

**DESARROLLO DE UNA METODOLOGÍA PARA LA OBTENCIÓN DE
DATOS DE CONCENTRACIÓN DE CLOROFILA *a* EN LA CUENCA
PACÍFICA COLOMBIANA A PARTIR DE IMÁGENES SATELITALES Y SU
VALIDACIÓN CON RESPECTO A DATOS IN SITU**



MARTHA LUCERO BASTIDAS SALAMANCA

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES EXACTAS Y DE LA EDUCACIÓN
INGENIERÍA FÍSICA
POPAYÁN
2006**

**DESARROLLO DE UNA METODOLOGÍA PARA LA OBTENCIÓN DE
DATOS DE CONCENTRACIÓN DE CLOROFILA *a* EN LA CUENCA
PACÍFICA COLOMBIANA A PARTIR DE IMÁGENES SATELITALES Y SU
VALIDACIÓN CON RESPECTO A DATOS IN SITU**

MARTHA LUCERO BASTIDAS SALAMANCA

Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de Ingeniera Física

DIRECTOR

Msc. JAURY LEÓN TÉLLEZ

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES EXACTAS Y DE LA EDUCACIÓN
INGENIERÍA FÍSICA
POPAYÁN
2006**

Nota de aceptación

Jurado

Jurado

Ciudad y fecha (día, mes, año) _____

A mi madre
y a la memoria de mi padre

AGRADECIMIENTOS

El autor expresa sus agradecimientos a:

A Dios por la vida, y a mi mamá y hermanos por enseñarme a descubrir lo hermoso de ella.

Al Programa de Ingeniería Física de la Universidad del Cauca por darme las herramientas necesarias para comprender lo hermosos de la naturaleza a través de los ojos de la física. Así mismo al Magíster Jaury León Téllez y al Grupo de Óptica y Láser por sus valiosas orientaciones y consejos durante toda mi carrera.

Al Centro Control Contaminación del Pacífico de la Armada Nacional de Colombia por permitirme desarrollar este trabajo en el área de Oceanografía Operacional bajo la orientación y apoyo del Capitán Javier Roberto Ortiz y del Doctor Efraín Rodríguez Rubio.

A la tripulación del buque oceanográfico ARC Providencia por la colaboración brindada durante el desarrollo del crucero ERFEN XL en julio de 2005.

A mis compañeros de Universidad y practicantes 2005 del CCCP por compartir conmigo los momentos mas agradables así como los más difíciles de mi carrera.

CONTENIDO

	Pág.
RESUMEN	
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1. DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO	4
1.1 GENERALIDADES DE LA CUENCA PACÍFICA COLOMBIANA	4
1.1.1 Características climáticas y oceanográficas de la CPC	6
1.1.2 Importancia de los pigmentos fitoplanctónicos para la caracterización de la CPC	14
1.2 ESTUDIOS OCEÁNICOS EN LA CUENCA PACÍFICA COLOMBIANA	16
1.2.1 Antecedentes de estudios oceánicos en Colombia	16
1.2.2 Cruceros oceanográficos realizados en la CPC por la Armada Nacional de Colombia	18
CAPÍTULO 2. SENSADO REMOTO DEL COLOR DEL OCÉANO	20
2.1 ÓPTICA DEL OCÉANO	20
2.1.1 Conceptos básicos	20

2.1.2	Propiedades ópticas de la columna de agua	23
2.1.3	Interacción de la luz con la columna de agua	28
2.1.4	Interacción de la luz con la atmósfera	34
2.2	OCEANOGRAFÍA SATELITAL	36
2.2.1	Sensores satelitales	38
2.2.2	Sensor satelital MODIS	40
2.2.3	Determinación de clorofila a partir de imágenes satelitales	46
	CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA	48
3.1	OBTENCIÓN DE DATOS IN SITU	48
3.1.1	Toma de muestras durante las expediciones oceanográficas	48
3.1.2	Procedimiento empleado en el CCCP para la determinación de clorofila <i>a</i>	50
3.2	OBTENCIÓN DE DATOS A PARTIR DE IMÁGENES SATELITALES	52
3.2.1	Obtención y acondicionamiento de las imágenes satelitales del sensor MODIS-AQUA	52
3.2.2	Desarrollo e implementación de rutinas para la obtención de datos de concentración de clorofila <i>a</i> a partir de imágenes satelitales del sensor MODIS-AQUA	55
3.3	COMPARACIÓN ENTRE DATOS SATELITALES Y DATOS IN SITU	57
3.3.1	Análisis estadístico	

3.3.2 Implementación de rutinas para el proceso de comparación

CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	62
4.1 METODOLOGÍA PARA LA OBTENCIÓN DE DATOS DE CONCENTRACIÓN DE CLOROFILA <i>a</i> EN LA CPC A PARTIR DE IMÁGENES SATELITALES DEL SENSOR MODIS-AQUA	62
4.1.1 Acondicionamiento de la imagen	62
4.1.2 Obtención de datos	65
4.2 RESULTADOS Y ANÁLISIS DE LA COMPARACIÓN	65
4.3 ANÁLISIS DE LOS FACTORES QUE INFLUYEN EN LA FIABILIDAD DE LOS DATOS OBTENIDOS A PARTIR DE IMÁGENES SATELITALES DEL COLOR DEL OCÉANO	72
4.3.1 Propiedades ópticas del agua en la CPC	73
4.3.2 Análisis de aguas Caso I y Caso II en la CPC	75
4.3.3 Comparación entre sensores	78
4.3.4 Condiciones climáticas que limitan la calidad de las imágenes e influencia del fondo	82
CONCLUSIONES	85
RECOMENDACIONES	88
BIBLIOGRAFÍA	89

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Productos MODIS del nivel 2.	45
Tabla 2. Bandas del MODIS y su uso primario.	46
Tabla 3. Datos obtenidos de concentración de clorofila <i>a</i> in situ y a partir del sensor MODIS en los años 2003, 2004 y 2005.	70
Tabla 4. Resultados estadísticos para la isla Gorgona.	72
Tabla 5. Comparación de resultados estadísticos para aguas Caso I y Caso II.	76
Tabla 6. Datos in situ y MODIS obtenidos en la grilla realizada de la isla Cascajal (Buenaventura)	80

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Cuenca Pacífica Colombiana y delimitación de su zona costera	5
Figura 2. Delimitación de zonas climáticas en el Pacífico colombiano	7
Figura 3. Valores medios mensuales de humedad relativa en la zona costera de la CPC	11
Figura 4. Buque oceanográfico “ARC Providencia” a bordo del cual se han realizado expediciones oceanográficas sobre la CPC	16
Figura 5. Sistema de coordenadas esféricas construido sobre un sistema cartesiano	22
Figura 6. Esquema empleado para definir las propiedades ópticas inherentes	25
Figura 7. Comunidad planctónica dominada por diatomeas y dinoflagelados	30
Figura 8. Espectro de absorción de algunos componentes del fitoplancton marino	32
Figura 9. Espectro de absorción aproximado para el <i>gelbstoff</i>	33
Figura 10. Esquema de la adquisición de datos mediante sensores satelitales	39
Figura 11. Grupo de química a bordo del crucero ERFEN XL	49
Figura 12. Diagrama de flujo para la determinación de clorofila <i>a</i> en el CCCP	51

Figura 13.	Esquema del sitio web del cual se descargan los archivos que contienen las imágenes	52
Figura 14.	Imágenes de la CPC	53
Figura 15.	Ejemplo de proyección <i>Tranversa Mercator</i>	54
Figura 16.	Apariencia del menú desplegado al ejecutar el programa “usuario” en <i>Matlab</i>	56
Figura 17.	Ejemplo de diagramas de dispersión	58
Figura 18.	Ejemplo de archivos de texto que han de ser generados por el usuario con datos in situ y satelitales para que el programa pueda hacer la comparación	61
Figura 19.	Imagen de la CPC obtenida en el <i>SeaDAS</i> después de hacer la corrección de la proyección, adecuar el tamaño de la imagen y aplicar una paleta de color.	64
Figura 20.	Clorofila <i>a</i> en un día de muestreo en la CPC	66
Figura 21.	Clorofila <i>a</i> en un día de muestreo en la CPC	66
Figura 22.	Clorofila <i>a</i> en un día de muestreo en la CPC	67
Figura 23.	Clorofila <i>a</i> en un día de muestreo en la CPC	67
Figura 24.	Clorofila <i>a</i> en Gorgona	68
Figura 25.	Diagrama de dispersión de los datos de clorofila <i>a</i> MODIS / in situ para un conjunto de 17 observaciones en la CPC	71
Figura 26.	Diagrama de dispersión obtenido para la isla Gorgona	72
Figura 27.	Diagramas de dispersión para aguas Caso I y Caso II	77
Figura 28.	Clorofila <i>a</i> en Buenaventura	81
Figura 29.	Lanzamiento de disco Secci durante el crucero ERFEN XL para determinar la claridad del agua	84

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO A Grilla ERFEN	92
ANEXO B Grillas Gorgona y Malpelo	94
ANEXO C Instrucciones para la obtención de datos de concentración de clorofila <i>a</i> a partir de imágenes satelitales del sensor MODIS-AQUA	96
ANEXO D Artículo presentado en el XXI Congreso Nacional de Física	103

RESUMEN

El uso de imágenes satelitales para estudiar los procesos físicos, biológicos y químicos del océano, ha llegado a ser una herramienta importante en la investigación y el monitoreo oceanográfico en diferentes regiones del planeta. Aunque esta herramienta es ampliamente utilizada en dichos estudios, requiere un proceso de validación para garantizar la fiabilidad de los datos provenientes de ella. Este trabajo muestra como resultado el desarrollo de una metodología para obtener datos de concentración de clorofila *a* en la Cuenca Pacífica Colombiana (CPC) a partir de imágenes satelitales del sensor MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) y la comparación de estos datos con respecto a datos *in situ*, obtenidos en expediciones oceanográficas en la CPC y sus áreas insulares en los últimos tres años en cruceros oceanográficos realizados por el Centro Control Contaminación del Pacífico (CCCP) de la Armada Nacional de Colombia.

Para la comparación se realizó un análisis estadístico, en el cual se calcularon el error cuadrático medio, el error absoluto medio, el sesgo y el coeficiente de correlación; con los cuales se logró establecer el grado de correspondencia entre los datos obtenidos del sensor satelital con respecto a los obtenidos *in situ*. A partir de este resultado se realizó un análisis general de los factores involucrados en el sensado remoto del color del océano en la CPC, factores que han de tenerse en cuenta a la hora de determinar los alcances tecnológicos de las imágenes satelitales con respecto a los datos *in situ*; entre los que se encuentran las propiedades ópticas de la columna de agua, la diferenciación entre aguas Caso I (oceánicas) y Caso II (costeras), diferencias entre los sensores empleados en cada técnica, así como las condiciones meteorológicas de la cuenca, todo ello con el fin de que se pueda tener una visión clara de los alcances de esta herramienta para el monitoreo de parámetros biológicos en la CPC.

De otro lado, este trabajo servirá como herramienta en el área de Oceanografía Operacional del CCCP, para que a partir de la metodología presentada en el mismo, los investigadores oceanógrafos puedan seguir obteniendo datos de concentración de clorofila *a* en la CPC a partir de imágenes satelitales, compararlos con respecto a datos *in situ* cuando se hayan realizado muestreos en expediciones oceanográficas y tener un panorama general de la distribución y concentración de este pigmento en nuestra cuenca.

Finalmente, este trabajo constituye el inicio en cuanto a estudios del color del océano en la Cuenca Pacífica Colombiana, ya que hasta el momento no existe registro de estudios similares en cuanto a determinación de pigmentos fitoplanctónicos en aguas del Pacífico colombiano a partir de imágenes satelitales; así como tampoco de un proceso de comparación con respecto a datos *in situ*.

INTRODUCCIÓN

Las observaciones de la Tierra a partir de los satélites lanzados en las últimas tres décadas han realizado grandes contribuciones al entendimiento del planeta. La oceanografía por satélite es una técnica que ofrece la posibilidad de observar el océano y sus variables, y determinar o entender fenómenos oceanográficos muy interesantes y con mucho impacto a nivel global; este es el caso de la productividad orgánica a partir de imágenes de espectrorradiómetros remotos, y el impacto de fenómenos naturales que pueden ser catastróficos como es el evento ENOS (El Niño – Oscilación del Sur).

El color del océano fue medido durante 8 años por el CZCS (*Coastal Zone Color Scanner*), el primer sensor de este tipo, lanzado a bordo del satélite Nimbus 7 y que colectó datos desde noviembre de 1978 hasta junio de 1986. Desde ese entonces, han sido varios los lanzamientos de sensores satelitales, los cuales suministran datos globales del color del océano que han estado disponibles para la comunidad científica en general.

Actualmente, se encuentra en operación el sensor MODIS (*Moderating Resolution Imaging Spectroradiometer*), un instrumento clave a bordo del satélite AQUA, el cual fue lanzado en mayo del 2002. El enfoque del proyecto AQUA es el estudio multidisciplinario de los procesos terrestres relacionados con la atmósfera, el océano y la superficie terrestre. El espectrorradiómetro MODIS posee un radiómetro de alta sensibilidad (12 bits) y tiene 36 bandas espectrales en longitudes de onda que abarcan desde las 0.4 hasta las 14.4 micras.

Los sensores satelitales del color del océano captan la radiación reflejada por la superficie de este. En la parte visible del espectro, las características espectrales de la

clorofila pueden ser claramente identificadas; de aquí que su firma espectral obtenida de estos sensores, puede ser usada para inferir abundancia de fitoplancton, como lo muestran los resultados obtenidos con el sensor SCIAMACHY [1]. Igualmente, estudios similares con las imágenes de color del océano obtenidas del SeaWiFS, muestran ciclos estacionales de clorofila con grandes florecimientos en aguas tropicales del Pacífico sur; así como la estimación de fijación de dinitrógeno [2] .

De otro lado, el área de Oceanografía Operacional del CCCP tiene por objeto caracterizar la CPC desde la oceanografía física y química. Para realizar la caracterización de la cuenca es necesario contar con la mayor cantidad de información de los parámetros de interacción océano-atmósfera; siendo indispensable mantener los programas sobre su vigilancia y monitoreo, realizando dos cruceros oceanográficos anuales sobre la CPC. Dentro de los parámetros biológicos a estudiar, se encuentra la concentración de clorofila *a*, un pigmento presente en el fitoplancton marino que es el responsable de la actividad fotosintética. Como resultado, se obtienen datos puntuales de su concentración, pero se desconoce la dinámica espacio-temporal de su distribución y concentración, lo cual es debido a que las expediciones se realizan dos veces por año.

Los datos geofísicos, producto de las medidas del color del océano hechas desde el espacio, tienen ventajas sobre los datos adquiridos *in situ*, ya que los sensores del satélite tienen mayor cobertura espacial, pueden obtener información de lugares de difícil acceso y la periodicidad de toma de los mismos es mayor. Sin embargo, los complejos procesos de interacción atmósfera-superficie del océano, hacen que los datos geofísicos adquiridos desde plataformas espaciales tengan cierto nivel de incertidumbre; por lo cual, los datos provenientes de sensores satelitales, necesitan ser validados con respecto a los obtenidos experimentalmente.

Para la realización de este trabajo se tenían como objetivos: obtener datos de concentración de clorofila *a* en la CPC a partir de imágenes satelitales del sensor MODIS-AQUA y determinar el grado de correspondencia entre los datos obtenidos

del sensor satelital con respecto a los obtenidos *in situ*. Es por ello, que este trabajo muestra los resultados de la comparación entre datos de concentración de clorofila *a* obtenidos del sensor satelital MODIS, con respecto a datos *in situ* obtenidos de expediciones oceanográficas por la CPC y sus áreas insulares, para lo cual se desarrolló una metodología. Igualmente muestra el análisis de los factores involucrados en el sensado remoto del color del océano que tiene en cuenta las variables que influyen en los resultados obtenidos.

Para la obtención de datos *in situ*, se realizó una grilla de muestreo durante el mes de julio del 2005 a lo largo de la CPC a bordo del buque oceanográfico ARC Providencia de la Armada Nacional de Colombia. Adicionalmente, el laboratorio de química del CCCP suministró los datos de concentración de clorofila *a* obtenidos de los cruceros realizados en los años 2003 y 2004.

El trabajo está dividido en capítulos. En el Capítulo 1 se hace una descripción general del área de estudio, de los trabajos desarrollados hasta la actualidad en cuanto a la utilización de las herramientas satelitales del color del océano, así como de la importancia de conocer la concentración y distribución de los pigmentos fitoplanctónicos para la caracterización de la CPC. El Capítulo 2 es una revisión de los aspectos de teoría óptica relacionados con el color del océano, describe los conceptos básicos que deben tenerse en cuenta para el sensado remoto del color en aguas oceánicas y costeras, y menciona los alcances de la oceanografía satelital.

En el Capítulo 3 se hace una descripción de los métodos utilizados para la determinación de concentración de clorofila *a* en las expediciones oceanográficas y a partir de imágenes del sensor satelital MODIS, así como del proceso de comparación efectuado sobre los conjuntos de datos *in situ* y satelital. Los resultados obtenidos son presentados en el Capítulo 4, el cual recopila los productos del trabajo. Finalmente, son presentadas las conclusiones y recomendaciones a partir de los resultados obtenidos y análisis realizados.

CAPÍTULO 1. DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

1.1 GENERALIDADES DE LA CUENCA PACÍFICA COLOMBIANA

Situada en el extremo occidental del país, la Cuenca Pacífica Colombiana (CPC) se ubica geográficamente entre los paralelos 1°30' hasta los 7°10' de latitud norte y entre los 77°40' y 82°00' de longitud oeste; figura 1.

De acuerdo con esta localización sus límites geográficos son: al norte, las aguas del Golfo de Panamá; al este, el litoral occidental de Colombia integrado por los departamentos de Chocó, Valle, Cauca y Nariño; al sur, las aguas de la costa ecuatoriana y la cordillera submarina de Carnegie; y al oeste, las aguas territoriales de la República de Panamá y la cordillera submarina de Cocos.

Las características geomorfológicas más importantes de la CPC son:

Isla Gorgona, ubicada sobre los 2°55' y 3°00' de latitud norte y 78°09' y 78°14' de longitud oeste, es una isla de origen volcánico, distante 30 Km de la costa más cercana; localizada a mitad de camino entre un océano de profundidades abisales de aguas transparentes y la contrastante zona costera, construida por planos aluviales que reciben cantidades considerables de agua dulce y sedimentos aportados por ríos caudalosos e innumerables quebradas.

Isla Malpelo, también de formación volcánica, se encuentra a 3°51' de latitud norte y 81°51' de longitud oeste. Ubicada a 300 Km al oeste de Buenaventura, es la única prolongación emergida del relieve oceánico submarino (la dorsal de Malpelo), que se eleva bruscamente desde fondos abisales.

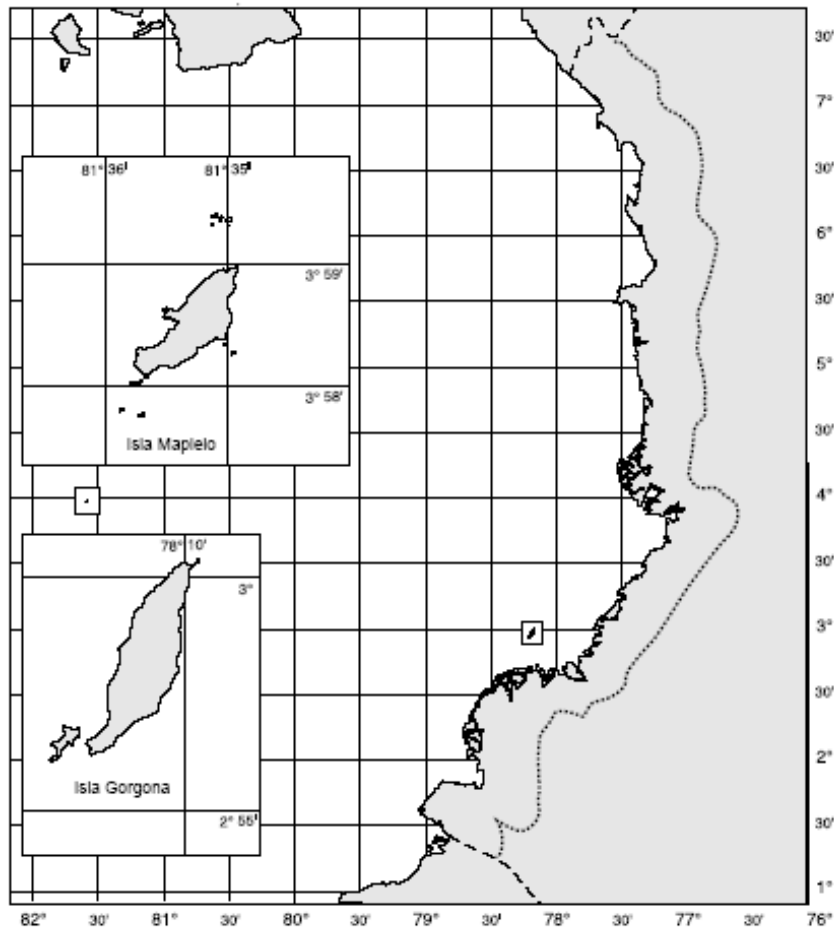


Figura 1. Cuenca Pacífica Colombiana y delimitación de su zona costera.

Fuente: Compilación Oceanográfica de la Cuenca Pacífica Colombiana. CCCP 2004.

La región costera de la CPC tiene aproximadamente 80000 km² de superficie, siendo sus límites geográficos: la hoya del río Juradó, al norte (7°28' N); el río Guaitará, afluente del río Patía, al sur (0°14' N); el nacimiento del río San Juan, al este (75°51' W), y la desembocadura del río Mira en Cabo Manglares, al oeste (79°02' W). Esta delimitación de la zona costera se encuentra incluida dentro de la franja conocida como la ensenada de Panamá (*Panamá Bight*), la cual se extiende por las costas de Panamá, Colombia y Ecuador hasta la longitud 81°W [3].

La oceanografía y climatología de esta región se conocen hace relativamente poco tiempo, gracias a algunas expediciones internacionales que produjeron los informes de *Forsbergh* [4] y *Wyrky* [5]; y más recientemente por los informes de los cruceros oceanográficos de la Armada Nacional de Colombia (ARC San Andrés, ARC Providencia y ARC Malpelo), los cuales han presentado datos oceanográficos y meteorológicos de zonas alejadas a la costa y de regiones costeras, publicados por el CCCP.

1.1.1 Características climáticas y oceanográficas de la CPC

De acuerdo con la información obtenida de 135 estaciones distribuidas en el Pacífico colombiano, con series de 30 años en promedio, recolectadas por el Instituto de Hidrología, Meteorología y de Estudios Ambientales (IDEAM); podría decirse que el régimen climático de la CPC se encuentra bajo la influencia de los desplazamientos sur-norte-sur sobre la franja ecuatorial de la denominada Zona de Convergencia Intertropical, ZCIT; la cual regula, en asocio con los sistemas pluviogénicos regionales, la climatología de la región.

Durante determinadas épocas del año otros fenómenos de mayor escala ejercen influencia sobre las condiciones medias, como la presencia de la depresión tropical en la bahía de Panamá y la incursión de aire polar (frente frío) sobre el Caribe colombiano, que afecta principalmente la dirección y velocidad de los vientos en la zona norte del Pacífico, aunque normalmente esta influencia no supera las 48 horas de duración [6].

Sobre la región costera del Pacífico colombiano no se distinguen las épocas secas de las húmedas. El clima en general se caracteriza como tropical lluvioso isotermal, lo que sugiere la presencia de precipitaciones durante todo el año y diferencias menores a 5°C entre el mes más cálido y el mes mas frío [7].

A continuación se presenta la delimitación de cada una de las zonas climáticas en las que se podría dividir la costa Pacífica colombiana, de acuerdo con sus características meteorológicas (figura 2):

Zona norte: comprendida desde punta Ardita hasta Pizarro (aproximadamente entre las latitudes 7° 08' y 4° 57' norte).

Zona centro: comprendida desde Pizarro hasta punta El Coco – Gorgona (aproximadamente entre latitudes 4°57' y 3° 00' norte).

Zona sur: área comprendida desde punta El Coco - Gorgona hasta Cabo Manglares (aproximadamente entre latitudes 3° 00' y 1°36' norte).

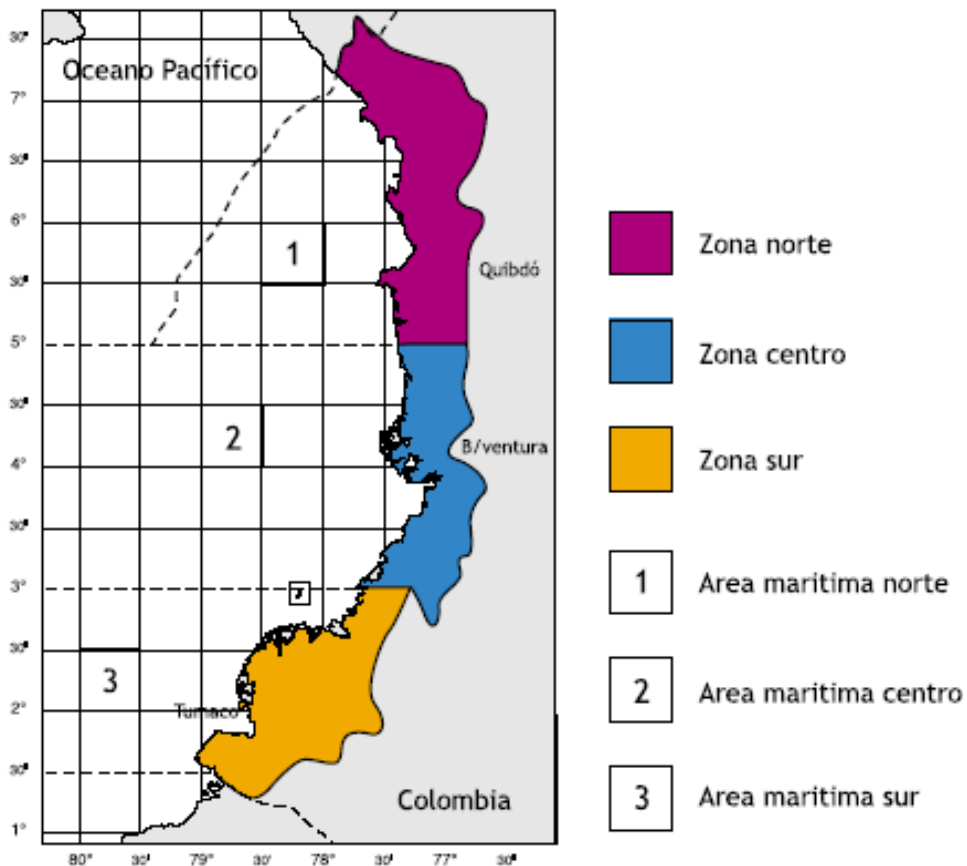


Figura 2. Delimitación de zonas climáticas en el Pacífico colombiano.

Fuente: Compilación Oceanográfica de la Cuenca Pacífica Colombiana. CCCP 2004.

Clima en la zona norte

Esta zona presenta los índices más altos de precipitación durante el año. El valor anual alcanza los 6452 mm. Esto se debe a que abarca en su totalidad el departamento del Chocó y a su proximidad con la región selvática del Darién en Centroamérica, áreas de reconocido aporte a la liberación de calor latente y su consecuente abastecimiento hídrico. Dentro de esta zona se encuentra uno de los puntos más lluviosos del globo, teniendo un valor anual de 12717 mm en Lloró (Chocó). La precipitación en esta zona es intensa durante todo el año, presenta sus valores más altos entre los meses de mayo y agosto; lo cual coincide con la presencia de la ZCIT en esta región del Pacífico. Los mínimos valores se registran durante el primer trimestre de año; época en la cual la ZCIT se encuentra al sur. Durante los otros meses se presentan valores intermedios entre los menores y los mayores.

Clima en la Zona Centro

El clima de esta zona es predominantemente cálido, muy húmedo, con altas temperaturas y precipitaciones durante la mayor parte del año. En zonas de ascenso cerca de la cordillera Occidental, el enfriamiento de las masas de aire provoca la condensación y, por consiguiente, la formación de nubosidad y de precipitaciones.

