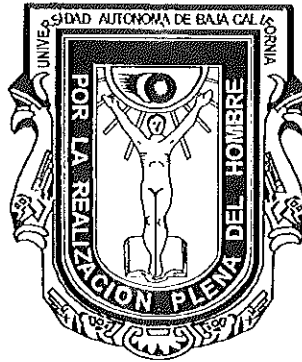


UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA
FACULTAD DE CIENCIAS MARINAS
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES OCEANOLÓGICAS



Análisis del Oleaje en la Región Costera Utilizando
Imágenes de Radar de Apertura Sintética (SAR/ERS-2):
Aplicación en la región de Rosarito, Baja California, México.

TESIS
Que para obtener el grado de
DOCTOR EN OCEANOGRAFÍA COSTERA
presenta

Jorge Torres Rodríguez

Ensenada, Baja California, Febrero de 2005.

RESUMEN

El Radar de Apertura Sintética (SAR) es el único instrumento capaz de proporcionar información espacial del campo de olas de manera sistemática y a escalas regional y global. Aunque esta tecnología se ha aplicado con éxito en estudios de escala global y para casos en mar profundo, existen relativamente pocos trabajos sobre la aplicación de imágenes de SAR en estudios de oleaje en regiones costeras. A diferencia del mar abierto, donde las condiciones del oleaje son más homogéneas, en la región costera se presenta mayor variabilidad espacial en los parámetros del oleaje, principalmente en sus características direccionales. La naturaleza no homogénea del oleaje costero constituye un problema, ya que el campo de olas puede presentar efectos de agrupamiento y refracción, así como difracciones causadas por la interferencia con obstáculos en la costa. En este trabajo se propone un esquema para analizar las características del oleaje en la zona costera a partir de imágenes de SAR. Por un lado se investigó la posibilidad de recuperar el espectro del oleaje mediante técnicas de inversión, utilizando espectros iniciales generados con un modelo para olas en aguas someras. Se analizó el desarrollo del espectro invertido durante las diferentes etapas del proceso de inversión, así como la influencia del espectro de primera aproximación en el resultado final de la inversión. Por otra parte, mediante la transformada de ondículas se analizó la evolución espacial del oleaje conforme éste se aproxima a la costa, permitiendo visualizar la formación de grupos de olas y estimar los parámetros característicos del oleaje (longitud, velocidades de grupo y de fase, y período) con base en la teoría lineal de olas. Los resultados obtenidos demuestran la viabilidad del esquema propuesto. Los espectros de olas recuperados presentaron una mejora sustancial en relación a sus correspondientes espectros iniciales, mostrando picos espectrales mejor definidos, así como sistemas de olas y otras estructuras no perceptibles en el espectro de primera aproximación. Se observó además una baja dependencia del espectro recuperado con respecto al espectro de primera aproximación. En cuanto al análisis espacial del campo de olas, se comprobó que mediante la transformada de ondículas es posible observar la coexistencia de diferentes sistemas de olas formando grupos, y que la variabilidad espacial en el espectro de ondículas está relacionada con las propiedades de agrupamiento y dispersión del oleaje. Se recomienda llevar a cabo el proceso de inversión, procurando evitar la interpretación directa de los parámetros del oleaje a partir del espectro de la imagen, siendo esto indispensable en los casos de oleaje con dirección de propagación acimutal. Aunque estos resultados son satisfactorios, aún es necesario hacer una validación de la metodología con suficiente respaldo estadístico. Para ello se requiere contar con un mayor número de mediciones de oleaje tomadas al momento del pase del satélite. Se recomienda además contar con modelos de olas y de viento calibrados para la zona de estudio, de manera que éstos aporten información de mejor calidad, tanto en la etapa inicial de inversión, como para la fase de validación de los resultados.

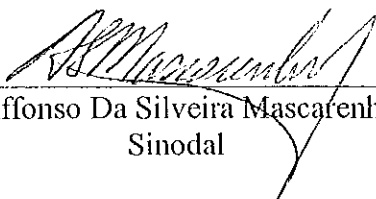
Análisis del Oleaje en la Región Costera Utilizando
Imágenes de Radar de Apertura Sintética (SAR/ERS-2):
Aplicación en la región de Rosarito, Baja California, México.

TESIS PARA OBTENER EL GRADO DE
DOCTOR EN OCEANOGRAFÍA COSTERA

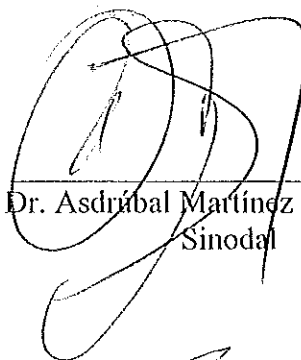
Aprobada por:



Dr. Francisco Javier Ocampo Torres
Director



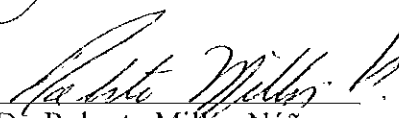
Dr. Affonso Da Silveira Mascarenhas Jr.
Sinodal



Dr. Asdrúbal Martínez Díaz de León
Sinodal



Dr. Carlos Rodolfo Torres Navarrete
Sinodal



Dr. Roberto Millán Núñez
Sinodal

DEDICATORIA

*A mi esposa Yolanda, por su amor y apoyo en el transcurso de estos años.
Gran parte del mérito es de ella.*

*A mis hijos, Jorge y Yolanda Elvira, esperando poder compensarles de alguna manera
el tiempo que dediqué a este trabajo.*

A todo aquel que guste de la Teledetección.

*Se está arrimando un día de Sol
Un día de duendes en añejo
Se acerca un pájaro feroz
Zumbando algo se ve color
Se acerca un tiempo de conejos...*

Silvio Rodríguez

AGRADECIMIENTOS

Deseo expresar mi agradecimiento a los integrantes de mi comité de tesis. Al Dr. Francisco Ocampo por sus sugerencias que me ayudaron a mejorar sustancialmente este documento. Al Dr. Asdrúbal Martínez, sus comentarios y observaciones me fueron de gran utilidad para aclarar algunos conceptos. Al Dr. Affonso Da S. Mascarenhas, al Dr. Carlos Torres y Dr. Roberto Millán por su apoyo y por haber depositado en mí su confianza para llegar a concluir este trabajo.

Los Talleres de Oceanografía por Satélite, impartidos en la División de Oceanología del CICESE y apoyados por el proyecto CONACyT "Fase 1 de Oceanografía por Satélite" (DAJ J002/750/00 C-834/00), sirvieron como ambiente para propiciar la interacción con académicos de primer nivel en esta disciplina. Mi reconocimiento al Dr. Keith Raney y al Dr. Werner Alpers, por la simplicidad con que explicaron en sus cursos algunos conceptos sobre teoría de radar y detección de oleaje. En especial quiero agradecer al Dr. Gerbrand Komen por sus sugerencias en la etapa inicial de este trabajo. Ahora comprendo lo que me quiso decir con aquella exclamación... Good luck, and enjoy it!

