

# UTILIZACIÓN DE IMÁGENES SATELITALES

## EN LA DETECCIÓN DE FENÓMENOS DE MAREA ROJA (\*)

Ing. **M<sup>a</sup> Gabriela Valenzuela V.** (\*\*)  
Dr. **Eligio Amthauer C.**  
Dr. **Rolando Hernández M.**  
Universidad de Concepción.

### INTRODUCCIÓN

**L**a vida en nuestro planeta se encuentra ampliamente determinada por el océano. Los mayores cambios de energía se presentan entre la atmósfera y la tierra, pasando a través de la superficie del océano y se obtiene como resultado el clima determinado por este intercambio.

El programa satelital nos provee información oceanográfica y meteorológica, de manera que es posible monitorear sus parámetros físicos en forma confiable.

El procesamiento de imágenes y la percepción remota, son en general de gran utilidad en el proceso de planificación, específicamente valiosa para detectar los fenómenos y producir mapas de diversos tipos de peligros naturales, como por ejemplo, las apariciones de fitoplanctales nocivos en las regiones del sur de Chile, además de presentarse en la zona de estudio una floración de algas sin coloración de las aguas, lo que apoya un monitoreo de la zona por medio de registros de temperatura, y porque no, de imágenes satelitales desde un satélite chileno.

En el presente trabajo se muestra la utilización de imágenes satelitales obtenidas desde una plataforma radiométrica satelital chilena, el satélite FASat B, en el desarrollo una metodología para detectar el fenómeno de Marea Roja en las regiones X a XII del sur de Chile. Esto se logra con ayuda de imágenes de las cámaras WAC (Wide

(\*) Conferencia presentada por el Dr. Rolando Hernández M. en el "Seminario Espacial Ruso-Chileno" desarrollado en el Centro de Convenciones Diego Portales en Santiago de Chile, el 30 de Octubre de 2001.

(\*\*) Los autores son miembros del Centro de Teledetección Satelital, de la Universidad de Concepción, del cual el Dr. Hernández es su Director.

Angle Camera), NAC (Narrow Angle Camera), y OUBI's (Ozone Ultraviolet Backcattering Imager) del FASat Bravo. Se muestra también el marco teórico de la percepción remota, el desarrollo y su fundamentación histórica, además de las características orbitales como de los instrumentos utilizados por el satélite, los cuales son directos responsables de proporcionar las imágenes para el estudio.

Los resultados obtenidos de la contrastación de las cartas de temperatura con los datos reales, como es la distribución de temperatura o de recursos pelágicos que se obtienen de los cruceros de evaluación o en diversas exploraciones

que destacan la importancia y beneficios de un monitoreo de tipo satelital para dicha zona.

Tomando en cuenta las características de las cámaras llevadas por la plataforma, se realizó un monitoreo de la zona sur de Chile, que muestra resultados favorables en la aparición de las Floraciones Nocivas recurrentes en dicha zona.

Por otro lado, para Chile la investigación en materias espaciales fue una de las actividades que preocupó a la Fuerza Aérea durante la década del '80, en particular la necesidad de ocupar un rol activo en el espacio, generando el programa FASat.

## ANTECEDENTES GENERALES

Aunque la mayor parte de estos fenómenos han sido inocuos, existen zonas, en algunos casos muy extensas, del litoral de las regiones X, XI y XII, donde se presentan floraciones de algas nocivas de alta toxicidad en forma recurrente, producidas por los dinoflagelados *Dinophysis acuta* y *acuminata*, causante de VDM y *Alexandrium catenella*, causante de VPM. (\*\*\*)

Las temperaturas superficiales del agua presentaron variaciones mensuales, siendo estas mayores al comienzo del invierno e inicio del verano de cada año, las cuales fueron muy bruscas, especialmente en el tiempo de lluvias. (2) (3)

Tomando en cuenta los antecedentes biológicos que en apoyo al desarrollo de este estudio se utilizó una plataforma satelital nacional, que se describe a continuación.

El FASat Bravo fue lanzado desde Baikonur (Rusia) por un cohete, el Viernes 10 de Julio de 1998 a las 02:32 hora local.

El objetivo primario del Proyecto es obtener para Chile la experiencia científica y tecnológica básica que permita continuar con experimentos y proyectos posteriores más complejos. Uno de los experimentos a bordo, llamados cargas útiles del satélite, es la Experimentación de Imágenes Terrestres.