La baja salinidad del mar presentada cerca de la costa, originada por el alto volumen de agua dulce que descargan los ríos en el litoral, la evaporación de los manglares y selvas de la costa, y el estancamiento de las masas de nubes arrastradas por los vientos marítimos por la presencia de la cordillera Occidental, causa principalmente el sostenimiento permanente de una alta humedad atmosférica a lo largo del año. Similarmente, en esta zona se presenta una alta nubosidad. Según los registros, el valor medio anual de nubosidad oscila entre 6/8 y 7/8 durante todo el año, lo cual permite concluir que la zona permanece cubierta o semicubierta de nubes.

Clima en la Zona Sur

La zona sur del Pacífico colombiano presenta durante el año un sistema de comportamiento definido en sus dos semestres; donde es más regular el primero en relación al comportamiento de los parámetros meteorológicos, presentando variaciones durante el segundo semestre. El aspecto de lluvias es de tipo monomodal, considerándose el invierno durante el primer semestre y acentuándose en el segundo trimestre, siendo la época de verano el segundo semestre con un promedio histórico anual de 2300 mm. El comportamiento de la temperatura ambiente presenta durante la época húmeda, temperaturas superiores o iguales a 25.8°C, siendo abril el mes que tiende a presentar un mayor valor en el rango de la temperatura. Posteriormente, entre julio y diciembre (época seca) la temperatura disminuye y se estabiliza por debajo de los 25.7°C, ajustándose el comportamiento de la temperatura a manifestaciones monomodales, con un período caliente de febrero a junio y otro relativamente frío de julio a enero.

La humedad relativa es más regular en el primer semestre, arrojando valores promedio de 86% los cuales son muy constantes, para posteriormente mostrar oscilaciones durante el segundo semestre con valores promedio entre 85% y 87%. En término general este parámetro presenta índices altos en la región porque en esta zona se caracteriza la permanencia de aires fríos.

En síntesis, la CPC presenta características especiales dentro del océano Pacífico por estar ubicada dentro de la región de bajas presiones atmosféricas conocida como *Concavidad Ecuatorial*, en la cual convergen los vientos Alisios de cada hemisferio para formar la ZCIT. El choque de masas de aire ascendente con diferencias térmicas y gradientes de humedad genera la formación de una banda nubosa por procesos de convección, lo que ocasiona que el clima se caracterice por sus vientos variables y débiles (zona de calmas ecuatoriales) y por su alta pluviosidad [8].

Otras características que hacen parte de las generalidades de la CPC son los parámetros oceanográficos: vientos, humedad, temperatura, salinidad y características biológicas.

Vientos

Los vientos en esta región del planeta se originan a partir de los gradientes de presión y los gradientes térmicos producidos tanto por la corriente fría de Humboldt como por el calentamiento solar diurno.

En la parte oriental del océano Pacífico se encuentra la frontera entre las aguas frías, provenientes del sur, y las cálidas aguas ecuatoriales. Esta frontera se marca severamente y tiene carácter de frente oceánico. Su formación ocurre como resultado de la influencia de los vientos del Sur [9].

En la costa Pacífica colombiana los vientos Alisios del sureste se recurvan y se convierten en vientos Ecuatoriales del oeste (Alisios del Oeste). Estos vientos, de componente oeste, se presentan al sur de la ZCIT cerca de 1°N. Los vientos más intensos del oeste coinciden con la posición más septentrional de la ZCIT.

De igual forma, los vientos Alisios del noreste se recurvan al norte de la ZCIT, adquiriendo un nuevo componente noroeste, y en consecuencia se forman las líneas de convergencia cerca de la costa. Dichas líneas permanecen costa afuera hasta cerca del amanecer y en la medida que la brisa terrestre se debilita, se mueven costa adentro siguiendo el flujo de gradiente.

Humedad

Es evidente que el excesivo aire cálido y húmedo tropical, reinante en toda el área, favorece la rápida formación de abundante nubosidad, de la cual se desprenden los

altos valores de precipitación registrados. Se establece una media anual de humedad relativa para esta área de 89%.

La figura 3 muestra los valores medios mensuales de humedad relativa en toda el área, donde se destaca el valor mínimo de este parámetro en marzo (excepto para la zona sur), conocido por ser el mes que marca el final de la llamada “época seca” o de menores valores de precipitación; y unos picos máximos en los meses de junio, octubre y diciembre, producto de constantes lluvias características de todos estos meses. Para la zona sur ocurre todo lo contrario, los meses más húmedos son marzo y abril, en tanto que los meses con menores valores de humedad son agosto y septiembre.

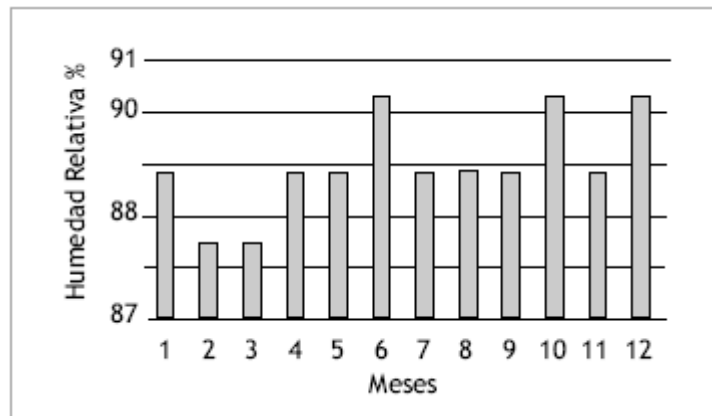


Figura 3. Valores medios mensuales de humedad relativa en la zona costera de la CPC.
Fuente: Compilación Oceanográfica de la Cuenca Pacífica Colombiana. CCCP 2004.

Temperatura y Salinidad

En general, para la CPC las variaciones de salinidad y temperatura son muy marcadas entre la zona costera y la región oceánica, y un poco menos entre las zonas norte y sur; identificándose salinidades altas en la región oceánica y bajas en la región costera, además de valores de temperatura mayores en la zona norte con respecto a los de la zona sur. Esto puede ser consecuencia de la influencia de aguas cálidas de la

contracorriente Ecuatorial, CCE, de las corrientes de Panamá y costera de Costa Rica, y por las corrientes frías de Perú-Colombia.

Durante la condición de El Niño, el régimen de corrientes muestra una posible intensificación de la CCE y de las corrientes de Panamá y Costa Rica. Esto puede afectar las condiciones térmicas en la CPC, produciendo para este período un aumento en la temperatura por intrusión de aguas provenientes del Pacífico Ecuatorial. Durante la condición de La Niña, las aguas empiezan a enfriarse, posiblemente debido a que la CCE se debilita y las corrientes predominantes comienzan de nuevo a ejercer su acción típica para el mes de mayo.

La influencia que ejercen estas corrientes sobre la CPC determina el patrón de distribución de parámetros físicos, químicos y biológicos en el área, tanto a nivel espacial como temporal. Es así como durante la condición normal se observa claramente, la presencia de corrientes que transportan aguas cálidas al norte y frías al sur, las cuales están relacionadas con organismos propios de estos tipos de aguas.

Características biológicas: clorofila *a*

Los pigmentos fotosintéticos son la base de la vida sobre el planeta Tierra. Son las sustancias capaces de captar energía lumínica y de transformarla en energía química mediante la fotosíntesis.

Hay dos tipos de pigmentos primarios, según se trate de organismos fotosintéticos procariotas (organismos sin núcleo diferenciado) o eucariotas (organismos con núcleo diferenciado envuelto por una membrana): bacterioclorofila *a* y clorofila *a* respectivamente, y además están acompañados de otros pigmentos accesorios, cuya función es, por una parte, ampliar el espectro de absorción de los pigmentos primarios y, por otra, servirles como sistemas de protección frente a la luz excesiva; el pigmento dominante es la clorofila *a*.

A partir de los datos obtenidos en las expediciones oceanográficas realizados en los últimos años sobre la CPC, a nivel superficial se registran valores promedio entre 0 y 4.6 mg/m³. Las mayores concentraciones se registran al sureste de la región costera, entre la bahía de Tumaco y la isla Gorgona, donde a la vez se detectan los mayores valores de abundancia de diatomeas [6]. Este mismo patrón de distribución espacial se mantiene desde la superficie hasta los 150 m de profundidad, donde la concentración mínima es de 0.32 mg/m³.

De igual forma se ha encontrado otro núcleo, aunque de concentraciones menores, hacia el centro de la cuenca entre los 82°W y los 4°N, con valores que oscilan entre 2.75 mg/m³ a nivel superficial y hasta 0.3 mg/m³ en el fondo. El resto del área presenta valores bajos con un promedio de 2.1 mg/m³, en superficie, hasta alcanzar concentraciones de 0 mg/m³ entre los 100 y 150 m.

La distribución espacial de los organismos fitoplanctónicos en el área, además de verse influenciada por las corrientes, la salinidad y la temperatura, está directamente ligada con la disposición de nutrientes. *Carlsson* (1993) [10], comenta que al actuar las sustancias nutritivas como limitantes, se condiciona la distribución de los organismos hacia las zonas en donde haya una alta concentración de las mismas, lo cual reduce su disponibilidad a las áreas de afloramiento o aquellas cercanas a descargas fluviales o terrestres. Es así como los máximos valores de abundancia sobre la cuenca, independientemente de la época climática, se detectan hacia la región costera, en especial frente a la bahía de Tumaco e isla Gorgona y en la región oceánica que circunda la isla Malpelo; presentándose una alta diversidad de especies y caracterizándose por la dominancia de diatomeas, lo que además se correlaciona con los más altos registros de clorofila *a*. De acuerdo con *Parsons* (1984) [11], se conoce un proceso denominado “efecto de masa en islas” donde se presenta una alta producción biológica cerca de islas o zonas ricas en nutrientes por turbulencias locales o surgencias.

1.1.2. Importancia de los pigmentos fitoplanctónicos para la caracterización de la Cuenca Pacífica Colombiana

El fitoplancton marino es el responsable de la síntesis de la materia orgánica en los océanos y contribuye a la renovación anual del oxígeno atmosférico. Representa la base de la cadena alimenticia en los ecosistemas marinos, constituyéndose en el productor primario del océano, ya que realiza el proceso de fotosíntesis por medio de los pigmentos fotosintéticos, entre ellos la clorofila *a*, sustancia capaz de captar energía lumínica y de transformarla en energía química.

Por ser un conjunto de organismos tan diminutos, pasa inadvertida su presencia, así como su papel fundamental en la economía del mar. Para una cuenca como la CPC, que contiene ecosistemas muy ricos, diversos y productivos, dotados para proveer bienes y servicios que sostienen actividades como la pesca, el turismo, la navegación, el desarrollo portuario y la explotación minera, constituye un recurso natural único, frágil y limitado del país [12].

La importancia de estudiar la distribución y concentración de clorofila *a* en la CPC, radica en que a fin de determinar la presencia o ausencia de un evento ENOS, es necesario tener la máxima información posible de los parámetros meteorológicos, oceanográficos, biológicos y fisicoquímicos. Teniendo en cuenta que la región sur del Pacífico colombiano es una de las primeras en recibir influencia de fenómenos globales, es necesario mantener los programas de monitoreo sobre la CPC; así se logrará obtener información de las condiciones promedio de la región y detectar a tiempo algún tipo de anomalía. Para ello se hace necesario el estudio oceanográfico y el consiguiente entendimiento de los procesos de la dinámica marina, la incidencia de los procesos oceánicos, el conocimiento de la estructura de la columna de agua y la comprensión de la dinámica biológica como herramienta de carácter predictivo de diversos sucesos que se presentan a escala global.

Es de anotar que el estudio de las características oceanográficas y meteorológicas de las aguas jurisdiccionales del país sobre el océano Pacífico está enfocado a conocer su comportamiento en las denominadas *condiciones normales*, además de aquellas variaciones o anomalías que se presentan cuando en nuestras aguas se manifiesta el conocido fenómeno de El Niño o el de La Niña, más conocidos como eventos ENOS.

Dichos eventos indican la presencia de anomalías positivas o negativas de la temperatura del agua de mar y la variación de otros parámetros físicos, químicos y biológicos, que a su vez, indican variaciones de los procesos de interacción océano-atmósfera y variaciones en el comportamiento de la atmósfera sobre las aguas del océano y sobre el continente. Estas manifestaciones generan, en consecuencia, modificaciones en los regímenes de lluvia del país y aumento del nivel medio del mar, entre otras; ocasionando importantes impactos sobre las actividades económicas del país, basta mencionar a manera de ejemplo: la producción agrícola, la estabilidad del nivel de los embalses para la producción de energía eléctrica y la pesca. Dichos impactos no son necesariamente negativos, ya que en presencia de La Niña llegan a nuestras aguas especies de peces que bajo condiciones normales se encuentran en aguas ecuatorianas o peruanas.

Estudios realizados por el CCCP a bordo de los buques oceanográficos de la Armada Nacional de Colombia (figura 4), con respecto a los eventos ENOS [6], han encontrado que en general, durante el desarrollo del fenómeno de El Niño la temperatura aumenta sensiblemente en la CPC, especialmente en las capas superiores a los 100 m, siendo mayor en la costa y al norte de la cuenca. La salinidad disminuye en toda la región Pacífica colombiana, especialmente en la superficie. Normalmente las aguas que caracterizan el fenómeno de El Niño son pobres en nutrientes, lo cual se refleja en la baja cantidad de organismos presentes en el área. Durante este período también se registran los valores más bajos de clorofila *a*. De otro lado, durante el evento de La Niña se presentan los más altos registros de clorofila *a* en el área, con concentraciones entre 4.6 y 4.85 mg/m³ en superficie, las cuales disminuyen gradualmente hasta obtener valores de 0.1 a 0.4 mg/m³ en el fondo.



Figura 4. Buque oceanográfico “ARC Providencia” a bordo del cual se han realizado expediciones a lo largo de la CPC.

1.2. ESTUDIOS OCEÁNICOS EN LA CUENCA PACÍFICA COLOMBIANA

1.2.1. Antecedentes de estudios oceánicos en Colombia

Los primeros esfuerzos colombianos por entender el comportamiento de las diferentes variables oceanográficas de la Cuenca Pacífica Colombiana, se remontan al año 1965, cuando a bordo del ARC Bocas de Ceniza se desarrollaron cuatro cruceros oceanográficos denominados ACENTO (del inglés: *The Augmented Colombian el NIÑO Tuna Oceanography*); programados y llevados a cabo por la Comisión Interamericana del Atún Tropical, CIAT, en el área del Panamá Bight, con los cuales se pretendía estudiar la variabilidad estacional y cíclica en la circulación y distribución de las propiedades físicas, químicas y biológicas en nuestras aguas. Posteriormente y a partir de 1967 se desarrollaron los cruceros EASTROPAC, patrocinados también por la CIAT, como un esfuerzo cooperativo hacia el entendimiento de la oceanografía en el Pacífico este tropical.

A partir de 1970 la Armada Nacional de Colombia empezó a llevar a cabo sus propios cruceros oceanográficos sobre aguas jurisdiccionales, tanto en el Caribe como en el Pacífico. Estos cruceros fueron ejecutados, inicialmente, con personal científico del Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas, CIOH, hasta 1994, cuando esa responsabilidad fue transferida al Centro Control Contaminación del Pacífico, CCCP.

El CCCP adelantó su primer crucero oceanográfico en 1996 y a la fecha ha realizado diecisiete, completándose así 40 cruceros sobre la CPC (23 de ellos ejecutados por el CIOH), en un lapso de 34 años. Durante estos cruceros se colecta la mayor cantidad de información posible en cada una de las estaciones oceanográficas; tomando datos de parámetros físicos, químicos y biológicos del océano, los cuales se complementan con observaciones de las condiciones meteorológicas reinantes.

Generalmente la obtención de información sobre procesos biológicos marinos, características atmosféricas y oceánicas en las áreas marítimas colombianas, se ha desarrollado a través de cruceros oceanográficos y con medidas *in situ*. A partir de 1997 el IDEAM inicia el uso en Colombia de sensores remotos para el seguimiento de los procesos marinos, especialmente de medida de temperatura superficial del mar con la ayuda del sensor satelital AVHRR (*Advanced Very High Resolution Radiometer*) de la NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*).

En el 2004, el CCCP bajo la orientación de la Dirección General Marítima (DIMAR) da a conocer una completa y actualizada publicación sobre oceanografía del océano Pacífico, denominada: *Compilación Oceanográfica de la Cuenca Pacífica Colombiana*. Ambiciosa en sus labores, pero estricta en sus investigaciones, ésta presenta análisis y resultados arrojados por los estudios desarrollados en el área de Oceanografía Operacional del CCCP. En ella convergen estudios, investigaciones y análisis de las condiciones físicas del océano Pacífico; los fenómenos oceanográficos propios del trópico, y el análisis de 30 años de cruceros oceanográficos que han sido

recopilados y estudiados por un consolidado grupo de investigadores en la sede del CCCP, ubicada en San Andrés de Tumaco (Nariño) desde su fundación.

1.2.2 Cruceros oceanográficos realizados en la Cuenca Pacífica Colombiana por la Armada Nacional de Colombia

La Armada Nacional es el organismo a nivel nacional encargado de contribuir a la defensa y seguridad de la Nación a través del empleo efectivo de un poder naval flexible en los espacios marítimo, fluvial y terrestre.

La Dirección General Marítima (DIMAR), dependencia de la Armada Nacional, es la autoridad marítima nacional que ejecuta las políticas del gobierno en materia marítima y tiene por objeto la dirección, coordinación y control de las actividades marítimas en los términos que señala el Decreto Ley 2324 de 1984 y los reglamentos que se expiden para su cumplimiento, promoción y estímulo del desarrollo marítimo del país.

El CCCP es un centro de investigaciones en el área de Oceanografía, perteneciente a la DIMAR, creado en 1984 mediante el Decreto Ley 2324. Inicialmente su accionar se concentró en temas relativos a la contaminación marina, ya que fue un siniestro marítimo el que le dio origen (hundimiento del petrolero *Saint Peter*, en aguas ecuatorianas, muy cerca de la frontera con Colombia), ya que se puso en evidencia la necesidad de crear un instituto que manejara el tema. Así, desde su fundación el centro adelanta actividades de investigación científica en las áreas de Contaminación Marina y Calidad Ambiental; Manejo Integral de Zonas Costeras y Oceanografía física, química y biológica. Entre sus funciones se encuentran, apoyar las actividades de investigación científica que realicen los buques oceanográficos en la Cuenca Pacífica Colombiana y respaldar los programas generales de preservación y conservación del medio marino, entre otras.

Hace un poco más de tres décadas que la Armada Nacional en cabeza de la Dirección General Marítima viene desarrollando cruceros oceanográficos, con los que poco a poco y por su invaluable importancia se ha llegado a entender el comportamiento de las variables oceanográficas de la Cuenca Pacífica Colombiana. El proceso de cruceros involucra toda una estructura organizacional que tiene como fin llevar a cabo lo planeado para la expedición. Este proceso cubre tareas como solicitudes de requerimiento y alistamiento del material necesario, elaboración de un plan de crucero, reentrenamiento del personal a embarcarse, originar invitaciones a participar en el crucero a otras entidades, pruebas de equipos, etc. Antes de iniciar el crucero se le entrega al Comandante del Buque un mapa donde están ubicadas todas las estaciones que se van a realizar con su posición en grados de latitud y longitud.

En las estaciones oceanográficas se toman datos de temperatura, salinidad y densidad con un CTD (*Conductivity, Temperature, Depth*). Así mismo, en cada una de las estaciones se toma la temperatura superficial del mar, información meteorológica como temperatura del aire, humedad relativa, presión atmosférica, dirección y velocidad del viento, cantidad y tipo de nubes, estado del mar, estado del tiempo y visibilidad. Adicionalmente, en las estaciones preestablecidas como biológicas se toman muestras de agua a diferentes profundidades para análisis de clorofila, fitoplancton, oxígeno disuelto y nutrientes, así mismo se realiza arrastre superficial y oblicuo para zooplancton [13].

Este capítulo mostró los aspectos generales de las condiciones promedio tanto climáticas como biológicas de la CPC. Se observó que el clima se caracteriza como tropical lluvioso isotermal, con alta pluviosidad durante la mayor parte del año, alta humedad relativa y presencia de nubes. Estas características promedio son factores que serán tomados en cuenta posteriormente para establecer los alcances y limitaciones de los datos obtenidos a partir de plataformas espaciales. Similarmente se estableció la importancia de caracterizar la cuenca desde la oceanografía física, química y biológica, puesto que el estudio de los pigmentos fitoplanctónicos tiene un importante significado ecológico, económico y social.

CAPITULO 2. SENSADO REMOTO DEL COLOR DEL OCÉANO

El sensado remoto es la ciencia de obtener información de un objeto analizando los datos adquiridos mediante algún dispositivo que no está en contacto físico con dicho objeto. La segunda guerra mundial dio un gran impulso a la fotografía aérea, así como a otras formas de percepción remota. Sin embargo, el gran avance se produjo en la década del 70 cuando las plataformas satelitales reemplazaron a las aéreas y los sensores multiespectrales acoplados a computadoras, reemplazaron las cámaras fotográficas.

Los objetos terrestres, iluminados por la radiación solar, la reflejan, luego de introducir en ella modificaciones debido a su misma estructura y composición. La radiación reflejada es capturada por los sensores del satélite, siendo parcialmente procesada a bordo de éste y retransmitida a estaciones receptoras terrestres para su posterior procesamiento y análisis. El sensado remoto es la tecnología que en la actualidad constituye la principal herramienta de operación para la observación, medida e interpretación de la superficie de la tierra, la atmósfera, los planetas y el resto del universo.

2.1 ÓPTICA DEL OCÉANO

2.1.1 Conceptos básicos

La propagación de la luz en el mar es de gran interés en muchas áreas de la oceanografía: la luz suministra la energía que potencia la productividad primaria en el océano; la luz reflejada por el océano suministra la señal para el sensado remoto de la concentración de constituyentes superficiales (particularmente pigmentos de

fitoplancton); la luz absorbida por el agua calienta la capa superficial del océano; la luz absorbida por sustancias químicas (particularmente orgánicos disueltos) suministra energía para su disociación; y la atenuación de la luz con la profundidad suministra una estimación de la actividad fotosintética.

La propagación de la luz en el sistema océano-atmósfera está gobernada por una ecuación integrodiferencial de transferencia radiativa, la cual contiene parámetros de absorción y esparcimiento que son característicos de la columna de agua bajo estudio.

Para que exista percepción por parte de un sensor, éste debe detectar un flujo energético proveniente de un objeto. Este flujo debe tener una intensidad determinada, provenir de una unidad de superficie y tener una dirección concreta. La cantidad fundamental en percepción remota es la Potencia de radiancia espectral. Cuando un detector ve la luz a través de un filtro de transmisión con un ancho espectral $\Delta\lambda$ centrado en λ , registrando N fotones por segundo, la potencia de radiancia espectral es:

$$P(\lambda) = \frac{hc}{\lambda} \frac{N}{\Delta\lambda} \quad (1)$$

Siendo h la constante de Planck (6.63×10^{-34} Js), c la velocidad de la luz y λ la longitud de onda de la luz. La unidad SI para $P(\lambda)$ es [W/nm].

Cuando se habla de campo de luz, se refiere a la cantidad conocida como radiancia. Consideremos un detector $P(\lambda)$, de área A_d y equipado con un filtro espectral que deja pasar un rango de longitudes de onda $\Delta\lambda$ centrado en λ . Si se coloca el detector al final de un tubo cilíndrico hueco tal que restrinja el campo de vista del detector a un ángulo sólido: $\Delta\Omega = A/l^2$ donde A es el área de sección transversal del tubo y l es la distancia del tubo; tal arreglo constituye un radiómetro. Si el detector graba una potencia $P(\lambda, \hat{\xi})$ cuando el extremo abierto del tubo está dirigido para recibir fotones viajando hacia $\hat{\xi}$, es decir, el extremo abierto del tubo apunta en la

dirección del vector unitario $\hat{\xi}$, el radiómetro graba en esta posición, una radiancia $L(\lambda, \hat{\xi})$ definida por:

$$L(\lambda, \hat{\xi}) = \frac{P(\lambda, \hat{\xi})}{A_D \Delta\Omega} \quad (2)$$

Las unidades SI para la radiancia son $[\text{W}/\text{m}^2 \text{ sr nm}]$. Siendo rigurosos, debería utilizarse el límite cuando $\Delta\Omega$ y $\Delta\lambda$ tienden a cero. En la práctica, sólo se necesita que sean lo suficientemente pequeños, tal que un pequeño cambio en su tamaño, no implique un cambio en la radiancia.

Si se adopta un sistema de coordenadas cartesianas, en el cual los ejes x y y están a lo largo de la superficie del mar y el eje z está dirigido hacia el agua; la dirección de propagación de la luz se especifica por el ángulo polar (θ) y el ángulo azimutal (φ) de un sistema de coordenadas esféricas construido sobre el sistema cartesiano (figura 5). Así, los fotones que viajan hacia el océano desde la atmósfera tienen $0 \leq \theta \leq 90^\circ$, mientras que los fotones que escapan del océano llevan ángulos $90 < \theta \leq 180^\circ$. La radiancia en el océano depende levemente de la posición horizontal (x, y), pero si es función de la profundidad z , así que L se toma como una función de la profundidad, la dirección y la longitud de onda, es decir, $L = L(z, \theta, \varphi, \lambda)$. A una profundidad y longitud de onda dada, $L = L(\theta, \varphi)$ se conoce como *distribución de radiancia*.

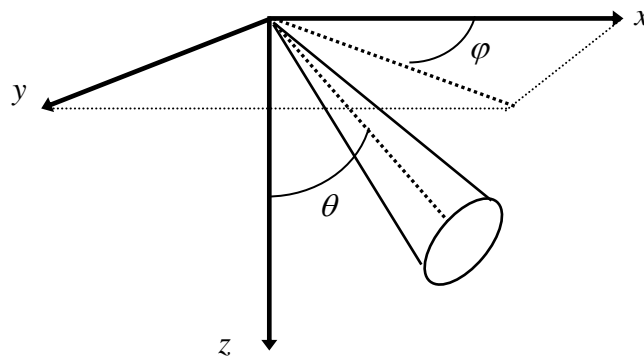


Figura 5. Sistema de coordenadas esféricas construido sobre un sistema cartesiano.

Ya que la radiancia es muy difícil de medir ordinariamente, la mayoría de las mediciones de campo de luz abarcan integrales de la distribución de radiancia. Las integrales de interés, son las que se conocen como irradiancia hacia abajo:

$$E_d(z, \lambda) = \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{\pi/2} L(z, \theta, \varphi, \lambda) \cos\theta \sin\theta d\theta \quad (3)$$

E irradiancia hacia arriba, con respecto a la superficie:

$$E_u(z, \lambda) = - \int_0^{2\pi} d\varphi \int_{\pi/2}^{\pi} L(z, \theta, \varphi, \lambda) \cos\theta \sin\theta d\theta \quad (4)$$

Esto representa la energía o flujo de fotones por unidad de tiempo y unidad de área a través de una superficie horizontal a una profundidad z asociada con los campos de luz hacia abajo y hacia arriba, respectivamente. Las unidades SI para todas las funciones de irradiancia son $[\text{W}/\text{m}^2\text{nm}]$.

2.1.2 Propiedades ópticas de la columna de agua

Las medidas experimentales de irradiancia (E_d y E_u), revelan que la irradiancia decae exponencialmente con la profundidad [14]. Así, es natural definir un coeficiente de atenuación asociado con el decaimiento, de la forma:

$$K_x(z, \lambda) = - \frac{d}{dz} \{ \ln[E_x(z, \lambda)] \} \quad (5)$$

Cuando x toma el valor de $x = d$ se llama coeficiente de atenuación hacia abajo; si $x = u$, se llama coeficiente de atenuación hacia arriba y si $x = 0$ se llama irradiancia escalar. En un medio homogéneo, estos coeficientes dependen débilmente de la

profundidad y por lo tanto, en algún sentido, son característicos del medio. Sin embargo, sus valores dependen de la superficie de iluminación, ángulo del sol y condiciones climáticas, por lo tanto no dependen de las propiedades del medio solamente. Debido a esto, son referidos como *propiedades ópticas aparentes*.