A la Dra. Eva Bauer por permitir el acceso al algoritmo WASAR. A la Dra. Susan Lehner por su amable disposición al analizar algunos de mis primeros resultados. Un agradecimiento especial al Dr. Nelson Violante-Carvalho, por sus consejos en relación al funcionamiento del algoritmo WASAR. Agradezco también al Dr. Johannes Schulz-Stellenfleth por su tiempo y las observaciones que hizo sobre mis resultados, hubiera sido muy útil establecer contacto con él con más anticipación. Al Oc. Sergio Ramos del DOF-CICESE, sin su asesoría me hubiera sido muy difícil utilizar los datos. Gracias al M. C. Pedro Rosales por su ayuda con el modelo SWAN y en la generación de los espectros de primera aproximación.

A diferencia de las imágenes adquiridas por radiómetros, para entender el proceso de formación de las imágenes de SAR se requiere de un mayor entendimiento sobre el funcionamiento del dispositivo que las genera. En este sentido he tenido la fortuna de contar con la asesoría de algunos colegas del Departamento de Electrónica y Telecomunicaciones del CICESE, quienes amablemente me explicaron algunos conceptos que difícilmente hubiera podido asimilar por mí mismo. Me refiero al Dr. Roberto Conte, Dr. Arturo Arvizu y al Dr. Arturo Velásquez, posiblemente algunas de mis preguntas les llegaron a parecer triviales, pero a mí me sirvieron sus respuestas para comprender la terminología que encontraba en los textos.

También debo agradecer al CONACyT y a la ANUIES por medio del Programa SUPERA, por su apoyo económico durante la etapa inicial del proyecto de tesis, y de manera especial a mis colegas del Departamento de Ciencias de la Computación del CICESE por permitirme disponer del tiempo necesario para llevar a cabo este trabajo. Finalmente quiero aprovechar este espacio para dar las gracias a mis maestros de licenciatura en la UCM, al fin de cuentas, creo que ahí empezó todo.

Mi agradecimiento a todos ellos, en el entendimiento de que cualquier error u omisión es responsabilidad solamente mía.

TABLA DE CONTENIDO

Preliminares	
Carátula.....	i
Resumen	ii
Aprobación	iii
Dedicatoria	iv
Agradecimientos.....	v
Tabla de contenido	vi
Lista de figuras	viii
Lista de tablas	xiii
Lista de láminas	xiv
 1.- INTRODUCCIÓN	 1
1.1.- Antecedentes	5
1.2.- Definición del problema.....	9
1.3.- Objetivos	10
1.4.- Organización del documento.....	11
 2.- MARCO DE REFERENCIA	 12
2.1.- Espectro de las olas	12
2.2.- Espectro de la imagen	14
2.3.- Espectro de ondículas.....	16
2.4.- Nivel de significancia.....	20
 3.- MATERIALES Y METODOLOGÍA	 21
3.1.- Sinopsis de la zona de prueba	21
3.2.- Selección de las imágenes	24
3.3.- El Algoritmo WASAR	26
3.4.- Procedimiento de análisis.....	30
3.4.1.- Generación de espectros.....	32
3.4.2.- Extracción de perfiles.....	43
 4.- RECUPERACIÓN DEL ESPECTRO DEL OLEAJE	 50
4.1.- Modelado directo	52
4.2.- Inversión de la transformada espectral.....	56
4.3.- Error y correlación entre espectros	60
 5.- EVOLUCIÓN ESPACIAL DEL OLEAJE	 61
5.1.- Velocidad de grupo y dispersión	62
5.2.- Interacción con el fondo.....	64
5.3.- Análisis espacio-escala.....	67
5.4.- Espectros de ondículas	72

6.- RESULTADOS Y DISCUSIONES	76
6.1.- De la recuperación del espectro de olas	77
6.1.1.- Iteración del espectro invertido (órbita 24029).....	77
6.1.2.- Influencia del espectro inicial (órbita 19019)	94
6.1.2.1.- Caso 1 (E1).....	97
6.1.2.2.- Caso 2 (E2).....	99
6.1.2.3.- Caso 3 (E3).....	102
6.1.2.4.- Sustitución de espectros	105
6.1.3.- Altura significativa.....	111
6.2.- Del análisis espacial del oleaje (órbita 20293).....	112
6.2.1.- Perfil 1 (P1)	112
6.2.2.- Perfil 2 (P2)	115
6.2.3.- Perfil 3 (P3)	117
6.2.4.- Perfil 4 (P4)	119
6.2.5.- Velocidades de fase y de grupo.....	121
6.2.6.- Oleaje con aproximación oblicua.....	126
7.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	132
7.1.- Acerca de la recuperación del espectro de las olas	132
7.2.- Acerca del análisis espacial del oleaje	134
7.3.- Comentarios finales.....	135
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	137
Apéndice A.- El Radar de Apertura Sintética	142
Apéndice B.- Detección de oleaje mediante el SAR.....	150
Apéndice C.- Descripción de las imágenes utilizadas.....	161

LISTA DE FIGURAS

- Figura 3.1** Localización geográfica de la franja costera de Rosarito, Baja California, incluyendo desde Punta Los Buenos hasta Bahía El Descanso. En el mapa se muestra la batimetría sobre la Plataforma de Rosarito referida en metros, así como la ubicación del sensor de presión Sea Pac 2100 y la boya meteorológica. 23
- Figura 3.2** Diagrama de flujo del algoritmo WASAR, utilizando como datos de entrada un espectro de subimagen SAR y un espectro de olas inicial SWAN..... 29
- Figura 3.3.-** Segmento de la imagen SAR correspondiente a la órbita 24029 y al marco 2961. En ella se muestra el recuadro donde se extrajo la subimagen S1 34
- Figura 3.4.-** Subimagen extraída en el sitio S1 (a) y su espectro direccional (b). AC y AL indican las direcciones de acimut y alcance del radar respectivamente. Las isolíneas están espaciadas logarítmicamente en relación al máximo de energía espectral..... 35
- Figura 3.5 .-** Segmento de imagen correspondiente a la órbita 19019, marco 2961. En esta imagen se observa un swell bien definido proveniente del noroeste, el cual forma complejos patrones de oleaje sobre la plataforma debido a los mecanismos de refracción y difracción originados al interactuar con el fondo y las islas. Los recuadros indican los sitios donde fueron extraídas las subimágenes E1, E2 y E3..... 38
- Figura 3.6.-** Subimagen extraída en el sitio E2 (a) y su espectro direccional (b). AC y AL indican las direcciones de acimut y alcance del radar respectivamente. Las isolíneas están espaciadas logarítmicamente en relación al máximo de energía espectral..... 40
- Figura 3.7.-** Subimagen extraída en el sitio E1 (a) y su espectro direccional (b). AC y AL indican las direcciones de acimut y alcance del radar respectivamente. Las isolíneas están espaciadas logarítmicamente en relación al máximo de energía espectral..... 41
- Figura 3.8.-** Subimagen extraída en el sitio E3 (a) y su espectro direccional (b). AC y AL indican las direcciones de acimut y alcance del radar respectivamente. Las isolíneas están espaciadas logarítmicamente en relación al máximo de energía espectral..... 42
- Figura 3.9.-** Segmento de imagen correspondiente a la órbita 20293, marco 2961. En color rojo se muestran los recuadros donde se extrajeron las subimágenes P1, P2, P3 y P4, y en color amarillo sus perfiles correspondientes. La imagen cubre una distancia horizontal de aproximadamente 100 Km. 43

