

TESIS DEFENDIDA POR
Evaristo Manuel Rojas Mayoral
Y APROBADA POR EL SIGUIENTE COMITÉ

Dr. Rafael Hernández Walls
Codirector del Comité

Dr. Francisco Javier Ocampo Torres
Codirector del Comité

Dr. Pedro Negrete Regagnon
Miembro del Comité

Dr. José Luis Ochoa de la Torre
Miembro del Comité

Dr. Jesus Manuel Figueroa Rodriguez
*Coordinador del programa de posgrado
en Oceanografía Física*

Dr. David Hilario Covarrubias Rosales
Director de Estudios de Posgrado

Agosto de 2009



**INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Y DE
EDUCACIÓN SUPERIOR DE ENSENADA**

**PROGRAMA DE POSGRADO EN CIENCIAS
EN OCEANOGRAFÍA FÍSICA**

**DETERMINACIÓN DE LA DIRECCIÓN DEL VIENTO EN EL GOLFO
DE TEHUANTEPEC USANDO RADARES DE ALTA FRECUENCIA Y
ALGORITMOS GENÉTICOS**

TESIS

que para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el grado de
MAESTRO EN CIENCIAS

Presenta:

EVARISTO MANUEL ROJAS MAYORAL

Ensenada, Baja California, México, Agosto de 2009

RESUMEN de la tesis de **EVARISTO MANUEL ROJAS MAYORAL**, presentada como requisito parcial para la obtención del grado de MAESTRO EN CIENCIAS en OCEANOGRAFÍA FÍSICA. Ensenada, Baja California. Agosto de 2009.

DETERMINACIÓN DE LA DIRECCIÓN DEL VIENTO EN EL GOLFO DE TEHUANTEPEC USANDO RADARES DE ALTA FRECUENCIA Y ALGORITMOS GENÉTICOS

Resumen aprobado por:

Dr. Rafael Hernández Walls
Codirector del Comité

Dr. Francisco Javier Ocampo Torres
Codirector del Comité

Se usan algoritmos genéticos para ajustar modelos de distribución direccional de la energía del oleaje a las lecturas de radares de alta frecuencia. Mediante dicho ajuste se encuentra la dirección de máxima energía del oleaje local, la cual es igual que la dirección del viento local. El método se implementó con las lecturas de un sistema radares de alta frecuencia localizado en el Golfo de Tehuantepec. Se comparó la dirección del viento calculada con el método propuesto contra mediciones de un anemómetro en un punto y contra mediciones satelitales en el área cubierta por los radares y se encontró que el método propuesto es viable. Se probó la capacidad del método para ajustar modelos de tres parámetros de la distribución direccional de la energía del oleaje a datos sintéticos y se encontraron resultados satisfactorios.

Palabras Clave: Golfo de Tehuantepec, radares de alta frecuencia, algoritmos genéticos, dirección del viento

ABSTRACT of the thesis presented by **EVARISTO MANUEL ROJAS MAY-ORAL**, in partial fulfillment of the requirements of the degree of **MASTER OF SCIENCE** in **PHYSICAL OCEANOGRAPHY**. Ensenada, Baja California. August, 2009.

DETERMINATION OF THE WIND DIRECTION IN THE GULF OF TEHUANTEPEC USING HIGH FREQUENCY RADARS AND GENETIC ALGORITHMS

Genetic algorithms are used to fit directional distribution wave energy models to high frequency radar readings. By such fitting, the direction of maximum energy in wind waves was found, which is assumed equal to the wind direction. The proposed method was implemented with the readings of a high frequency radar system located in the Gulf of Tehuantepec. The wind direction computed with the proposed method was compared against measurements taken by an anemometer in one point and against satellite measurements in the area covered by the radars; it was found that the proposed method is viable. The capability of the method for fitting three-parameter directional distribution wave energy models to synthetic data was tested; satisfactory results were found.

Keywords: Gulf of Tehuantepec, high frequency radars, genetic algorithms, wind direction

Dedicatoria

Para Andrea.

Agradecimientos

Agradezco a los codirectores Dr. Rafael Hernández Walls y Dr. Francisco Javier Ocampo Torres y sinodales Dr. Pedro Negrete Regagnon y Dr. José Luis Ochoa de la Torre por su asesoría.

Agradezco al proyecto SEP-CONACYT: SEP-2004-C01-47285 por el apoyo brindado.

Agradezco a NOAA/NESDIS por dar acceso libre a los datos del escaterómetro SeaWinds a bordo del QuikSCAT.

Índice general

I. Introducción	1
I.1. Justificación	1
I.2. Área de estudio	3
I.3. Objetivos	4
I.3.1. Objetivo general	4
I.3.2. Objetivos particulares	5
II. Metodología	6
II.1. Distribución Direccional de la Energía del Oleaje	6
II.2. Radares HF	8
II.2.1. Operación	9
II.2.2. La ecuación de Barrick	10
II.3. Determinación de la dirección del viento usando radares HF	11
II.3.1. Razón entre los dos picos de máxima energía del espectro Doppler	12
II.3.2. Ajuste lineal entre la dirección del viento y la razón los picos de máxima energía en el espectro Doppler	14
II.3.3. Estimación de máxima verosimilitud	15
II.4. Métodos de Optimización	17
II.4.1. Algoritmos Genéticos	18
III.Resultados	23
III.1. Dirección del viento en un punto	23
III.1.1. Razón entre los dos picos de máxima energía del espectro Doppler	23
III.1.2. Ajuste lineal entre la dirección del viento y la razón los picos de máxima energía en el espectro Doppler	25
III.1.3. Estimación de Máxima Verosimilitud	25
III.1.4. Algoritmo Genético	26
III.1.5. Comparación	28
III.2. Mapa de dirección del viento	29
III.3. Exploración de las capacidades del método	31
III.3.1. Tres parámetros	31
III.3.2. Bimodalidad direccional	32

IV. Discusión y Conclusión	35
V. Anexos	37

Índice de figuras

Figura	Página
1. Modelo de la distribución direccional de la energía del oleaje descrito por la ecuación 1. El eje angular representa la dirección azimutal de propagación del oleaje. El eje radial representa la fracción de $F(k)$ viajando en cada dirección.	8
2. Espectro Doppler típico recibido por los radares HF.	9
3. Soluciones numéricas para la razón de picos de primer orden en estación Cangrejo (azul) y Santa María (rojo).	24
4. Promedio vectorial de las soluciones numéricas para la razón de picos de primer orden (verde) y dirección del viento medida con el anemómetro (negro).	25
5. Series de tiempo de la dirección del viento calculada con el ajuste lineal (diamante) contra la medida con el anemómetro (equis).	26
6. Series de tiempo de la dirección del viento calculada mediante EMV (cuadro) contra la medida con el anemómetro (equis).	27
7. Series de tiempo de la dirección del viento calculada mediante AG (circulo) contra la medida con el anemómetro (equis).	27
8. Series de tiempo de la dirección del viento calculada con los diferentes métodos.	29
9. Mapa de la dirección del viento calculada con Algoritmos Genéticos a partir de radares HF (flechas azules) y medida con el satélite QuikSCAT (flechas verdes).	30
10. Dirección sintética (eje horizontal) contra dirección calculada (eje vertical).	31
11. Ancho de la distribución direccional sintética (eje horizontal) contra ancho de la distribución direccional calculada (eje vertical).	32
12. Energía sintética que se propaga en dirección contraria al viento (eje horizontal) contra energía calculada que se propaga en dirección contraria al viento (eje vertical).	33
13. Dirección real (eje horizontal) contra dirección calculada (eje vertical).	34
14. s real" (eje horizontal) contra s calculada (eje vertical).	34

Índice de tablas

Tabla	Página
I. Coeficiente de Correlación Circular (CCC) de los cuatro métodos utilizados para calcular la dirección del viento.	28

Capítulo I

Introducción

I.1. Justificación

Las costas pueden ser consideradas como un recurso económico por la importancia económica de las actividades que en ellas se desarrollan. Para su explotación óptima es necesario que la toma de decisiones se base en el conocimiento de la dinámica de las aguas costeras. En algunas ocasiones dicho conocimiento está limitado por la cantidad de información disponible. El presente trabajo pretende mejorar el método de medición de la dirección del viento en la superficie del mar usando radares de alta frecuencia y algoritmos genéticos.

Los radares de *alta frecuencia* (HF) han sido usados durante décadas para medir propiedades de la superficie del mar en áreas que cubren cientos de kilómetros cuadrados con una resolución espacial de pocos kilómetros y resolución temporal de decenas de minutos. Las propiedades de la superficie marina que se miden usando radares HF son la velocidad de la corriente superficial, la altura de las olas y la dirección del viento (Teague *et al.*, 1997).

Entre las mediciones de la dirección del viento destacan las realizadas por Long y Trizna (1973) en el Atlántico norte, donde usando la razón entre los dos picos de primer orden del espectro Doppler resolvieron numéricamente la dirección del viento suponiendo una función de distribución direccional de la energía del oleaje. Después, Harlan y Georges (1994) utilizaron un ajuste lineal entre la dirección del viento y la razón de los dos picos de primer orden del espectro Doppler, al estudiar los vientos en el norte de los océanos Pacífico y Atlántico. Luego, Wyatt *et al.* (1997) propone el uso de estimación de máxima verosimilitud al estudiar los vientos costeros de Humberside en el noreste de Inglaterra.

Dos de los métodos anteriores se basan en el ajuste de modelos de la distribución direccional de la energía de oleaje unimodal. Los modelos de distribución direccional de la energía de oleaje unimodal típicamente dependen de dos parámetros: la dirección de máxima energía (que es igual a la dirección del viento) y el ancho de la distribución direccional. Long y Trizna (1973) resolvieron sólo la dirección de máxima energía suponiendo el ancho de la distribución direccional constante. Después, Wyatt *et al.* (1997) ajustaron tanto la dirección de máxima energía como el ancho de la distribución direccional.