Igualmente lo son otras cantidades asociadas a la irradiancia, llamadas Reflectancia, Función de distribución de afloramiento hacia abajo y hacia arriba respectivamente:

$$R(z, \lambda) = \frac{E_u(z, \lambda)}{E_d(z, \lambda)} \quad (6)$$

$$D_d(z, \lambda) = \frac{E_{0d}(z, \lambda)}{E_d(z, \lambda)} \quad (7)$$

$$D_u(z, \lambda) = \frac{E_{0u}(z, \lambda)}{E_u(z, \lambda)} \quad (8)$$

La reflectancia justo debajo de la superficie del mar es de interés central en el sensado remoto del color del océano. Además $E_0(z, \lambda) = E_{0d}(z, \lambda) + E_{0u}(z, \lambda)$ es la irradiancia escalar, la cual es proporcional a la densidad de fotones asociada con el campo de luz a la profundidad z . Sus unidades son $[\text{W}/\text{m}^2\text{nm}]$.

Como el objetivo es entender la propagación de la luz en el mar, es decir, la variación en la distribución de radiancia con la profundidad y dirección, no pueden ser suficientes las propiedades ópticas aparentes, de esta forma, se busca un sentido mas profundo de caracterización del medio.

Considérese un pequeño volumen ΔV de longitud Δl , iluminado por un rayo paralelo de luz atravesándolo en una dirección especificada por el vector unitario $\hat{\xi}$ como lo muestra la figura 6.

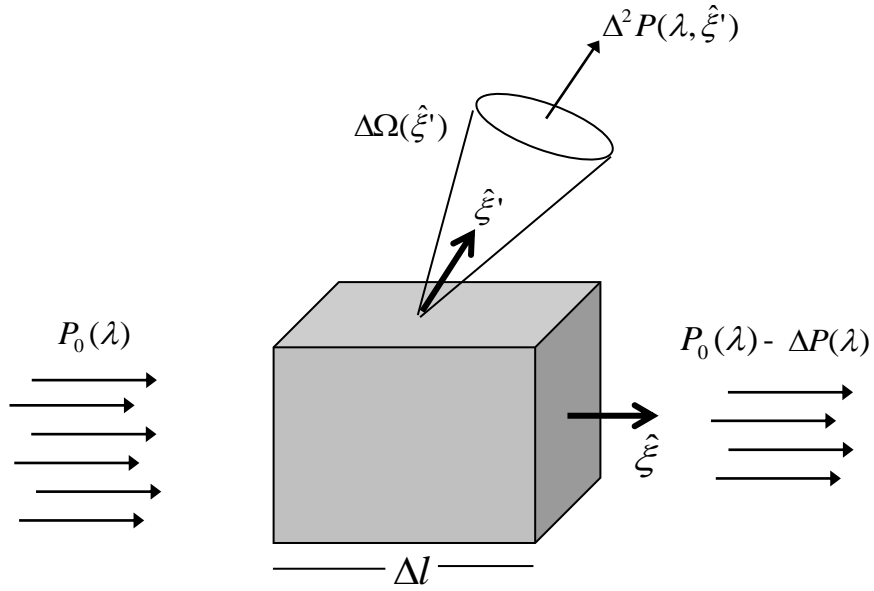


Figura 6. Esquema empleado para definir las propiedades ópticas inherentes.

$P_0(\lambda)$ es la potencia de radiancia espectral entrando al volumen. Al atravesarlo, algunos fotones son removidos por absorción dentro de ΔV mientras otros son removidos por esparcimiento. Si $\Delta P(\lambda)$ es la fracción removida de $P_0(\lambda)$, entonces, el coeficiente de atenuación del rayo se define como:

$$c(\lambda) = \frac{1}{\Delta l} \left[\frac{\Delta P(\lambda)}{P_0(\lambda)} \right] \quad (9)$$

Se puede interpretar a $c(\lambda)$ como la fracción de potencia removida por unidad de longitud. Sus unidades son m^{-1} .

Si $\Delta^2 P(\lambda, \hat{\xi}')$ es la potencia de radiancia espectral esparcida en un pequeño ángulo sólido $\Delta\Omega(\hat{\xi}')$, la función de volumen de esparcimiento (VSF) se define como:

$$\beta(\lambda, \xi \rightarrow \hat{\xi}') = \frac{1}{\Delta l \Delta\Omega(\hat{\xi}')} \left(\frac{\Delta^2 P(\lambda, \hat{\xi}')}{P_0(\lambda)} \right) \quad (10)$$

β se puede interpretar como la fracción de potencia esparcida de la dirección $\hat{\xi}$ hacia la dirección $\hat{\xi}'$ por unidad de longitud y por unidad de ángulo sólido. El superíndice de $\Delta^2 P(\lambda, \hat{\xi}')$ no indica al cuadrado, si no, de segundo orden en pequeñez.

El tamaño del volumen de esparcimiento debe ser lo suficientemente pequeño, tal que los fotones tengan una probabilidad insignificante de esparcirse más de una vez en ΔV . Para el agua de mar y para partículas suspendidas en ella con orientación aleatoria, β depende en dirección, solamente del ángulo entre $\hat{\xi}$ y $\hat{\xi}'$.

Si sumamos las contribuciones provenientes de cada $\Delta\Omega(\hat{\xi}')$ sobre la esfera que rodea a ΔV , el resultado es:

$$\int_{4\pi} \beta(\lambda, \hat{\xi} \rightarrow \hat{\xi}') d\Omega(\hat{\xi}') = \frac{1}{\Delta l} \left(\frac{\Delta P_s(\lambda)}{P_0(\lambda)} \right) \quad (11)$$

donde

$$\Delta P_s(\lambda) = \sum_{\Delta\Omega} \frac{\Delta^2 P(\lambda, \hat{\xi}')}{\Delta\Omega(\hat{\xi}')} \Delta\Omega(\hat{\xi}') \quad (12)$$

Comparando las ecuaciones (9) con (11), se observa que el lado derecho de la ecuación (11) es la contribución del lado derecho de la ecuación (9) que resulta del esparcimiento. Así, el coeficiente de esparcimiento $b(\lambda)$ está dado por

$$b(\lambda) = \int_{4\pi} \beta(\lambda, \hat{\xi} \rightarrow \hat{\xi}') d\Omega(\hat{\xi}') \quad (13)$$

Los procesos de esparcimiento que aquí se tratan son elásticos, es decir, no hay cambios en las longitudes de onda tras la dispersión. Finalmente, ya que $\Delta P(\lambda) - \Delta P_s(\lambda)$ es la potencia absorbida en ΔV , se puede definir el coeficiente de

absorción como:

$$c(\lambda) - b(\lambda) = \frac{1}{\Delta l} \left[\frac{\Delta P(\lambda) - \Delta P_s(\lambda)}{P_0(\lambda)} \right] = a(\lambda) \quad (14)$$

Las cantidades $a(\lambda), b(\lambda), c(\lambda)$ y β son referidas como *propiedades ópticas inherentes* del medio.

En general, las propiedades ópticas inherentes son muy difíciles de medir con la instrumentación disponible en la actualidad. Sin embargo, son fáciles de interpretar ya que satisfacen la ley de *Lambert-Beer*; es decir, que para la columna de agua, se pueden sumar algebraicamente las contribuciones tanto del agua pura como de las partículas suspendidas. En contraste, las propiedades ópticas aparentes son fácilmente medibles, pero son difíciles de interpretar porque dependen de la superficie de iluminación, el estado del mar, la profundidad y no satisfacen la ley de *Lambert-Beer*.

La distribución de radiancia se relaciona con las propiedades ópticas inherentes a través de la *Ecuación de Transferencia Radiativa* (RTE). En un medio en el cual las propiedades inherentes solo dependen de la profundidad, se ignoran los procesos inelásticos y no hay fuentes internas, como bioluminiscencia por ejemplo. La RTE se define como:

$$\begin{aligned} \cos\theta \frac{dL(z, \lambda, \theta, \varphi)}{dz} = & -c(z, \lambda)L(z, \lambda, \theta, \varphi) \\ & + \int_0^{2\pi} \int_0^\pi \beta(z, \lambda, \theta, \theta', \varphi, \varphi')L(z, \lambda, \theta', \varphi') \sin\theta' d\theta' d\varphi \end{aligned} \quad (15)$$

El primer término de la derecha representa la pérdida de radiancia en la dirección (θ, φ) por esparcimiento y absorción; mientras el segundo término suministra la ganancia en radiancia desde las otras direcciones (θ', φ') hacia la dirección (θ, φ) .

2.1.3 Interacción de la luz con la columna de agua

La luz que penetra el mar decae exponencialmente con la profundidad [14], acompañada de un cambio drástico en el espectro de energía como resultado de la absorción por varios componentes en el agua de mar. Tal cambio en la luz afecta la vida del fitoplancton directamente.

Después de que la luz entra en el océano, eventualmente parte de ella se retroesparce a través de la superficie. Esta radiación emergente puede ser deducida a partir de la señal recuperada por el sensor desde el espacio y después de remover los efectos atmosféricos. La magnitud, variación espectral y distribución angular de esta radiación depende de los coeficientes de absorción y esparcimiento del agua de mar (conocidos como propiedades ópticas inherentes), la irradiancia incidente y la distribución angular de la luz dentro del océano.

La radiancia total detectada por el sensor se puede dividir en dos componentes: la radiancia emergente (*Water Leaving Radiance*) y la radiancia que no ha penetrado la superficie del mar, pero que es reflejada de otras fuentes hacia el sensor. Mientras que los efectos del océano dominan la primera, los fenómenos atmosféricos dominan la segunda, generando ruido no deseado. La tarea básica al procesar datos de color es identificar y eliminar este ruido y entonces, a partir de estos, generar el mejor estimador de la concentración de pigmentos fitoplanctónicos.

Solo la luz que emerge de la superficie del mar es la que lleva información útil. Varios factores afectan la luz que emerge del agua: la luz que penetra el agua directamente pero que es absorbida o esparcida por sustancias presentes en ella; en aguas claras y poco profundas, la que es reflejada por el fondo; una parte que no llega porque es absorbida por la sustancia amarilla y, la absorbida por el fitoplancton.

La distribución espectral de la luz bajo el agua está determinada por los procesos de absorción y esparcimiento de varias componentes del agua de mar. Es por esto, que

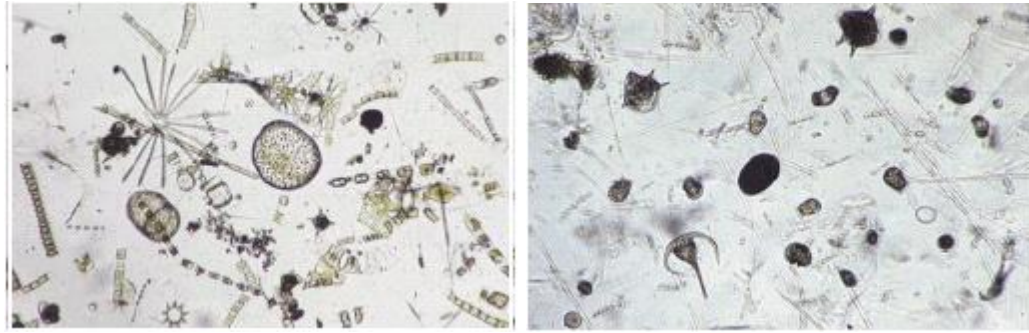
se consideran tres componentes, los cuales interactúan con el agua y alteran la señal recuperada por el sensor: fitoplancton, *gelbstoff* y materia inorgánica.

Fitoplancton

El plancton es el conjunto heterogéneo de organismos que viven en suspensión en las aguas de los océanos, lagos, estanques y ríos. Como son incapaces de moverse, o a lo sumo realizan movimientos erráticos, están a merced de las corrientes y de las olas. Puede dividirse en dos grupos principales: fitoplancton y zooplancton. El fitoplancton está compuesto de vegetales, cuyos componentes son todos microscópicos; tanto de mar como de agua dulce, comprende bacterias, organismos afines a ellas y plantas verdes en forma de células aisladas o pequeñas colonias.

El estudio de los organismos fitoplanctónicos es de gran importancia ecológica, ya que ellos comprenden la mayor proporción de productores primarios en el mar, constituyéndose así en la alimentación básica para los consumidores. El entendimiento de cómo se efectúa la regulación de su desarrollo es esencial para construir modelos predictivos del ciclo global del carbono, y para una mejor comprensión de cómo la vida en los océanos podría responder a cambios en patrones globales de circulación oceánica inducidos por cambios climáticos [15].

El fitoplancton está compuesto por distintos grupos de algas diversamente especializadas para aprovechar las condiciones del medio. Los organismos más abundantes en el fitoplancton son las diatomeas y los dinoflagelados (figura 7), los cuales presentan características antagónicas. Las diatomeas son pequeñas algas muy vistosas, provistas de un caparazón silíceo, son capaces de reproducirse vertiginosamente cuando las condiciones ambientales son favorables y los elementos nutritivos son muy abundantes. En cuanto cesan estas condiciones su número decae rápidamente. Los dinoflagelados, por el contrario, pueden desarrollarse en situaciones un poco más adversas y aprovechar al máximo los ambientes caracterizados por la escasez de elementos nutritivos.



a)

b)

Figura 7. Comunidad fitoplanctónica dominada por: **a)** diatomeas, **b)** dinoflagelados

Fuente: Compilación Oceanográfica de la Cuenca Pacífica Colombiana. CCCP 2004.

En los últimos años el conocimiento del fitoplancton marino ha adquirido especial interés debido a la importancia que cobra en los estudios orientados a predecir el fenómeno de El Niño y evaluar su efecto sobre la producción biológica [16]. Dicho interés se basa, principalmente, en la necesidad de establecer organismos o grupos de organismos planctónicos que puedan considerarse como *indicadores biológicos*, los cuales tienden a desplazarse junto con determinadas masas de agua; siendo necesario, además, que los organismos cumplan con la condición de bio-indicar cambios en las modificaciones de los componentes físicos y químicos durante la ocurrencia de fenómenos globales.

La densidad del fitoplancton marino es determinable gracias a su pigmentación. La clorofila absorbe la luz solar y el dióxido de carbono atmosférico, sintetizando alimento orgánico. La luz reflejada por la clorofila de las plantas microscópicas marinas permite que los detectores de algunos satélites puedan medir su concentración. La presencia de fitoplancton afecta altamente las propiedades ópticas del agua pura, ya que la clorofila absorbe radiación en algunas zonas del espectro, de aquí que la coloración azul-verdosa del agua de mar tienen su origen en el fenómeno de absorción preferencial o selectiva, en este caso absorción de la luz roja (entre los 620 y los 680 nm) así como de la luz azul-violeta (entre los 420 y los 440 nm).

El fitoplancton también está rodeado de material orgánico disuelto, el que contiene feofitina *a*, la que tiene otras características de absorción en el espectro. Dentro de la población de fitoplancton, el detrito de organismos muertos puede contener tanto esqueletos que contribuyan a la difusión de la luz, como material orgánico que contribuye a la absorción, aunque ya no exista clorofila en las células muertas. En consecuencia las aguas que contienen fitoplancton tienen diferentes proporciones de material absorbiendo y difundiendo la luz, dependiendo de las especies y edad de la población.

La energía solar es usada para llevar a cabo el proceso de fotosíntesis, y la conversión de energía radiante en energía química depende de los pigmentos fotosintéticos que usualmente están contenidos en los cloroplastos del fitoplancton. El pigmento dominante es la clorofila *a*, aunque las clorofilas *b*, *c* y *d* conocidas como pigmentos accesorios (carotenoides, xantofilas y ficobilinas) también están presentes en muchas especies de fitoplancton y están involucrados en esta conversión.

La biosfera recibe radiación solar comprendida entre los 290 nm y los 3000 nm de longitud de onda, pero básicamente la mayor proporción de la energía está concentrada entre los 380 nm y los 710 nm, que constituye el rango de absorción de las clorofilas y los pigmentos accesorios (figura 8). La clorofila presenta un máximo de absorción en el azul violeta cerca de los 430 nm y otro menor ocurre en el rojo cerca de los 662 nm.

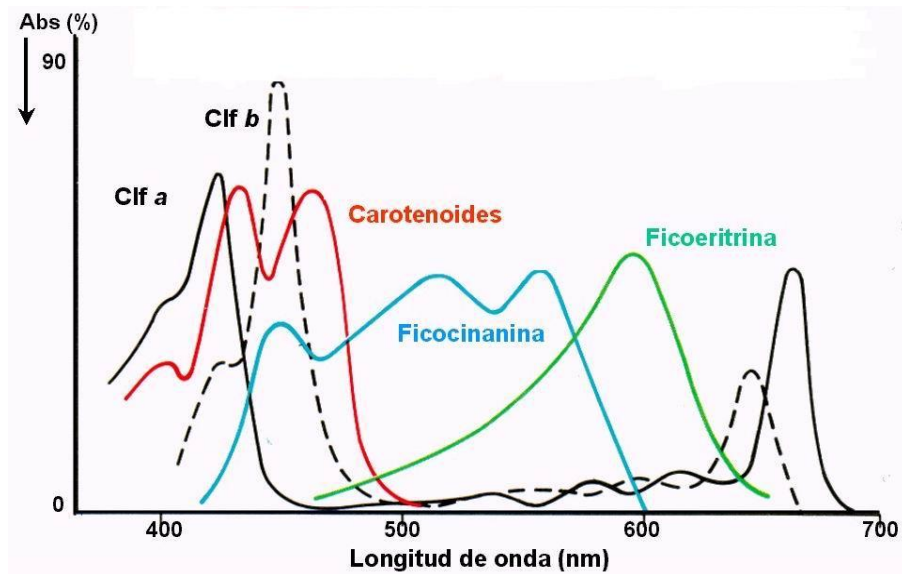


Figura 8. Espectro de absorción de algunos componentes del fitoplancton marino.

Gelbstoff

El material orgánico asociado con vegetación en proceso de putrefacción se conoce como “sustancia amarilla” o *gelbstoff*. Esta influye sobre el color del agua a través de sus propiedades de absorción (figura 9). Tiene un marcado máximo de absorción en el azul y muestra una disminución con la longitud de onda y una menor absorción en la zona amarilla del espectro. La sustancia amarilla no está relacionada con la productividad local del fitoplancton y se cree que es derivada del drenaje continental, encontrándose altas concentraciones en mares encerrados. Esta sustancia puede servir como indicadora, desde el espacio, de la localización de plumas de ríos.

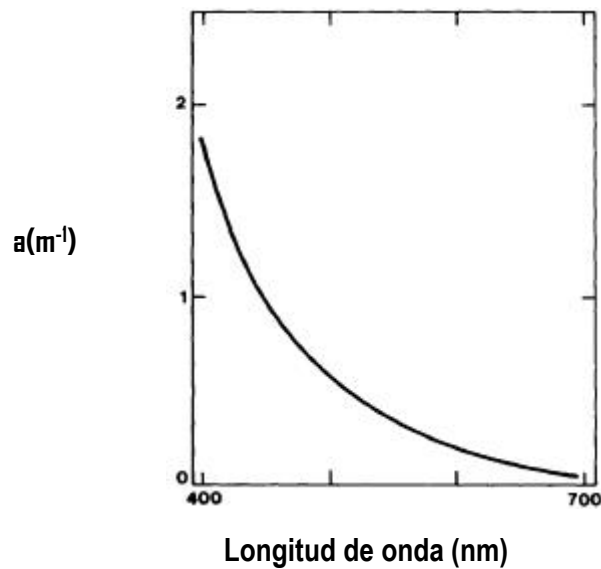


Figura 9. Espectro de absorción aproximado para el *gelbstoff*.

Fuente: <http://www.profc.udec.cl/~gabriel/tutoriales/curso/cap08-color.PDF>

Materia inorgánica

La energía que eventualmente llega a un sensor es reflejada o emitida por una variedad de componentes ambientales. Al conocer los patrones de respuesta espectral de estos componentes, es posible determinar las regiones espectrales óptimas para su observación. Los sedimentos suspendidos descargados por ríos son particularmente grandes reflectores. El mapeo de estas plumas de sedimentos es un medio para estudiar los patrones de mezcla y circulación de aguas. Sin embargo, dado que se reflejan fuertemente en un amplio rango de longitudes de onda, altas concentraciones de sedimento pueden interferir o impedir mediciones de clorofila. Estos pueden ser sedimentos de fondo resuspendidos, sedimentos arrastrados por ríos, material costero erosionado o sedimentos arrojados por proceso de dragado.

2.1.4 Interacción de la luz con la atmósfera

La energía que recibe un sensor desde el objeto de interés debe pasar a través de la atmósfera. Los componentes gaseosos y las partículas de materia dentro de la atmósfera, pueden afectar la intensidad y la distribución espectral de la energía y pueden impedir la observación de características de la superficie del mar. La magnitud de los efectos atmosféricos depende de factores tales como la longitud del camino recorrido por la luz, la longitud de onda y las variaciones diarias de las condiciones atmosféricas.

En el caso de la energía reflejada, la atmósfera interviene entre la fuente de iluminación y el objeto, así como también entre el objeto y el sensor.

El efecto atmosférico más fácilmente discernible en longitudes de onda visible, es el de esparcimiento. El esparcimiento es simplemente la extracción de energía de una onda incidente y la reemisión subsecuente de alguna porción de esa energía por partículas en la atmósfera; mientras que las partículas individuales son pequeñas, su efecto neto puede ser bastante significativo si están presentes en cantidades apreciables. El esparcimiento Rayleigh es causado por moléculas atmosféricas y partículas diminutas que son considerablemente más pequeñas que las longitudes de onda de la radiación a la que afectan. Este tipo de esparcimiento ocurre principalmente en las porciones ultravioleta y azul del espectro y de hecho, es responsable por la apariencia azul del cielo durante el día.

Cuando la radiación se encuentra con partículas que son varias veces más grandes que las longitudes de onda afectadas, ocurre una reflexión múltiple no selectiva. El término no selectivo significa que todo lo reflejado de las longitudes de onda solar es afectado más o menos igual. Las gotas de agua en nubes o los bancos de niebla son esparcimientos no selectivos; ellas aparentan ser blancas porque todas las longitudes de onda del rango visible son reflejadas.

Debido a sus longitudes de onda larga, los sensores de microondas no son afectados por las reflexiones múltiples atmosféricas y son por lo tanto capaces de “ver” a través de las nubes. Desafortunadamente, debido a que las moléculas colorantes orgánicas o pigmentos, tienen resonancias en el visible, la radiación de microondas no suministra información acerca de ellas.

Debido a las reflexiones múltiples, la energía que es recibida por el sensor incluye reflexiones tanto de la atmósfera como del objeto. El componente de reflexión atmosférica es referido como la ruta de radiancia y se requieren algoritmos complejos para corregir este efecto. A diferencia de las reflexiones múltiples que redirigen la radiación y causan una pérdida de detalle, la absorción atmosférica realmente reduce el monto de energía en ciertas bandas de longitud de onda. A pesar de que la atmósfera es esencialmente transparente en la porción visible del espectro, hay varias regiones en las cuales es parcial o totalmente opaca. Varios componentes de la atmósfera absorben energía en estas longitudes de onda que son llamadas bandas de absorción.

Cuando las moléculas de gas absorben la radiación proveniente del sol, su nivel de energía es incrementado; esta energía es subsecuentemente reemitida como calor, el cual es radiación térmica infrarroja. Las emisiones atmosféricas pueden degradar la señal que alcanza a un sensor desde un objeto de manera muy parecida en la que las reflexiones múltiples afectan a la energía reflejada. De nuevo, es posible corregir este efecto a través de comparar mediciones realizadas simultáneamente en diferentes bandas.

2.2 OCEANOGRAFÍA SATELITAL

La oceanografía tiene por objeto el estudio de los mares, es decir, de los fenómenos físicos, químicos y biológicos que tienen lugar en las aguas marinas y en las costas que las limitan. En su estudio se trata la composición física, química y biológica de los mares, determinando parámetros tales como densidad, salinidad, temperatura, transparencia, coloración, entre otras; así como investigaciones en cuanto a la vida que se desarrolla en los mares, como fauna y flora litoral, pelágica y abisal.

Con la llegada de la era espacial y el desarrollo de la tecnología satelital orientada a la observación del sistema tierra-océano durante los años 70, se abrió una ventana de exploración nunca antes lograda por los métodos tradicionales de investigación oceanográfica, apareciendo la oceanografía satelital, la cual se presenta como una técnica alternativa y novedosa para observar el océano y sus variables. Aunque teniendo en cuenta que esta tecnología presenta actualmente limitaciones, plantea el fortalecimiento del método tradicional de investigación basado en medidas *in situ* realizadas durante expediciones oceanográficas.

Regiones de interés para la oceanografía satelital

- a) Visible (400-700 nm). Rango de absorción de los pigmentos fotosintéticos.
- b) Infrarrojo Cercano (700-3000 nm). También llamado IR reflejado y fotográfico, puesto que puede detectarse mediante películas especiales. Puede discriminar masas vegetales y concentraciones de humedad.
- c) Infrarrojo Medio (3000-6000 nm). Aquí se entremezclan los procesos de reflexión de la luz solar y de emisión de la superficie terrestre.
- d) Infrarrojo lejano o térmico (6000-15000 nm). Porción emisiva de la superficie terrestre.
- e) Microondas (a partir de 1mm). Es de gran interés, ya que las nubes son transparentes a la mayor parte de la energía en esta región.

Todos los sistemas de percepción remota a bordo de satélites incluyen las mediciones de radiación electromagnética, la cual ha sido emitida, reflejada o esparcida por la atmósfera o la superficie del mar. A pesar de la gran cantidad de sensores satelitales que han sido lanzados en las últimas décadas, básicamente la percepción remota del océano sólo es capaz de medir cuatro propiedades del mar:

Color. El proceso físico por el cual se extrae información útil de la superficie del mar acerca del color del océano, es el retroesparcimiento (*backscattering*) o esparcimiento hacia arriba. Para detectarlo, se usan espectrorradiómetros, los cuales miden la radiancia espectral como función de la longitud de onda. Un ejemplo de ellos, es el sensor MODIS.

Temperatura. Para ello se usan los radiómetros de microondas pasivos, los cuales observan la radiación emitida desde el mar en el rango de 1-300 GHz. El radiómetro del satélite mide los niveles de radiación que dependen de la temperatura del objeto radiante, y a cada nivel de radiación, se le asigna un color.

Rugosidad (Altimetría). Para medirla se usan radares que apuntan al nadir. Estos miden la altura del instrumento sobre la superficie del mar, al medir el intervalo de tiempo entre la transmisión y recepción de una cadena de cortos pulsos.

Vientos, oleaje. Para determinar estas variables se usan radares que miden velocidad y dirección del viento, llamados *scatterometers*.

Es a partir de estas cuatro medidas primarias de donde se pueden derivar otras propiedades del océano. Por ejemplo, usando las bandas apropiadas en el rango visible del espectro, se puede estimar el contenido de clorofila y de ahí la productividad primaria. Mediante la altimetría se pueden medir pendientes y deducir la dirección de las corrientes y su velocidad.

2.2.1 Sensores satelitales

Los satélites son plataformas espaciales, capaces de monitorear la superficie completa del planeta de forma periódica, cubriendo una superficie considerable en cada revolución. La órbita teórica de un satélite es una elipse, y se clasifican en ecuatoriales, polares y semipolares, según si su órbita está en el plano del ecuador o perpendicular a él. Dos tipos de órbita son descritas por los satélites de observación de cobertura completa de la tierra: geosíncrona y heliosíncrona, dependiendo de su altura y de si pasan el plano del ecuador al mismo tiempo solar cada día.

La resolución de un sistema sensor del color del océano, implica resolución espacial, espectral, radiométrica y temporal:

Resolución espacial. Objeto más pequeño que puede ser distinguido sobre una imagen. En los sensores opto electrónicos corresponde al tamaño de la mínima unidad de información incluida en la imagen, denominada píxel.

Resolución espectral. Indica el número y anchura de las bandas espectrales que puede detectar un sensor. Un sensor será mejor mientras más bandas proporcione y entre más estrechas sean.

Resolución radiométrica. Sensibilidad o capacidad de detectar variaciones en la radiancia espectral que recibe. Corresponde al número máximo de niveles digitales que puede detectar un sensor opto electrónico. Los primeros sensores ofrecían 64 a 128 niveles digitales, actualmente ofrecen más de 1024.

Resolución temporal. Frecuencia de cobertura que proporciona el sensor, es decir, la periodicidad con que adquiere datos de la misma porción de la superficie terrestre. El ciclo de cobertura es función de la órbita del satélite, así como del diseño del sensor.