Figura 3.10.- Detalle de la subimagen P1 (a) y su espectro direccional (b). AC y AL indican las direcciones de acimut y alcance del radar respectivamente.....45

Figura 3.11.- Detalle de la subimagen P2 (a) y su espectro direccional (b). AC y AL indican las direcciones de acimut y alcance del radar respectivamente.....47

Figura 3.12.- Detalle de la subimagen P3 (a) y su espectro direccional (b). AC y AL indican las direcciones de acimut y alcance del radar respectivamente.....47

Figura 3.13.- Detalle de la subimagen P4 (a) y su espectro direccional (b). AC y AL indican las direcciones de acimut y alcance del radar respectivamente.....48

Figura 5.1- Adición de dos componentes senoidales con amplitudes similares y número de onda diferente. El eje vertical representa la amplitud de la señal en unidades relativas y el eje horizontal la distancia en número de dato.....63

Figura 5.2.- Espectro de ondículas de una señal monocromática consistente en una función seno con longitud de onda 8. El panel superior corresponde a la señal original y su eje vertical representa amplitud en unidades relativas. El panel inferior corresponde a su espectro de ondículas, cuyo eje vertical representa el nivel de escala en número de dato. El eje horizontal es distancia en número de dato. La barra de color inferior representa los niveles de energía en la señal expresados en magnitud.72

Figura 5.3.- Espectro de ondículas de una señal formada por paquetes de ondas. El panel superior corresponde a la señal original y su eje vertical representa amplitud en unidades relativas. El panel inferior corresponde a su espectro de ondículas, cuyo eje vertical representa el nivel de escala en número de dato. El eje horizontal es distancia en número de dato. La barra de color inferior representa el nivel de energía en la señal expresado en potencia.73

Figura 5.4.- Espectro de ondículas de un senoide atenuado que presenta un nivel de ruido considerable. El panel superior corresponde a la señal original y su eje vertical representa amplitud en unidades relativas. El panel inferior corresponde a su espectro de ondículas, cuyo eje vertical representa el nivel de escala en número de dato. El eje horizontal es distancia en número de dato. La barra de color inferior representa los niveles de energía en la señal expresados en magnitud.....74

Figura 5.5.- Espectro de ondículas de una señal no estacionaria, consistente en un senoide atenuado y con incremento en frecuencia. El panel superior corresponde a la señal original y su eje vertical representa amplitud en unidades relativas. El panel inferior corresponde a su espectro de ondículas, cuyo eje vertical representa el nivel de escala en número de dato. El eje horizontal es distancia en número de

dato. La barra de color inferior representa los niveles de energía en la señal expresados en magnitud. 75

Figura 6.1.- Inversión del espectro de la subimagen S1 utilizando el algoritmo WASAR en su versión no iterativa (ver NOTA descriptiva en la siguiente página). 79

Figura 6.2.- Iteración 1 en la inversión del espectro de la subimagen S1 (ver NOTA descriptiva para la Figura 6.1). 82

Figura 6.3.- Iteración 2 en la inversión del espectro de la subimagen S1 (ver NOTA descriptiva para la Figura 6.1). 83

Figura 6.4.- Iteración 3 en la inversión del espectro de la subimagen S1 (ver NOTA descriptiva para la Figura 6.1). 84

Figura 6.5.- Iteración 4 en la inversión del espectro de la subimagen S1 (ver NOTA descriptiva para la Figura 6.1). 85

Figura 6.6.- Iteración 5 en la inversión del espectro de la subimagen S1 (ver NOTA descriptiva para la Figura 6.1). 86

Figura 6.7.- Espectros obtenidos durante la inversión de la subimagen S1. Espectro de olas recuperado (columna izquierda) y espectro SAR calculado (columna derecha). 88

Figura 6.8.- Análisis comparativo entre el espectro de olas inicial (Figura superior izquierda) y el espectro de olas recuperado mediante inversión en la Iteración 5 (Figura inferior izquierda). En la columna derecha aparecen sus correspondientes espectros SAR calculados. Visualmente se puede apreciar la baja correlación que existe entre los espectros calculados, indicando de manera indirecta la no dependencia del espectro recuperado con respecto al espectro inicial. 91

Figura 6.9.- Espectros obtenidos en la inversión del Caso1. 98

Figura 6.10.- Espectros obtenidos en la inversión del Caso2. 101

Figura 6.11.- Espectros obtenidos en la inversión del Caso 3. 103

Figura 6.12.- Espectros obtenidos en la inversión del Caso1-2. 106

Figura 6.13.- Espectros obtenidos en la inversión del Caso1-3. 108

Figura 6.14- Espectros obtenidos en la inversión del Caso 4.....	110
Figura 6.15- (a) Espectro de ondículas del perfil P1. El gráfico superior es el perfil de intensidad. El eje horizontal es la distancia y el vertical es la escala, ambos en unidades de píxel. La barra de color en la parte inferior representa el nivel de energía y el gráfico en el lado derecho es el espectro global, ambos en unidades de magnitud. (b) Detalle del espectro direccional de la subimagen P1, ambos ejes están en número de onda y las longitudes de onda están asociadas a su escala.	114
Figura 6.16- (a) Espectro de ondículas del perfil P2. (b) Detalle del espectro direccional de la subimagen P2. Ver descripción para la Figura 6.15.	116
Figura 6.17- (a) Espectro de ondículas del perfil P3. (b) Detalle del espectro direccional de la subimagen P3. Ver descripción para la Figura 6.15.	118
Figura 6.18- (a) Espectro de ondículas del perfil P4. (b) Detalle del espectro direccional de la subimagen P4. Ver descripción para la Figura 6.15.	120
Figura 6.19- (a) Segmento de 256 X 256 píxeles extraído del cuadrante superior derecho de la subimagen P4. (b) Espectro direccional obtenido a partir del segmento de imagen superior. P es el sistema de olas asociado al perfil de intensidad. A, B, C y D son sistemas de olas que intersectan oblicuamente al perfil P4.	127
Figura 6.20- Relación geométrica entre dos olas que se intersectan oblicuamente. λ es la longitud de onda para olas cuyas crestas (líneas discontinuas) se propagan en la misma dirección que el perfil P4. λ' es la longitud de onda aparente, cuando el mismo tren de olas intersecta oblicuamente al perfil P4 con ángulo θ	129
Figura A.1- Geometría y cobertura espacial del radar de apertura sintética que opera a bordo del satélite ERS-2. Modificado de ESA (1993).	143
Figura A.2- Productos ERS.SWM.FDP (subimagen y su espectro direccional). Tomado de ESA (1993).	146
Figura A.3- Geometría Bragg para trenes de olas que se propagan en la dirección de alcance del radar. Modificado de Robinson (1985).	147
Figura A.4- Geometría Bragg para trenes de olas que se propagan con un ángulo Φ respecto a la dirección de alcance del radar. Modificado de Robinson (1985).	149
Figura B.1- El modelo 2-Escalas. Modificado de Hasselmann, et al. (1985)	151