En este estudio se propone el uso de *algoritmos genéticos* para obtener mapas de dirección del viento en la superficie del mar usando información de radares de HF. También se exploran las capacidades del método propuesto para ajustar modelos de tres parámetros de distribución direccional unimodales y modelos de dos parámetros de distribución direccional bimodal.

El método propuesto es aplicado a los datos obtenidos por un sistema de radares HF en las costas de el Golfo de Tehuantepec, donde se desarrollan actividades de importancia económica, como lo son la navegación y la pesca. La contribución del presente

trabajo se limita al mejoramiento de las mediciones de la dirección del viento. La rapidez del viento no es considerada.

I.2. Área de estudio

El Golfo de Tehuantepec (GT) se localiza en la costa sur de México entre los 15 y 16 grados de latitud norte y los 93 y 96 grados de longitud oeste. En esta área del Pacífico mexicano las pesquerías son relevantes debido a la alta productividad primaria (Robles-Jarero y Lara-Lara, 1993), resultante de las surgencias inducidas por los intensos vientos locales (Stumpf, 1975). Dada la geometría del golfo y debido a que la rapidez del viento está fuertemente asociada con su dirección (vientos del norte son más rápidos) (Romero-Centeno *et al.*, 2003), la probabilidad de ocurrencia de un evento de surgencia depende en gran medida de la dirección del viento. Considerando la importancia económica de la zona y su relación con los vientos, resulta evidente la necesidad de incrementar la disponibilidad de información acerca de los vientos locales.

Los fuertes vientos en el GT están asociados tanto a condiciones meteorológicas de gran escala como a las características topográficas locales, i.e. Istmo de Tehuantepec. Estos fuertes vientos, llamados Tehuanos, se extienden cientos de kilómetros en el Pacífico produciendo una disminución significativa en la temperatura superficial del mar en el GT, generando remolinos oceánicos de gran escala e incrementando la cantidad de nutrientes y fitoplancton en la zona eufótica (Romero-Centeno *et al.*, 2003).

Anteriormente, se ha obtenido información del viento en el GT mediante mapas de temperatura medida por el satélites NOAA-2 (Stumpf, 1975), anemómetros montados en buques oceanográficos (Trasvina *et al.*, 1995), simulación numérica (Steenburgh *et al.*, 1998) e imágenes satelitales SAR (Martinez-Diaz-De-Leon *et al.*, 1999). En el GT

nunca se han medido las propiedades del viento con la resolución espacial y temporal ofrecida por los radares de alta frecuencia.

A pesar de la importancia de contar con información espacial y temporal de las propiedades del viento, muy pocos datos están disponibles en zonas cercanas a la costa. Los radares HF son la mejor opción para medir la dirección del viento en zonas costeras porque presentan mayor resolución espacial y temporal que las alternativas. Por ejemplo, el satélite QuikSCAT tiene una resolución espacial de varias decenas de kilómetros y toma una medición cada 12 o 24 horas, mientras que los radares HF tienen una resolución espacial de pocos kilómetros y una resolución temporal de 30 min (toman una medición cada 0.34 seg durante 11.6 min utilizando 2048 mediciones en total para producir un espectro Doppler cada 30 min). Además de medir la dirección del viento, los radares HF proveen de la velocidad de la superficie del mar y la altura del oleaje. Hasta este momento no se ha medido la dirección del viento en el GT mediante radares HF. La dirección del viento no es suficiente dado que para obtener el vector de la velocidad del viento también se requiere la rapidez. Obtener la rapidez del viento mediante radares de alta frecuencia deberá ser el objetivo de un trabajo posterior al presente.

Este trabajo representa una contribucion de los proyectos dirocIOA e INGOTEPa, apoyados por el CONACYT (convenios 62520 y 84514, respectivamente).

I.3. Objetivos

I.3.1. Objetivo general

Obtener mapas de la dirección del viento en el Golfo de Tehuantepec usando radares de alta frecuencia y algoritmos genéticos.

I.3.2. Objetivos particulares

- Implementar un método para encontrar la dirección de máxima energía del oleaje unimodal de 0.41 Hz usando algoritmos genéticos en el ajuste de modelos de dos parámetros para la direccionalidad del oleaje con la información de un sistema dual de radares de alta frecuencia.
- Comparar el método propuesto contra los métodos precedentes.
- Probar el método propuesto en el ajuste de modelos de tres parámetros de la direccionalidad del oleaje unimodal.
- Probar el método propuesto en el ajuste de modelos de la direccionalidad del oleaje bimodal.

Capítulo II

Metodología

II.1. Distribución Direccional de la Energía del Oleaje

El *espectro direccional del oleaje* (S) es una descripción estadística de las elevaciones de la superficie del mar en el espacio definido por el vector número de onda horizontal \mathbf{k} .

S puede ser representado como una función de \mathbf{k} , ya sea en coordenadas cartesianas $S = S(k_x, k_y)$ o en coordenadas polares $S = S(k, \theta)$ donde $k = \sqrt{k_x^2 + k_y^2}$ es la magnitud y θ la dirección de \mathbf{k} .

La función $S = S(k, \theta)$ es comúnmente representada como el producto de dos funciones $S(k, \theta) = F(k)D(\theta)$; una dependiente del número de onda $F(k)$ y otra dependiente de la dirección $D(\theta)$. $F(k)$ describe la densidad espectral de las elevaciones en la superficie en términos del número de onda, es decir, su gráfica es un espectro de energía en el dominio de k . $D(\theta)$ describe la *distribución direccional de la energía del oleaje*, es decir, describe cómo se distribuye angularmente la densidad espectral descrita

por $F(k)$. Es probable que a cada k_i le corresponda una $D(\theta)$ diferente, pero en este trabajo solo se considera $k = 0,67 \text{ m}^{-1}$ (dado que el sistemas de radares HF usado sólo es sensible a las olas con este número de onda) y se supone que para este oleaje particular la distribución direccional en la zona siempre es la misma.

Existen muchos modelos de la distribución direccional de la energía del oleaje. Entre los más populares está $\cos^s \left(\frac{\theta - \theta_\mu}{2} \right)$ (Stewart y Barnum, 1975) donde θ_μ es la dirección de máxima energía del oleaje y $s = 2n$, $n \in \mathbb{N}$ es una medida del ancho de la distribución direccional. También muy usado es el modelo $\text{sech}^2 \beta (\theta - \theta_\mu)$ (Donelan *et al.*, 1985), donde θ_μ es la dirección de máxima energía y β es una medida del ancho de la distribución direccional.

En el presente trabajo se usó una modificación del primer modelo (Cochin *et al.*, 2005):

$$D(\theta) = \frac{\epsilon + (1 - \epsilon) \cos^s \left(\frac{\theta - \theta_\mu}{2} \right)}{N(s)} \quad (1)$$

donde $N(s)$ es un factor de normalización (para que la integral de $D(\theta)$ en todo su dominio sea igual a 1 representando el total de la energía del oleaje con el número de onda $k = 0,67 \text{ m}^{-1}$ viajando en todas las direcciones y cada $D(\theta_i)$ represente una fracción de dicha energía viajando en la dirección θ_i) y $0 < \epsilon < 1$ representa una fracción de la energía del oleaje que viaja en dirección opuesta a θ_μ .

En la figura 1 el eje angular representa la dirección de propagación del oleaje y la distancia del centro a la línea azul representa la fracción de la energía de $F(k)$. Dada la forma de la gráfica, es común referirse a este tipo de modelo como *cardioide*.

Suponiendo que este modelo se cumple en la zona de estudio durante un intervalo de tiempo, es posible ajustar los parámetros del modelo a las lecturas de los radares HF (Wyatt *et al.*, 1997).

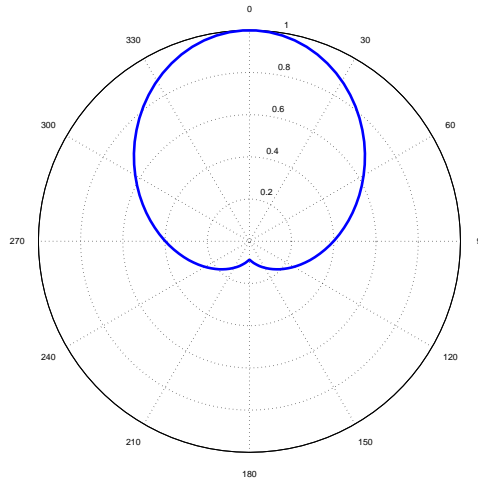


Figura 1: Modelo de la distribución direccional de la energía del oleaje descrito por la ecuación 1. El eje angular representa la dirección azimutal de propagación del oleaje. El eje radial representa la fracción de $F(k)$ viajando en cada dirección.

Long y Trizna (1973) ajustaron las lecturas de radares HF al modelo $\cos^s \left(\frac{\theta - \theta_\mu}{2} \right)$ suponiendo $s = 4$ constante, encontrando así la dirección (único parámetro libre). Wyatt *et al.* (1997) ajustaron lecturas de radares HF al modelo anterior y al modelo $\text{sech}^2 \beta (\theta - \theta_\mu)$ pero encontrando los dos parámetros simultáneamente (la dirección y el ancho de la distribución direccional) en ambos modelos.

Gracias a que el uso de Algoritmos Genéticos lo permite, en el presente trabajo se pretende ajustar las lecturas de un sistema dual de radares HF al modelo descrito por la ecuación 1 para encontrar los tres parámetros involucrados en (1).