Para la realización de los experimentos, el satélite FASat Bravo contiene dos cámaras captadoras de imágenes en rango visible, una de campo amplio (baja resolución) y otra de campo angosto (resolución media), ambas alineadas en la misma dirección. La cámara de campo amplio tiene una resolución media de aproxi-

(\*\*\*) VDM: Veneno Diarreico de Mariscos  
VPM: Veneno Paralizante de Mariscos.

madamente 1.500 metros. En tanto que la de campo angosto tiene una resolución de aproximadamente 150 metros.

## DESCRIPCIÓN TÉCNICA

El satélite FASat Bravo, pertenece a la clase de los microsátélites de órbita baja, los cuales operan entre los 600 y 1.200 kilómetros de altura (820 Km. aprox.). (5) El satélite está construido en torno a un cuerpo central de 60 cm. de altura y con

una base cuadrada de 35 cm. por lado. El interior del cuerpo central está formado por 11 módulos o bandejas que albergan todos los circuitos electrónicos, mientras que en el exterior de sus cuatro caras laterales, se ubican los paneles solares que le proveen energía eléctrica.

### 1. Periodo Orbital

El periodo orbital se obtiene mediante:

$$T = 2 \pi \sqrt{\frac{\alpha}{\mu}} = 6078.39 \text{ [s]} = 101.3065 \text{ [min]}$$

donde:  $\mu = 3.986 > 10^{14} \text{ [m}^3/\text{s}^2]$   
 $\alpha = 7199 \text{ [Km]}$

### 2. Determinación Exacta de Repetición de Órbita

La expresión usada para dicho evento es:

$$T_N \left( \omega_E - \frac{d\Omega}{dt} \right) = 2\pi \cdot \frac{n_1}{n_2}$$

donde:  $T_N = 6085.4197 \text{ [s]}$

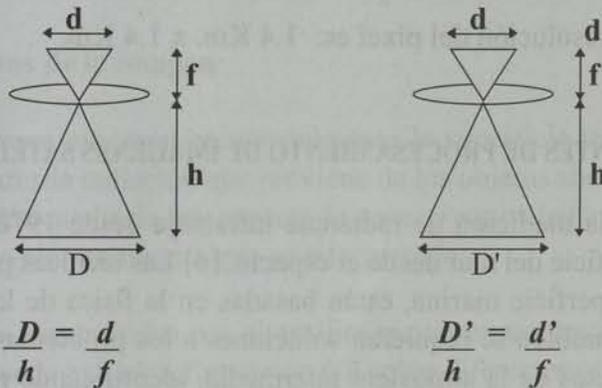
dando:  $n_2 \cup 71 \text{ órbitas}$  y  $n_1 \cup 5 \text{ días}$

### 3. Determinación de Área de Imagen y Resolución

En la figura 1 se observa la determinación del área de imagen, la resolución y la relación entre los parámetros involucrados (longitud focal, altitud del satélite, etc.).  
 donde:

- $h$  = altura aproximada del FASat Bravo
- $f$  = longitud focal de las lentes

- $d$  = área de imagen CCD
- $d'$  = dimensión del píxel
- $D$  = área de fondo
- $D'$  = resolución de píxel



**Figura 1:** Área de imagen y resolución.

**A.- Wide Angle Camera (WAC)**

Esta cámara esta basada en un sensor de televisión monocromático CCD04-06, con 578 x 576 píxeles, arreglados en 2 campos de 578 x 288 píxeles.

- ⊙ Región de imagen de la CCD es: 8.52 x 6.3 [mm]
- ⊙ El largo focal es: 4.8 [mm]

Así el área de convergencia esta dado por: 1456 Km. x 1076 Km. Por lo que la resolución del píxel es: 2.6 Km. x 3.8 Km.

**B.- Narrow Angle Camera (NAC)**

Esta cámara esta basada en un sensor de televisión monocromático CCD04-06, con 578 x 576 píxeles, arreglados en 2 campos de 578 x 288 píxeles.

- ⊙ Región de imagen de la CCD es: 8.52 x 6.3 [mm]
- ⊙ El largo focal es: 75 [mm]

Así, al igual que la cámara WAC, el área de convergencia esta dado por: 93 Km. x 69 Km.

Por lo que la resolución del píxel es: 164 Km. x 246 m.