Figura B.2- Modulación por inclinación. Modificado de Robinson (1985).....	154
Figura B.3- Modulación hidrodinámica. Modificada de Robinson (1985).....	156
Figura B.4- Agrupamiento por velocidad. Modificado de Robinson (1985).....	157
Figura B.5- Dependencia acimutal de los tres mecanismos de modulación. Tomado de Alpers et al (1981).....	160

LISTA DE TABLAS

Tabla 3.I- Información de las imágenes seleccionadas, indicando la órbita, fecha y hora de adquisición. Los datos anotados con (*) fueron tomados de Peirache y Lombardi (2001). Todas las imágenes corresponden al marco 2961. Las direcciones se indican con respecto al norte geográfico.	25
Tabla 3.II- Tabla comparativa en la que se muestran los parámetros de oleaje medidos en el sitio de anclaje del sensor y los parámetros de oleaje generados con el modelo SWAN. Los datos fueron tomados de Peirache y Lombardi (2001) y coinciden con las fechas de las órbitas correspondientes.	26
Tabla 3.III.- Tabla que muestra los resultados obtenidos al invertir los espectros de las subimágenes extraídas sobre el sitio de anclaje del sensor, para cada una de las órbitas seleccionadas. Los resultados se obtuvieron utilizando el algoritmo WASAR con 5 iteraciones.....	32
Tabla 6.I.- Valores de correlación entre los espectros resultantes de la inversión de la subimagen S1 extraída de la imagen correspondiente a la órbita 24029.....	78
Tabla 6.II.- Parámetros característicos del oleaje obtenidos durante el proceso de inversión de la subimagen S1 (órbita 24029).....	92
Tabla 6.III.- Resultados obtenidos al invertir los espectros de las subimágenes E1, E2 y E3 mostradas en la Fig. 3.5. En este experimento se utilizó el algoritmo WASAR configurado para 10 iteraciones.	96
Tabla 6.IV.- Parámetros característicos del oleaje obtenidos para los casos de inversión mostrados en la Tabla 6.III. En este experimento se utilizó el algoritmo WASAR configurado para 10 iteraciones.	96
Tabla 6.V.- Parámetros de oleaje derivados del espectro de ondículas de los perfiles P1 y P2 extraídos de la imagen correspondiente a la órbita 20293.....	123
Tabla 6.VI.- Estimaciones de velocidad en aguas someras para los Grupos 5, 6 y 7, correspondientes a los perfiles P3 y P4.....	125
Tabla 6.VII.- Longitudes de onda aparentes (λ') proyectadas por sistemas de olas con longitud de onda λ , que intersectan al perfil P4 con un ángulo θ	130
Tabla A.I- Especificaciones técnicas del SAR/ERS-2. Tomado de ESA (1993).....	145
Tabla C.I.- Información sobre las imágenes de SAR utilizadas.	161

LISTA DE LÁMINAS

- Lámina C.1.-** Imagen ERS-2.SAR (órbita 19019, marco 2961) de la región costera del noroeste de Baja California, adquirida el 9 de Diciembre de 1998 a las 18:26 UTC. El cubrimiento total de la imagen es de 100 km por 100 km. La resolución nominal por píxel es de 12.5 m por 12.5 m. En la parte superior de la imagen se muestra la dirección del norte geográfico, así como la dirección de iluminación del radar (AL) y de vuelo del satélite (AC). Ver descripción de la imagen en el texto. © ESA 1998. 163
- Lámina C.2.-** Imagen ERS-2.SAR (órbita 20293, marco 2961) de la región costera del noroeste de Baja California, adquirida el 8 de Marzo de 1999 a las 18:29 UTC. El cubrimiento total de la imagen es de 100 km por 100 km. La resolución nominal por píxel es de 12.5 m por 12.5 m. En la parte superior de la imagen se muestra la dirección del norte geográfico, así como la dirección de iluminación del radar (AL) y de vuelo del satélite (AC). Ver descripción de la imagen en el texto. © ESA 1999. 165
- Lámina C.3.-** Imagen ERS-2.SAR (órbita 24029, marco 2961) de la región costera del noroeste de Baja California, adquirida el 24 de Noviembre de 1999 a las 18:26 UTC. El cubrimiento total de la imagen es de 100 km por 100 km. La resolución nominal por píxel es de 12.5 m por 12.5 m. En la parte superior de la imagen se muestra la dirección del norte geográfico, así como la dirección de iluminación del radar (AL) y de vuelo del satélite (AC). Ver descripción de la imagen en el texto. © ESA 1999. 167

1.- INTRODUCCIÓN

La adquisición de información de oleaje, ya sea desde plataformas o mediante el uso de sensores de presión, anclados o en el fondo, es un trabajo complicado y costoso. La principal desventaja es que la información colectada de esta manera, para un punto fijo, representa únicamente las condiciones del oleaje prevalecientes en un área de unos cuantos kilómetros alrededor de ese punto de observación. Una alternativa para superar esta problemática es el empleo de información de radar adquirida mediante satélites.

Hacia finales de los años 70's, la misión SEASAT planteó la necesidad de contar con un sistema de monitoreo de información de oleaje a nivel global, el cual contaría con capacidad para observar ondas oceánicas superficiales de manera continua y bajo todo tipo de condiciones climáticas (Gonzalez, et al., 1979; Born, et al., 1981). Aunque el período de vida útil del satélite SEASAT fue muy corto (poco más de tres meses) la relevancia de los resultados obtenidos a partir de la información colectada hizo que se mantuviera vigente el interés en esta tecnología, y fue hasta después de 13 años (17 de julio de 1991) que el primer satélite europeo de percepción remota (European Remote-sensing Satellite, ERS-1) fue puesto en órbita (ESA, 1993). A diferencia de la misión SEASAT, este satélite tendría la capacidad de proporcionar información sobre el estado del mar de manera continua y casi en tiempo real (ESA, 1989).

Posteriormente el 21 de abril de 1995 fue puesto en órbita el satélite ERS-2, el cual contó con características similares a las del satélite anterior. Entre los diferentes dispositivos de microondas con que cuenta este satélite, el Radar de Apertura Sintética

(SAR por sus siglas en inglés) es el único instrumento diseñado para proporcionar información sobre el estado del mar en dos dimensiones, contando además con suficiente cobertura y resolución espacial para permitir la observación de la superficie marina a escalas local y regional (ESA, 1995).