II.2. Radares HF

Se utilizó un sistema de radares WERA operando a 16.05 MHz con un alcance de 90 km y se escogieron una resolución espacial de 1.5 km y una resolución temporal de 20 min. En esta sección se describe la manera en la que operan los radares HF y se

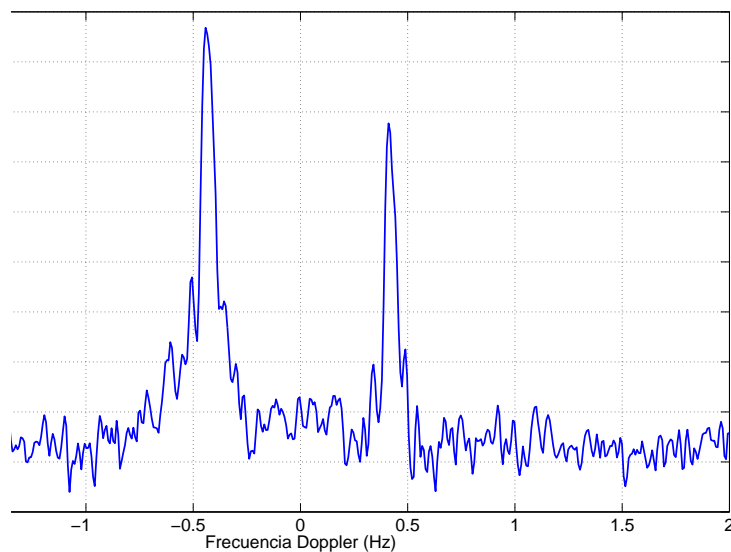


Figura 2: Espectro Doppler típico recibido por los radares HF.

revisa la teoría en la que se basa su funcionamiento.

II.2.1. Operación

Los radares HF tienen dos tipos de antenas: las de transmisión y las de recepción.

La antena transmisora de los radares emite una onda electromagnética HF, es decir, con una frecuencia $\sim 3 - 30$ MHz, la cual en realidad se encuentra dentro del intervalo de ondas de radio y no de radares.

Una fracción de la onda electromagnética transmitida es reflejada por la superficie del mar y recibida por las antenas receptoras. La figura 2 muestra un espectro de energía Doppler de la radiación electromagnética recibida por un radar HF. Este espectro resulta de la reflexión de ondas electromagnéticas en una superficie tan compleja en forma y movimiento como lo es la superficie marina. La interpretación del espectro de energía recibido es la clave de la obtención de información de la superficie del mar.

Los radares HF se basan en un fenómeno de reflexión resonante llamado *reflexión*

Bragg. La reflexión Bragg resulta de la reflexión coherente de la energía reflejada por las olas con longitud de onda igual a la mitad de la longitud de onda transmitida por el radar cuando la incidencia es rasante.

Los radares HF usados en el presente estudio transmiten en una frecuencia de 16.05 MHz, así que la reflexión Bragg ocurre en las olas de longitud de onda igual a 9 m para obtener información acerca de la corriente superficial, estadística de la altura del oleaje y la dirección del viento.

Debido a que se conoce la frecuencia de transmisión del sistema de radares HF, usando la relación de dispersión para aguas profundas $\omega^2 = gk$ es posible conocer las características de propagación de las olas Bragg asociadas a dicha frecuencia y la ubicación de los picos espectrales presentes en el espectro Doppler. Cualquier corrimiento de dichos picos deberá estar asociado a un corrimiento también Doppler pero debido a una corriente marina presente en el momento de la obtención de la información (Teague *et al.*, 1997).

II.2.2. La ecuación de Barrick

La energía reflejada por las olas Bragg que recibe el radar (Barrick, 1972) está descrita por la ecuación:

$$\sigma(\omega) = 2^6 \pi k_0^4 \sum_{m=\pm 1} S(-2mk_0, 0) \delta(\omega - m\omega_B) \quad (2)$$

donde σ es la energía recibida por el radar, ω la frecuencia Doppler, ω_B la frecuencia Bragg, k_0 el número de onda de la onda transmitida por el radar, S es la función del espectro direccional de oleaje en coordenadas cartesianas y δ es la función delta de Dirac. El argumento de δ permite que σ sea diferente de cero solo cuando $\omega = \pm\omega_B$, es

decir, el radar sólo recibe energía reflejada sobre las olas Bragg.

Usando una función para el espectro direccional de oleaje en coordenadas polares, la ecuación anterior se prodría reescribir como:

$$\sigma(\omega) = 2^6 \pi k_0^4 \sum_{m=\pm 1} S\left(2k_0, \theta_0 - \frac{\pi}{2}(m+1)\right) \delta(\omega - m\omega_B) \quad (3)$$

donde S es el espectro direccional de oleaje en coordenadas polares y θ_0 es la dirección hacia la que está orientada el radar.

Resolviendo la suma:

$$\sigma(\omega) = 2^6 \pi k_0^4 [S(2k_0, \theta_0 - \pi)\delta(\omega - \omega_B) + S(2k_0, \theta_0)\delta(\omega + \omega_B)] \quad (4)$$

donde se observa que la suma es igual a cero excepto cuando $\omega = \pm\omega_B$

II.3. Determinación de la dirección del viento usando radares HF

Los tres principales métodos disponibles en la actualidad para calcular la dirección del viento utilizando información de radares HF son: la razón entre los dos picos de máxima energía en el espectro Doppler (Long y Trizna, 1973), ajuste lineal entre la dirección del viento y los picos de máxima energía en el espectro Doppler (Harlan y Georges, 1994) y estimación de máxima verosimilitud (Wyatt *et al.*, 1997). A continuación se revisa cada método.

II.3.1. Razón entre los dos picos de máxima energía del espectro Doppler

Long y Trizna (1973) propusieron usar la razón entre los dos picos de máxima energía del espectro Doppler para determinar numéricamente la dirección del viento suponiendo alguna distribución direccional.

Fundamento.

El espectro direccional del oleaje local unimodal $S(k, \theta)$ se puede escribir como el producto entre una función del espectro de frecuencia $F(k)$ y una función direccionalidad $D(\theta)$

$$S(k, \theta) = F(k)D(\theta). \quad (5)$$

Sustituyendo (5) en (4) se obtiene:

$$\sigma(\omega) = 2^6 \pi k_0^4 [F(2k_0)D(\theta_0 - \pi)\delta(\omega - \omega_B) + F(2k_0)D(\theta_0)\delta(\omega + \omega_B)] \quad (6)$$

evaluando (6) en $\omega = \pm\omega_B$ se obtiene:

$$\sigma(+\omega_B) = 2^6 \pi k_0^4 F(2k_0)D(\theta_0 - \pi) \quad (7)$$

$$\sigma(-\omega_B) = 2^6 \pi k_0^4 F(2k_0)D(\theta_0) \quad (8)$$

dividiendo (7) entre (8) se obtiene:

$$\frac{\sigma(+\omega_B)}{\sigma(-\omega_B)} = \frac{D(\theta_0 - \pi)}{D(\theta_0)} \quad (9)$$

donde se observa que la razón entre los dos picos de máxima energía del espectro Doppler está relacionada con la direccionalidad del oleaje como lo describe (9).

Modelo de la distribución direccional de la energía del oleaje.

Para la función de direccionalidad $D(\theta)$ se escogió (1), donde s es una medida del ancho de la direccionalidad, $N(s)$ es un factor de normalización, θ_μ es la dirección del viento y ϵ es una fracción de la energía que se propaga en la dirección contraria al viento.

Evaluando (1) en $\theta = \theta_0 - \pi$ se obtiene:

$$D(\theta_0 - \pi) = \frac{\epsilon + (1 - \epsilon) \cos^s \frac{\theta_0 - \pi - \theta_\mu}{2}}{N(s)} \quad (10)$$

Evaluando (1) en $\theta = \theta_0$ se obtiene:

$$D(\theta_0) = \frac{\epsilon + (1 - \epsilon) \cos^s \frac{\theta_0 - \theta_\mu}{2}}{N(s)} \quad (11)$$

Sustituyendo (10) y (11) en (9) se obtiene:

$$\frac{\sigma(+\omega_B)}{\sigma(-\omega_B)} = \frac{\epsilon + (1 - \epsilon) \cos^s \frac{\theta_0 - \pi - \theta_\mu}{2}}{\epsilon + (1 - \epsilon) \cos^s \frac{\theta_0 - \theta_\mu}{2}} \quad (12)$$

donde se elimina la función de normalización $N(s)$. Considerando s y ϵ constantes, la dirección del viento μ es la única incógnita. Usando algún método numérico es posible resolver (12) encontrándose dos μ que satisfagan cada caso. Para eliminar dicha ambigüedad es necesario utilizar más información, por ejemplo, la información de otro radar.

II.3.2. Ajuste lineal entre la dirección del viento y la razón los picos de máxima energía en el espectro Doppler

Harlan y Georges (1994) realizaron un ajuste lineal usando la razón entre la energía los picos de máxima energía del espectro Doppler como variable independiente y la dirección principal como variable dependiente.

El *ajuste lineal* es un tipo de regresión en el cual se modela la relación entre una o más variables independientes y una variable dependiente. La función que resulta de un ajuste lineal es una combinación lineal de uno o más parámetros del modelo, llamados coeficientes de regresión.

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^p \beta_i X_i + \text{error} \quad (13)$$

donde Y es la variable dependiente, p es el número de variables independientes, $\hat{X} = [X_1, X_2, \dots, X_p]$ es la matriz de variables independientes y $\hat{\beta} = [\beta_0, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_p]$ es la matriz de coeficientes de regresión.

En el caso que nos ocupa Y es la dirección del viento y X es una matriz de seis columnas ($p = 6$) que contiene las razones entre los valores de los picos de máxima energía los espectros Doppler de ambos radares. Son cuatro picos de energía en total (dos por cada radar) $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ y σ_4 permiten calcular seis razones $\frac{\sigma_1}{\sigma_2}, \frac{\sigma_1}{\sigma_3}, \frac{\sigma_1}{\sigma_4}, \frac{\sigma_2}{\sigma_3}, \frac{\sigma_2}{\sigma_4}$ y $\frac{\sigma_3}{\sigma_4}$.