**C.- Ozone Ultraviolet Backcattering Imager (OUBI)**

Esta cámara esta basada en un sensor de televisión monocromático CCD02-06, con 385 x 576 píxeles, arreglados en 2 campos de 385 x 288 píxeles.

- ⊙ Región de imagen de la CCD es: 8.32 x 6.16 [mm]
- ⊙ El largo focal es: 12.5 [mm]

Así el área de convergencia esta dado por: 546 Km. x 404 Km.

Por lo que la resolución del píxel es: 1.4 Km. x 1.4 Km.

## ANTECEDENTES DE PROCESAMIENTO DE IMÁGENES SATELITALES

Se ha usado la medición de radiancia infrarroja desde 1970, para estimar la temperatura de superficie del mar desde el espacio. [6] Las técnicas para estimar dicha temperatura de la superficie marina, están basadas en la física de la radiación de un cuerpo negro, pero también se requieren soluciones a los problemas prácticos, como para corregir los efectos de la atmósfera intermedia, identificando regiones libres de nubes y las coordenadas respectivas en tierra (georeferenciación).

### 1.- Físicas: Radiación de un Cuerpo Negro

En virtud del movimiento molecular, todas las substancias sobre el cero absoluto emiten radiación. Un cuerpo que absorbe toda la radiación entrante es llamado cuerpo negro. [4] [6]

En 1901, Planck asumió que la energía sólo puede existir en paquetes discretos o cuántum, igual a  $h\nu$ , donde  $h$  es la constante de Planck y  $\nu$  es la frecuencia electromagnética.

$$B(\lambda, T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{\exp\left(\frac{hc}{kT\lambda}\right) - 1}$$

donde:  $c$  es la velocidad de luz  
 $k$  es la constante de Boltzmann.

### 2.- Estimación de Temperatura

Se presentan 3 limitaciones mayores para estimar la temperatura de superficie de mar, al usar medidas de radiancia de una plataforma satelital.

1. Bloqueo de la radiación infrarroja de la superficie por presencia de nubes. Si no se identifican regiones nubladas apropiadamente, las medidas de temperatura de la nube son incorrectamente asociadas con temperatura de superficie de mar.

2. La atmósfera intermedia absorbe parte de la radiación emitidas por la superficie y también emite radiación la cual va directamente al sensor, distorsionando la medición.
3. La radiación solar se refleja de la superficie al sensor.

### 3.- Tratamientos de la imagen

Los sensores exploran secuencialmente la superficie terrestre, adquiriendo a intervalos regulares la radiación que proviene de los objetos situados en ella. El sensor detecta la radiación media de una parcela de terreno equivalente al tamaño del píxel, el que se traduce a valor numérico, que es interpretado.

Los datos transmitidos por el satélite requieren un tratamiento corrector para que de ellos se pueda extraer información útil sobre diferentes parámetros físicos (temperatura, concentración pigmentaria).

Este tratamiento se compone de variadas etapas:

#### A.- Corrección de Agentes Externos

El flujo de energía recibido por el sensor no sólo depende de la feffectividad de la cubierta, sino también de otros factores externos. Los más importantes son:

- ⊙ Condiciones atmosféricas.
- ⊙ Geometría de la observación. El ángulo de elevación solar (fuente del flujo energético) y ángulo de observación (posición del sensor) respecto a la superficie terrestre determina la respuesta que ésta da.

La radiación cuando entra en contacto con la superficie terrestre puede sufrir tres procesos diferentes: reflexión, dispersión y absorción. A estos se agrega la emisión de energía previamente almacenada.

Las bandas constituyen el grupo de longitudes de onda directamente dependientes de la luz solar. Es la banda de mayor interés para la observación remota de la superficie terrestre. La curva de emitancia del sol se asemeja bastante a la de un cuerpo negro a esa temperatura.