De acuerdo a la región del espectro donde operan, los sensores se pueden clasificar como de microondas, visibles o infrarrojos; y, según el tipo de energía usado, en activos y pasivos. Los pasivos se limitan a recibir la energía proveniente de un foco exterior a ellos, como por ejemplo los fotográficos, opto electrónicos y de antena. Por su parte, los activos son capaces de emitir su propio haz de energía, siendo más flexibles, pues no dependen tanto de las condiciones exteriores al sistema sensor-tierra. Este es el caso del radar y el lidar. Los sensores pasivos u ópticos van captando los elementos de la superficie terrestre, en este caso el haz luminoso reflejado proveniente del elemento, se separa, a través de filtros, en haces de distinta longitud de onda dentro de los rangos visible e infrarrojo.

La radiancia registrada por el sensor es digitalizada y guardada como una grilla de píxeles para su posterior manipulación. Es una matriz con filas y columnas donde cada elemento se llama píxel. Por cada una de las bandas existirá una de estas matrices (figura 10). La cantidad de bits usada por el píxel determinará finalmente cuánta información puede llevar este píxel. En percepción remota, lo más usual es encontrar píxeles de entre 8 y 10 bits. Los píxeles quedan entonces agrupados en imágenes multispectrales formadas por varias bandas o planos, que representan la radiancia del terreno en cada una de las correspondientes bandas del espectro electromagnético.

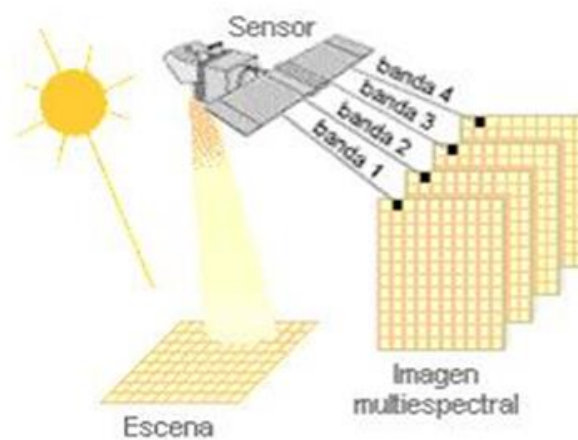


Figura 10. Esquema de la adquisición de datos mediante sensores satelitales.

Fuente: [http:// primahost3.prima.com.ar](http://primahost3.prima.com.ar)

2.2.2 Sensor satelital MODIS

El MODIS (*Moderating Resolution Imaging Spectroradiometer*) es un instrumento clave a bordo del satélite AQUA, el cual fue lanzado en mayo del 2002. El enfoque del proyecto AQUA es el estudio multidisciplinario de los procesos terrestres relacionados con la atmósfera, el océano y la superficie terrestre, y su relación con los cambios en los sistemas terrestres. La investigación de los cambios globales llevado a cabo con el conjunto de instrumentos AQUA incluyen: temperatura atmosférica y perfiles de humedad, cubrimiento de vegetación, propiedades de nubes y aerosoles, precipitación y balance radiativo, nieve, hielo, temperatura superficial del mar y productividad oceánica. Su amplio campo de vista para el cubrimiento de la tierra, hace posible entender en detalle los ecosistemas globales y su relación con otros ecosistemas.

La órbita del AQUA tiene una altura de 705 Km nominal, con una inclinación de 98,2°. El periodo orbital es de 98.8 minutos. Su órbita es heliosíncrona polar, lo que permite observar una determinada zona de la tierra repetidamente con las mismas condiciones lumínicas. El cruce por el Ecuador, en sentido ascendente, se produce a las 13:30 horas, con un margen de 15 minutos.

MODIS incorpora el estado del arte en cuanto a óptica y tecnología de materiales, ya que es un instrumento clave del programa de la NASA denominado “Misión al planeta Tierra”. Esta misión requiere un nivel sin precedentes de fidelidad radiométrica y estabilidad sobre un amplio rango espectral, tal que sean registrados los cambios en el sistema terrestre en vez de los cambios en el instrumento. Debido a esto, MODIS sobresale sobre los sensores espaciales anteriores a él por su extensa capacidad de calibración a bordo, la cual incluye un cuerpo negro de referencia, un difusor solar reflectivo, un monitor para la estabilidad del difusor solar (SDSM) y un montaje para calibración espectrorradiométrica (SRCA) [17].

El espejo escaneador rotatorio da acceso oportuno a esas fuentes sin interrumpir el funcionamiento normal del instrumento. El cuerpo negro suministra la fuente de referencia radiométrica para las bandas infrarrojas en cada escaneo. El difusor solar es un preciso objetivo de radiancia para bandas reflectivas. El SDSM examina alternadamente el difusor solar y el sol, revisando la estabilidad de monitoreo del difusor y detectando potenciales contaminantes. El SRCA incluye un monocromador para revisar los filtros espectrales y verificar su estabilidad y un enfriador radiativo pasivo de alto desempeño suministra enfriamiento a 83K para las 20 bandas espectrales infrarrojas en dos montajes de plano focal.

Sistema Óptico

El sistema óptico es el corazón del MODIS, este recoge, enfoca y divide la radiación de la tierra en 36 bandas espectrales. Entre sus componentes se encuentran:

- Telescopio afocal
- Espejo escaneador
- Dicroico principal
- Tres divisores de haz dicroicos
- Cuatro montajes de plano focal (FPAs)

Entre el sistema de calibración a bordo, sobresalen:

- Cuerpo negro de referencia
- Difusor solar
- Montaje de calibración espectralradiométrica (SRCA)

Espejo de escaneo: Dirige la luz de la superficie de la tierra hacia los montajes de plano focal (FPA's). El espejo escaneador refleja la radiación de la tierra sobre un rango de barrido de ± 55 grados hacia el telescopio afocal. La radiación de la tierra

pasa sobre el dicroico principal antes de reflejarse en un espejo secundario para después caer en una serie de 3 divisores de haz dicroicos separan la radiación captada en cuatro regiones espectrales: visible, infrarrojo cercano, infrarrojo medio e infrarrojo lejano.

Focal Plane Assemblies (FPA's): Para abarcar las 36 bandas espectrales, MODIS cuenta con cuatro montajes de plano focal; para el visible (VIS), infrarrojo cercano (NIR), ondas infrarrojas cortas y medias (SWIR / MWIR) y ondas infrarrojas largas (LWIR). Cada FPA enfoca la luz a un detector de píxeles, el cual genera una señal distinta, dependiendo del tipo de luz al que sea sensible. Los detectores son celdas fotovoltaicas (fotodiodos). Para el visible y el infrarrojo cercano están hechos de silicio híbrido (0.4 a 1.0 micras), para el SWIR / MWIR se usan detectores de HgCdTe (1.2 a 4.5 micras). Para el LWIR, las celdas son hechas de materiales similares, pero adicionalmente incluyen detectores fotoconductivos para las longitudes de onda mayores a 10 micras.

Cuerpo Negro: Cuando los fotones son emitidos por cualquier objeto, tal como la superficie de la tierra y nubes, su temperatura puede ser determinada si son vistos en el infrarrojo medio y lejano. MODIS toma ventaja de esto usando un cuerpo negro diseñado para ser no reflectivo y de esta forma mantiene la temperatura precisa para ayudar a calibrar sus bandas térmicas. El requerimiento para una calibración absoluta impone que para obtener temperaturas uniformes y alto nivel de efectividad, la emisividad debe ser mayor al 0.992. La superficie del cuerpo negro es terminada con un proceso tal que minimiza la reflexión y asegura la efectividad de la cavidad emisiva.

Difusor solar: Calibra las bandas reflectivas del MODIS. Conociendo las propiedades de reflectancia de la superficie del difusor y el ángulo al cual el sol lo alcanza, los científicos pueden predecir la radiancia del difusor, manteniendo una fuente de calibración radiométrica de las bandas reflectivas. Midiendo los fotones

que vienen directamente del sol, los ingenieros en la tierra serán capaces de calibrar la respuesta entera del sistema MODIS, ya que como esta señal es constante (la del sol), cualquier cambio en la salida del MODIS debe ser debido a la degradación, o del MODIS en sí, o del difusor solar.

Spectroradiometric Calibration Assembly (SRCA): El montaje de calibración espectroradiométrica es un dispositivo de calibración diseñado para monitorear las bandas VIS, IR y SWIR. El SRCA también puede generar registros de información banda a banda para las 36 bandas espectrales. El instrumento tiene internamente: fuente, óptica, mecánica y electrónica que permiten generar y modificar los estímulos de entrada al MODIS en tres modos, sin interferir con la operación normal del sensor principal. Los tres modos en que el SRCA opera son: espectral, radiométrico y espacial.

En el modo de calibración espectral, una fuente de luz suministra iluminación para las bandas VIS, NIR y SWIR. Esta luz es dirigida a un monocromador que contiene un montaje de un motor manejador y un espejo-rejilla, el cual, junto con un filtro de rueda, difractan la luz en las regiones VIS, NIR y SWIR. Esta luz difractada es enviada a un telescopio que colima el haz y lo lleva al espejo escaneador. Esta luz se dirige al sistema óptico principal y hacia los detectores, donde los datos de calibración resultante se integran a los datos generales del barrido. Como mínimo, se toma una medida espectral en cada revolución del espejo escaneador. Modelos computacionales han mostrado que la precisión de este método de calibración está dentro de una micra.

En el modo de calibración radiométrica, las aberturas de entrada y salida del SRCA se abren y un espejo plateado reemplaza la rejilla. En este modo el SRCA está diseñado para suministrar seis niveles de radiancia que son estables sobre un periodo de orbita de 100 minutos. Esta estabilidad es alcanzada por un ciclo de realimentación de radiancia basado en un fotodiodo.

Para el modo espacial, la entrada al monocromador se abre y una grilla patrón que establece la escala de posición, se coloca a la salida del monocromador. Adicional a la iluminación para el VIS, NIR y SWIR, la radiación proveniente de un calentador resistivo se acopla al sistema para suministrar energía que soporte el registro espacial de las bandas térmicas. La grilla patrón es después proyectada hacia el sistema óptico principal, donde es redibujada y escaneada por varios FPA's que generan los datos para el algoritmo de registro espacial.

Descripción de productos MODIS

Los datos suministrados por el sensor pueden almacenarse en los siguientes niveles:

- Nivel 0: datos en bruto recibidos en formato HRPT (*High Resolution Picture Transmission*) y transmitidos continuamente por el satélite para recepción por estaciones.
- Nivel 1: además de la información principal, contiene datos auxiliares y parámetros radiométricos. Estos se almacenan en formato LAC (*Local Area Coverage*), los cuales son usados para calibración.
- Nivel 2: las imágenes se encuentran corregidas atmosféricamente pero no tienen la proyección adecuada; lo cual es necesario para el estudio del fitoplancton y otras dinámicas marinas. Están en formato LAC.

La tabla 1 muestra los productos MODIS del nivel 2, los cuales son principalmente de carácter oceánico. Los algoritmos desarrollados por los científicos están descritos en el *Algorithm Theoretical Basis Documents* (ATBD's), y están disponibles electrónicamente en: http://eosps0.gsfc.nasa.gov/eosps0_homepage.html.

Tabla 1. Productos MODIS del nivel 2.

ALGORITMO	PRODUCTOS
Corrección atmosférica	Radiancia emergente Propiedades de aerosoles
Algoritmos empíricos	Concentración de pigmentos Sólidos suspendidos Coeficiente de atenuación difusa
Algoritmos semianalíticos	Clorofila <i>a</i> Coeficiente de absorción Concentración de materia orgánica
PAR	IPAR (absorción de radiación instantánea de la fotosíntesis)
Épsilon	Valores épsilon para corrección de aerosoles
Coccolith	Concentración de cocolitos y calcitas
Phycobilipigments	Ficoeritrina
Fluorescencia de la clorofila	Fluorescencia
Producción primaria	Índices de producción
Temperatura superficial del mar	Temperatura superficial del mar
Base de datos para validación	Datos de emparejamiento

El MODIS tiene alta sensibilidad radiométrica, de 12 bits, en 36 bandas espectrales en longitudes de onda que abarcan desde las 0.4 hasta las 14.4 micras. La dos primeras bandas tienen resolución espacial de 250 m, las siguientes cinco bandas a 500 m, y las restantes 29 a 1 Km. La tabla 2 muestra el uso primario dado a cada banda.

Tabla 2. Bandas del MODIS y su uso primario. La banda coloreada corresponde a la banda 13 donde se encuentra el máximo de absorción para la clorofila *a*.

USO PRIMARIO	BANDA	ANCHO DE BANDA (nm)
Frontera entre tierra, nubes y aerosoles	2	841 - 876
Propiedades de tierra, nubes, y aerosoles		
	7	2105 - 2155
Color del océano Fitoplancton		
	16	862 - 877
Atmósfera Vapor de agua	19	915 - 965
Temperatura superficial en las nubes		
	23	4020 - 4080
Temperatura atmosférica	25	4482 - 4549
Nubes Cirrus Vapor de agua		
	28	7175 - 7475
Propiedades de las nubes	29	8400 - 8700
Ozono	30	9580 - 9880
Temperatura superficial en las nubes	32	11770 - 12270
Altura de nubes		
	36	14085 - 14385

2.2.3. Determinación de clorofila a partir de imágenes satelitales

El fitoplancton tiene características de absorción específicas, cambiando el color del agua. Los pigmentos fitoplanctónicos alteran el color del océano debido a su influencia en el espectro de absorción del agua pura, excepto cuando la fluorescencia de la clorofila altera significativamente la señal en una banda específica.

El uso de imágenes multiespectrales captadas por satélites se ha convertido en una gran herramienta para la extracción de datos destinados a diferentes aplicaciones en la investigación y monitoreo de parámetros oceanográficos. Las técnicas de procesamiento digital de imágenes, además de permitir analizar una escena en diferentes regiones del espectro electromagnético, también posibilitan la integración de varios tipos de datos debidamente registrados.

Los sensores de color del océano miden la radiancia emergente en un número determinado de longitudes de onda en el visible y a partir de esta información se infiere la concentración de pigmentos en el fitoplancton en las capas superficiales del océano. Los algoritmos en las rutinas hacen uso del hecho de que las componentes atmosféricas y oceánicas de la señal total que alcanza al sensor del satélite pueden ser desacopladas usando modelos teóricos de transferencia radiativa en la atmósfera. Esta señal corregida del ruido atmosférico es usada en algoritmos empíricos para recuperar la concentración de pigmentos en el fitoplancton.

La espectrorradiometría es una técnica basada en la información que proporciona el espectro de reflectancia sobre las características de la superficie que se está midiendo. Su aplicación en el estudio de la vegetación es muy interesante ya que permite variar de escala, desde el nivel foliar (relativo a las hojas de las plantas) hasta el nivel del planeta.

Estudios recientes [18], [19] en la aplicación de la percepción remota al color del océano, han dado resultados positivos con respecto a las capacidades de los sensores de color para la determinación de la actividad fotosintética del fitoplancton marino. Por esto, la obtención de la concentración y distribución de clorofila a partir de imágenes satelitales representa una buena posibilidad para la ampliación de conceptos oceanográficos, entre ellos el conocimiento de parámetros biológicos en la CPC.

CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA

El desarrollo del trabajo involucró dos fases: una de ellas encierra las actividades realizadas para la obtención de datos de concentración de clorofila a partir de muestreo *in situ* durante el crucero ERFEN XL realizado por el CCCP; y la otra, el desarrollo de la metodología para la obtención de datos de concentración de clorofila *a* a partir de imágenes satelitales y su posterior comparación con los datos *in situ*.

3.1 OBTENCIÓN DE DATOS IN SITU

3.1.1. Toma de muestras durante las expediciones oceanográficas

Durante el crucero oceanográfico ERFEN XL realizado por la Cuenca Pacífica Colombiana a bordo del buque ARC Providencia durante el mes de julio del 2005, se midieron parámetros oceanográficos y meteorológicos en 40 estaciones ubicadas a lo largo de la cuenca y alrededor de las islas Gorgona y Malpelo. Así mismo, en 25 de estas estaciones, se tomaron muestras de agua para el análisis del componente biológico y químico. La grilla de crucero ERFEN es mostrada en el Anexo A. Adicionalmente fueron monitoreadas las islas Gorgona y Malpelo (Ver grillas en el Anexo B).

Este muestreo se llevó a cabo por medio de botellas Niskins, las cuales fueron lanzadas a diferentes profundidades: 0, 10, 20, 30, 50, 75, 100 y 150 metros, para las determinaciones de oxígeno disuelto, nutrientes y clorofila *a*, ver figura 11. Para efectos de este trabajo, se utilizaron los datos de concentración de clorofila *a* obtenidos a 0 m, es decir, superficial.

El objetivo de asistir al crucero fue participar como auxiliar en el Grupo de Química para la realización de las maniobras oceanográficas habiendo recibido una capacitación previa; y así obtener las muestras de agua en la grilla propuesta, ya que a partir de estas se obtuvieron los datos de concentración de clorofila *a*, información necesaria para la realizar la comparación con respecto a los datos obtenidos a partir de las imágenes satelitales.



Figura 11. Grupo de Química a bordo del crucero ERFEN XL tomando las muestras de agua de las botellas Niskins lanzadas a diferentes profundidades.

Una vez obtenidas las muestras de agua a diferentes profundidades y transferidas a botella plástica, se les realizó un procedimiento a bordo, debido a que debían ser filtradas antes de ser llevadas al laboratorio. Este procedimiento se llevó a cabo con la ayuda de un set de filtración, en el cual se colocaban filtros de éster de celulosa de 0.45 micras por el cual pasaría el agua a ser filtrada. El volumen de agua filtrado fue de 1000 ml. A medida que la muestra iba siendo filtrada, se adicionaban unas gotas de suspensión de carbonato de magnesio para evitar la acidificación del filtro.

Una vez filtrado todo el volumen de agua, los filtros fueron sacados y doblados con pinzas, para así ser guardados en sobres de papel aluminio debidamente rotulados con fecha, hora, número de estación, profundidad y volumen filtrado. Finalmente, los sobres fueron almacenados en un desecador y llevados a nevera. El análisis de las muestras fue efectuado posteriormente en tierra, por personal capacitado del laboratorio de química del CCCP el cual determinó la concentración de clorofila *a* por el método de espectrofotometría visible.

3.1.2. Procedimiento usado en el CCCP para la determinación de clorofila *a*

El método químico más útil para determinar la cantidad de fitoplancton en agua de mar es estimar la cantidad de clorofila (usualmente clorofila *a*). Las clorofilas que se encuentran en la naturaleza y que a la fecha han sido reportadas y descritas son: clorofilas *a*, *b*, *c*, *d*, y *e*.

Este método es aplicable a la estimación de pigmentos en aguas naturales, especialmente agua de mar y aguas continentales. El límite de detección de los pigmentos vegetales en agua de mar no puede ser expresado como tal, porque depende de la cantidad de muestra filtrada. La precisión del método es del 90%, pero cuando la concentración de clorofilas es menor de 0.2 mg/m³, disminuye apreciablemente.

La técnica descrita ha sido obtenida con base en modificaciones hechas al método inicial formulado por *Strickland* y *Parson* en 1952 [20] y es la que actualmente se lleva a cabo en el laboratorio de química del CCCP con las muestras obtenidas en expediciones oceanográficas, como se muestra en el diagrama de la figura 12.

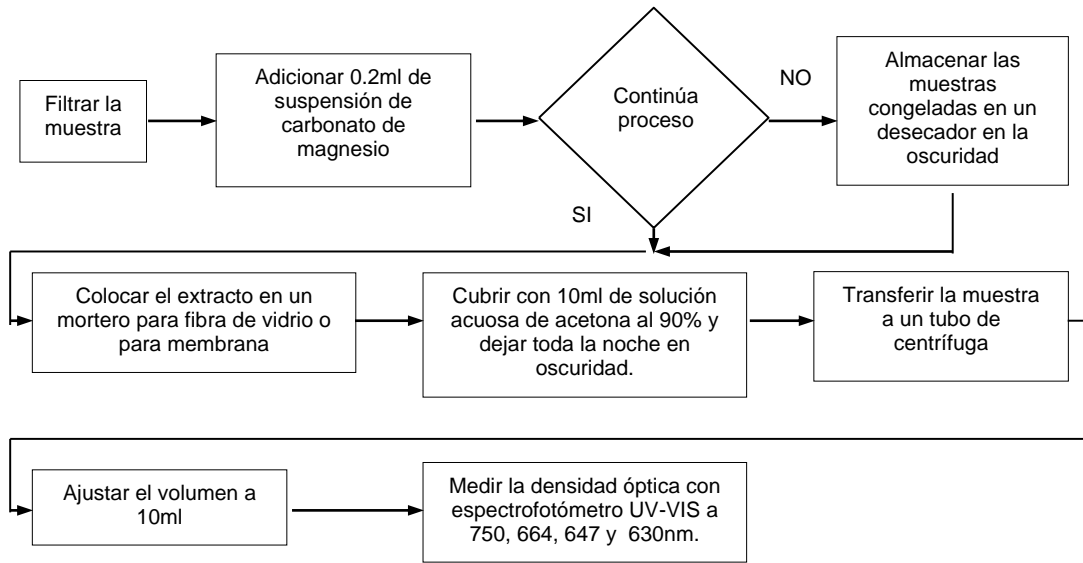


Figura 12. Diagrama de flujo para la determinación de clorofila *a* en el CCCP.

Fuente: Procedimiento técnicos Parte I. Laboratorio de química CCCP 2004.

De acuerdo a [21], el procedimiento de cálculo que se usó fue el siguiente:

$$Cla = 11.85(OD_{664}) - 1.54(OD_{647}) - 0.08(OD_{630}) \quad (16)$$

Donde *Cla* es la cantidad de clorofila *a* en cada extracto y las OD corresponden a las densidades ópticas a las longitudes de onda indicadas por el subíndice. Las lecturas a 664, 647 y 630 nm se usan para determinar las clorofilas *a*, *b* y *c*, respectivamente. La lectura a 750 nm sirve como una corrección para la turbidez. Esta lectura se sustrae de cada una de las otra OD antes de ser usadas en las ecuaciones.

La concentración en mg/m³ se determina a partir de:

$$Cla(mg / m^3) = \frac{Cla \times Vol.extracto}{Vol.filtrado} \quad (17)$$

3.2 OBTENCIÓN DE DATOS A PARTIR DE IMÁGENES SATELITALES

3.2.1. Obtención y acondicionamiento de las imágenes satelitales del sensor MODIS-AQUA.

A través del sitio web <http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/cgi/browse.pl> se obtuvieron las imágenes de la CPC de los días de muestreo *in situ*, ya que se encuentran disponibles imágenes desde julio del 2002 hasta la actualidad. Ver figura 13. El criterio para trabajar con una imagen fue la ausencia de nubes y que se advierta claramente la cuenca, como se muestra en la figura 14. Una vez desplegada la imagen del día deseado y del área en cuestión, fue descargado el archivo comprimido del nivel 2, llamado según convención. El nombre del archivo es de la forma *Ayyyydddhmmss.L2_LAC.bz2*; donde la *A* indica el nombre del satélite (AQUA), *yyyy* el año, *ddd* el día de toma de la imagen (día juliano, de 1 a 365), *hhmmss* la hora de la captura y *LAC* (*Local Area Coverage*) indica la taza de muestreo (1 Km).

The screenshot shows the SeaWiFS User Login interface. At the top, there are navigation buttons (back, forward, home) and a search bar. Below the search bar, there are options for SeaWiFS sensors (GAC, LAC, HRPT, MLAC) and MODIS (Aqua). A radius selection tool is present, with options for 36, 400, 800, 1200, and 1500 km. There are also options to select swaths containing at least a certain percentage of the area of interest (any part, 25%, 50%, 75%, all). A calendar is displayed at the bottom, showing the months of April, May, and June 2005. The main map area shows a global view of Chlorophyll concentration, with a color scale from blue (low) to red (high). The map is titled "Wednesday, 3 July 2002 through Wednesday, 29 June 2005". On the right side, there is a "Select one or more regions:" dropdown menu with options: AdriaticSea, AegeanSea, Antarctica, ArabianSea, AraSea, Australia, and Azores. Below this, there are input fields for boundary coordinates (N, W, S, E) and a checkbox to select all of this time period's scenes. There are buttons for "Find swaths" and "Reconfigure page".

Figura 13. Esquema del sitio web del cual se descargan los archivos que contienen las imágenes

Fuente: <http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/cgi/browse.pl?sen=am>

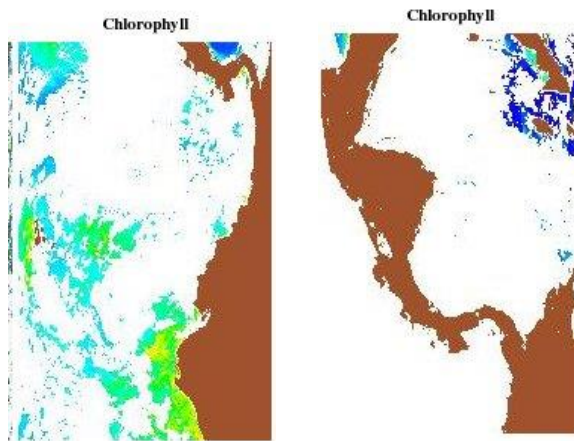


Figura 14. Imágenes de la CPC. A la izquierda se muestra una imagen óptima. A la derecha se muestra una imagen no apropiada debido a la presencia de nubes y a que no se aprecia la CPC completa.

Fuente: <http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/cgi/browse.pl?sen=am>

El acondicionamiento de las imágenes se llevó a cabo con el software *SeaDAS* (*SeaWiFS Data Analysis System*), el cual es un software de la NASA, de libre distribución y corre bajo plataforma linux. El *SeaDAS* es un paquete mixto para el análisis de imágenes, que analiza, procesa y despliega los datos producidos por diferentes sensores satelitales, entre ellos, el MODIS. El acondicionamiento de la imagen implicó hacer corrección de la proyección, adecuar los límites de latitud y longitud y la generación de archivos HDF.

Proyección UTM

Se llama proyección al conjunto de procedimientos matemáticos que permiten representar la superficie de la tierra en un plano. La solución tiene lugar transfiriendo todos los puntos de la tierra a un plano o superficie de una figura desarrollable, es decir, asimilable a un plano.

UTM es la proyección *Universal Transversa Mercator*. La retícula UTM se extiende

desde los 84°N hasta los 80°S. Se inicia en el meridiano 180, dividiendo el este en 60 zonas de 6°. Se emplea en mapas topográficos y en imágenes de satélite.

UTM es una proyección que conserva los ángulos. La imagen del ecuador es una línea recta, y las de los círculos de longitud son líneas perpendiculares distribuidas de forma homogénea a lo largo de ese ecuador. Las imágenes de los círculos de latitud son líneas rectas paralelas al ecuador, pero la distancia entre ellas aumenta; esto se debe a que en una esfera, las líneas de longitud se estrechan a medida que se acercan a los polos. Esto hace imposible proyectar las regiones próximas a los polos, y exagera las distancias verticales a medida que ellas se alejan del Ecuador (figura 15). Este cambio se refleja en la UTM aumentando la distancia entre las líneas de latitud, de modo que la proporción entre los largos de latitud y longitud es la misma que en la esfera.

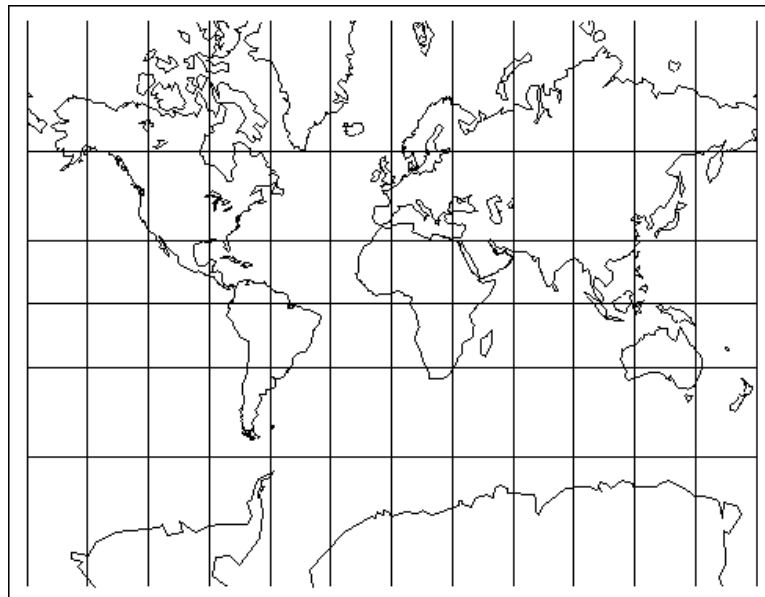


Figura 15. Proyección *Tranversa Mercator*.