Aunado a lo anterior, el desarrollo de modelos para predecir las condiciones de oleaje (forecast), así como para calcular las características del oleaje a partir de condiciones históricas de viento (hindcast), han permitido la asimilación de información de satélites en estudios relacionados con diversas disciplinas en oceanografía. Esto ha tenido repercusiones positivas en actividades de tipo económico, tales como pesquerías, operaciones en la zona costera, transporte marítimo y protección de costas (ESA, 1996). Además de las aplicaciones de carácter práctico mencionadas anteriormente, el conocimiento de las condiciones del oleaje es esencial para entender los mecanismos que gobiernan el movimiento de masas de agua, y el flujo de calor y de gases a través de la interfase océano-atmósfera. Esta información constituye el fundamento para elaborar modelos climáticos a nivel global, los cuales han cobrado bastante importancia científica durante los últimos años (Weber, et al., 1993; Mastenbroek, et al., 1993; Janssen y Viterbo, 1996).

Durante las últimas décadas, la mayoría de los trabajos sobre aplicaciones del SAR al estudio de ondas oceánicas se han enfocado al análisis de olas en mar profundo, así como a la asimilación de información de satélite para predecir el estado del mar con una perspectiva de escala global. Ejemplos sobre la asimilación de información de radar en estudios de escala global, así como para la extracción de parámetros de oleaje en

regiones de mar abierto son encontrados en los trabajos de Heimbach et al. (1998), Breivik et al. (1998) y de Lehner et al. (2002), entre otros. Sin embargo existen relativamente pocos trabajos relacionados con la aplicación de imágenes de SAR al estudio de olas en regiones costeras (Ocampo-Torres, 2001). Esto se debe esencialmente a dos motivos: Por un lado a la carencia de metodologías que permitan recuperar el espectro de olas en aguas someras a partir de espectros de imágenes de radar, ya que, como se verá más adelante en este trabajo, para ello se requiere invertir el espectro de imagen en su espectro de olas de acuerdo a parámetros establecidos mediante modelos de oleaje en aguas someras. Y por otro lado a la naturaleza no homogénea del oleaje en regiones cercanas a la costa, lo cual constituye un problema, ya que el campo de olas puede presentar efectos de agrupamiento y refracción, así como la presencia de difracción originada por la interacción con obstáculos en la costa. Estas características impiden su tratamiento mediante técnicas espectrales convencionales (e.g. análisis de Fourier).

El presente trabajo tiene doble propósito: En primera instancia se pretende analizar la posibilidad de recuperar el espectro del oleaje en regiones costeras a partir de imágenes de satélite obtenidas mediante SAR. A diferencia del mar abierto, donde las condiciones son más homogéneas, en la región costera esperaríamos encontrar una mayor variabilidad espacial de los parámetros característicos del oleaje. Para lograr este objetivo se propone el empleo de modelos para olas en aguas someras, esto con la finalidad de especificar, con la mejor aproximación posible a la realidad, los parámetros iniciales en el proceso de inversión. En segunda instancia se propone analizar la

evolución espacial del campo de olas conforme el oleaje se aproxima a la costa. Para ello se implementarán técnicas de análisis multi-resolución para señales unidimensionales, basadas en la Transformada de Ondículas (Mallat, 1989).

Con la finalidad de poner a prueba las metodologías propuestas y medir su desempeño en la práctica, se seleccionó como zona de experimentación la región costera de Rosarito, Baja California. Se seleccionó este sitio debido a que se cuenta con un archivo de imágenes SAR-ERS2 de la región, así como datos de oleaje, además de presentar características fisiográficas y oceanográficas apropiadas para el desarrollo de este estudio. Entre estas características destaca la presencia de oleaje proveniente de mar abierto, además de un conjunto de islas y una plataforma perfectamente definida que le permiten la formación de patrones de oleaje complejos.

1.1.- Antecedentes

Aunque la capacidad del SAR para detectar ondas oceánicas superficiales ha sido ampliamente explicada en diversos estudios (Alpers, et al., 1981; Hasselmann, et al., 1985; Alpers, et al., 1986; Brüning, et al., 1988), la obtención del espectro direccional del oleaje a partir de imágenes obtenidas por un SAR no es un procedimiento directo.

El proceso de formación de la imagen es altamente no lineal debido a las distorsiones inducidas por el movimiento vertical de las olas, dando como resultado una imagen desvanecida y un espectro asimétrico con pérdida de información en las componentes altas de frecuencia en la dirección de vuelo del SAR (dirección acimutal). A la región espectral donde ocurre esta pérdida de información se le denomina región de corte acimutal- del inglés “azimuthal cutoff”. Por otra parte, se tendrá además una ambigüedad direccional de 180° en el sentido de propagación de las olas, debido a que el espectro proviene de una imagen fija.

Para recuperar el espectro del oleaje es necesario efectuar el modelado directo del espectro SAR de acuerdo a la teoría de detección de oleaje, y posteriormente invertir el espectro de la imagen en un espectro de olas (Macklin y Cordey, 1991; Hasselmann y Hasselmann, 1991; Krogstad, 1992; Engen, et al., 1994; Krogstad, et al., 1994). Como se explica en el capítulo 4, este proceso se lleva a cabo de manera iterativa mediante la optimización de un funcional de costo que involucra las diferencias entre un par de espectros; el espectro SAR simulado mediante modelado directo y el espectro observado por el SAR (Hasselmann, et al., 1996).

De acuerdo al esquema de inversión propuesto por Hasselmann, et al. (1998), tanto el modelo de olas WAM (WAMDI Group, 1988), como los espectros derivados de los productos denominados “imagettes” (ERS.SWM.FDP) proporcionados por los satélites europeos ERS (ESA, 1993), son componentes fundamentales en este esquema de inversión. El modelo WAM provee los espectros de olas de primera aproximación, los cuales representan las condiciones iniciales en el proceso de recuperación del espectro del oleaje. Estos espectros son utilizados esencialmente para eliminar la ambigüedad direccional y para completar la información perdida más allá de la región de corte acimutal, esto es, la región espectral a partir de la cual las componentes en número de onda son desvanecidas debido al proceso de formación de la imagen de SAR. Los espectros generados a partir de los productos ERS.SWM.FDP se emplean como los espectros observados por el radar, los cuales contienen información adicional a la aportada por el modelo inicial y por lo tanto deben ser invertidos para complementar el espectro de olas (Brüning, et al., 1994). Un ejemplo sobre la utilización de los productos ERS.SWM.FDP, en conjunto con espectros de olas generados con el modelo WAM puede verse en Heimbach, et al. (1998). Una descripción detallada de los productos ERS.SWM.FDP se puede ver en ESA (1992), y su empleo en el proceso de inversión puede consultarse en Hasselmann et al. (1998).