Teniendo en cuenta la componente de reflectividad, que es lo que podemos medir con el sensor,

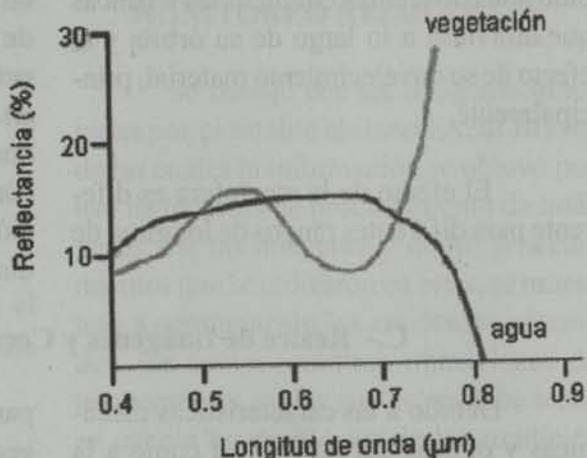


Figura 2: Gráfica de Reflectancia en tipos de superficies

podremos saber qué tipo de superficie es la que da esa firma espectral.

### **Comportamiento Espectral Teórico en el Dominio Óptico**

El agua, absorbe o transmite la mayor parte de la radiación visible que recibe. Por tanto presentará una curva espectral plana, baja y de sentido descendente. En aguas poco profundas, la reflectividad aumenta. Los factores que afectan a este comportamiento son: profundidad, contenido en materias en suspensión (clorofila,

arcillas y nutrientes) y rugosidad de la superficie (factor, extremadamente importante).

Por su parte, la nieve ofrece un comportamiento completamente diferente al del agua, con una reflectividad elevada en las bandas visibles, reduciéndose drásticamente en el infrarrojo cercano.

### **Comportamiento Espectral Teórico en el Dominio del Infrarrojo Térmico**

Como la temperatura de la superficie terrestre es de 300 °K (aprox.), su emitancia espectral es máxima en la banda entre 8 y 14  $\mu\text{m}$  (infrarrojo térmico). Esto nos permitirá detectar el calor que procede de las distintas superficies, pero para ello no se mide la energía reflejada, sino la emitida, en función de la temperatura.

Se produce el fenómeno de que casi toda esta energía es absorbida por la atmósfera, permitiendo la existencia de vida.

Pero hay una ventana de transmisión entre 8 y 14  $\mu\text{m}$  que se puede usar en teledetección.

En el Suelo y el Agua, el factor más destacado es su contenido de humedad. A mayor humedad, más frío estará durante el día y más cálido durante la noche, con respecto a los suelos secos. El agua posee la mayor inercia térmica debido a su alta conductividad. Es más difícil que cambie su temperatura.

### **B.- Correcciones Radiométrica y Atmosférico:**

Estos son cálculos para corregir el comportamiento del sensor, que varía debido a las diferentes condiciones térmicas que atraviesa a lo largo de su órbita y al efecto de su envejecimiento material, principalmente.

El efecto de la atmósfera es diferente para diferentes rangos de longitud de

onda: así en el infrarrojo este efecto se reduce prácticamente a una subestimación de las temperaturas debido a la absorción de parte de la radiación emitida por la superficie por el vapor de agua, mientras que en los canales visibles debemos tener en cuenta la absorción de ciertos agentes como el ozono, la dispersión de la radiación por los aerosoles, el efecto de la radiación Rayleigh, etc.

### **C.- Realce de Imágenes y Corrección Geométrica**

Debido a las características mecánicas y ópticas del sensor, así como a la curvatura terrestre, las imágenes obtenidas deben ser corregidas geométricamente

para atribuir a cada píxel su localización geográfica exacta. Si podemos buscar puntos dentro de la imagen de los que sabemos sus coordenadas geográficas, podre-

mos calcular una transformación que obtenga la proyección de los datos en un plano, conforme a un sistema de proyección cartográfico. A esos puntos se les llaman puntos de control (GCP, Ground Control Points).

La relación entre el sistema de coordenadas de la imagen y el de la realidad se construye mediante una transformación. Se trata de un regresión lineal múltiple:

$$\bar{X}_i = a_0 + a_1 \cdot c_i + a_2 \cdot l_i$$

$$\bar{Y}_i = b_0 + b_1 \cdot c_i + b_2 \cdot l_i$$

donde:  $a_0, a_1, a_2, b_0, b_1, b_2$  son los coeficientes de regresión.

$c_i$  y  $l_i$  las variables independientes

$X_i$  e  $Y_i$  las variables dependientes.

Se emplea el método de cuadrados mínimos para calcular esos coeficientes de las funciones de transformación. Con una transformación lineal (de primer orden) sólo podemos hacer tres cosas: rotar, escalar y trasladar una imagen, son necesarios 6 coeficientes. Con transformaciones no lineales (de segundo orden o más) también pueden corregir las distorsiones internas de la imagen, entonces serán necesarios 12 coeficientes para segundo orden, 20 para tercer orden, etc. con los que el número de puntos de control a buscar será mayor.