Límites de latitud y longitud

Con el objetivo de trabajar con una imagen que tuviera información solamente de la CPC, se utilizó el software *SeaDAS* para establecer los límites de latitud y longitud correspondientes al área bajo estudio. Para la CPC estos límites son: desde 0° hasta

9° para latitud norte y desde -84° hasta -76° para longitud oeste.

Archivos HDF

El formato HDF (*Hierarchical Data Format*) es un formato estructurado de múltiples objetos desarrollado y soportado por la NCSA (*National Center for Supercomputing Applications*). El formato describe cada proceso o componente de la imagen como un objeto, incluyendo algoritmos de calibración, bandas, información de georeferenciación y otros. Todos los objetos están interconectados entre si y la ubicación de cada objeto es conocida. Ya en este formato las imágenes pueden ser leídas y numéricamente procesadas en otro software, como es el caso de *Matlab* de *Mathworks inc.* En su nivel mas bajo, HDF es un formato físico de archivos para almacenar datos científicos. En su nivel más alto, es una colección de utilidades y aplicaciones para manipular, ver y analizar datos. Los tipos de estructura de datos que soporta son: datos científicos, imágenes raster, paletas de color, entradas de texto, entre otros.

3.2.2. Desarrollo e implementación de rutinas para la obtención de datos de concentración de clorofila *a* a partir de imágenes satelitales del sensor MODIS-AQUA

Una vez procesadas las imágenes satelitales con ayuda del software *SeaDAS* y obtenidos los archivos HDF, el paso siguiente fue desarrollar e implementar rutinas en *Matlab* que permitieran obtener los datos de concentración de clorofila *a* en determinadas posiciones geográficas, mostrar la imagen del área bajo estudio y realizar la posterior comparación de estos datos con respecto a datos *in situ*.

Para ello se realizó un programa principal con interfaz gráfica llamado “*usuario*”. La interfaz se hacía necesaria ya que, como en el CCCP se desea continuar con el proceso de determinación de concentración de clorofila a partir de imágenes

satelitales; se requería un programa completo, robusto y fácilmente ejecutable junto con una metodología entendible, y así este trabajo podría ser continuado por los funcionarios del CCCP.

El programa desarrollado permite cargar la imagen del día deseado como un archivo HDF, para así ser leído y procesado. Una vez cargado el archivo, permite visualizar la imagen de la CPC con la concentración de clorofila *a* a lo largo de ella e indica las estaciones monitoreadas en forma gráfica. La apariencia del programa “*usuario*” es mostrada en la figura 16.



Figura 16. Apariencia del menú desplegado al ejecutar el programa “*usuario*” en *Matlab*.

A continuación se describen brevemente cada una de las funciones que realiza el programa “*usuario*”:

La opción SELECCIONAR IMAGEN despliega un cuadro de diálogo para que el usuario escriba el nombre del archivo que contiene la imagen, así como el que contiene las coordenadas; archivos HDF generados previamente con el *SeaDAS*.

La opción MOSTRAR IMAGEN despliega otro menú para que el usuario seleccione la grilla realizada durante el muestreo. Una opción es la grilla ERFEN, que consta de

25 estaciones biológicas; la otra opción es NUEVA GRILLA. Para que el programa pueda leer una grilla diferente, esta debe estar escrita en un archivo de texto (con extensión *.txt*) donde la primera columna sea Latitud, y la segunda Longitud. Tanto Latitud como Longitud, deben estar en decimales, y no en grados, minutos y segundos. Este archivo no debe incluir títulos ni leyendas. Una vez seleccionada la grilla, se muestra una figura de la CPC con las estaciones biológicas monitoreadas durante la expedición, y una escala de color para discriminar abundancia de clorofila.

La opción OBTENER DATOS despliega el menú de seleccionar grilla, donde se puede escoger entre grilla ERFEN u otra diferente. Como en el caso anterior, la nueva grilla debe estar como archivo *.txt*. Seleccionada la grilla, en el *Command Window* de *Matlab*, aparece la lista de los valores de concentración de clorofila asociados a cada estación de la grilla seleccionada.

Así, tras la ejecución del programa se obtuvieron como datos de salida: la imagen de la CPC del día deseado con las estaciones de la grilla seleccionada indicadas sobre esta, la lista de los valores de concentración de clorofila *a* asociados a esa grilla; y a partir de la comparación con respecto a datos *in situ*, se obtuvo como resultado del análisis estadístico: el diagrama de dispersión y los estadísticos RMSE, MAE, BIAS y coeficiente de correlación, que son explicados a continuación.

3.3 COMPARACIÓN ENTRE DATOS SATELITALES Y DATOS IN SITU

El proceso de comparación involucró calcular estadísticos simples a partir de los datos obtenidos del sensor satelital y los obtenidos *in situ*, a fin de establecer el grado de correspondencia entre ellos. Para ello se implementó una rutina en *Matlab* que a partir de los dos conjuntos de datos mostró como resultado el diagrama de dispersión y los estadísticos calculados.

3.3.1 Análisis estadístico

Las observaciones realizadas de un fenómeno pueden ser representadas en un diagrama de dispersión, también llamado nube de puntos. En este, cada pareja de datos es un punto cuyas coordenadas son los valores de las variables. A partir del análisis de este diagrama es posible determinar cualitativamente si existe relación entre las variables analizadas y si esta relación es directa o inversa. Los tipos de relación que se pueden presentar son mostrados en los diagramas de la figura 17.

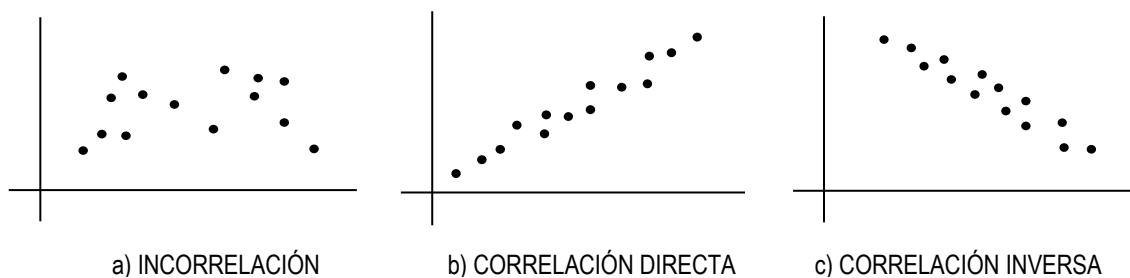


Figura 17. Tipos de relación observados a partir de diagramas de dispersión.

En cuanto al análisis estadístico, se optó por utilizar el error cuadrático medio (RMSE), el error absoluto medio (MAE), el sesgo (BIAS) y el coeficiente de correlación. Estos estadísticos fueron calculados mediante rutinas implementadas en *Matlab* a partir de los datos obtenidos para cada estación biológica, para así determinar el grado de correspondencia entre pares de valores obtenidos experimentalmente y a partir del sensor del satélite; igualmente se obtuvo la nube de puntos o diagrama de dispersión, el cual permite reconocer si existe relación entre las variables y de qué tipo es.

Los datos in situ y MODIS fueron transformados logarítmicamente (base 10) antes de hacer la comparación estadística, esto debido a que la distribución natural de la clorofila en el océano es lognormal [22]. Siendo S los valores obtenidos del sensor satelital, I los obtenidos in situ y n el número de muestras, se considera:

Error Cuadrático Medio (RMSE). Permite medir el promedio del grado de correspondencia entre pares individuales de valores pronosticados (satelitales) y valores observados (in situ). Es una estimación del error del conjunto de datos pronosticados (datos satelitales). Se define como:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum [Log(S) - Log(I)]^2}{n}} \times 100 \quad (18)$$

Error Absoluto Medio (MAE). Es el error medio de la predicción. Es el promedio de la diferencia entre el valor predicho y el observado en todos los casos de la prueba. Está definido por:

$$MAE = \frac{\sum |Log(S) - Log(I)|}{n} \times 100 \quad (19)$$

Sesgo (BIAS). Cuantifica el error sistemático del modelo. Existe sesgo cuando la ocurrencia de un error no aparece como un hecho aleatorio advirtiéndose que ocurre de forma sistemática. Proporciona información sobre la tendencia del modelo a sobreestimar o subestimar una variable. La ausencia de sesgo indica que el valor medio obtenido en las estimaciones es el mismo valor que se desea conocer. Está definido como:

$$BIAS = \frac{\sum [Log(S) - Log(I)]}{n} \times 100 \quad (20)$$

Coefficiente de correlación (r). Es un indicador de la existencia de relación lineal entre dos variables. Indica si los puntos tienen una tendencia a disponerse alineadamente (excluyendo rectas horizontales y verticales). Es adimensional, solo toma valores en [-1,1]. De acuerdo a la figura 16 a, si $r = 0$ las variables no están correlacionadas, la relación lineal perfecta se presenta si $r = \pm 1$. Cuanto mas cerca esté r de +1 (figura 16 b) ó de -1 (figura 16 c) mayor será el grado de relación lineal. El coeficiente de correlación se define por:

$$r = \frac{S_{xy}}{\sqrt{S_{xx} S_{yy}}} \quad (21)$$

Donde S_{xy} es la covarianza muestral y S_{xy} y S_{xx} son las desviaciones típicas muestrales de x y de y .

3.3.2 Implementación de rutinas para el proceso de comparación

Se diseñó una función que realizara la comparación entre los dos conjuntos de datos y que perteneciera al programa principal desarrollado para la obtención de los mismos.

Al ejecutar la opción COMPARAR del programa “*usuario*”, se despliega un cuadro de diálogo para que el usuario escriba el nombre del archivo que contiene los datos de clorofila a superficial suministrados por el laboratorio de química del CCCP. De acuerdo al diseño del programa, estos deben estar escritos en un editor de texto (con extensión *.txt*), a dos columnas, siendo la primera columna las estaciones biológicas (25 en total en el caso de cruceros ERFEN) ordenadas de menor a mayor, y en la segunda columna, los valores de concentración de clorofila a asociados a cada estación. En las estaciones que no se tenga valor de clorofila, se debe escribir “NaN”. No debe omitirse ninguna de las estaciones.

Seguido a esto, el programa despliega otro cuadro de diálogo para que el usuario escriba el nombre del archivo de texto que contiene los datos obtenidos del sensor satelital. Ya se vio que para ello, se ejecutan las tres primeras opciones del programa “*usuario*”, pero como este trabaja con una sola imagen y durante un crucero se hace muestreo durante mas de un día, se tiene mas de una imagen; por tanto, este mismo procedimiento ha de aplicarse a las imágenes que se tengan de los días de crucero en que hubo muestreo químico y biológico. De esta forma, el programa ha de ejecutarse n veces (siendo n el número de días de muestreo, o lo que es lo mismo, el número de imágenes), para generar los datos de concentración de clorofila.

El usuario del programa, ha de tener en cuenta la estación o estaciones monitoreadas durante cada día, para que a partir del listado de valores obtenidos de la opción OBTENER DATOS, escoja los valores (si los hubo) de las estaciones correspondientes al día de muestreo, y genere otro archivo de texto de forma similar al generado para los datos *in situ*, es decir, un archivo de dos columnas, en la primera la estación y en la segunda el valor de clorofila asociado a ella. En las estaciones donde no hubo dato se ha de colocar “NaN”. No debe omitirse ninguna de las estaciones. Ver ejemplo en la figura 18.

1	0.2583	1	NaN
2	0.4979	2	0.4830
3	NaN	3	0.6573
4	1.75	4	0.9250
5	NaN	5	NaN
6	0.8714	6	NaN
7	0.2781	7	NaN
8	1.5712	8	0.3812
9	0.9882	9	0.3030
10	NaN	10	NaN
11	0.3350	11	NaN
12	0.4037	12	0.2471
13	0.2719	13	NaN
14	0.1698	14	0.1550
15	0.1698	15	NaN

Figura 18. Ejemplo de archivos de texto que han de ser generados por el usuario con los datos *in situ* (a la izquierda) y satelitales (a la derecha), para que el programa pueda hacer la comparación. Nótese que tienen el mismo número de estaciones, y en la estación que no hay dato se escribe NaN.

Realizados estos dos pasos, ya se cuenta con dos archivos de texto, el primero de datos *in situ*, y el segundo con datos del sensor satelital. Así, el programa hace un llamado a la rutina que realiza el análisis estadístico; y que, a partir de los dos conjuntos de datos, calcula estadísticos de primer orden que permiten establecer la bondad de los resultados obtenidos por el sensor. Esta opción despliega una figura con el diagrama de dispersión de los datos, y lista los valores de RMSE, MAE, BIAS y coeficiente de correlación.

CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 METODOLOGÍA PARA LA OBTENCIÓN DE DATOS DE CONCENTRACIÓN DE CLOROFILA a EN LA CPC A PARTIR DE IMÁGENES SATELITALES DEL SENSOR MODIS-AQUA

La metodología desarrollada para obtener datos de concentración de clorofila a en la CPC a partir de imágenes satelitales, involucró una serie de procedimientos tanto de análisis como de implementación de rutinas software. A continuación se analizan los procedimientos involucrados y, en el Anexo C, se detallan las operaciones efectuadas para ello con el software *SeaDAS*.

4.1.1 Acondicionamiento de la imagen

Las imágenes se obtuvieron de acuerdo a lo detallado en el apartado 3.2.1 de este trabajo. Una vez obtenidas, fueron procesadas previamente con el *SeaDAS*, antes de poder derivar de ellas los valores de concentración de clorofila a .

Una vez desplegada la imagen en el *SeaDAS*, fue manipulada con una serie de herramientas denominadas funciones. En este trabajo, las funciones utilizadas fueron “*coastline*” y “*color LUT*”. La primera se empleó para definir la línea de costa y de esta forma se obtuvo información solamente del área en cuestión, lo cual puede ser interpretado como una detección de bordes, ya que el algoritmo buscó cambios bruscos en los niveles de radiancia, los cuales aparecieron en el límite entre la tierra y el océano. De otro lado, con la función “*color LUT*” se buscó una mejor representación de los datos, de tal forma que hubiera un mayor contraste en la imagen. Por ello fue aplicada una paleta de color denominada arco iris, en la cual los

mayores niveles de radiancia tienden al rojo y los menores al azul, permitiendo distinguir las diferentes concentraciones de clorofila.

Para obtener de forma precisa la información contenida en la imagen, fue necesario llevar esta última a la proyección adecuada, la cual para mapas topográficos e imágenes de satélite es la UTM. Esta corrección se hizo necesaria debido a que se requerían datos de puntos específicos a lo largo de la cuenca; y una distorsión de latitud o longitud arrojaría datos que no corresponderían al punto muestreado. Así mismo, se establecieron los límites de latitud y longitud correspondientes a la CPC.

Las imágenes generadas por los sensores satelitales son multiespectrales, y están contenidas en archivos que almacenan la reflectancia registrada por el sensor en determinadas longitudes de onda. Las imágenes generadas por el MODIS tienen un tamaño de 1354x2030 píxeles y fueron recortadas a un tamaño de 900x1000 a fin de que se adecuaran a la resolución espacial del sensor. La resolución espacial del MODIS para la banda en cuestión (absorción debida al fitoplancton) es de 1 Km, lo que corresponde a 0.009° por píxel; y este mismo tamaño de píxel (0.009) se mantuvo en la matriz cargada posteriormente en *Matlab* a partir de una imagen de 900x1000 y así no hubo distorsión de los datos. Además, fue mas conveniente trabajar con una imagen de menor tamaño y que solo tuviera información de la CPC, porque se ahorraron recursos computacionales al cargarla.

Una vez realizado el acondicionamiento con las operaciones descritas anteriormente, se obtuvo una imagen con el tamaño y proyección adecuados, en la cual se pudiera discriminar cualitativamente la concentración de clorofila *a* a partir de una paleta de color. La figura 19 muestra un ejemplo de ello.

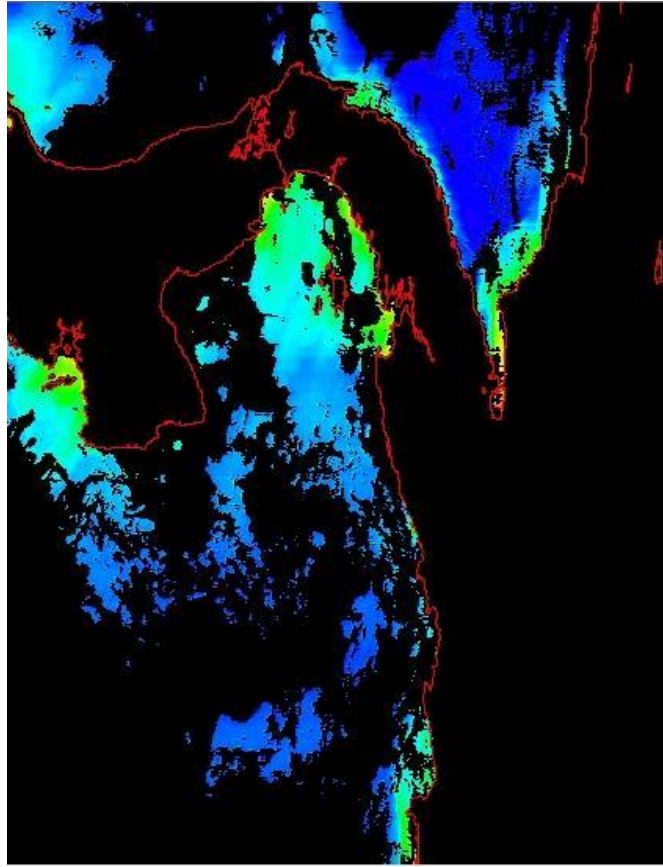


Figura 19. Imagen de la CPC obtenida en el *SeaDAS* después de hacer la corrección de la proyección, adecuar el tamaño de la imagen y aplicar una paleta de color.

De otro lado, como los archivos obtenidos del sensor satelital son HDF, contienen además de la imagen, información adicional; como el nombre del sensor, coordenadas, fecha y hora de la toma de la imagen, entre otros datos de carácter científico; por ello se aplicó una serie de operaciones a las imágenes para poder extraer solamente la información de interés para este trabajo.

Para la clorofila se generó un archivo HDF con datos de carácter geofísico y en formato de doble precisión, ya que ellos corresponden a la concentración de clorofila a en cada píxel de la imagen, estimada a partir de la reflectancia capturada por el sensor. De otro lado, para la información de coordenadas se generó otro archivo HDF con los datos de las posiciones de latitud y longitud de cada píxel de la imagen.

4.1.2 Obtención de datos

Como se requería mostrar la imagen y los datos de concentración de clorofila asociados a ella, así como realizar la validación con respecto a datos *in situ*, se ejecutó el programa “*usuario*” desarrollado en *Matlab*.

Una de las ventajas del programa, aparte de tener interfaz gráfica para hacerlo más amable al usuario, es que permitió cambiar la grilla de muestreo; es decir, las posiciones geográficas de las cuales se desea obtener la concentración del pigmento. Una opción fue la grilla ERFEN, que consta de 25 estaciones biológicas a lo largo de la CPC que son regularmente monitoreadas durante los cruceros oceanográficos; además, como también se hicieron muestreos alrededor de las islas Gorgona y Malpelo, el programa permitió incluir una nueva grilla. Adicionalmente, permitió importar un archivo de texto con los datos *in situ* para la grilla seleccionada y que fue utilizado para el posterior análisis estadístico, también implementado en *Matlab*.

4.2 RESULTADOS Y ANÁLISIS DE LA COMPARACIÓN

Las figuras 20 a 23 muestran la distribución y concentración de clorofila *a* observada durante algunos días de muestreo en la CPC a partir de las imágenes suministrada por el sensor satelital y obtenidas de la rutina implementada en *Matlab*, con las correspondientes estaciones biológicas indicadas gráficamente.

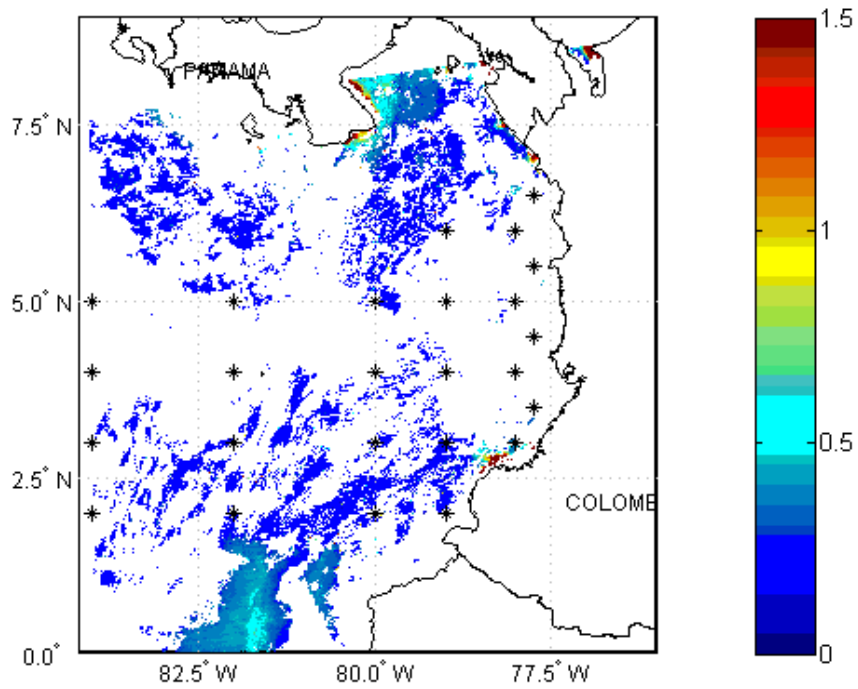


Figura 20. Clorofila *a* en la CPC (mg/m^3) en un día de muestreo. Fuente: sensor MODIS 16/07/05.

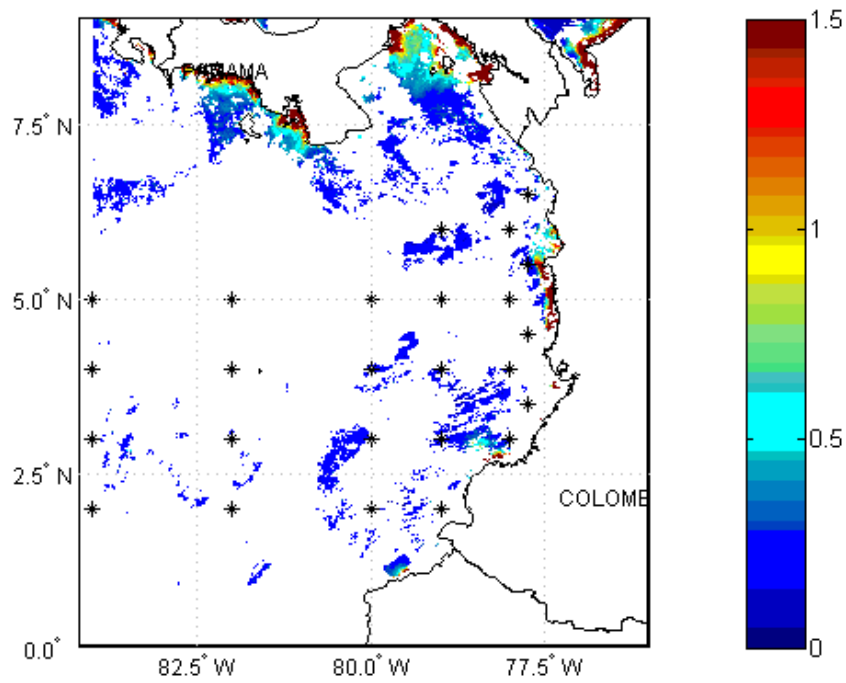


Figura 21. Clorofila *a* en la CPC (mg/m^3) en un día de muestreo. Fuente: sensor MODIS 21/07/05.

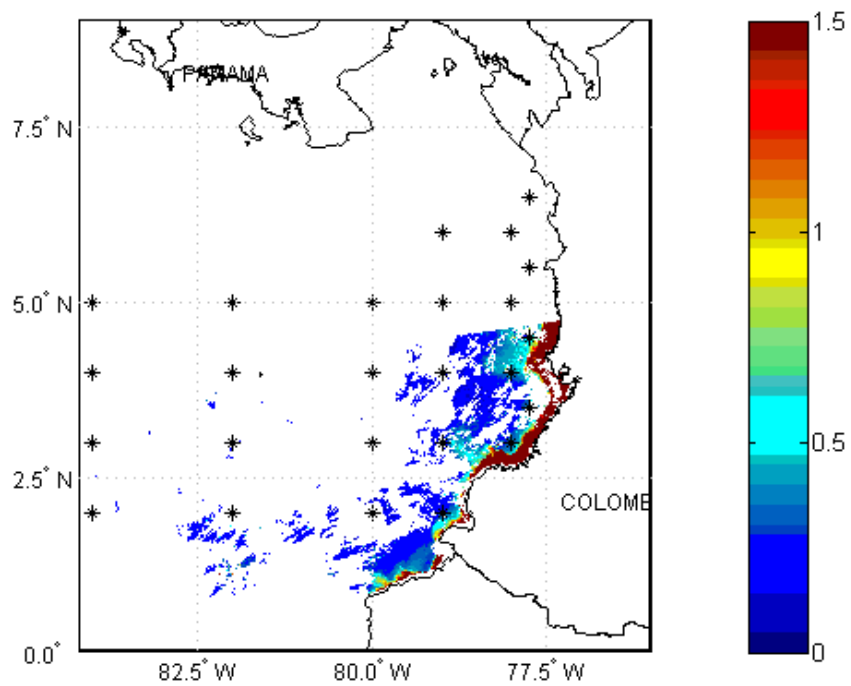


Figura 22. Clorofila *a* en la CPC (mg/m^3) en un día de muestreo. Fuente: sensor MODIS 23/07/05.

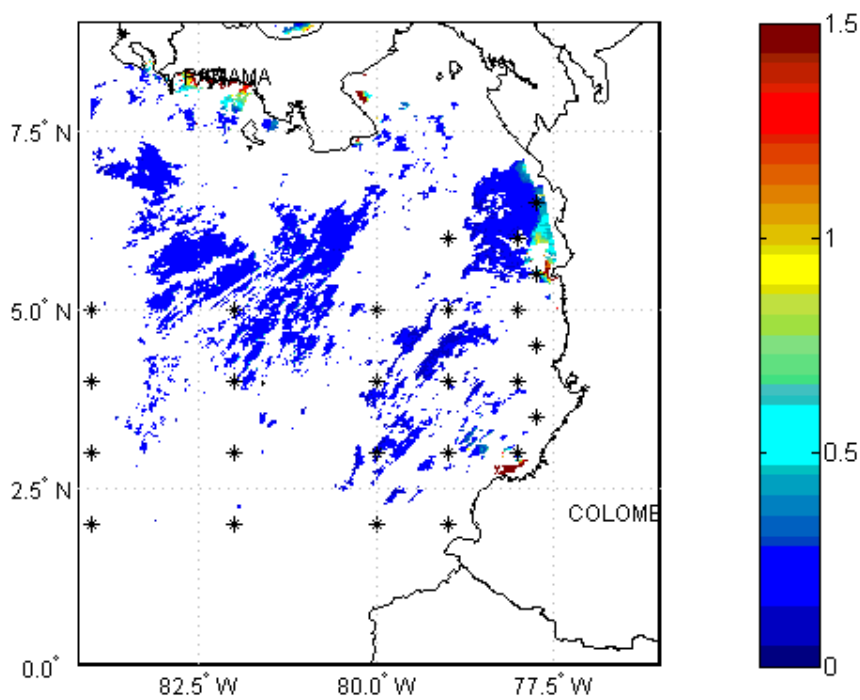


Figura 23. Clorofila *a* en la CPC (mg/m^3) en un día de muestreo. Fuente: sensor MODIS 27/07/05

Se observa que los valores más altos se distribuyen sobre la zona costera y alrededor de la isla Gorgona (figura 24), donde se encontró el valor más elevado de concentración de clorofila *a*, 0.9250 mg/m³, indicando mayor abundancia de fitoplancton. Desafortunadamente no se cuenta con datos de Malpelo, debido a las condiciones climáticas desfavorables que impidieron obtener imágenes de la zona.