Una desventaja de los esquemas de inversión mencionados anteriormente es la amplia ventana espacio-temporal que utilizan para situar los espectros WAM en correspondencia con los espectros observados por el SAR. Estas distancias pueden ser del orden de los 50 Km y con diferencias en tiempo hasta de 30 minutos. Es obvio que

estas diferencias en ubicación espacio-temporal resultarían inadecuadas para aplicaciones en la zona costera. En este trabajo se propone recuperar el espectro de olas en la región costera a partir de imágenes de SAR. Para lograr este propósito es necesario conocer las características del oleaje en sitios específicos de la zona costera, y en particular para el sitio donde se cuenta con información de oleaje. Debido a ello será necesario extraer segmentos de imagen para los sitios de interés y además calcular espectros del oleaje para estos mismos sitios con base en modelos de olas para aguas someras. En este estudio se propone calcular los espectros iniciales mediante el modelo de olas SWAN -Simulation of WAVes in the Nearshore- (Holthuijsen, et al., 2003), lo cual permitirá contar con espectros iniciales más realistas, aproximándose más a las condiciones reales del oleaje en la región. Los espectros observados serán generados a partir de segmentos (subimágenes) obtenidos de los productos ERS.SAR.PRI, los cuales son imágenes de cubrimiento completo adquiridas con el radar operando en modo imagen (ver el Apéndice A). Para mayor información sobre los productos ERS.SAR.PRI el lector puede referirse a ESA (1994).

En cuanto al análisis espacial del campo de olas, como segundo objetivo de investigación en este trabajo, éste ha sido otro aspecto importante en la aplicación de imágenes adquiridas mediante SAR al estudio de oleaje costero. En los trabajos pioneros de Beal, et al. (1983) y Beal, et al. (1986) se describe un caso bien documentado, en el cual el SAR a bordo del satélite SEASAT fue capaz de detectar un sistema de olas de baja energía, con 200 m de longitud de onda y altura aproximada de

1 m. En este caso el SAR mostró capacidad para rastrear la evolución de este oleaje desde aguas profundas a lo largo de la Corriente del Golfo, hasta alcanzar aguas someras sobre la plataforma continental.

Por otra parte, Shuchman et al. (1979) ilustran la aplicación de información de SAR en el análisis de la refracción del oleaje. Ellos comparan los cambios en la dirección de propagación y la longitud de onda observadas en una imagen de SAR, con los valores derivados de la aplicación de un modelo de refracción de oleaje. Sus resultados fueron verificados estadísticamente, demostrándose la capacidad del SAR para observar ondas superficiales con suficiente claridad para detectar la refracción del oleaje en aguas someras.

Con el objeto de analizar en forma continua la evolución espacial del oleaje a lo largo de su dirección de propagación, en este trabajo se propone el uso de técnicas de análisis multi-resolución en conjunto con técnicas tradicionales basadas en la transformada de Fourier. La idea es utilizar la Transformada de Ondículas como una herramienta para analizar la naturaleza dispersiva del campo de olas y además estimar los parámetros característicos del oleaje, tales como su longitud de onda, velocidad de grupo y período.

1.2.- Definición del Problema

El propósito de este trabajo tiene dos vertientes. Por un lado se pretende estudiar la posibilidad de recuperar el espectro del oleaje en la zona costera a partir de imágenes adquiridas mediante radar de apertura sintética (SAR). Debido a que no se tienen experiencias previas en las que se utilicen espectros de primera aproximación generados con modelos de olas en aguas someras, es recomendable analizar el proceso de inversión y estimar la calidad del espectro recuperado. Para ello se propone analizar el comportamiento del espectro invertido durante el proceso de recuperación del espectro de olas, así como hacer una estimación de la influencia del espectro de primera aproximación sobre el espectro recuperado.

Por otra parte se pretende analizar el agrupamiento de las olas y la evolución del campo de oleaje conforme se aproxima a la costa. Debido a la limitación que tiene la transformada de Fourier para localizar eventos en el espacio, existen desventajas en las técnicas espectrales tradicionales para analizar series de datos no homogéneas, como lo es el oleaje costero. En este estudio se propone el empleo de técnicas convencionales basadas en la transformada de Fourier, conjuntamente con técnicas de análisis multi-resolución basadas en la transformada de ondículas. La idea es aplicar la transformada de Fourier para determinar la dirección de propagación del oleaje, y utilizar el espectro de ondículas para detectar y ubicar espacialmente las acumulaciones de energía asociadas al oleaje en la imagen. Se analizarán perfiles de intensidad extraídos de las imágenes de SAR, con el objeto de inferir los parámetros característicos del oleaje que viaja cercano a la dirección de alcance del radar.

1.3.- Objetivos

1.3.1.- Objetivo General

Recuperar el espectro de las olas y estimar los parámetros característicos del campo de oleaje, así como analizar su evolución espacial en la zona costera, utilizando imágenes de la superficie del mar adquiridas mediante radar de apertura sintética.

1.3.2.- Objetivos Particulares

- 1) Analizar el desarrollo del espectro invertido durante el proceso de inversión del espectro de la imagen.
- 2) Analizar el grado de influencia del espectro de primera aproximación sobre el resultado de la inversión.
- 3) Estimar los parámetros característicos del oleaje a partir de imágenes de SAR: altura significativa, dirección y período promedio, dirección y período asociados al pico espectral.
- 4) Analizar las características de agrupamiento y dispersión del oleaje conforme éste se aproxima a la costa.
- 5) Estimar los siguientes parámetros del oleaje a partir del espectro de ondículas: longitud de onda, velocidad de grupo y período.

1.4.- Organización del documento

Este documento está organizado de la siguiente manera. El Capítulo 2 constituye el marco teórico donde se presentan algunos conceptos básicos que permitirán relacionar el espectro de las olas y el espectro de la imagen, así como una descripción del espectro de ondículas. En el Capítulo 3 se presenta una sinopsis del sitio de experimentación, enfocándose más bien a la descripción de los datos empleados y a los procedimientos de análisis. Los siguientes dos capítulos constituyen el núcleo del trabajo, en ellos se describen los conceptos teóricos que respaldan las metodologías empleadas para alcanzar los objetivos planteados. El Capítulo 4 presenta los aspectos más relevantes del proceso de inversión del espectro de imagen, mientras que el Capítulo 5 es una reseña sobre los conceptos básicos de la teoría de dispersión del oleaje. En este capítulo se describen además algunos conceptos sobre el análisis espacio-escala de señales no-estacionarias, el cual servirá de base para el análisis espacial del oleaje a partir de perfiles de intensidad extraídos de imágenes de SAR.

Posteriormente en el Capítulo 6 se presentan y se discuten por separado los resultados obtenidos en cada caso de estudio, de acuerdo a los objetivos planteados. Finalmente en el Capítulo 7 se presentan las conclusiones alcanzadas en esta investigación, así como una serie de recomendaciones y sugerencias para trabajo futuro. Al final se presenta una lista con las referencias bibliográficas citadas en el documento y tres apéndices que sirven como información complementaria a todo el documento en general.