Usando mínimos cuadrados para encontrar $\hat{\beta}$ se obtiene la expresión

$$\hat{\beta} = (X'X)^{-1}X'Y \quad (14)$$

Una vez encontrados los coeficientes $\hat{\beta}$ se tiene la ecuación 13 con la cual podemos calcular las direcciones del viento dadas las mediciones de los radares. Cabe señalar que

este método requiere de datos medidos *in situ* sobre la dirección del viento para poder encontrar los parámetros del modelo de regresión, y esto conlleva a que el modelo sólo es válido para el momento en que los datos son obtenidos.

II.3.3. Estimación de máxima verosimilitud

Wyatt *et al.* (1997) utilizaron el método estadístico llamada *estimación de máxima verosimilitud* (EMV) para ajustar un modelo de distribución direccional de la energía del oleaje a las lecturas de un sistema de radares HF para encontrar la dirección de máxima energía del oleaje y el ancho de la distribución direccional de la energía del oleaje simultáneamente.

La EMV es un método para encontrar los valores de parámetros que maximizan la probabilidad de que cierto modelo haya producido un conjunto de datos observados (Myung, 2003).

Sea $f(\mathbf{y}|\mathbf{w})$ la *función de densidad de probabilidad* (FDP) que especifica la probabilidad de observar el vector de datos $\mathbf{y} = (y_1, \dots, y_m)$ dado el vector de parámetros $\mathbf{w} = (w_1, \dots, w_k)$ de algún modelo. Si las observaciones individuales, y_i , son estadísticamente independientes entre sí, entonces de acuerdo con la teoría de probabilidad, la FDP para el conjunto de datos \mathbf{y} dados los parámetros \mathbf{w} puede ser expresada como la multiplicación de FDPs para observaciones individuales,

$$f(\mathbf{y}|\mathbf{w}) = f_1(y_1|\mathbf{w})f_2(y_2|\mathbf{w})\dots f_m(y_m|\mathbf{w}) \quad (15)$$

Dado un conjunto de valores de parámetros, la FDP correspondiente mostrará que algunos datos son más probables que otros. Sin embargo, los datos ya han sido observados. Por lo tanto, el problema al que nos enfrentamos puede ser enunciado como: dados

los datos observados y un modelo de interés, encontrar la FDP que es más probable que haya producido los datos. Para resolver este problema inverso, definimos la *función de verosimilitud* invirtiendo los papeles del vector de datos \mathbf{y} y el vector de parámetros \mathbf{w} en $f(\mathbf{y}|\mathbf{w})$,

$$L(\mathbf{w}|\mathbf{y}) = f(\mathbf{y}|\mathbf{w}) \quad (16)$$

Así $L(\mathbf{w}|\mathbf{y})$ representa la verosimilitud de los parámetros \mathbf{w} dados los datos \mathbf{y} , y como tal es una función de \mathbf{w} .

Una vez determinada la función de verosimilitud de un modelo dados los datos, se está en posición de hacer inferencias estadísticas acerca de la población, esto es, la distribución de probabilidad contenida en los datos. Dado que diferentes valores de parámetros produce en diferentes distribuciones de probabilidad, nos interesa encontrar los valores de parámetros que corresponden a la distribución de probabilidad deseada. Wyatt *et al.* (1997) usaron EMV para encontrar la dirección del viento con radares HF. La FDP para el presente problema está dada por $\frac{\Gamma(\nu)\left(\frac{\sigma'}{\sigma}\right)^{(\nu/2)-1}}{[\Gamma(\frac{\nu}{2})]^2(1+(\frac{\sigma'}{\sigma}))^\nu}$ donde Γ es la distribución gamma, ν está relacionado con las estimaciones del espectro Doppler (ventanas aplicadas, traslape de segmentos de datos y el promediado requerido para reducir la varianza en las estimaciones espectrales), σ' son las observaciones y σ es el modelo que se pretende ajustar (Wyatt *et al.*, 1997). Se busca maximizar la función de costo $L = \sum_{i=1}^N -\ln(\text{FDP}(\sigma'_i))$ donde i representa cada pico de primer orden y $N = 4$ (dos picos de primer orden en cada radar da un total de cuatro picos en el espectro Doppler). Entonces la función a maximizar queda

$$L = \sum_{i=1}^N \left[\nu \ln\left(1 + \frac{\sigma'_i}{\sigma_i}\right) - \left(\frac{\nu}{2} - 1\right) \ln\left(\frac{\sigma'_i}{\sigma_i}\right) - \ln(\Gamma(\nu)) + 2 \ln\left(\Gamma\left(\frac{\nu}{2}\right)\right) \right]$$

El modelo es el que se seleccione para la direccionalidad del oleaje local (*e.g.*

$\cos^s \left(\frac{\theta - \mu}{2} \right)$ o $\text{sech}^2 \beta (\theta - \mu)$), los parámetros \boldsymbol{w} son la dirección del viento μ y el ancho de la distribución direccional s o β y los datos \boldsymbol{y} son los dos picos de energía en los espectros Doppler de cada radar (cuatro picos de energía en total).

Para buscar la distribución de probabilidad se utiliza un método de optimización, analítico o numérico, que encuentre los valores de parámetros que maximizan la probabilidad de ocurrencia de los datos observados.

II.4. Métodos de Optimización

Optimización es una importante herramienta en la toma de decisiones y en el análisis de sistemas físicos. Para *optimizar* se requiere definir una medida cuantitativa a maximizar (o minimizar). Esta medida cuantitativa se le llama función de costo. Una función de costo ampliamente usada es la suma de los cuadrados del error y al minimizar esta función se están buscando los *mínimos cuadrados*. Optimizar se refiere a encontrar los valores de las variables con las que se obtiene el máximo (o mínimo) en la función de costo. Existen muchos métodos de optimización y escoger el método apropiado podría determinar si el problema se resuelve rápido o lento, e incluso, si el problema se resuelve o no.

Entre los métodos de optimización más usados destacan el *Método Simplex*, el *Método del Gradiente Reducido Generalizado* (GRG) y los *Algoritmos Genéticos* (AG).

El método simplex es un método de búsqueda directa que evalúa la función de costo alrededor de un conjunto inicial de valores candidato a solución y se mueve hacia el siguiente conjunto candidato a solución basándose en el cambio local (Carlyle *et al.*, 2000).

El método GRG es un método de predicción-corrección que basa su búsqueda en el

gradiente de la función de costo. El algoritmo toma un paso predictor en la dirección del gradiente y luego corrige el paso regresando al juego de restricciones activas (Carlyle *et al.*, 2000).

El inconveniente de estos métodos es que pueden resultar en una solución espuria dando un máximo o mínimo local a diferencia de la solución que es el máximo o mínimo absoluto.

Los AG son algoritmos de optimización probabilísticos que manteniendo una población de cientos o miles de soluciones, usan los conceptos evolutivos de reproducción, mutación y selección para crear generaciones sucesivas esperando encontrar mejores soluciones en cada generación (Carlyle *et al.*, 2000).

Es de esperarse que algunos individuos de la población de candidatos a solución sean máximos o mínimos locales, pero a diferencia de los métodos anteriores, es poco probable que un algoritmo genético arroje como solución una que sea espuria a pesar de que encuentre máximos o mínimos locales.

II.4.1. Algoritmos Genéticos

Definición

Un *Algoritmo Genético* (AG) es una técnica computacional para resolver problemas de optimización. El AG es un método heurístico que se inspira en la biología evolutiva para encontrar el "mejor individuo en una población de candidatos a solución, usando operadores análogos a diversos mecanismos genéticos como herencia, mutación, selección y cruza.

Funcionamiento

Los AG se implementan como una simulación por computadora en la que una población, donde cada individuo es un conjunto de valores que representa un candidato a solución, evoluciona de tal manera que cada generación contiene individuos con mayor probabilidad de ser la solución. La evolución sucede por generaciones y comúnmente inicia a partir de una población de individuos generados aleatoriamente. Cada generación es una iteración del AG y en ella se evalúa la aptitud de cada individuo, se selecciona un subconjunto de individuos de forma estocástica y se modifica aplicándole los operadores genéticos para formar la población de la siguiente generación. Generalmente los algoritmos terminan cuando se produce un número máximo de generaciones o cuando resulta pequeña la diferencia entre la aptitud de los individuos en las poblaciones de generaciones consecutivas.

Representación Genética

En el presente problema cada gen representa un parámetro del modelo de la distribución direccional de la energía del oleaje. En el primer experimento se usó una cadena de dos genes, uno para la dirección de máxima energía del oleaje y otro para el ancho de la distribución direccional del oleaje. En el segundo experimento se usó una cadena de tres genes, los dos del experimento anterior y uno más para representar una fracción de la energía del oleaje viajando en dirección contraria al viento. En el tercer experimento se usó una cadena de tres genes, los dos del primer experimento y uno más para representar el ángulo entre la dirección del viento y los picos de máxima energía en la distribución direccional bimodal del oleaje.

Función de Aptitud

La función de aptitud se define sobre la representación genética y mide la calidad de la solución representada. En el presente problema, se determina el error en el ajuste de la función direccional a los datos de los radares HF. Se evalúa la función direccional en cuatro puntos, correspondientes a los dos picos de primer orden del espectro Doppler de cada radar.

Inicialización

Para la primer generación se crea un conjunto de soluciones aleatorias para formar la población inicial. El tamaño de la población depende del problema, pero típicamente contiene cientos o miles de posibles soluciones. Tradicionalmente la población se genera aleatoriamente cubriendo totalmente el dominio de los posibles valores que pueden tomar los diferentes parámetros.

Selección

En cada generación se selecciona una porción de la población existente para producir la nueva generación. La selección se basa en la aptitud, donde las soluciones más aptas tienen mayor probabilidad de ser seleccionadas.

La mayoría de los métodos de selección son estocásticos de tal manera que una pequeña parte de las soluciones menos aptas también son seleccionadas. Esto ayuda a mantener alta diversidad en la población, evitando una convergencia prematura hacia máximos o mínimos locales.

Reproducción

El siguiente paso es generar la población de la segunda generación mediante la aplicación de los operadores genéticos a los individuos seleccionados. Los operadores genéticos comúnmente utilizados son cruce y mutación.