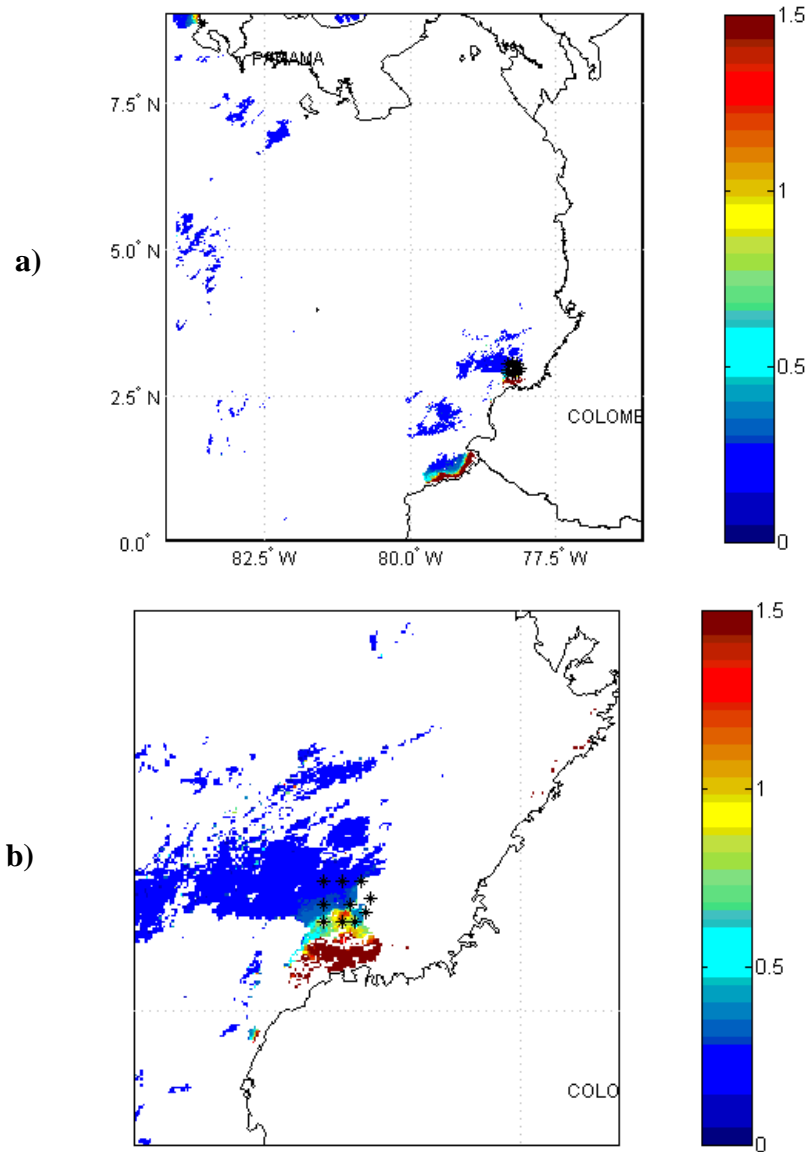


Figura 24. Clorofila *a* en la grilla Gorgona (mg/m³). En a) se aprecia la imagen completa de la CPC, y en b) una ampliación de la zona de interés. Fuente: sensor MODIS 10/07/05.

De las figuras 20 a 24 es notorio que no siempre se cuentan con datos de una estación determinada, puesto que la calidad de las imágenes depende de factores meteorológicos. La nubosidad en el área de estudio fue un factor determinante para la obtención de imágenes adecuadas de la CPC durante los días de muestreo.

De acuerdo a los datos meteorológicos tomados durante el crucero ERFEN XL realizado en julio de 2005, se presentó una humedad relativa promedio del 80%, y una cantidad de nubes promedio de 7/8, indicando que el cielo mantuvo cubierto y por lo tanto disminuyó la posibilidad de obtener imágenes completas y apropiadas de la CPC. Con respecto a las condiciones meteorológicas de los años 2003 y 2004 de los que también se obtuvo imágenes, la humedad relativa y la cobertura de nubes presentó valores similares. Los datos de las condiciones meteorológicas de años anteriores fueron suministrados por el área de Oceanografía Operacional del CCCP.

Los datos obtenidos de los años 2003, 2004 y 2005 del sensor MODIS e *in situ* son presentados en la tabla 3. Al aplicar el análisis estadístico al conjunto de datos, se obtuvo un coeficiente de correlación de 0.7 indicando relación lineal directa de buen ajuste entre las variables.

El RMSE obtenido para el conjunto de datos fue de 25.18%, lo que indica buen desempeño del conjunto de datos MODIS con respecto a los *in situ*, además, no supera el RMSE del 35% requerido para una mayor credibilidad en datos obtenidos de sensores satelitales [23], [24]. En cuanto al sesgo negativo del -12%, se advierte la tendencia a subestimar el valor de la clorofila obtenida satelitalmente. Hay que resaltar que la precisión de los dos métodos es del orden de las milésimas. Para el método espectrofotométrico es de 0.005 del valor de absorbancia para cada OD, pero para el método satelital no es fácilmente determinable puesto que depende de las bandas involucradas en la obtención de los datos, y por cada banda, su ancho es diferente.

Tabla 3. Datos obtenidos de concentración de clorofila *a in situ* y a partir del sensor MODIS en los años 2003, 2004 y 2005. Se especifica además, la fecha de muestreo, posición geográfica y profundidad de las estaciones monitoreadas.

Fecha de muestreo	Posición geográfica (latitud – longitud)	Valor in situ (mg/m³)	Valor MODIS (mg/m³)	Profundidad (m)
04/09/03	4.5°N - 77°W	1.3754	0.6522	1200
03/09/03	4°N - 78°W	0.1140	0.1293	1640
23/09/04	6.5°N - 77.75°W	0.1674	0.1774	1700
22/09/04	5.5°N - 77.75°W	0.6670	0.8195	1955
22/09/04	6°N - 78°W	0.6267	0.2593	3200
22/09/04	5°N - 78°W	0.7799	0.2386	3600
21/09/04	4°N - 78°W	0.4518	0.1496	1640
10/07/05	2°53' N - 78°12'09'' W	0.3938	0.6573	70
10/07/05	2°53'N - 78°15'05'' W	0.8117	0.9250	70
10/07/05	2°53'N - 78°20'W	1.2209	0.9061	110
10/07/05	2°57'51'' N - 78°13'37''W	0.3776	0.3162	50
10/07/05	2°57'51'' N - 78°20'W	0.3776	0.3030	550
10/07/05	3°03'N - 78°15'05'' W	0.2251	0.2471	600
10/07/05	3°03' N - 78°10'W	0.2583	0.2667	100
09/07/05	3°N - 79°W	0.5277	0.1906	1600
27/07/05	2°N - 80°W	0.3077	0.1992	3180
23/07/05	5°N - 84°W	0.1884	0.2067	3200

Un RMSE del 25%, indica un bajo error medio en el conjunto de datos, inferior al 64% obtenido de los resultados de validación del satélite AQUA suministrados por el sitio: http://seabas.gsfc.nasa.gov/cgi-bin/matchup_results.cgi (página oficial del sensor); además no supera el 35% propuesto por [23] y [24], los cuales señalan un límite para dar credibilidad a los datos obtenidos de sensores satelitales.

El diagrama de dispersión para los datos de la tabla 3 es mostrado en la figura 25, e indica una buena correspondencia entre los dos conjuntos de datos.

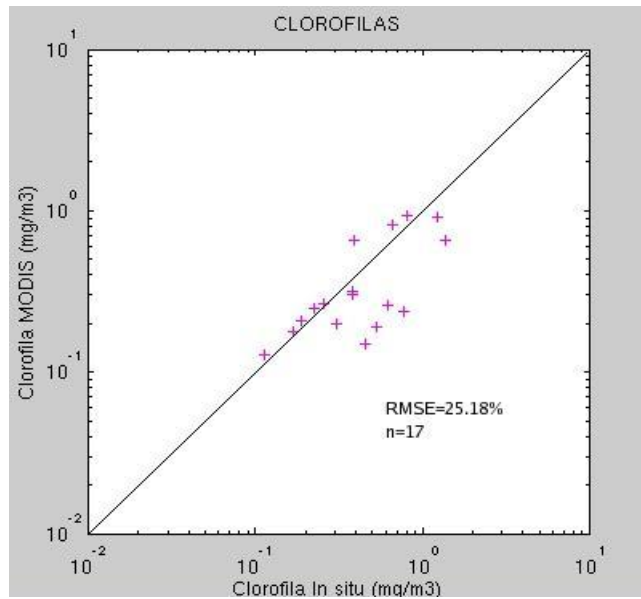


Figura 25. Diagrama de dispersión de los datos de clorofila *a* MODIS / In situ para un conjunto de 17 observaciones en la CPC.

Hay que tener en cuenta que los sensores de color del océano miden la radiancia emergente en un número determinado de longitudes de onda en el visible y a partir de esta información se infiere la concentración de pigmentos en el fitoplancton en las capas superficiales del océano, es decir, para ser una estimación de la concentración de clorofila y no una medida directa, el resultado es bueno, y es apropiado para describir la distribución espacial del fitoplancton en la CPC. Información similar se puede obtener del MAE del 18.7%, ya que, aunque lo ideal es 0%, un error en la predicción cercano al 20% es muy apropiado para determinar las bondades de las imágenes satelitales con respecto a los datos *in situ*.

Adicionalmente, fue aplicada la metodología descrita anteriormente al conjunto de datos obtenidos en la isla Gorgona, encontrándose la mejor relación entre los conjuntos de datos *in situ* y satelital. Los resultados se muestran en la tabla 4 y el diagrama de dispersión en la figura 26.

Tabla 4. Resultados estadísticos en Gorgona, para un conjunto de 7 observaciones.

RMSE	MAE	BIAS	r
11.01%	8.7%	-0.3%	0.89

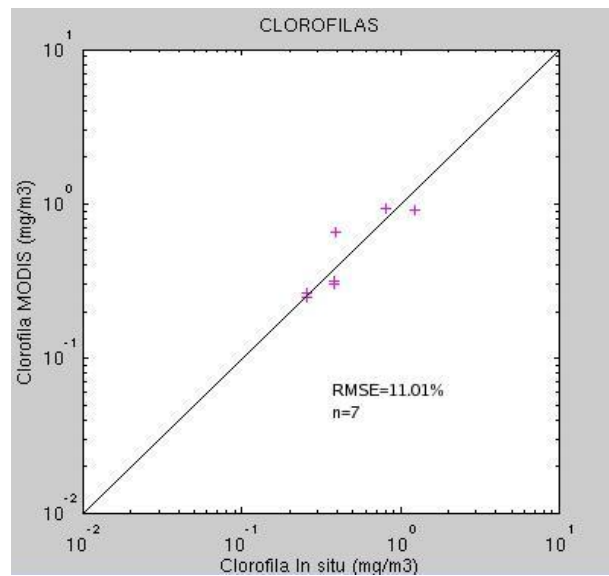


Figura 26. Diagrama de dispersión obtenido para la isla Gorgona.

Estos resultados están de acuerdo con estudios recientes hechos con el sensor satelital *SeaWiFS* [25], un sensor de color similar al MODIS y realizados en diferentes zonas a nivel mundial, los cuales han encontrado un buen desempeño de los algoritmos empleados por los sensores satelitales de color del océano en el Pacífico ecuatorial, encontrando un RMSE de 16.8%, y un r de 0.7.

4.3 ANÁLISIS DE LOS FACTORES QUE INFLUYEN EN LA FIABILIDAD DE LOS DATOS OBTENIDOS A PARTIR DE IMÁGENES SATELITALES DEL COLOR DEL OCÉANO

Los resultados obtenidos a partir de las imágenes satelitales, están influenciados por ciertos factores que han de tenerse en cuenta para determinar los alcances

tecnológicos de las mismas con respecto a los datos *in situ*, y que determinan la existencia o no de imágenes apropiadas en los días de muestreo; por lo cual hay que tener en cuenta las propiedades ópticas del agua en la CPC, la clasificación de las aguas en costeras y oceánicas, la diferenciación entre sensores, así como las condiciones meteorológicas de la CPC.

4.3.1 Propiedades ópticas del agua en la CPC

Hay que tener en cuenta que, a la altura que se encuentra el sensor, más del 80% de la luz que alcanza el detector está influenciada por la atmósfera [26], y pequeños errores en la estimación de la contribución atmosférica, pueden causar sesgos significativos en la estimación de la contribución del agua. Esto lleva a analizar que el sesgo negativo encontrado en los resultados de la CPC puede ser atribuido a las condiciones atmosféricas reinantes en el área y que no son iguales a las presentes en otras regiones del planeta, en donde los algoritmos indican sobreestimación de la clorofila obtenida satelitalmente, de aquí que sea necesario identificar la contribución debida a la atmósfera para la señal recuperada por el sensor en esta región del planeta.

De otro lado, existen factores que influyen en la radiancia emergente:

- Esparcimiento hacia arriba por el material orgánico suspendido, el cual puede provenir de la descarga de ríos sobre la zona costera de la CPC.
- Esparcimiento hacia arriba por las moléculas de agua.
- Absorción debida a la sustancia amarilla, la cual es el resultado de la contaminación orgánica en las aguas de la CPC, producto de los desechos de los puertos y la descomposición del material orgánico de la zona.
- Reflexión en el fondo, para las zonas en las cuales el fondo es detectable desde la superficie.
- Esparcimiento hacia arriba por el fitoplancton, el cual es el componente del agua que está bajo estudio en el presente trabajo.

Se puede analizar que la absorción debida a cualquier de las primeras componentes o por el fondo, disminuye la señal de radiancia emergente. Además, la luz proveniente del sol, puede ser esparcida por los constituyentes atmosféricos, antes de alcanzar la superficie del mar. Similarmente, la luz que abandona el agua, puede ser esparcida por la atmósfera en su camino hacia el sensor. Es por ello, que para obtener la señal que mejor suministre información sobre la estimación de concentración de pigmentos fitoplanctónicos en la CPC se requiere del estudio y determinación de cada una de las componentes que afectan la señal de radiancia emergente, lo cual se plantea como el paso siguiente para el fortalecimiento de este trabajo a largo plazo.

La interpretación cuantitativa de la señal sensada remotamente en términos de los constituyentes del agua requiere que se identifiquen y aislen los efectos de la señal que se levanta a partir de las variaciones en el campo de luz incidente. Por lo tanto, un paso necesario en el modelado del color del océano, expresa la reflectancia (que es una propiedad aparente) en términos de las propiedades ópticas inherentes, las cuales son independientes de las variaciones de la distribución angular del campo de luz, y solamente están determinadas por la naturaleza y cantidad de las sustancias presentes en el agua. Como estas propiedades son referidas a pequeñas muestras del medio, podrían hacerse monitoreos en la zona y llevar las muestras al laboratorio para ser medidas. El coeficiente de absorción a varias longitudes de onda puede ser medido con espectrofotómetro; mientras que el coeficiente de dispersión y la VSF pueden ser medidas con un fotómetro dispersor de luz.

De otro lado, las propiedades ópticas aparentes no son propiedades del medio acuático como tal, aunque de cerca dependen de la naturaleza del medio. En realidad, son propiedades del campo de luz que, bajo la radiación solar incidente, se establecen dentro del cuerpo de agua. Estas propiedades son inseparables del cuerpo de agua en sí. No pueden ser medidas en muestras, ya que el campo de luz que yace en una pequeña alícuota fuera del océano es bastante diferente al existente dentro del océano en sí.

No obstante, aunque las propiedades aparentes son propiedades del campo de luz total contenido dentro del cuerpo de agua, sus valores están determinados por las propiedades inherentes. Las propiedades ópticas aparentes del cuerpo de agua son el resultado, el producto, de la interacción entre el flujo solar incidente y las propiedades ópticas inherentes del agua. Es por ello que la reflectancia, podría ser expresada en términos del coeficiente de absorción, de esparcimiento o de la función volumen de esparcimiento; con lo cual se podría obtener la información característica de las aguas locales y así desarrollar algoritmos propios para la obtención de pigmentos fitoplanctónicos en la CPC.

Existen otros factores que influyen en la luz esparcida hacia arriba por el fitoplancton. Recientes reportes [27],[28] y [29], indican la importancia del esparcimiento por pequeños organismos tales como virus. Otra posible explicación a las señales espurias es que la fuente pueden ser partículas terrígenas llevadas al océano por ríos y vientos [30]. Recientes trabajos [31], [32], también han hablado de la importancia del posible esparcimiento por burbujas de agua en el océano. En la actualidad, no se conoce cual de las componentes de esparcimiento hacia arriba debería ser parametrizada de forma diferente en aguas del Caso II para la CPC, ya que los modelos usados en la actualidad, tratan similarmente los dos casos de aguas.

4.3.2 Análisis de aguas Caso I y Caso II en la CPC

Para un análisis adecuado de los resultados obtenidos tras la comparación, se debe tener en cuenta la clasificación de las aguas oceánicas propuesta por *Morel & Prieur* en 1977 [33]: aguas de Caso I y aguas de Caso II, ya que no poseen las mismas propiedades ópticas y composición, siendo más complejas las de Caso II. Este tipo de aguas es el que se encuentra en regiones costeras y lagos, y en las cuales, las variaciones en las propiedades ópticas no solo dependen del fitoplancton, sino también de las partículas inorgánicas en suspensión y de la sustancia amarilla (materia orgánica disuelta).

A la fecha, los algoritmos se han centrado en aguas Caso I y es bien conocido que estos ya no funcionan en aguas Caso II en cuanto a determinación de clorofila [34].

Además, aunque las aguas Caso II corresponden a una pequeña fracción del cubrimiento total del océano, es una importante fracción, ya que corresponde a aguas costeras con un importante significado económico, ecológico y social.

Debido a lo anterior, se realizó una división en el conjunto de estaciones monitoreadas, siendo el punto de referencia la profundidad de la zona. De acuerdo a *Gregg & Casey* [25], se agruparon como aguas de Caso I todas aquellas estaciones con profundidad mayor a 200 m, y como Caso II las menores. Para poder llevar a cabo esta clasificación, se utilizaron los datos de profundidad de cada estación monitoreada obtenidos durante las expediciones oceanográficas (Ver tabla 3). Así, la rutina desarrollada en *Matlab* para el análisis estadístico fue implementada en los dos conjuntos de datos, obteniendo como resultados los mostrados en la tabla 5. Los diagramas de dispersión son mostrados en la figura 27.

Cabe aclarar que de acuerdo a la tabla 3, cinco estaciones tienen profundidad menor a 200 m y por tanto se ubican en Caso II, pero debido a que la estación monitoreada con fecha de 04/09/03 y que tiene profundidad de 1200 m tiene fuerte contribución de sedimentos ya que se encuentra en cercanías del río San Juan (Chocó), fue clasificada como de Caso II, ya que las propiedades ópticas del agua en esta posición geográfica se ven influenciadas por sedimentos además de la contribución debida al fitoplancton.

Tabla 5. Comparación de resultados estadísticos para aguas Caso I y Caso II, donde n es el número de datos.

TIPO DE AGUA	RMSE	MAE	BIAS	r
Aguas Caso I (n=11)	28.55%	21.40%	-16%	0.53
Aguas Caso II (n=6)	17.35%	13.73%	-4%	0.78

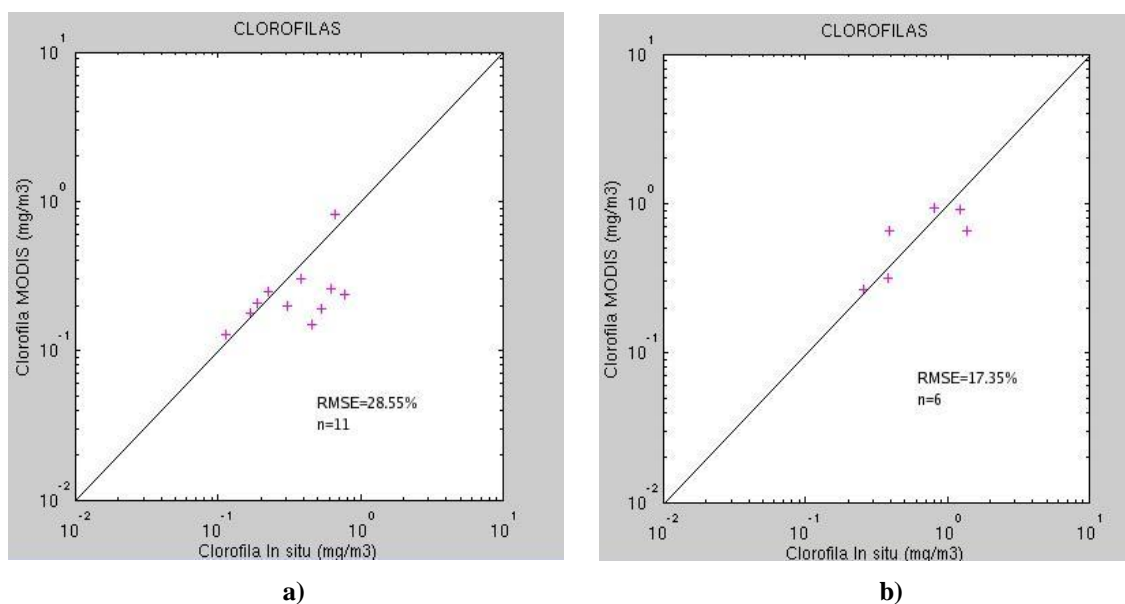


Figura 27. Diagramas de dispersión obtenidos para aguas Caso I (a) y Caso II (b).

Estos resultados evidencian la diferencia existente entre los dos tipos de agua. Los valores encontrados se encuentran por debajo del límite sugerido del 35%, aunque, contrario a lo encontrado en los estudios realizados del color del océano, se obtuvo un mejor ajuste para aguas Caso II, donde la señal recuperada por el sensor no solo es debida al fitoplancton. Hay que tener en cuenta que en el presente trabajo se contaron con pocos datos y que para el fortalecimiento del mismo se requieren más observaciones.

En este punto se debe analizar lo siguiente: la mayoría de estaciones clasificadas como Caso II pertenecen a Gorgona, donde se obtuvo el mejor ajuste. La diferencia entre los datos obtenidos en la isla, con respecto a los obtenidos en la cuenca, radica en que en la isla Gorgona, el muestreo solo se realizó durante un día (fecha de muestro Gorgona: 10/07/05) y por tanto los valores obtenidos a partir del sensor satelital corresponden a los de la misma imagen; es decir, aunque existen factores que limitan la señal proveniente del fitoplancton y recuperada por el sensor, todos los datos cuentan con el mismo error. Mientras que los datos obtenidos para la CPC, fueron obtenidos en diferentes días y en diferentes años, lo que significa que no se

puede garantizar que la calidad de las imágenes fuera la misma en todos los días de muestreo. Para ello, hay que tener en cuenta que las condiciones climáticas reinantes durante los días de muestreo, son diferentes durante todo el crucero.

4.3.3 Comparación entre sensores

Para realizar la comparación, se tienen datos *in situ* obtenidos a partir de espectrofotómetro, y datos satelitales obtenidos de espectrorradiómetro. Ambos son métodos ópticos de análisis, ya que miden la radiación electromagnética que emana de la materia o que interacciona con ella. La característica común a ambos es que se miden espectros y además, que estos espectros son debidos a transiciones entre estados de energía característicos.

El espectrofotómetro incluye cinco componentes principales: una fuente de radiación, un recipiente que contiene la muestra, un dispositivo que aísla una región restringida del espectro, un detector y un sistema de lectura o visualización.

El espectrorradiómetro por su parte, no cuenta con los dos primeros componentes, puesto que capta la señal proveniente una vez la radiación electromagnética ha interactuado con la materia, es decir, la radiación del sol reflejada por el fitoplancton hacia la atmósfera.

El espectrofotómetro usado es un instrumento de doble haz con un rango de longitudes de onda que abarca de 190 a 900 nm, con una incertidumbre de ± 0.3 nm y controlado electrónicamente por computador. Su sistema óptico consta de una rejilla holográfica que hace las veces de selector de longitud de onda. Tiene dos fuentes, según la región del espectro donde vaya a operar: lámpara de deuterio para la región ultravioleta, y para las mediciones por encima de los 350 nm usa lámpara de filamento incandescente (tungsteno). Tiene un chopper electro-óptico que divide el rayo de luz en dos: rayo de referencia y rayo muestra, de ahí el nombre de

instrumento de doble haz, los cuales después de interactuar con la muestra de referencia y muestra de trabajo, inciden sobre un tubo fotomultiplicador, que hace las veces de detector.

De otro lado, el espectrorradiómetro MODIS cuenta con 3 divisores de haz dicróicos que dividen la radiación reflejada del objeto en cuatro regiones espectrales: visible, infrarrojo cercano, ondas infrarrojas cortas y medias y ondas infrarrojas largas.

En cuanto a resolución radiométrica y espectral, el MODIS supera al espectrofotómetro, además de contar con un excelente sistema de calibración a bordo que incluye un cuerpo negro y un difusor solar. Tecnológicamente hablando, el MODIS posee un nivel sin precedentes de fidelidad radiométrica y estabilidad sobre un amplio rango espectral, lo cual lo convierte en un prodigioso sensor del color del océano, pero hay que tener en cuenta otros aspectos relevantes a las medidas realizadas por este sensor, entre las que se encuentran su resolución espacial y temporal.

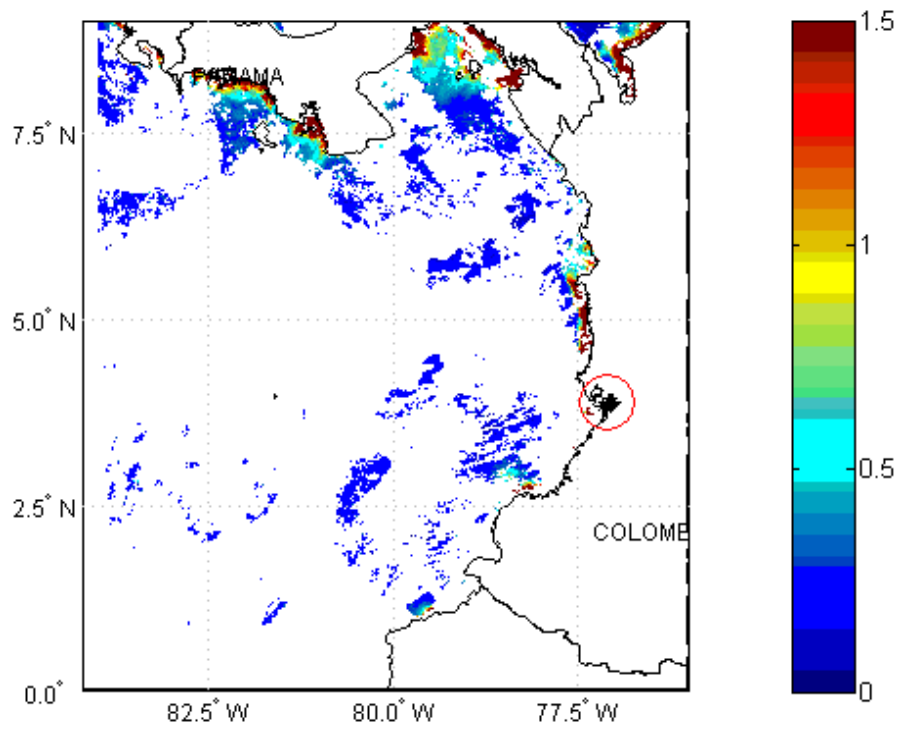
El MODIS tiene resolución espacial de 1 Km (para las bandas de interés en el presente trabajo), lo cual no es apropiado para aguas costeras donde la composición de la columna de agua puede cambiar drásticamente en esta distancia y más aún, en una cuenca como la CPC que está influenciada por la descarga de ríos y contaminación en los puertos.