2.- MARCO DE REFERENCIA

2.1.- Espectro de las Olas

Si observamos una región de la superficie del mar notaremos dos características importantes. Por un lado, veremos que existe una estructura ondulada predominante y bien definida, la cual modula a otras estructuras sobrepuestas y de menor tamaño. Por otra parte también observaremos que esta estructura no se repite en ninguna parte del segmento de superficie examinada, al menos cuando este segmento tenga un tamaño aproximadamente mayor a tres veces la longitud de onda de la estructura predominante (Donelan, 1996). Lo anterior significa que se trata de un proceso aleatorio. La variabilidad de la elevación de la superficie se distribuye de manera irregular en el dominio del espacio, sin embargo puede representarse mediante su espectro en el dominio de la frecuencia (o número de onda). Si observamos el espectro de frecuencia notaremos uno o varios picos espectrales bien definidos en alguna(s) de sus componentes de frecuencia, disminuyendo rápidamente la contribución de sus demás componentes conforme éstas se alejan del pico.

El espectro direccional de las olas es quizás la descripción más completa de la superficie del océano (Kinsman, 1965). Para el caso de un tren de olas estacionario, el espectro X puede ser definido como un proceso aleatorio de la siguiente manera (Phillips, 1977)

$$X(k, \omega) = (2\pi)^{-3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \rho(r, t) \times \exp[-i(k \cdot r - \omega t)] dr dt \quad (2.1)$$

donde

$$\rho(r, t) = \overline{\zeta(x, t_0) \zeta(x + r, t_0 + t)} \quad (2.2)$$

es una función de covarianza de la elevación de la superficie $\zeta(x, t)$, r es el vector de posición espacial, t es el tiempo, k es el vector número de onda y ω es la frecuencia angular. El término $X(k, \omega)$ cumple con la siguiente propiedad

$$\overline{\zeta^2} = \iint X(k, \omega) dk d\omega \quad (2.3)$$

lo cual significa que es equivalente a la varianza de los desplazamientos verticales de la superficie y que es proporcional a la energía del oleaje para cada componente con número de onda k y frecuencia ω .

Otra manera de representar el espectro del oleaje es la siguiente

$$\Omega(k) = 2 \int_0^{\infty} X(k, \omega) d\omega \quad (2.4)$$

o bien, su equivalente simétrico

$$\Omega_s(k) = \int_{-\infty}^{\infty} X(k, \omega) d\omega \quad (2.5)$$

el cual suele también expresarse como

$$\Omega_s(k) = \frac{1}{2} [\Omega(k) + \Omega(-k)] \quad (2.6)$$

Un espectro como $\Omega_s(k)$ se origina al analizar una superficie congelada (imagen) y por lo tanto presenta una ambigüedad en la dirección de propagación del oleaje. La estructura de este espectro consiste en dos conjuntos de componentes simétricas con niveles de energía iguales, pero separadas por un ángulo de 180° entre sí.

2.2.- Espectro de la Imagen

Debido a que el radar forma la imagen en un lapso relativamente corto, las variables t y ω no serán consideradas a continuación, por lo tanto consideramos a la imagen como una versión “congelada” de la superficie del océano.

De acuerdo a (2.3), (2.6) y siguiendo la notación establecida por Hasselmann y Hasselmann (1991) la varianza total del desplazamiento vertical de la superficie del océano ζ , asociada al espectro direccional de oleaje $F(k)$, puede definirse como

$$\langle \zeta^2 \rangle = \int F(k) dk . \quad (2.7)$$

Por otra parte, si consideramos que los procesos involucrados en la formación de la imagen corresponden a un Radar de Apertura Real (RAR), entonces el espectro de varianza $P^R(k)$ asociado a la modulación de la intensidad I^R en la imagen RAR se definirá como

$$\langle I^{R^2} \rangle = \int P^R(k) dk \quad (2.8)$$

y ambos espectros estarán relacionados linealmente mediante

$$P^R(k) = \frac{1}{2} \left[\left| T^R(k) \right|^2 F(k) + \left| T^R(-k) \right|^2 F(-k) \right]. \quad (2.9)$$

donde T^R es una función de transferencia asociada al mecanismo de formación de la imagen RAR (ver el Apéndice B).

Al incluir los efectos por movimiento, inherentes al proceso de formación de una imagen de SAR, el espectro de la imagen P^S quedará definido como

$$P^S(k) = \frac{1}{2} \left[\left| T^S(k) \right|^2 F(k) + \left| T^S(-k) \right|^2 F(-k) \right]. \quad (2.10)$$

donde T^S es una función de transferencia asociada al proceso de formación de la imagen SAR (ver el Apéndice B).

Sin embargo debido al desplazamiento vertical de los reflectores, inducido por el movimiento orbital de las olas, el proceso de formación de la imagen no es lineal. En este caso el problema consiste en encontrar las funciones de transferencia T^R y T^S , tal que podamos obtener el espectro de olas $F(k)$ a partir del espectro de imagen $P^S(k)$ mediante técnicas de inversión. Este problema ha sido planteado de diferentes maneras en trabajos realizados por Macklin y Cordey (1991), Hasselmann y Hasselmann (1991), Krogstad (1992), Engen et al. (1994) y Hasselmann et al. (1996). Aunque estos trabajos han mostrado resultados satisfactorios para casos de oleaje en aguas profundas, aun queda abierto el problema de su aplicación en aguas someras en la zona costera, donde existe mayor variabilidad espacial en los parámetros del oleaje y por lo tanto la estructura del espectro de la imagen puede ser más compleja.

2.3.- Espectro de Ondículas

A diferencia del análisis de Fourier, el cual provee información sobre la variabilidad promedio de cada armónica en una serie, la Transformada de Ondículas – *WT* del inglés “Wavelet Transform”- puede proveer una estimación local de la variabilidad de cada armónica para un punto en particular. Esto le permite hacer un estudio más detallado de las características temporales (o espaciales) en señales no estacionarias.

El análisis de ondículas se basa en la convolución de una función $f(x)$ con un conjunto de funciones $\psi_{ab}(x)$ derivadas de los escalamientos y traslaciones de la ondícula madre $\psi(x)$, tal que

$$\psi_{ab}(x) = \frac{\psi}{a^{\frac{1}{2}}} \left(\frac{x-b}{a} \right) \quad (2.11)$$

donde $a > 0$ y b son números reales (Daubechies, 1992).

La convolución de $f(x)$ con el conjunto de ondículas (2.11) define a la transformada de ondículas WT

$$WT_f(a,b) = \frac{1}{a^{\frac{1}{2}}} \int \psi \left(\frac{x-b}{a} \right) f(x) d(x) \quad (2.12)$$

la cual se conoce como transformada continua, debido a que los parámetros a y b varían de manera continua. El parámetro de traslación b corresponde a la posición y el parámetro a a la longitud del escalamiento. La ecuación (2.12) expande una serie unidimensional a un espacio paramétrico (a,b) de dos dimensiones, proporcionando una medida local de la variabilidad contenida en la serie para una posición b y a una escala a dada. Este enfoque es lo opuesto al análisis de Fourier, el cual únicamente representa la variabilidad promedio sobre la serie completa. La WT producirá coeficientes instantáneos y por lo tanto puede proveer información sobre la evolución de un proceso no estacionario.