Se selecciona una pareja de reproductores del acervo seleccionado anteriormente para producir una nueva solución. Cada nueva solución producida usando los operadores de cruce comparte características con ambos de sus progenitores. Luego la nueva solución, o un clon de ella, es mutada aleatoriamente. Por último se selecciona otra pareja para generar otra nueva solución y el proceso continúa hasta que el tamaño de la nueva generación sea el deseado. Generalmente la aptitud promedio de una población incrementará en cada generación.

Finalización.

El proceso generacional se repite hasta que se alcanza la condición de finalización. En el presente caso se seleccionó un número determinado de generaciones.

Procedimiento

1. Crear la población inicial
2. Repetir hasta terminar:
 - 2.1. Aplicar los operadores genéticos a la población.
 - 2.2. Evaluar la aptitud de cada individuo de la población.
 - 2.3. Seleccionar los individuos más aptos para pasar a la siguiente generación.
3. Seleccionar el individuo más apto.

Algoritmos Genéticos y Estimación de Máxima Verosimilitud.

Los métodos de optimización son ampliamente usados en análisis estadístico multivariado. En particular Lewis (1998) usó AG en EMV para la reconstrucción filogenética de 55 taxa de plantas.

Wyatt *et al.* (1997) propusieron el uso de EMV para encontrar la dirección del viento a partir de información de radares HF.

En esta tesis, siguiendo a Lewis (1998) y Wyatt *et al.* (1997), se propone el uso de AG en EMV para encontrar la dirección del viento a partir de lecturas de radares HF.

Capítulo III

Resultados

III.1. Dirección del viento en un punto

Se repitieron los métodos basados en la relación entre la razón de los picos de primer orden del espectro Doppler y el modelo de direccionalidad del oleaje (Long y Trizna, 1973), ajuste lineal de la razón entre picos de primer orden del espectro Doppler (Harlan y Georges, 1994) y la estimación de máxima verosimilitud (Wyatt *et al.*, 1997). A continuación se presentan los resultados obtenidos con cada método y se comparan con las mediciones realizadas con un anemómetro marca Gill modelo R3A con una frecuencia de muestreo de 20 Hz y una exactitud en la dirección $< \pm 1^\circ$ que estuvo montado en una boya localizada en los 15° de latitud norte y 96° de longitud oeste.

III.1.1. Razón entre los dos picos de máxima energía del espectro Doppler

Se reprodujo el método de la razón entre picos de primer orden del espectro Doppler (Long y Trizna, 1973) y se encontraron las dos soluciones para cada radar, como se

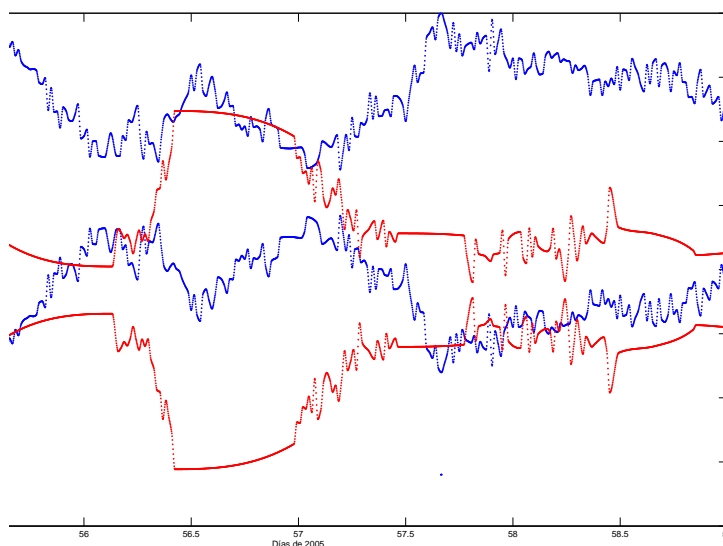


Figura 3: Soluciones numéricas para la razón de picos de primer orden en estación Cangrejo (azul) y Santa María (rojo).

muestra en la figura 3.

La figura 3 muestra un par de soluciones para cada radar. Las soluciones son simétricas respecto al ángulo de orientación del radar.

Se calculó el promedio de la pareja de soluciones que presentó la menor diferencia, una de cada radar, y se comparó contra la dirección medida por el anemómetro en la figura 4.

La figura 4 muestra que la diferencia entre la dirección calculada y la dirección medida es pequeña durante los intervalos de tiempo en los que la dirección es constante. Lo anterior sugiere que este método es efectivo sólo cuando la dirección del viento se mantiene constante durante varias horas.

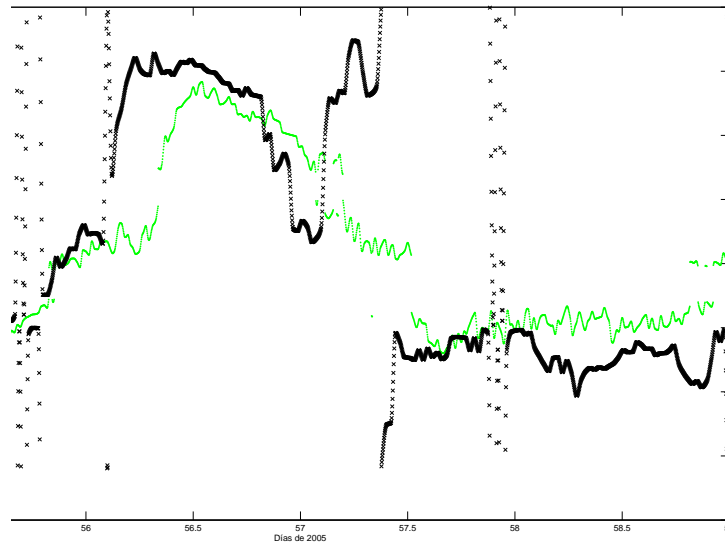


Figura 4: Promedio vectorial de las soluciones numéricas para la razón de picos de primer orden (verde) y dirección del viento medida con el anemómetro (negro).

III.1.2. Ajuste lineal entre la dirección del viento y la razón los picos de máxima energía en el espectro Doppler

Se reprodujo el método de ajuste lineal (Harlan y Georges, 1994). Se realizó un ajuste lineal usando como variables independientes las seis razones ($\frac{\sigma_1}{\sigma_2}$, $\frac{\sigma_1}{\sigma_3}$, $\frac{\sigma_1}{\sigma_4}$, $\frac{\sigma_2}{\sigma_3}$, $\frac{\sigma_2}{\sigma_4}$ y $\frac{\sigma_3}{\sigma_4}$) entre los valores de los picos de máxima energía los espectros Doppler de ambos radares y como variable dependiente la dirección del viento provista por el anemómetro.

La figura 5 sugiere que este método funciona sólo para algunas direcciones.

III.1.3. Estimación de Máxima Verosimilitud

Se utilizó el método EMV como lo describen Wyatt *et al.* (1997). Sin embargo, Wyatt *et al.* (1997) no especifican el método de optimización utilizado. En el presente estudio se supone que Wyatt *et al.* (1997) utilizaron el mismo método de optimización

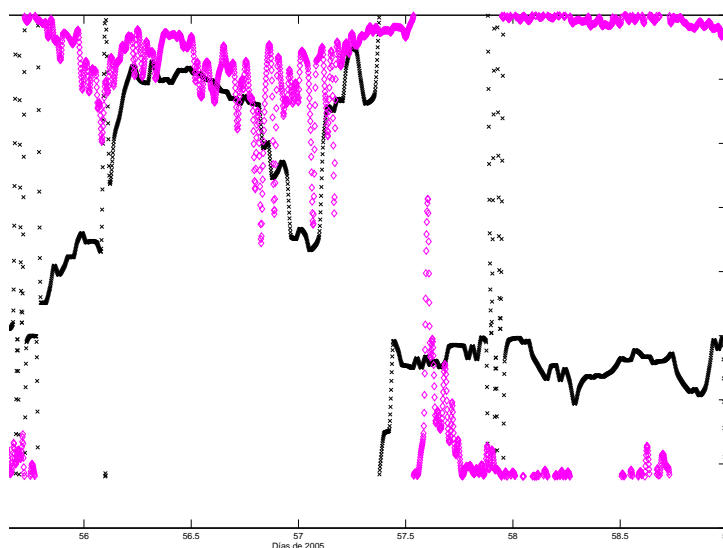


Figura 5: Series de tiempo de la dirección del viento calculada con el ajuste lineal (diamante) contra la medida con el anemmetro (equis).

que Wyatt (1987), el cual evalúa todo el dominio en intervalos de 15° . Cabe resaltar que Wyatt *et al.* (1997) utilizaron EMV, mientras que Wyatt (1987) utilizó Mínimos Cuadrados.

La figura 6 compara series de tiempo de la dirección del viento calculada mediante EMV contra la medida con el anemómetro.

III.1.4. Algoritmo Genético

Se calculó la dirección del viento mediante algoritmos genéticos.

La figura 7 compara series de tiempo de la dirección del viento calculada mediante AG contra la medida con el anemómetro.

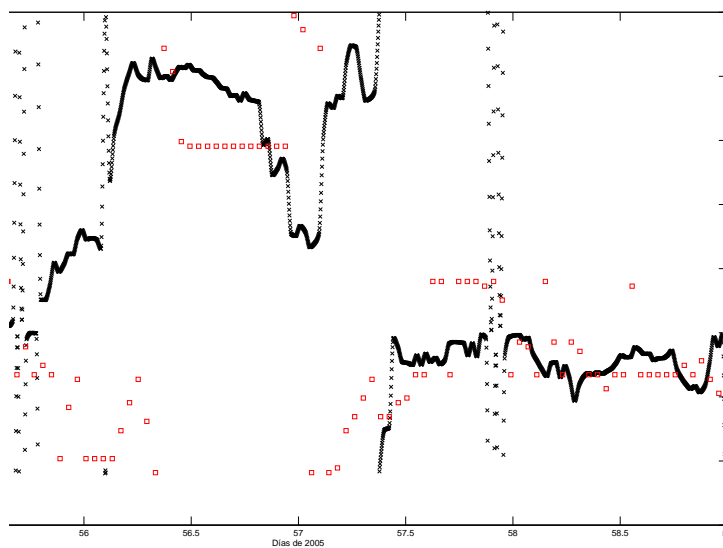


Figura 6: Series de tiempo de la dirección del viento calculada mediante EMV (cuadro) contra la medida con el anemómetro (equis).