Este fue el caso que se presentó en el muestreo realizado alrededor de la isla Cascajal (Buenaventura), aunque no estaba incluido dentro de las grillas del presente trabajo. Aprovechando que se obtuvieron datos *in situ*, se descargó la imagen satelital del día de muestreo y tras aplicar la metodología presentada en este trabajo, se encontró que toda la grilla quedó contenida dentro del mismo píxel (aunque sin dato), debido a que entre una estación y otra, había una distancia muy por debajo de 1 Km. Los resultados son mostrados en la tabla 6 y la imagen obtenida se muestra en la figura 28. Debido a que no se contó con los dos conjuntos de datos, los resultados obtenidos

en Buenaventura no fueron tomados en cuenta para los resultados de validación del presente trabajo.

Tabla 6. Datos in situ y MODIS obtenidos en la grilla realizada de la isla Cascajal (Buenaventura).

FECHA DE MUESTREO	POSICIÓN GEOGRÁFICA (latitud N – longitud W)	VALOR IN SITU (mg/m ³)	VALOR MODIS (mg/m ³)
21/07/05	3.8880 - 77.0470	5.8830	NaN
21/07/05	3.8930 - 77.0600	2.0619	NaN
21/07/05	3.8730 - 77.0670	2.1073	NaN
21/07/05	3.8880 - 77.0810	3.6305	NaN
21/07/05	3.8930 - 77.0690	3.2623	NaN
21/07/05	3.8420 - 77.1720	2.6844	NaN
21/07/05	3.8960 - 77.0710	3.3081	NaN



a)



b)

Figura 28. Clorofila *a* en la CPC (mg/m^3) el día de muestreo en Buenaventura. En a) se aprecia la imagen completa de la CPC y en b) una ampliación de la zona de interés.

Fuente: sensor MODIS 21/07/05

A partir de los datos *in situ* obtenidos en la grilla de Buenaventura, se observó como las propiedades ópticas de las aguas costeras varían considerablemente en el espacio, pero así mismo pueden hacerlo en el tiempo. Existe un error asociado con cada medida *in situ* vs satelital, pero este es mucho mayor en aguas costeras ya que existe un error mayor asociado con la correlación espacio-temporal de las medidas. Es por esto, que también ha de tenerse en cuenta la hora de la medición *in situ* y de paso del satélite. La resolución temporal del MODIS es de 1 día, y para hacer más fiable la comparación, es esencial tomar los datos *in situ* lo más cerca posible a la hora de paso del satélite. Aún, una diferencia de una hora podría invalidar la comparación si ocurren variaciones considerables de las aguas locales [34].

Debido a ello, se realizó una comparación entre las horas de muestreo y de paso del satélite para el conjunto global de datos, obteniéndose como resultado una diferencia promedio de 8 horas; lo cual lleva a mencionar que la no correlación temporal en la captura de datos no influyó considerablemente en los resultados obtenidos. Cabe mencionar que este factor se escapa del alcance del investigador, puesto que el satélite tiene su órbita definida y calibrada para escanear determinado punto de la tierra a una hora fija, y por otro lado, durante un muestreo, la hora de llegada a una estación depende de la velocidad del buque y de las condiciones atmosféricas

presentes en la zona. Para trabajos futuros, se sugiere que una vez monitoreada la zona, se escojan para el análisis de comparación los puntos que presenten buena correlación temporal entre la hora de muestreo y el paso del satélite.

4.3.4 Condiciones climáticas que limitan la calidad de las imágenes e influencia del fondo

Factores meteorológicos que afectan la zona de estudio

Es evidente que el excesivo aire cálido y húmedo tropical, reinante en toda el área de la CPC, favorece la rápida formación de abundante nubosidad, de la cual se desprenden los altos valores de precipitación registrados. Se establece una media anual de humedad relativa para esta área de 89% [6]. No se exhiben valores medios de nubosidad para la zona costera del Pacífico colombiano debido a que estos valores muestran una constante durante la mayor parte del año que se caracteriza por presentar coberturas de nubosidad entre 6/8 y 8/8, permitiendo determinar que los cielos permanecen entre semicubiertos y cubiertos.

La nubosidad en el área de estudio fue un factor determinante para la obtención de imágenes adecuadas de la CPC durante los días de muestreo. De acuerdo a los datos meteorológicos tomados durante los mismos, se presentó una humedad relativa promedio del 80%, y una cantidad de nubes promedio de 7, indicando que el cielo mantuvo cubierto y por lo tanto disminuyó la posibilidad de obtener imágenes completas y apropiadas de la CPC.

Influencia del fondo

En aguas poco profundas, los sistemas de sensado remoto captan la radiación

proveniente del fondo. La máxima profundidad desde la cual el sensor recibe una señal significativa varía como función de la longitud de onda y de la claridad del agua. En aguas claras, el fondo es detectable hasta los 30 m sobre un estrecho rango espectral centrado en los 490 nm [34]. La variación de la atenuación espectral con la profundidad es una herramienta clave para usar los datos del sensado remoto en la determinación de batimetrías y características del fondo. De acuerdo a la grilla realizada, las menores profundidades se obtuvieron alrededor de la isla Gorgona, siendo la menor de ellas 45 m.

Otro indicador es la transparencia del agua, que en las estaciones propuestas fue determinada con un instrumento oceanográfico llamado “Disco Secci”. Este es un disco de 30 cm de diámetro sujeto a un cabo medrado y que posee una parte de color negra y otra parte de color blanca. El disco se introduce en el agua, hasta perderlo de vista, y así se toma la transparencia de la misma (figura 29). El disco Secci fue sumergido en todas las estaciones monitoreadas; para la estación menos profunda el resultado fue 7 m para negro y 10 m para blanco, indicando que las aguas eran claras.

Lo anterior indica que, de acuerdo a las profundidades de las estaciones y a la claridad de las aguas, se puede descartar la contribución de la reflexión en el fondo para la señal captada por el sensor.

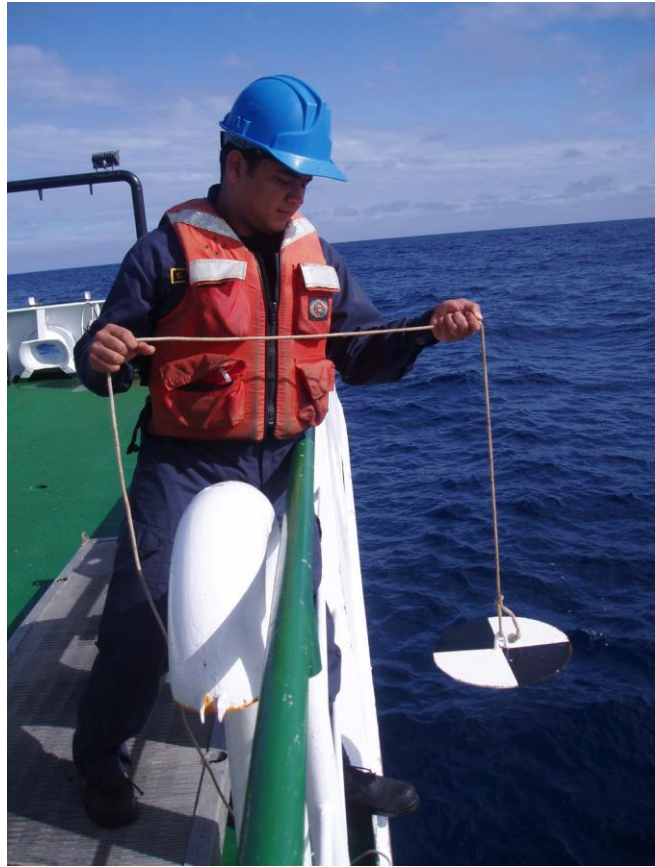


Figura 29. Lanzamiento de disco Secci durante el crucero ERFEN XL para determinar la claridad del agua.

CONCLUSIONES

Con la llegada de la era espacial y el desarrollo de la tecnología satelital orientada a la observación del sistema tierra-océano, se abrió una ventana de exploración nunca antes lograda por los métodos tradicionales de investigación oceanográfica, enriqueciendo el método tradicional de monitoreo *in situ*. Este trabajo representa un primer esfuerzo por comprender la dinámica marina en la Cuenca Pacífica Colombiana a partir de sensores satelitales del color del océano.

Se evaluó el desempeño de los datos obtenidos del sensor satelital MODIS para determinar la concentración de clorofila *a* en la CPC, obteniéndose un coeficiente de correlación de 0.7 con respecto a datos *in situ*, lo cual indica alta correlación entre los datos. El RMSE obtenido del 25% conlleva a dar credibilidad a los datos obtenidos del sensor MODIS. El BIAS negativo indica una subestimación de la concentración de clorofila producto del MODIS, por lo cual se hace necesario desarrollar algoritmos locales bio-ópticos para mejorar los resultados obtenidos del conjunto de datos satelitales. En general, la correlación entre las variables analizadas es buena, aunque para obtener resultados más confiables, es necesario contar con un número mayor de pares de datos.

Las zonas más productivas se encontraron a lo largo de los bordes continentales y alrededor de la isla Gorgona, donde se exhibieron los valores más altos de concentración de clorofila *a*. Los altos valores encontrados alrededor de Gorgona pueden ser atribuidos al “efecto de masa”, ya que se presenta una alta producción biológica cerca de islas o zonas ricas en nutrientes. Además, aunque en Gorgona se encontraron los valores más altos, son subestimados con respecto a los datos obtenidos *in situ*.

Con respecto a aguas del Caso II, se encontró que algunos puntos de la zona costera de la CPC están influenciados por desembocaduras de ríos que vierten sus aguas al océano Pacífico, generando una contribución de materia inorgánica debido a los sedimentos que arrastran. Similarmente, debido a que en otros puntos de la CPC se encuentran puertos de gran actividad comercial, en los cuales se generan descargas al mar tanto de desechos orgánicos como de contaminantes, se puede alterar la composición de la columna de agua. Este fue el caso presentado en Buenaventura, y a partir del cual se advierte como limitación del MODIS su resolución espacial, ya que condiciona la obtención de datos satelitales a grandes extensiones de agua, impidiendo realizar seguimientos en zonas mas reducidas tales como ríos o lagos.

Se encontró que las aguas costeras son generalmente menos transparentes que las de alta mar debido al aporte fluvial de materiales terrígenos y de nutrientes, que en las inmediaciones de las desembocaduras de los ríos pueden generar proliferación de algas, además, las corrientes costeras o el oleaje sobre el litoral contribuyen asimismo al aumento de la turbidez, resuspendiendo los sedimentos.

Las condiciones climáticas de la CPC constituyeron una limitación para la aplicación del método de obtención de datos de clorofila a partir de imágenes satelitales, ya que no permitieron contar con imágenes apropiadas durante todos los días de muestreo, impidiendo así, dar continuidad temporal a las observaciones remotas de nuestra cuenca. Este fue el caso específico del monitoreo realizado alrededor de la isla Malpelo, puesto que aunque se obtuvieron datos *in situ*, no se obtuvieron imágenes apropiadas de esta zona debido a la presencia de nubes.

En general, los resultados muestran que para las aguas de la CPC, se requieren algoritmos que involucren todas las características propias de esta cuenca; como lo son la desembocadura de ríos, influencia de zonas portuarias y efectos atmosféricos, que contribuyen notablemente en la recuperación de la señal proveniente de la superficie del mar y en la calidad de las imágenes obtenidas del sensor. Similarmente, se requiere realizar un análisis profundo de las propiedades ópticas de

la columna de agua de la CPC, de un método de determinación *in situ* adicional a la espectrofotometría y del uso de datos provenientes de otros sensores del color del océano, tal que se enriquezca el proceso de validación.

Finalmente, este trabajo motivó a revisar el estado actual de los estudios oceánicos en Colombia y muestra la importancia de contar con un monitoreo constante de nuestra cuenca, en esta ocasión, haciendo uso de la tecnología satelital; en otras palabras, la aplicación de la física y la ingeniería a la solución de problemas concernientes a otros campos del saber.

RECOMENDACIONES

Estudios recientes de validación usando lidar aéreo [35], muestran cómo aprovechando láser de 355 nm, inducen la fluorescencia para determinar el coeficiente de absorción de la materia orgánica disuelta, y a partir de relaciones empíricas, determinar la abundancia de fitoplancton. Esto lleva a sugerir otro método de validación para los datos satelitales: análisis de fluorimetría para los datos *in situ*, el cual cuenta con la ventaja de que, en general, es de cinco a diez veces más sensible que el método espectrofotométrico [36], pero que a la fecha, no ha podido llevarse a cabo en el laboratorio de química del CCCP debido a que para implementarse, se requiere un estándar de clorofila *a* con el que no se cuenta debido a su elevado costo. El límite de detección de este método depende del volumen de agua filtrado y de la sensibilidad del fluorómetro.

Así mismo se recomienda dar continuidad al proceso de determinar la concentración de clorofila a partir de imágenes satelitales, ya que para ello se desarrolló la metodología. Esto con el fin de obtener una serie de tiempo de observaciones remotas de nuestra cuenca, y, aprovechando los datos *in situ* obtenidos en los cruceros oceanográficos, aplicar el proceso de comparación.

Finalmente, se recomienda aplicar la oceanografía satelital a la determinación de otros parámetros oceanográficos que amplíen la caracterización de la CPC como lo es la temperatura superficial del mar; puesto que los sensores remotos plantean un método alternativo al tradicional de monitoreo *in situ*, y mediante el cual se enriquece y amplía la investigación oceanográfica en nuestro país.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Sierk, B., Bracher, A., Richter, A., Vountas, M., Dinter, T., Burrows, J.P. 2004. Determination of phytoplankton concentrations from space-borne spectroscopic measurements. *GAYANA. International journal of biodiversity, oceanology and conservation*. Tomo II. 532-539.
- [2] Dupouy, C., Neveux, J., le Boutellier, A. 2004. Spatial and temporal analysis of SeaWiFS chlorophyll in the south tropical pacific ocean. *GAYANA. International journal of biodiversity, oceanology and conservation*. Tomo I. 161-166.
- [3] Wooster, W. 1959. Oceanographic observations in the Panama Bight. Askoy Expedition, 1941. *Amer. Mus. Nat. Hist. Bull.* 118(3), 115-151.
- [4] Forsbergh, E. D. 1969. Estudio sobre la climatología, oceanografía y pesquería del Panamá Bight. *Bol. Inter-amer. Trop. Tuna Comm.* 14(2), 260-285.
- [5] Wyrski, K. 1965. Oceanographic observations in the Panamá Bight. Askoy Expedition, 1941. *Amer. Mus. Nat. Hist., Bull.* 118(3), 113-152.
- [6] CCCP. 2004. *Compilación Oceanográfica de la Cuenca Pacífica Colombiana*.
- [7] Eslava, J. 1994. *Climatología del Pacífico Colombiano*. Academia Colombiana de Ciencias Geofísicas. Colección Eratóstenes No. 1. Bogotá, Colombia.
- [8] Trojer, H. 1958. Meteorología y climatología de la vertiente del Pacífico colombiano. *Rev. Acad. Colom. Ci. Ex. Fis. Nat.*, 10(40), 199-219.

[9] Bubnov, V. A. 1990. Circulación de las aguas de la zona ecuatorial del océano Mundial. Hidrometeoizdat. Leningrado. 210p.

[10] Carlsson, T. 1993. Nitrogen bound to humic matter of terrestrial origin - A nitrogen pool coastal phytoplankton. Mar. Ecol. Prog. Ser. Vol 97, 105-116.

[11] Parsons, T. R. 1984. Biological oceanographic processes. Pergamon Press. 3^o Edition. England. 330 p.

[12] CCCP. 2004. Caracterización para la determinación de la jurisdicción de la DIMAR en el Litoral Pacífico Colombiano. Tomo IV de V.

[13] CCCP. 2004. Manual de cruceros oceanográficos.

[14] Gordon, H.R. 1994. Modeling and simulating radiative transfer in the ocean. Ocean Optics. Oxford University Press. 283 p.

[15] Moiseev, P. A. 1989. Recursos biológicos del océano mundial. Agropromizdat, Moscú, 367 p.

[16] Avaria, S. 1984. Cambios en la composición y biomasa del fitoplancton marino del norte de Chile durante el fenómeno El Niño, 1982-1983. Rev. Com. Perm. Pacífico Sur. (15), 303-309.

[17] MODIS. Home page.

URL: <http://www.modis.gsfc.nasa.gov.html>

[18] Esaias, W.E., Abbott, M.R., Barton, I., Brown, O.B., Campbell, J.W., Carder, K.L., Clark, D.K., Evans, R.H., Hoge, F.E., Gordon, H.R., Balch, W.M., Letelier, R., Minnett, P.J. 1998. An Overview of MODIS Capabilities for Ocean Science

Observations. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 36, 1250–1265.

[19] Yuras, G., Ulloa, O., Letelier, R., Pizarro, O. 2004. On the annual cycle of satellite chlorophyll off Chile. *GAYANA. International journal of biodiversity, oceanology and conservation.* Tomo II. 611-614.

[20] Strickland, J. H. D., Parson, T. R. 1972. *A Practical Handbook of Seawater Analysis.* Fisheries research Board of Canada. 2a. Ed. Ottawa.

[21] CCCP. 2004. *Procedimientos técnicos Parte I. Laboratorio de Química.*

[22] Campbell, J.W. 1995. The lognormal distribution as a model for bio-optical variability in the sea. *Journal of Geophysical Research*, 100(C7), 13237-13254.

[23] Eplee, R. E., Robinson, W. D., Bailey, S. W., Clark, D. K., Werdell, P. J., Wang, M., Barnes, R. A., & McClain, C. R. 2001. Calibration of SeaWiFS: II. Vicarious techniques. *Applied Optics*, 40(36), 6701– 6718.

[24] Hooker, S. B., McClain, C. R. 2000. The calibration and validation of SeaWiFS data. *Progress in Oceanography*, 45, 427– 465.

[25] Gregg, W., Casey, N. 2004. Global and regional evaluation of the SeaWiFS data set. *Remote sensing of environment* 93, 463-479.

[26] Morel, A. 1980. In-water and remote measurement of ocean color. *Boundary-Layer Meteorol.* 18, 177-201.

[27] Morel, A., Ahn, Y.H. 1991. Optics of heterotrophic nanoflagellates and ciliates: A tentative assessment of their scattering role in oceanic waters compared to those of

bacterial and algal cells. *J. Mar. Res.* 49, 177-202.

[28] Stramski, D. and Kiefer, D. A. 1991. Light scattering by microorganisms in the open ocean. *Prog.Oceanogr.* 28, 343-383.

[29] Ulloa, O., Sathyendranath, S., Platt, T. and Quiñones, R. A. 1992. Light scattering by marine heterotrophic bacteria. *J. Geophys. Res.* 97, 9619-9629.

[30] Kopelevich, O. V. 1983. The experimental data on seawater optical properties. Ocean Optics. Vol. 1. Physical Ocean Optics (in Russian), A. S. Monin (ed.), Nauka Publishers, Moscow, 166-208.

[31] Stramski, D. 1994. Gas microbubbles: an assessment of their significance to light scattering in quiescent seas. *Proc. SPIE Ocean Opt. XII*, J. S. Jaffe (ed.), 704-710.

[32] Zhang, X., Lewis, M. and Johnson, B. 1998. Influence of bubbles on scattering of light in the ocean. *Appl. Optics* 37, 6525-6536.

[33] Morel, A., Prieur, L. Analysis of variations in ocean color. 1977. *Limnol. Oceanography.*, 22, 709-722.

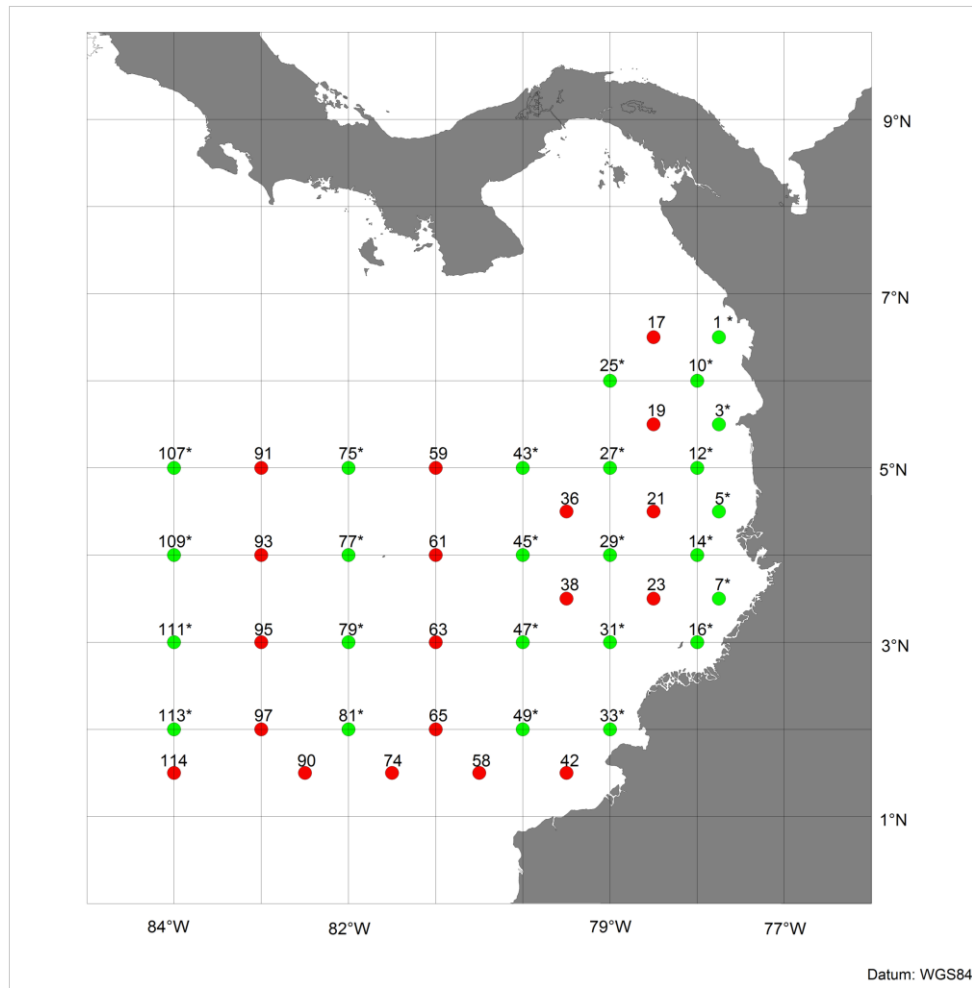
[34] IOCCG, report number 3. 2000. Remote sensing of ocean colour in coastal, and other optically-complex, waters. International Ocean-Colour Coordinating Group.

[35] Chomko, R., Gordon, H., Maritorena, S., Siegel, D. 2003. Simultaneous retrieval of oceanic and atmospheric parameters for ocean color imagery by spectral optimization: a validation. *Remote sensing of environment* 84, 208-220.

[36] Parsons, T., Maita, Y., Lalli, C. 1992. A manual of chemical and biological methods for seawater analysis. Pergamon Press, pp 101-109.

ANEXO A. Grilla de cruceo ERFEN

ESTACIONES OCEANOGRÁFICAS EN EL PACÍFICO COLOMBIANO



- Estaciones oceanográficas
- Estaciones oceanográficas + biológica y química

Posiciones de las estaciones biológicas

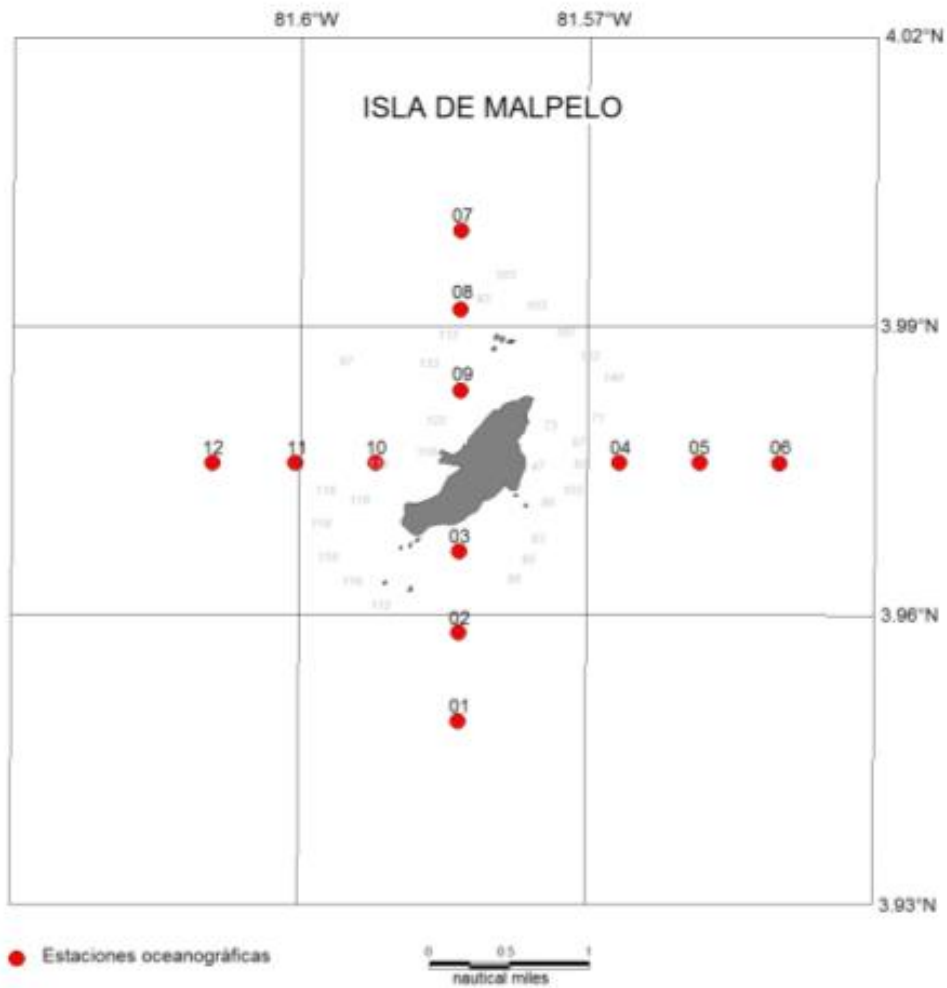
ESTACIÓN	LATITUD	LONGITUD	ESTACIÓN	LATITUD	LONGITUD
1	06°30 N	77°45' W	43	05°00 N	80°00' W
3	05°30 N	77°45' W	45	04°00 N	80°00' W
5	04°30 N	77°45' W	47	03°00 N	80°00' W
7	04°30 N	77°45' W	49	02°00 N	80°00' W
10	06°00 N	78°00' W	75	05°00 N	82°00' W
12	05°00' N	78°00' W	77	04°00 N	82°00' W
14	04°00 N	78°00' W	79	03°00 N	82°00' W
16	03°00 N	78°00' W	81	02°00 N	82°00' W
25	06°00 N	79°00' W	107	05°00 N	84°00' W
27	05°00N	79°00' W	109	04°00 N	84°00' W
29	04°00 N	79°00' W	111	03°00 N	84°00' W
31	03°00 N	79°00' W	113	02°00 N	84°00' W
33	02°00 N	79°00' W			

ANEXO B. Grillas Gorgona y Malpelo



Posiciones de las estaciones biológicas

ESTACIÓN	LATITUD	LONGITUD
4G	02°53'00'' N	78°12'09'' W
5G	02°53'00'' N	78°15'05'' W
7G	02°53'00'' N	78°20'00'' W
9G	02°57'51'' N	78°13'37'' W
11G	02°57'51'' N	78°20'00'' W
15G	03°03'00'' N	78°15'05'' W
17G	03°03'00'' N	78°10'00'' W



Posiciones de las estaciones biológicas

ESTACIÓN	LATITUD	LONGITUD
1M	03°56'56" N	81°35'00" W
3M	03°58'00" N	81°35'00" W
4M	03°58'33" N	81°34'00" W
6M	03°58'33" N	81°33'00" W
7M	04°00'00" N	81°35'00" W
9M	03°59'00" N	81°35'00" W
10M	03°58'33" N	81°35'32" W
12M	03°58'33" N	81°36'33" W

ANEXO C

INSTRUCCIONES PARA LA OBTENCIÓN DE DATOS DE CONCENTRACIÓN DE CLOROFILA *a* EN LA CPC A PARTIR DE IMÁGENES SATELITALES DEL SENSOR MODIS-AQUA

1. Obtención de las imágenes de la CPC del sitio web oficial del sensor

A través del sitio web <http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/cgi/browse.pl> se obtienen las imágenes de la CPC del día deseado, ya que se encuentran disponibles imágenes desde julio del 2002 hasta la actualidad. Hay que recordar que el criterio para trabajar con una imagen es la ausencia de nubes y que se advierta claramente la cuenca.