El indicador más utilizado es el error medio cuadrático (RMS) para cada uno de los  $i$  puntos de control:

$$RMS_i = \sqrt{(x_i - \bar{x}_i)^2 + (y_i - \bar{y}_i)^2}$$

El promedio de los RMS para todos los puntos de control facilita una evaluación de la calidad general del ajuste. Lo que se hace, es tolerar un cierto margen de error (de RMS).

El RMS expresa distancia en el sistema de unidades origen, esto es, distancia en número de píxeles.

Se necesita también conocer el tamaño del píxel para que en la operación de remuestreo, para que se pueda calcular el número de píxeles que se deberán intercalar entre posiciones conocidas de referencia.

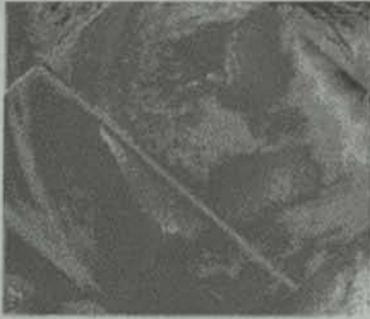
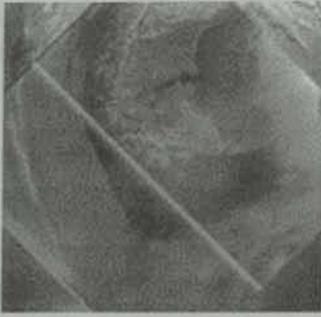
#### D.- Máscaras

Este es el caso del medio terrestre y de la cobertura nubosa cuyo enmascaramiento permite una mayor claridad de visualización de las imágenes y una mayor rapidez en su lectura.

Las máscaras de Tierra son imágenes binarias (0 = tierra, 1 = mar) que se superponen a las imágenes estudiadas. El enmascaramiento de nubes, persiguen la selección de píxeles contaminados por nubes en función de varios parámetros como su valor de radiancia en diferentes bandas espectrales.

#### MONITOREO RESULTANTE

Se trabajó con las imágenes obtenidas por el satélite chileno FASat Bravo, de las cuales la información se obtuvo por uso de técnicas de procesamiento de imágenes. De las imágenes y de los procedimientos que se utilizaron en éstas, se muestran a continuación los resultados obtenidos, los cuales muestran transiciones de temperaturas, en las cuales, se debe tener en cuenta los problemas de las condiciones climáticas que afectan a la zona de estudio.



0 Temp °C 18

Figura 3 : Imagen FASat del 18 de Junio de 2000. (-54.684 lat S., -68.391 long O)



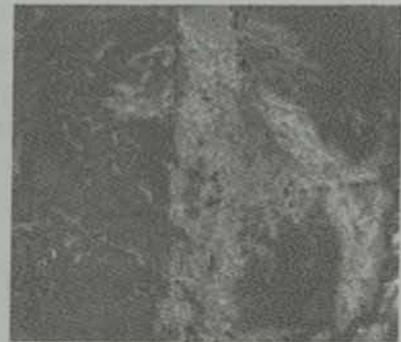
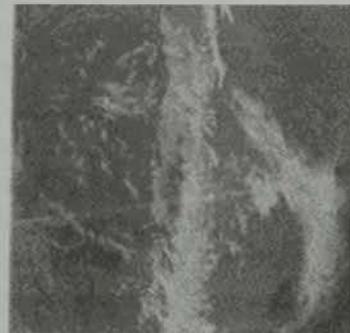
0 Temp °C 18

Figura 5 : Imagen FASat del 10 de Julio de 2000. (-52.355 lat. S, -70.644 long O)



0 Temp °C 18

Figura 4 : Imagen FASat del 09 de Julio de 2000. (-41.310 lat.S, -71.638 long. O)



0 Temp °C 18

Figura 6 : Imagen FASat del 03 de Septiembre de 2000. (-54.909 lat S, -67.182 long O)

A las imágenes anteriormente mostradas se le realizaron pruebas tanto de ecualización, mejoramiento de turbiedad de Gauss, enmascaramiento de ruido, etc.