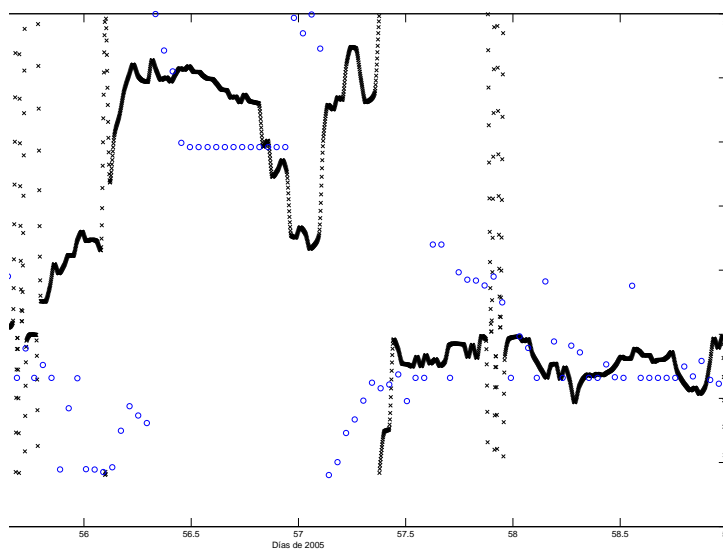


Figura 7: Series de tiempo de la dirección del viento calculada mediante AG (circulo) contra la medida con el anemómetro (equis).

III.1.5. Comparación

Debido a que en este trabajo se tienen que comparar parámetros angulares se utilizó el *Coficiente de Correlación Circular* (CCC) propuesto por Fisher y Lee (1983) (ecuación 1) entre la dirección calculada con cada método y la dirección medida con el anemómetro de la boya ASIS.

$$r = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \sin(a_i - a_j) \sin(b_i - b_j)}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \sin^2(a_i - a_j) \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \sin^2(b_i - b_j)}} \quad (1)$$

Fisher y Lee (1983) explican que entre dos variables angulares $a, b \in [0, 2\pi]$ una correlación positiva describe una relación del tipo $a = b + c$, mientras que una correlación negativa describe una relación del tipo $a = -b + c$, donde c es un ángulo constante.

En series de tiempo largas ningún método presentó un CCC mayor que 0.3. Para hacer evidentes las ventajas de usar modelos de más de un parámetro se calculó el CCC en un intervalo de tiempo de 12 horas (25 febrero 2005 de las 00:00 hr a las 12:00 hr) en el que la dirección no es constante. Los resultados se muestran en el cuadro 3.1.

Cuadro I: Coeficiente de Correlación Circular (CCC) de los cuatro métodos utilizados para calcular la dirección del viento.

Método	CCC
Razón de Picos	-0.670
Ajuste Lineal	0.447
EMV	0.575
AG	0.637

El cuadro 3.1 sugiere que el método de los AG es más preciso durante los intervalos de tiempo en el que la dirección no es constante. Para algunos intervalos de tiempo diferentes los resultados son opuestos a los mostrados.

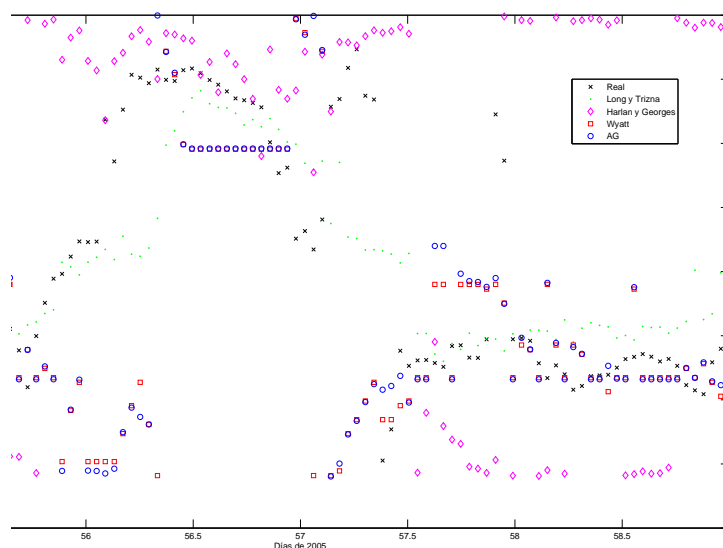


Figura 8: Series de tiempo de la dirección del viento calculada con los diferentes métodos.

La figura 8 muestra series de tiempo de la dirección del viento calculada con los diferentes métodos y la dirección medida con el anemómetro en el mismo punto. La figura muestra que cada método es más preciso que el resto en diferentes intervalos de tiempo de la serie de tiempo. No hay un método que siempre sea más preciso que el resto.

III.2. Mapa de dirección del viento

QuikSCAT (o *QSCAT*) es el nombre del escaterómetro SeaWinds montado en el satélite QuikBird, el cual ha estado en órbita desde junio de 1999. QuikSCAT mide el viento cerca de la superficie del océano.

QuikSCAT es un radar que transmite pulsos electromagnéticos en la frecuencia de las microondas hacia la superficie terrestre y mide la energía reflejada hacia el instrumento. La energía reflejada está relacionada con la rugosidad de la superficie. La rugosidad de la superficie de los océanos está altamente correlacionada con la rapidez y dirección del

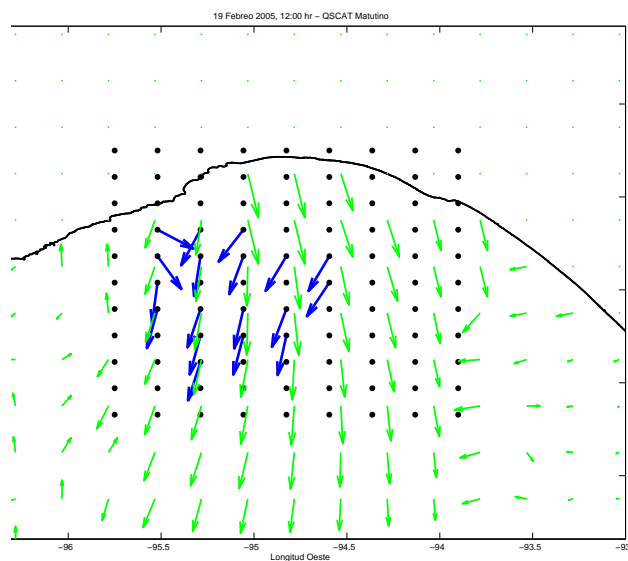


Figura 9: Mapa de la dirección del viento calculada con Algoritmos Genéticos a partir de radares HF (flechas azules) y medida con el satélite QuikSCAT (flechas verdes).

viento cercano a la superficie. Así se deducen la rapidez y dirección del viento a 10 m de la superficie a partir de mediciones del escaterómetro de la energía reflejada (Ebuchi *et al.*, 2002).

QuikSCAT ofrece dos conjuntos de datos diarios con cobertura mundial con una resolución espacial de $0,25^\circ$ (≈ 27 km) y una exactitud en la dirección $< \pm 1^\circ$ (Ebuchi *et al.*, 2002).

La figura 9 muestra que las direcciones del viento calculadas con el método propuesto son similares a las direcciones del viento medidas por el satélite QuikSCAT. La diferencias observadas podrían estar asociadas a que hay una diferencia de varias horas entre las mediciones del satélite con respecto a las de los radares HF.

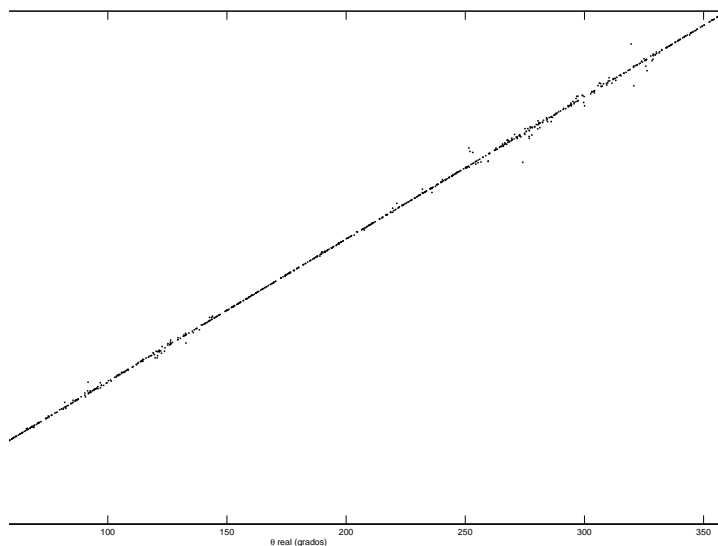


Figura 10: Dirección sintética (eje horizontal) contra dirección calculada (eje vertical).

III.3. Exploración de las capacidades del método

III.3.1. Tres parámetros

Se aplicó el método propuesto a datos sintéticos para resolver un modelo de distribución direccional de tres parámetros: dirección de máxima energía del oleaje θ_μ , ancho de la distribución direccional s y cantidad de energía ϵ que viaja en dirección contraria a la dirección de máxima energía. Se generaron aleatoriamente mil tríos de $\theta_\mu \in [0^\circ, 360^\circ]$, $s \in [0, 8]$, $\epsilon \in [0, 0.5]$ y usando el modelo descrito por la ecuación (1) en (6) en se calcularon las cuatro σ (suponiendo que el factor en (6) $2^6 \pi k_0^4 F(2k_0) = 1$) que en teoría recibirían los radares.