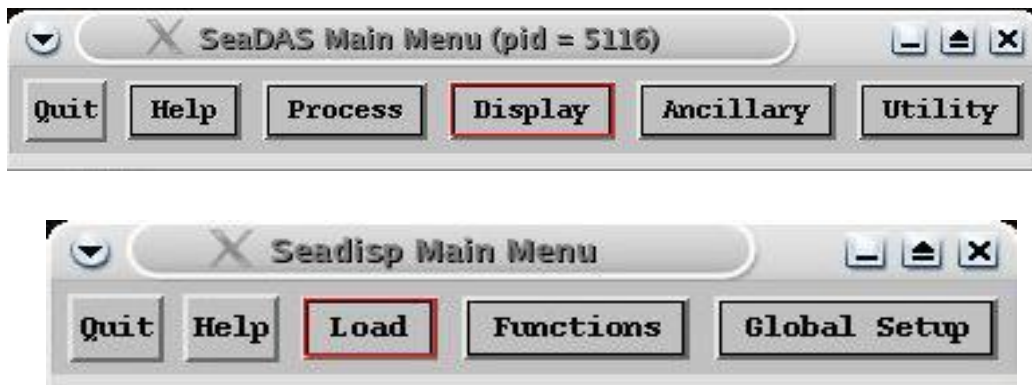
2. Acondicionamiento de la imagen

Se realiza con el software *SeaDAS*. El programa se accede desde la terminal o “*shell*” de un computador que tenga sistema operativo linux e instalado el paquete; para ello, solo debe escribirse “*SeaDAS*” en la terminal y el programa se cargará automáticamente.

El primer paso es cargar el archivo que contiene la imagen. Para ello, se selecciona del menú principal, la ventana “*Display*”, y del menú que aparece, se selecciona la opción “*Seadisp*”, la cual es la función general para desplegar imágenes. Una vez desplegado el menú “*Seadisp*”, se selecciona la opción “*Load*”, la cual permite seleccionar el sensor satelital del cual se ha obtenido la información.

Tras seleccionar MODIS, se despliega un cuadro de diálogo para que el usuario seleccione la ubicación del archivo. Cuando se ha seleccionado el archivo, se despliega la lista de productos generados por el algoritmo del software, entre ellos, la clorofila *a* llamado “*chlor_a*”. Este ítem debe ser seleccionado, para que así se cargue en el cuadro de diálogo “*Band list selection*” la imagen que contiene dicho archivo y pueda ser desplegada. La figura 1 muestra los menús desplegados del software *SeaDAS*, que permiten llevar a cabo las operaciones indicadas anteriormente.

Una vez cargada la imagen, puede ser acondicionada con una serie de funciones que ofrece el software. Para efectos del trabajo requerido, las funciones que se usan son “*coastline*” para definir la línea de costa y “*color LUT*” para aplicar una paleta de color que permita distinguir las diferentes concentraciones de clorofila. Estas funciones se encuentran en la opción “*Functions*” de la imagen desplegada.



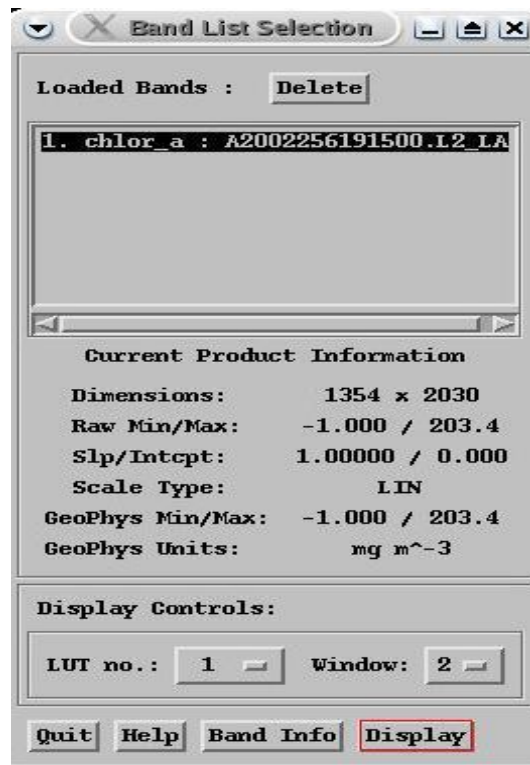
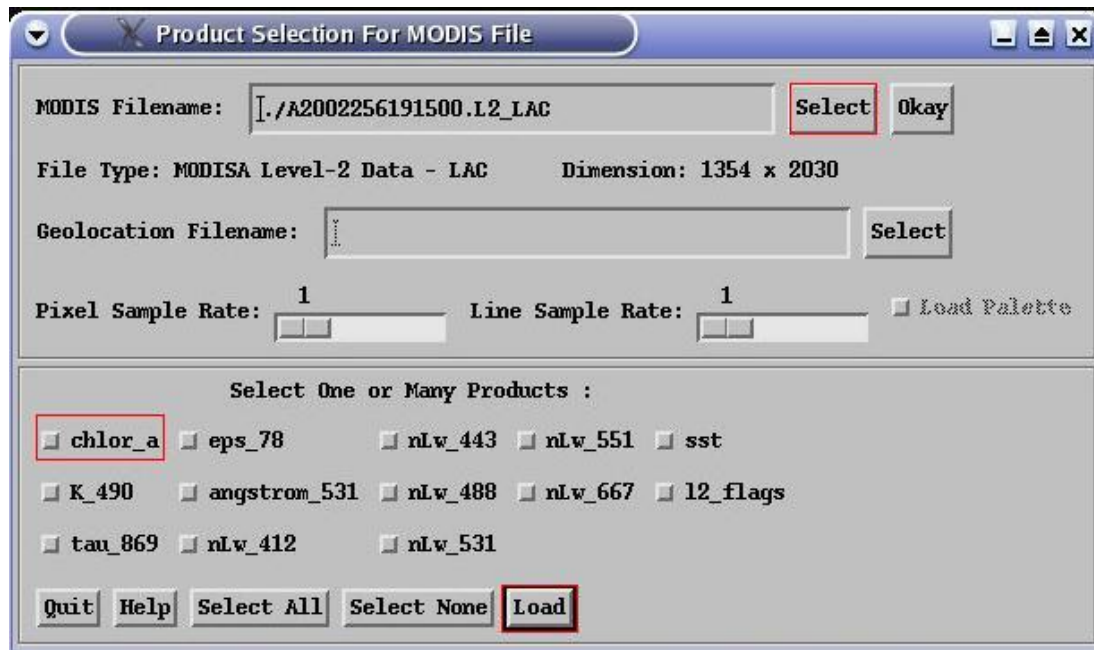


Figura 1. Menús desplegados por el SeaDAS para cargar los archivos del MODIS

3. Corrección de la proyección

Esta corrección también se logra con ayuda del software *SeaDAS*. Los pasos a seguir en este proceso, involucran seleccionar la opción “*Functions*” del menú “*Seadis*” mostrado en la figura 1.

De esta opción se escoge “*Projection*”, y se despliega un cuadro para seleccionar la imagen que se desea corregir. Seleccionada la imagen dentro del cuadro principal, aparece un recuadro con los parámetros de entrada para realizar la proyección, llamado “*Map Projection Inputs*”, el cual tiene un menú desplegable llamado “*Projection*” del cual se selecciona la opción “*Tranverse Mercator*”. En el mismo recuadro, se establecen los límites de latitud y longitud de la CPC (0 a 9 latitud, -84 a -76 longitud) y en “*Output Size*” se establece el tamaño de salida del archivo que se desea generar (900x1000).

El menú desplegado para hacer la corrección de la proyección es mostrado en la figura 2. Una vez especificadas estas características, se da “*Go*” y se genera un nuevo mapa de clorofila, pero con la proyección adecuada. Este se carga automáticamente en el “*Band list selection*” y puede verse con “*Display*”.

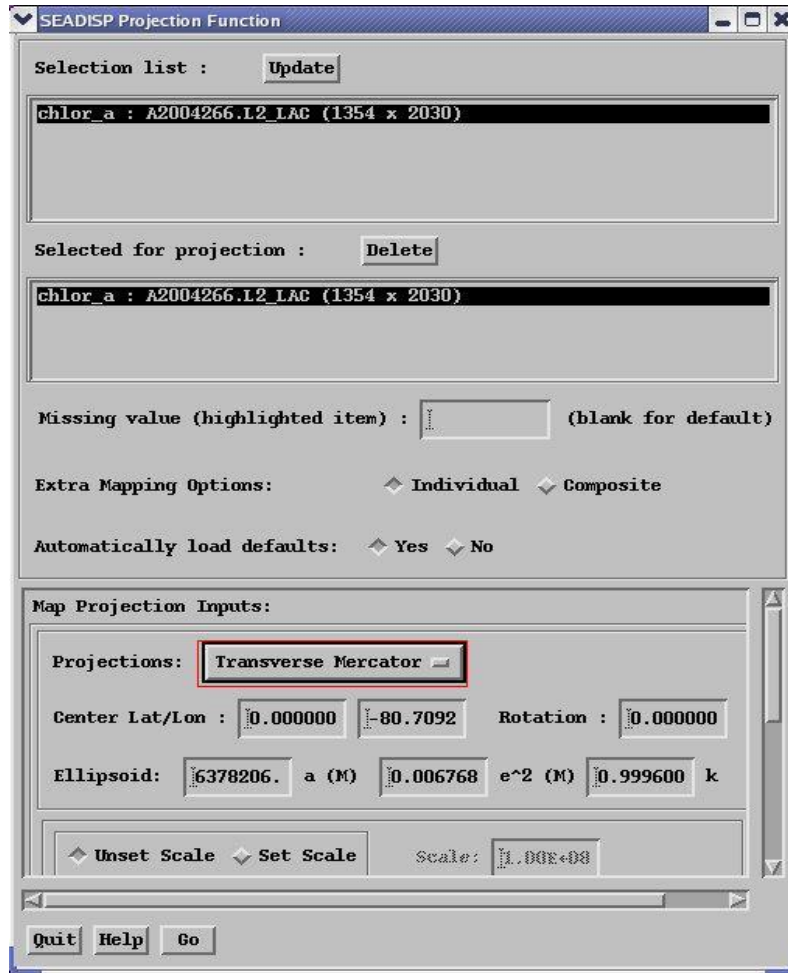


Figura 2. Menú “Seadisp-Projection-Function” del *SeaDAS* que permite hacer la corrección de la proyección.

4. Generación de los archivos HDF que contienen la información de clorofila y coordenadas

Después de hacer la corrección de la proyección, se obtiene una nueva imagen con la proyección y tamaño adecuados llamada “*Mapped-chlor_a*”. El paso a seguir es generar los archivos HDF para los datos de clorofila y de coordenadas a partir de la imagen desplegada.

En el menú “*Functions*” de la imagen desplegada, se escoge la opción “*Output*” luego “*Data*” y después “*Binary*”. Realizado esto, se despliega el cuadro “*Output Setup*” donde se especifica el tipo de dato, nombre de archivo, tipo de archivo y formato de salida. En “*Type*” se selecciona “*Imagen Data*” y “*Geophys*”; en “*Output File*” se escribe el nombre que llevará el archivo con extensión hdf; en “*File Type*” se selecciona “*HDF SD*” y en “*Output Format*” se selecciona “*Double*”. Hecho esto, finalmente se da “*Go*”. Ver Figura 3a.

Para generar el archivo de coordenadas, los pasos a seguir son similares a los anteriores. En el menú “*Functions*” de la imagen desplegada, se escoge la opción “*Output*” luego “*Navigation*” y después “*Binary*”. En el cuadro desplegado “*Output Setup*” se escoge en “*Type*” la opción “*Navigation Data*”, en “*Output File*” se escribe el nombre que llevará el archivo con extensión hdf; y en “*File Type*” se selecciona “*HDF SD*”. Hecho esto, se da “*Go*”. Ver Figura 3b.

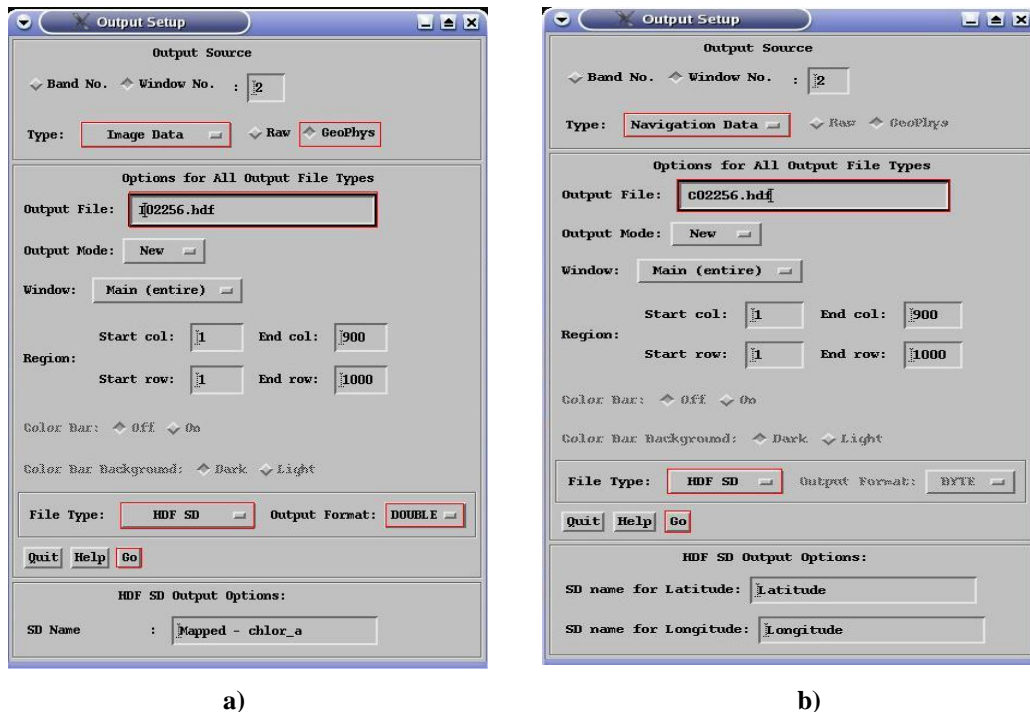


Figura 3. Cuadros “*Output Setup*” desplegados por el *SeaDAS* para generar los archivos HDF de salida. El cuadro a) es para clorofila y el b) es para coordenadas.

5. Obtención de datos

Se requiere mostrar la imagen y los datos de concentración de clorofila asociados a ella, así como realizar la validación con respecto a datos in situ. Para esto se ejecuta el programa “*usuario*”, desarrollado en *Matlab*. Este programa permite seleccionar la imagen, la grilla realizada, mostrar la imagen con las estaciones biológicas, obtener los datos de clorofila, importar un archivo *.txt* con los datos in situ y comparar estos últimos con los obtenidos del sensor satelital.

Para ejecutar este programa, el computador debe tener instalado el sistema operativo linux y el paquete *Matlab*. Entonces, primero ha de cargarse el paquete, el cual se ejecuta desde la terminal o “*shell*” del computador, simplemente escribiendo *Matlab*. El programa “*usuario*” debe estar guardado en la carpeta raíz y así podrá ser llamado desde el *Comand Window* de *Matlab*, simplemente escribiendo: usuario.

.

ANEXO D

ARTÍCULO PRESENTADO EN EL XXI CONGRESO NACIONAL DE FÍSICA

UNIVERSIDAD DEL ATLÁNTICO
BARRANQUILLA, OCTUBRE 24 – 28 DE 2005

VALIDACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE CLOROFILA *a* GENERADA POR EL SENSOR MODIS-AQUA CON DATOS IN SITU EN EL PACÍFICO COLOMBIANO

M. Bastidas^{a,b} y E. Rodríguez-Rubio^b.

^aIngeniería Física, Universidad del Cauca, Popayán, Colombia.

^bCentro Control Contaminación del Pacífico (CCCP), Armada Nacional, Tumaco,
Nariño: e-mail: cccp@dimar.mil.co.

RESUMEN

El uso de imágenes satelitales para estudiar los procesos físicos, biológicos y químicos del océano, ha llegado a ser una herramienta importante en la investigación y el monitoreo oceanográfico en diferentes regiones del planeta. Aunque esta herramienta es ampliamente utilizada en dichos estudios, requiere un proceso de validación para garantizar la fiabilidad de los datos. Este trabajo muestra los resultados de validar datos de concentración de clorofila *a* obtenidos por el sensor satelital MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*), con respecto a datos in situ obtenidos en expediciones oceanográficas en la Cuenca Pacífica Colombiana y sus áreas insulares en los últimos tres años por el Centro Control Contaminación del Pacífico (CCCP) de la Armada Nacional de Colombia. Para dicha validación, se calculó el error cuadrático medio logarítmico, el error absoluto medio, el sesgo y el coeficiente de correlación. La comparación mostró un error medio cuadrático logarítmico (RMSE) de 25.18% con un coeficiente de correlación de 0.7 usando 17 puntos en los cuales se colectaron datos que coincidieron con la toma por parte del sensor MODIS. El Océano Pacífico Colombiano mostró un buen ajuste con respecto a MODIS sin embargo presentó un sesgo negativo lo cual indica la subestimación de la clorofila *a*.

Palabras clave: Validación, MODIS, color del océano, clorofila, Pacífico Colombiano, *SeaDAS*.

ABSTRACT

The use of satellite images to study the physical, biological and chemical processes from the ocean has been an important tool in the oceanographic research and monitoring in different regions from the planet. Although this tool is widely used in these studies, it's requires a validation process to guarantee the reliability of the data. This work shows the results of validating data of chlorophyll *a* concentration obtained from satellite sensor MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer), with in situ data obtained from oceanographic expeditions in the Colombian Pacific Ocean and its insulars areas in the last three years colleted by Centro Control Contaminación del Pacífico (CCCP). Validation was made calculating the root mean square log error, the average absolute error, the bias and the correlation coefficient. The comparison indicated a root mean square (RMS) log error of 25.18%, with a correlation coefficient of 0.7 using 17 data points where in situ and MODIS data were coincident and collocated. The Colombian Pacific Ocean showed very good agreement with MODIS, however shows a negative bias, indicating an underestimation of chlorophyll *a*.

Key words: Validation, MODIS, ocean color, chlorophyll, Pacífico Colombiano, *SeaDAS*.

1. Introducción

El color del océano fue medido durante 8 años por el CZCS (*Coastal Zone Color Scanner*), el primer sensor de color, lanzado a bordo del satélite Nimbus 7 y que colectó datos desde noviembre de 1978 hasta junio de 1986. Desde ese entonces, han sido varios los lanzamientos de sensores satelitales que suministran datos globales del color del océano. Actualmente, se encuentra en operación el sensor MODIS (*Moderating Resolution Imaging Spectroradiometer*) a bordo del satélite AQUA, el cual fue lanzado en mayo del 2002. El MODIS equipa un radiómetro de alta sensibilidad (12 bits) y tiene 36 bandas espectrales en longitudes de onda que abarcan desde las 0.4 hasta las 14.4 micras. Tiene una alta relación señal/ruido y estabilidad para bandas espectrales estrechas, lo cual mejora su calibración radiométrica y estabilidad de monitoreo, mejorando así los datos científicos producto de sus algoritmos [1]. Los sensores del color del océano captan la radiación reflejada por la superficie del océano. En la parte visible del espectro, las características espectrales de la clorofila pueden ser claramente identificadas. Sin embargo, los complejos procesos de interacción océano-atmósfera, hacen que los datos geofísicos adquiridos desde plataformas espaciales tengan cierto nivel de incertidumbre; por lo cual, los datos provenientes de sensores satelitales, necesitan ser comparados con respecto a los obtenidos in situ en expediciones oceanográficas.

2. Material y método

Se utilizaron imágenes de nivel 2 del sensor satelital MODIS-AQUA. El criterio de selección de las imágenes fue la ausencia de nubes en la zona y que se advirtiera claramente la cuenca. Las imágenes fueron procesadas con el *SeaDAS*, software libre de la NASA, a fin de obtener imágenes con la proyección adecuada y los límites de latitud y longitud correspondientes a la Cuenca Pacífica Colombiana (CPC), obteniéndose como salida dos archivos HDF con la información de coordenadas y clorofila, que fueron leídos con rutinas implementadas en *Matlab* y así se obtuvieron los datos de concentración de clorofila en determinadas posiciones geográficas correspondientes a estaciones biológicas de la expedición oceanográfica. Los datos in situ fueron suministrados por el laboratorio de química del CCCP, en el cual la concentración de clorofila *a* es determinada usando el método de espectrofotometría UV-VIS.

Para el análisis estadístico se utilizó el error cuadrático medio logarítmico (RMSE), el error absoluto medio (MAE), el sesgo (BIAS) y el coeficiente de correlación *r*, los cuales fueron calculados mediante rutinas implementadas en *Matlab*. Los datos in situ y MODIS fueron transformados logarítmicamente (base 10) antes de hacer la comparación estadística debido a que la distribución natural de la clorofila en el océano es lognormal [2]. Siendo *S* los valores obtenidos del sensor satelital, *I* los obtenidos in situ y *n* el número de muestras, consideramos:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum [\text{Log}(S) - \text{Log}(I)]^2}{n}} \times 100 \quad (1)$$

$$MAE = \frac{\sum |\text{Log}(S) - \text{Log}(I)|}{n} \times 100 \quad (2)$$

$$BIAS = \frac{\sum [\text{Log}(S) - \text{Log}(I)]}{n} \times 100 \quad (3)$$

$$r = \frac{S_{xy}}{\sqrt{S_{xx} S_{yy}}} \quad (4)$$

3. Resultados y Discusión

La Figura *1a* muestra la distribución y concentración de clorofila *a* observada en un día de muestreo en la CPC, con las estaciones biológicas indicadas con un asterisco. La Figura *1b*, muestra el diagrama de dispersión del análisis de correlación. Se obtuvo un RMSE de 25.18%, inferior al 35% que de acuerdo a [3], [4] indica buen desempeño del set de datos MODIS; un MAE de 18.7%, un BIAS de -12% y un *r* de 0.7.

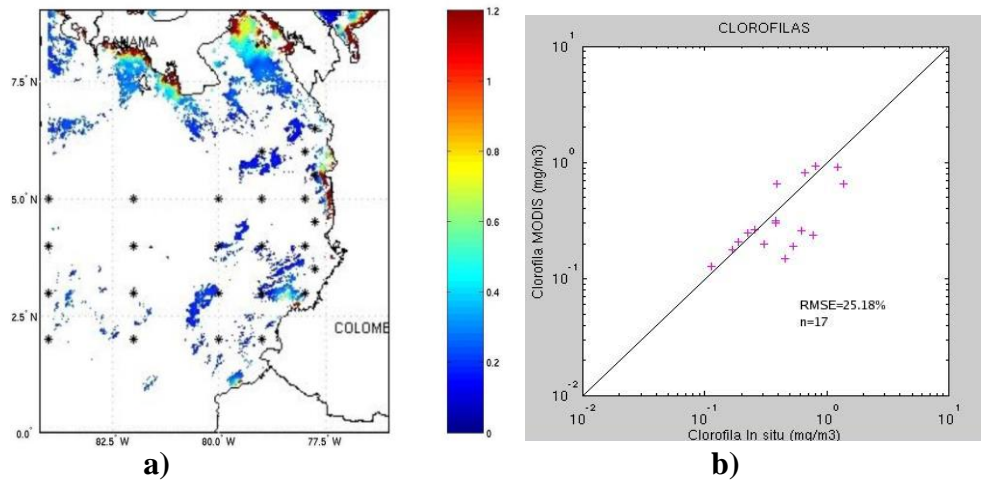


Figura 1. a) Clorofila *a* en la CPC (mg/m^3) en un día de muestreo. Fuente: MODIS 21/07/05. b) Diagrama de dispersión para un conjunto de 17 observaciones en la CPC.

Hay que tener en cuenta que, a la altura que se encuentra el sensor, más del 80% de la luz que alcanza el detector está influenciado por la atmósfera [5], y pequeños errores en la estimación de la contribución atmosférica, pueden causar sesgos significativos en la estimación de la contribución del agua. La nubosidad en el área de estudio fue un factor determinante para la obtención de imágenes adecuadas de la CPC durante los días de muestreo, de aquí que la contribución atmosférica influyó en la señal recuperada por el sensor durante los mismos.

Comparando las características del sensor MODIS con respecto a la del espectrofotómetro UV-VIS empleado en el laboratorio; en cuanto a resolución radiométrica y espectral, el MODIS supera al espectrofotómetro. Tecnológicamente hablando, el MODIS posee un nivel sin precedentes de fidelidad radiométrica y estabilidad sobre un amplio rango espectral, lo cual lo convierte en un prodigioso sensor del color del océano, pero hay que tener en cuenta otros aspectos relevantes a las medidas realizadas por este sensor, entre las que se encuentran su resolución espacial y temporal.

El MODIS tiene resolución espacial de 1Km, lo cual no es apropiado para aguas costeras donde la composición de la columna de agua puede cambiar drásticamente en esta distancia y más aún, en una cuenca como la CPC que está influenciada por la descarga de ríos y contaminación en los puertos. Las propiedades ópticas de las aguas costeras varían considerablemente en el tiempo y en el espacio. Existe un error asociado con cada medida in situ vs satelital, pero este es mucho mayor en aguas costeras ya que existe un error mayor asociado con la correlación espacio-temporal de las medidas. Es por esto, que ha de tenerse en cuenta la hora de la medición in situ y de paso del satélite. La resolución temporal del MODIS es de 1 día, y para la validación, es esencial tomar los datos in situ lo mas cerca como sea posible a la hora

de paso del satélite. Aún, una diferencia de una hora podría invalidar la comparación si ocurren variaciones considerables de las aguas locales [6]. Se realizó una comparación entre las horas de muestreo y de paso del satélite para el conjunto global de datos, obteniéndose como resultado una diferencia promedio de 8 horas; lo cual lleva a mencionar que la no correlación temporal en la captura de datos no influyó considerablemente en los resultados obtenidos.

4. Conclusiones

Se obtuvo un r de 0.7 indicando buena relación lineal entre las variables. El RMSE obtenido del 25.18% indica buen desempeño del set de datos MODIS con respecto a los in situ, pues no supera el RMSE del 35% requerido para una mayor credibilidad en datos obtenidos de sensores satelitales. El MAE del 18.7% indica bajo error medio en la predicción y el sesgo negativo muestra la tendencia a subestimar el valor de la clorofila obtenida satelitalmente. Las condiciones climáticas de la CPC constituyen una desventaja a la hora de aplicar el método de obtención de datos de clorofila a partir de imágenes satelitales, ya que no permite contar con imágenes apropiadas e impiden dar continuidad temporal a las observaciones remotas de nuestra cuenca.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Centro Control Contaminación del Pacífico y la Dirección General Marítima (DIMAR), así como a la tripulación del buque oceanográfico ARC Providencia por su colaboración durante el crucero oceanográfico por la CPC, y por los datos suministrados a través de su laboratorio de química para la ejecución de este trabajo.

Referencias

- [1] Esaias, W.E., Abbott, M.R., Barton, I., Brown, O.B., Campbell, J.W., Carder, K.L., Clark, D.K., Evans, R.H., Hoge, F.E., Gordon, H.R., Balch, W.M., Letelier, R., Minnett, P.J. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 1998, 36, 1250–1265.
- [2] Campbell, J.W. *Journal of Geophysical Research.* 1995, 100(C7), 13237- 13254.
- [3] Eplee, R. E., Robinson, W. D., Bailey, S. W., Clark, D. K., Werdell, P. J., Wang, M., Barnes, R. A., & McClain, C. R. *Applied Optics.* 2001, 40(36), 6701– 6718.
- [4] Hooker, S. B., McClain, C. R. *Progress in Oceanography.* 2000, 45, 427– 465.
- [5] Morel, A. *Boundary layer meteorology.* 1980, 18, 177-201.
- [6] IOCCG . *International Ocean-Colour Coordinating Group.* 2000, Report number 3. 145.