## RESUMEN Y CONCLUSIONES

El agua posee como característica la absorción de energía en el infrarrojo cercano, lo cual entrega como resultado una localización y delineación de cuerpos de agua con mayor facilidad, además la reflexión del agua, no solo depende de ésta, sino del material que hay en ella, es decir, agua limpia absorbe poco, presentando longitudes de onda ( $\lambda$ ) menores a  $0.6 \mu\text{m}$ . Como la turbiedad del agua cambia la transmitancia, se tiene un cambio de reflexión. Agua con sedimentos tiene mayor reflexión en el espectro visible que el agua de mar. La concentración de clorofila cambia la característica de reflexión. El aumento de clorofila tiene una disminución en la reflexión del agua en longitud de onda del azul e incrementa en la del verde.

Las características de concentración de oxígeno, pH y sal no son observables directamente a través de cambios de reflexión del agua, pero se correlaciona con la reflexión observada.

Métodos aplicados a imágenes oceánicas obtenidas por el FASat Bravo, permiten conocer la variación espacial de la temperatura en la superficie del mar, siendo el conocimiento de esta de gran ayuda para estudios oceanográficos, como para la industria pesquera. Por esto la importancia de un monitoreo eficiente en la costa de nuestro país ya que ellas se caracterizan por los canales y fiordos.

Del monitoreo que se realizó a la zona de estudio, en un periodo de 6 meses, se pudo comprobar la relación directa del aumento de la temperatura superficial del mar con la aparición de floraciones nocivas, su desarrollo y evolución en el tiempo, además de las concentraciones fijas de estas en ciertas locaciones de la región.

La utilización de imágenes del FASat Bravo, en el sentido de la captación de la temperatura superficial del mar (TSM), es útil como ayuda y benéfica para una mayor vigilancia a los azares de la naturaleza, ya que esta entrega una información que se destaca por su acierto y el bajo error, en este caso de la variación de la temperatura entregada, ya que al ser contrastadas las temperaturas reales obtenidas in situ, y las temperaturas entregadas por el análisis de las imágenes, se alcanza el rango de precisión de  $\pm 0.6^\circ\text{C}$ , del sensor en la medición de temperatura superficial.

Este monitoreo realizado desde una plataforma chilena, afirma la posibilidad de detección de marea roja en su primera etapa.

Finalmente, se puede decir que la utilización de imágenes satelitales para el monitoreo de fenómenos naturales es de real importancia, ya que todos los peligros naturales, hasta cierto punto, son eventos o procesos recurrentes, que dejan evidencias de su anterior ocurrencia. Tal evidencia puede ser observada, analizada e integrada en el proceso de planificación. Con el apoyo de nuevos programas espaciales y las mejoras en la resolución espacial, tanto para las bandas visibles e infrarroja cercana, a lo que se suma una baja sustancial en los precios de las imágenes, todo lo cual hace más fácil la utilización de observación satelital, para mejorar nuestro medio ambiente y prevenir las FAN (Floraciones de Algas Nocivas) las que

traen consigo problemas a la población, como asimismo serios daños económicos al sector productivo, y turístico. El resultado final es que se logra hacer crecer a Chile en el ámbito tecnológico. 

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] Valenzuela V, M<sup>a</sup> Gabriela. 2001. *Detección del Fenómeno de Marea Roja en las Regiones del Sur de Chile, con Ayuda de Imágenes Satelitales. Memoria título para optar al de título de Ingeniero Civil Electrónico. Universidad de Concepción.*
- [2] Avaria S, D. Cassis, P. Muñoz y P. Vera. 1997. *Distribución del microfitoplancton marino en aguas interiores del sur de Chile en Octubre de 1995 (Crucero Cimar-Fiordo I).* *Ciencia y Tecnología del Mar* 20; 107-123.
- [3] Cassis D. 1999. *Variación temporal del fitoplancton en una estación fija en el período 1993-1998. Tesis de Grado para optar al Título de Biólogo Marino. Universidad de Valparaíso.*
- [4] Eisberg R. M., *Fundamentals of Modern Physics, John Wiley and Sons, New York, NY, 47-69, 1961.*
- [5] *Estudio Proyecto OLME, Fuerza Aérea de Chile.*
- [6] Stewart, R. H. *Methods of Satellite Oceanography, University of California Press, Berkley, CA, 128-152, 1985.*