La figura 10 muestra las direcciones del viento sintéticas y las correspondientes direcciones del viento calculadas con AG. El AG midió la dirección del viento con una precisión de $\pm 0.087^\circ$. El coeficiente de correlación asociado es 0.999. Lo anterior indica que si el modelo de distribución direccional de la energía del oleaje se cumpliera

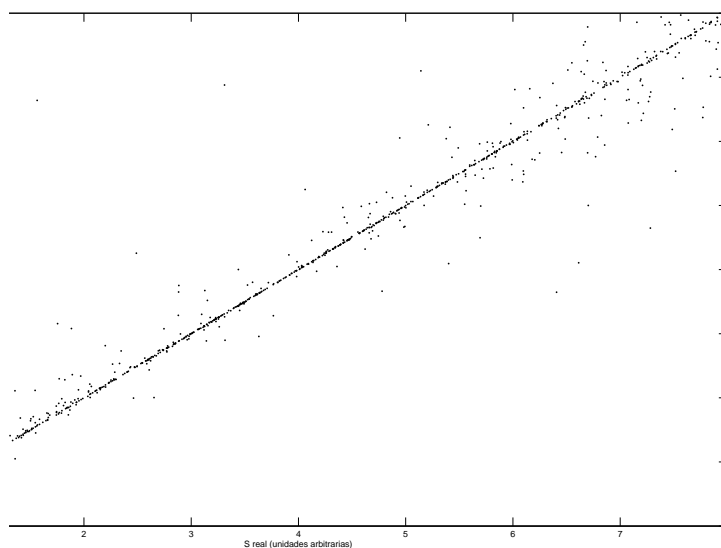


Figura 11: Ancho de la distribución direccional sintética (eje horizontal) contra ancho de la distribución direccional calculada (eje vertical).

perfectamente en la naturaleza entonces el metodo propuesto encontraría la dirección de máxima energía con alta precisión.

La figura 11 muestra los anchos de las distribuciones direccionales sintéticos y los correspondientes anchos de las distribuciones direccionales calculados con AG. El coeficiente de correlación asociado es 0.96.

La figura 12 muestra el parámetro sintético asociado a la cantidad de energía que se propaga en dirección contraria al viento y el correspondiente parámetro calculado con AG. El coeficiente de correlación asociado es 0.83.

III.3.2. Bimodalidad direccional

El método utilizado no puede discernir entre distribuciones unimodales y distribuciones bimodales. Se generaron datos sintéticos con el modelo:

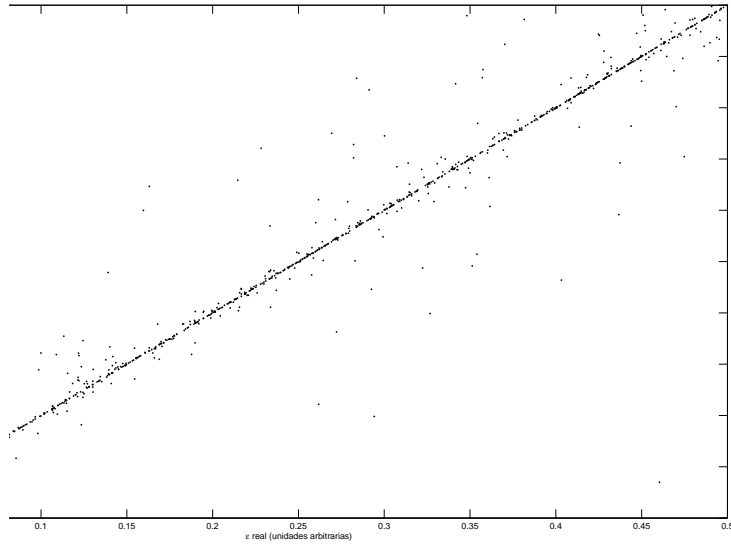


Figura 12: Energía sintética que se propaga en dirección contraria al viento (eje horizontal) contra energía calculada que se propaga en dirección contraria al viento (eje vertical).

$$D(\theta) = \frac{\max\left(\cos^s\left(\frac{\theta-\theta_\mu-15^\circ}{2}\right), \cos^s\left(\frac{\theta-\theta_\mu+15^\circ}{2}\right)\right)}{N(s)} \quad (2)$$

Se ajustaron los datos sintéticos al mismo modelo que los generó.

La figura 13 muestra las direcciones del viento sintéticas y las correspondientes direcciones del viento calculadas con AG. El AG midió la dirección del viento con una precisión de ± 0.058 grados. El coeficiente de correlación asociado es 0.999.

La figura 14 muestra las s sintéticas y las s calculados con AG. El coeficiente de correlación asociado es 0.99.

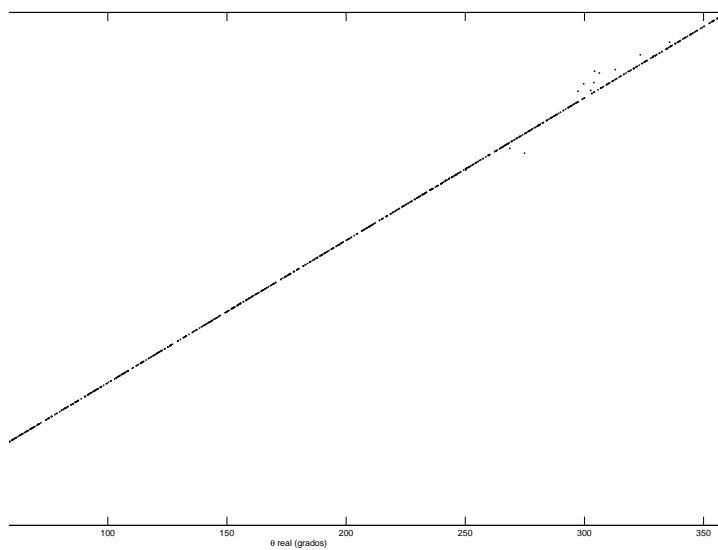


Figura 13: Dirección real (eje horizontal) contra dirección calculada (eje vertical).

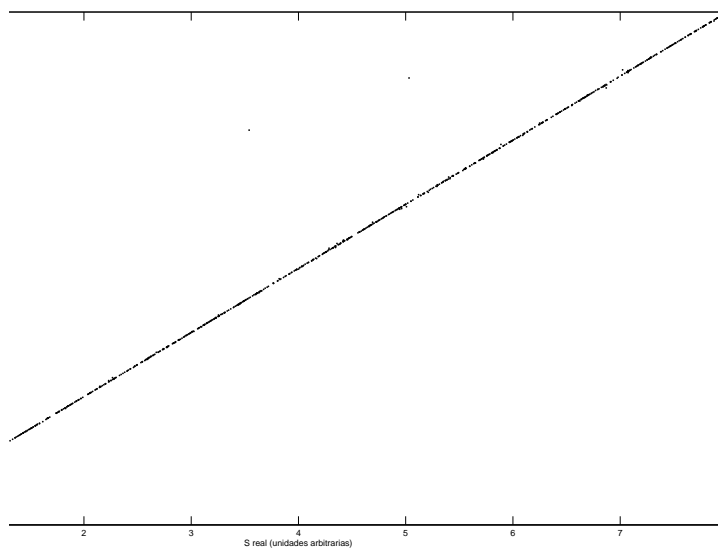


Figura 14: s real (eje horizontal) contra s calculada (eje vertical).

Capítulo IV

Discusión y Conclusión

El método para obtener la dirección del viento que usa la razón entre los dos picos de máxima energía del espectro Doppler presentó la menor correlación (-0.670). El método presenta el mayor error durante los intervalos de tiempo cuando la dirección no es constante. Wyatt *et al.* (1997) sugirió que el error está asociado a que el método requiere suponer que el ancho de la distribución direccional de la energía del oleaje es constante (modelo de sólo un parámetro).

El método del ajuste lineal presentó mayor correlación (0.447) que el anterior. La desventaja de este método es que los coeficientes de la función lineal son específicos para el intervalo de tiempo de las mediciones y para el punto donde se localizaba el anemómetro.

El método computacional usado por Wyatt *et al.* (1997) para la estimación de máxima verosimilitud presentó una correlación menor (0.575) que la del AG (0.637). Este método evalúa la función direccional en todo el dominio de direcciones en intervalos equiespaciados.

Tanto el método que utiliza el Algoritmo Genético como el que utiliza Wyatt *et al.*

(1997) resuelven la dirección y el ancho de la distribución direccional, lo que se tradujo en un mejor ajuste que el logrado con el método de la razón entre picos de primer orden durante los intervalos de tiempo cuando la dirección del viento no es constante. Los Algoritmos Genéticos requieren menor costo computacional para brindar la misma precisión ofrecida por el método computacional usado por Wyatt *et al.* (1997).

Al probar la capacidad del AG en el cálculo de la dirección para modelos de tres parámetros y bimodales la precisión de la medición fue menor que 0.1° y el coeficiente de correlación entre la dirección sintética y la encontrada fue 0.999 para ambas funciones. En la solución del resto de los parámetros la correlación siempre resultó mayor que 0.83.

La figura 9 sugiere de manera cualitativa que el AG fue capaz de resolver la dirección del viento en el área cubierta por los radares HF al compararlos contra mediciones satelitales. La ventaja de las mediciones de los radares HF es que tienen mayor resolución espacial y temporal que la provista por satélites como QuikSCAT.

El algoritmo genético probó ser una alternativa viable como método de optimización para el ajuste de modelo de funciones de la distribución direccional de la energía del oleaje de dos parámetros. El AG probó ser capaz de ajustar modelos direccionales unimodales de tres parámetros. En conclusión se recomienda el uso de Algoritmos Genéticos en la obtención de mapas de la dirección del viento usando radares de alta frecuencia.

Capítulo V

Anexos

Código en MATLAB:

```
global x t n;
mu = rand*2*pi; % Una direccion sintetica al azar
mu*180/pi
t = [110 (110+180) 214 (214-180)]'*pi/180; % direccion en la que ven
% los radares en radianes
n = 4; % Numero de picos de primer orden
x = (cos((t-mu)./2)).^4 % Lo que observara el radar si el modelo se cumple

solucion = ag('cos_mle',1,2*pi,t,x,[],[],[],[],[])

function solucion = ag(fun,npar,restriccion,x,y,npob,ngen,prob,muta,max_cuates);
% AG Algoritmo Genetico Simple.
% Encuentra los parmetros SOLUCION que mejor ajustan la funcin FUN a
% los datos X, Y.
```

```

%
% SOLUCION = AG(FUN,NPAR,RESTRICCION,X,Y,NPOB,NGEN,PROB,MUTA,MAX_CUATES);
% FUN Cadena de caracteres con el nombre de la funcion.
% NPAR Numero de parametros de la funcion FUN.
% RESTRICCION Vector 1xNPAR con los valores limite (maximo si es positivo
%   o minimo si es negativo) de los parametros. [] = sin restriccion.
% X Datos independientes.
% Y Datos dependientes.
% NPOB Tamano de la poblacion de soluciones. [] = 100
% NGEN Numero de generaciones o iteraciones del algoritmo. [] = 100
% PROB Probabilidad de que cada gen mute. [] = 0.50
% MUTA Maximo porcentaje que puede mutar. [] = 0.50
% MAX_CUATES Maximo numero de parejas de cuates que se obtendran de cada
%   pareja de progenitores. [] = 5
%

%% Parametros iniciales
% Se configura el Algoritmo definiendo parametros anlogos en la Genetica
if isempty(npob), npob = 100; end % tamano de la poblacion de soluciones
if isempty(ngen), ngen = 100; end % iteraciones del algoritmo
if isempty(prob), prob = 0.50; end % probabilidad de que cada gen mute
if isempty(muta), muta = 0.50; end % maximo porcentaje que puede mutar
if isempty(max_cuates), max_cuates = 5; end % Maximo numero de parejas de cuates que

%% Poblacion inicial

```



```

poblacion = rand(npob,npar); % La poblacion inicial se genera aleatoriamente
if isempty(restriccion) % Prueba si hay restriccion
    restriccion = ones(1,npar);
else
    poblacion = cell2mat(cellfun(@times,num2cell(poblacion,1),num2cell(restriccion,1),1));
end

%% Iteraciones
% La poblacion de soluciones evoluciona mediante la cruza y mutacion
s = npob;
hw = waitbar(0,'Evolucionando...');
for i = 1:ngen

    %% Orden aleatorio de parejas (barajar o revolver)
    poblacion(:,npar+1) = rand(s,1);
    poblacion = sortrows(poblacion,npar+1);

    %% Cruza
    cruza = zeros((s-mod(s,2))*max_cuates,npar+1); % Esta matriz contendr los hijos
    c = -1; % contador
    for j = 1:2:s-1
        cuates = ceil(rand*max_cuates); % El numero de hijos de cada pareja es variable
        for k = 1:cuates
            c = c + 2;
            mama = rand(1,npar+1)>0.5;

```

```

        papa = ~mama;
        cruza(c,:) = [poblacion(j,:).*mama+poblacion(j+1,:).*papa];
        cruza(c+1,:) = [poblacion(j,:).*papa+poblacion(j+1,:).*mama];
    end
end
poblacion = [poblacion; cruza(1:c+1,:)];

%% Mutacion
s = size(poblacion,1);
mutantes = (rand(s,npar+1)<prob);
mutacion = cell2mat(cellfun(@times,num2cell(muta*(rand(s,npar+1)*2-1),1),num2cell(1,s),1));
poblacion = [poblacion; poblacion + mutantes.*mutacion];

%% Material genetico de organismos de otra poblacion (o generacion espontanea)
nuevos = rand(npob,npar); % La poblacion inmigrante se genera aleatoriamente
nuevos = cell2mat(cellfun(@times,num2cell(nuevos,1),num2cell(restriccion,1),1),num2cell(1,npob),1));
poblacion = [poblacion; nuevos NaN*ones(npob,1)];

%% Calculo de la aptitud (o viabilidad)
s = size(poblacion,1);
viabilidad = zeros(s,1);
for j = 1:s
    viabilidad(j) = feval(fun,poblacion(j,1:npar));
end

```

```

poblacion(:,npar+1) = viabilidad;
idx = imag(viabilidad) ~= 0;
poblacion(idx,:)=[];
idx = isnan(poblacion(:,npar+1));
poblacion(idx,:)=[];

%% Seleccion
poblacion = unique(poblacion,'rows');
poblacion = sortrows(poblacion,-(npar+1));
s = min([size(poblacion,1),npob]);
poblacion = poblacion(1:s,:);
waitbar(i/ngen,hw)
end
close(hw)

%% Resultados
solucion = poblacion(1,1:end-1);

function loglik = cos_mle(w)
% COS_MLE La funcion de veromimilitud-log del modelo coseno
global n t x;
mu = w(1); % Direccion principal del viento
s = 4; % Ancho de la distribucion direccional
p = (cos((t-mu)./2)).^s; % Modelo coseno de direccionalidad del oleaje

```

```
p = p + (p == zeros(4,1))*1e-5 - (p == ones(4,1))*1e-5; % asegurar 0<p<1
nu = 18.2;
for i = 1:4
    r_ = x(i);
    r = p(i);
    loglik(i) = log(gamma(nu))-2*log(gamma(nu/2))+ ... % Funcion de
        (nu/2-1)*log(r_/r)-nu*log(1+r_/r)-log(r);      % verosimilitud-log
end
loglik = sum(loglik);
```

Bibliografía

- Barrick, D. (1972). Remote Sensing Of Sea State By Radar. volumen 4, páginas 186–192. Oceans. IEEE Conference Proceeding.
- Carlyle, W., Montgomery, D., y Runger, G. (2000). Optimization problems and methods in quality control and improvement. *Journal of Quality Technology*, **32**(1):1–17.
- Cochin, V., Forget, P., y Mercier, G. (2005). Sea surface currents and wind direction by VHF radar: results and validation. volumen 2, páginas 942–947. Oceans 2005 - Europe. IEEE Conference Proceeding.
- Donelan, M., Hamilton, J., y Hui, W. (1985). Directional Spectra of Wind-Generated Waves. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series A-Mathematical Physical and Engineering Sciences*, **315**(1534):509–562.
- Ebuchi, N., Graber, H., y Caruso, M. (2002). Evaluation of wind vectors observed by QuikSCAT/SeaWinds using ocean buoy data. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, **19**(12):2049–2062.
- Fisher, N. y Lee, A. (1983). A Correlation-Coefficient for Circular Data. *Biometrika*, **70**(2):327–332.
- Harlan, J. y Georges, T. (1994). An Empirical Relation Between Ocean-Surface Wind

- Direction And The Bragg Line Ratio Of Hf Radar Sea Echo Spectra. *Journal Of Geophysical Research-Oceans*, **99**(C4):7971–7978.
- Lewis, P. (1998). A genetic algorithm for maximum-likelihood phylogeny inference using nucleotide sequence data. *Molecular Biology and Evolution*, **15**(3):277–283.
- Long, A. y Trizna, D. (1973). Mapping Of North-Atlantic Winds By Hf Radar Sea Backscatter Interpretation. *Ieee Transactions On Antennas And Propagation*, **Ap21**(5):680–685.
- Martinez-Diaz-De-Leon, A., Robinson, I., Ballesteros, D., y Coen, E. (1999). Wind Driven Ocean Circulation Features In The Gulf Of Tehuantepec, Mexico, Revealed By Combined Sar And Sst Satellite Sensor Data. *International Journal Of Remote Sensing*, **20**(8):1661–1668.
- Myung, I. (2003). Tutorial on maximum likelihood estimation. *Journal of Mathematical Psychology*, **47**(1):90–100.
- Robles-Jarero, E. y Lara-Lara, J. (1993). Phytoplankton Biomass And Primary Productivity By Size Classes In The Gulf Of Tehuantepec, Mexico. *Journal Of Plankton Research*, **15**(12):1341–1358.
- Romero-Centeno, R., Zavala-Hidalgo, J., Gallegos, A., y O'brien, J. (2003). Isthmus Of Tehuantepec Wind Climatology And Enso Signal. *Journal Of Climate*, **16**(15):2628–2639.
- Steenburgh, W., Schultz, D., y Colle, B. (1998). The Structure And Evolution Of Gap Outflow Over The Gulf Of Tehuantepec, Mexico. *Monthly Weather Review*, **126**(10):2673–2691.

- Stewart, R. y Barnum, J. (1975). Radio Measurements of Oceanic Winds at Long Ranges - Evaluation. *Radio Science*, **10**(10):853–857.
- Stumpf, H. (1975). Satellite Detection Of Upwelling In Gulf Of Tehuantepec, Mexico. *Journal Of Physical Oceanography*, **5**(2):383–388.
- Teague, C., Vesecky, J., y Fernandez, D. (1997). HF Radar Instruments, Past to Present. *Oceanography*, **10**(2):40–44.
- Trasvina, A., Barton, E., Brown, J., Velez, H., Kosro, P., y Smith, R. (1995). Offshore Wind Forcing In The Gulf Of Tehuantepec, Mexico - The Asymmetric Circulation. *Journal Of Geophysical Research-Oceans*, **100**(C10):20649–20663.
- Wyatt, L. (1987). Ocean Wave Parameter Measurement Using A Dual-Radar System - A Simulation Study. *International Journal of Remote Sensing*, **8**(6):881–891.
- Wyatt, L., Ledgard, L., y Anderson, C. (1997). Maximum-Likelihood Estimation Of The Directional Distribution Of 0.53-Hz Ocean Waves. *Journal Of Atmospheric And Oceanic Technology*, **14**(3, Part 2):591–603.