La representación gráfica bidimensional de $WT_f(a,b)$ se conoce como escalograma o espectro de ondículas, el cual, al ser promediado sobre b producirá un espectro global, que a su vez es una aproximación al espectro de Fourier (suavizado) de la serie original.

La interpretación cuantitativa del espectro de ondículas dependerá del tipo de ondícula que se utilice. Por ejemplo, una ondícula compleja permitirá separar la magnitud y la fase en una serie, mientras que una ondícula real únicamente proveerá información sobre la magnitud en el plano (a,b) . Debido a su contenido de información en magnitud y en fase, la *WT* compleja es más fácil de interpretar y por lo tanto es el tipo de ondícula que se utiliza en este trabajo. Más información a este respecto se presenta en las secciones 5.3 y 5.4.

La elección de $\psi(x)$ dependerá de los objetivos del análisis. Por ejemplo, si queremos detectar la presencia de dos frecuencias ω_1 y ω_2 en una señal, la ondícula apropiada puede ser

$$\psi(x) = (e^{i\omega_1 x} e^{i\omega_2 x}) e^{-x^2/2} \quad (2.13)$$

En cambio, si queremos detectar segmentos con incrementos lineales de frecuencia, la ondícula

$$\psi(x) = e^{ikt^2/2} e^{i\omega t} e^{-x^2/2} \quad (2.14)$$

podría ser útil.

En este trabajo utilizaremos la ondícula de Morlet (Grossman y Morlet, 1984)

$$\psi(x) = e^{i\omega_0 x} e^{-x^2/2} \quad (2.15)$$

la cual además de ser bien localizada en espacio y frecuencia, ha probado ser una ondícula adecuada para el análisis de ondas en la superficie del océano, debido a su envolvente con forma Gaussiana (Teti y Kritikos, 1992b; Chapron et al., 1996; Donelan et al., 1996).

La manera más sencilla de implementar la WT continua es mediante integración numérica. Conociendo $f(x)$ y $\psi(x)$ se puede calcular la transformada utilizando una versión discreta de (2.12), sin embargo este método es costoso computacionalmente. Por ejemplo, si integramos sobre $0 < a \leq I$ y $0 < b \leq J$, el tiempo de integración será IJ^2 . El método utilizado en este trabajo aprovecha el teorema de convolución y se basa en transformada inversa de Fourier

$$WT_b(a,b) = a^{1/2} \int e^{ib\omega} \hat{\psi}^*(a\omega) \hat{f}(\omega) d\omega \quad (2.16)$$

donde

$$\hat{f}(\omega) = \int f(x) e^{-i\omega x} dx \quad (2.17)$$

y

$$\hat{\psi}(\omega) = \sqrt{2\pi} e^{-\frac{(\omega-\omega_0)^2}{2}} \quad (2.18)$$

son las transformadas de Fourier de f y ψ respectivamente. Esto permite calcular la WT en el dominio de la frecuencia, haciendo el proceso más eficiente en un orden de $I \log_2 J$. Para aplicar este método es necesario conocer la forma analítica de $\psi(x)$ y los datos deben ser preprocesados para evitar errores en los algoritmos FFT.

2.4.- Nivel de Significancia

Para determinar los niveles de significancia estadística en un espectro de ondículas es necesario elegir un espectro de referencia apropiado. En nuestro caso utilizamos como referencia un espectro de ruido blanco. Se supone que el proceso analizado estará distribuido aleatoriamente alrededor de la media de referencia. El espectro de referencia se utiliza para establecer la hipótesis nula acerca del nivel de significancia de un pico en el espectro de ondículas. Si un pico en el espectro de ondículas es estadísticamente significativo sobre el espectro de referencia entonces podemos suponer, con un cierto porcentaje de confianza, que se trata de una característica real de los datos. Por lo tanto, el término “significante al 5%” es equivalente a un nivel del 95% de confianza, implicando con ello una prueba contra un cierto nivel de referencia. En nuestro caso el nivel de significancia está dado en términos de χ^2 con dos grados de libertad y es relativo al espectro de ondículas de una serie aleatoria, suponiendo ruido blanco Gaussiano.

3.- MATERIALES Y METODOLOGÍA

3.1.- Sinopsis de la Zona de Prueba

La zona seleccionada para llevar a cabo las pruebas de recuperación del espectro de olas corresponde a la franja costera de Rosarito, Baja California. Esta zona se encuentra incluida dentro de la región oceanográfica conocida como "Southern California Bight", la cual es una gran bahía abierta que comprende la región costera desde Punta Concepción al norte de Los Angeles, California, hasta Punta Colonett al sur de Ensenada, Baja California (Álvarez, et al., 1990).

La franja costera de Rosarito tiene unos 15 Km de ancho e incluye el litoral comprendido entre Punta los Buenos y Punta el Descanso. Está situada aproximadamente entre las latitudes $32^{\circ} 15'$ y $32^{\circ} 30'$ y las longitudes $-117^{\circ} 00'$ y $-117^{\circ} 19'$, limitando al noroeste con el archipiélago de las Islas Coronado y al este con una línea de costa recta con dirección noroeste-sureste. El área es relativamente somera, con pendiente suave y con una rompiente de plataforma abrupta justo al sur de las Islas Coronado (ver la Figura 3.1). La profundidad predominante varía entre los 20 m y 40 m. El oleaje se aproxima generalmente del noroeste y del oeste con períodos entre los 10 s y 13 s, y con alturas entre 1 m y 2 m (Marmolejo-Lara, 1985). Durante los meses de otoño e invierno el oleaje incide del oeste y del noroeste, mientras que en primavera y verano suele provenir del suroeste.

Los trabajos en esta zona se han enfocado principalmente al estudio del régimen de corrientes y dispersión costera (Alvarez et al., 1990), siendo escasos los trabajos relacionados al régimen del oleaje. Ocampo-Torres (1998) analizó las variaciones espaciales del espectro de las olas para esta región, sin embargo no fue posible reproducir los patrones de oleaje observados en las imágenes de SAR utilizando modelos avanzados. Por otro lado se han realizado intentos por extraer información del oleaje a partir de imágenes de SAR utilizando técnicas unidimensionales (Torres et al., 1998; Ocampo-Torres, 2001), quedando aún abierto el problema de la recuperación del espectro de olas a partir de las imágenes obtenidas mediante SAR. Debido a la influencia de la batimetría y al efecto de difracción por las islas, el oleaje incidente en esta región forma patrones complejos, los cuales son difíciles de simular mediante modelos.

Una de las principales ventajas del radar de apertura sintética es su potencial para analizar las características direccionales del oleaje, a diferencia de las condiciones de mar abierto, donde las propiedades del oleaje son más homogéneas, en la región costera es común encontrar mayor variabilidad espacial de los parámetros característicos del oleaje. Lo anterior propicia una ventana de oportunidad para aplicar técnicas de percepción remota basadas en tecnología de radar, con el objeto de analizar el oleaje costero en esta región.

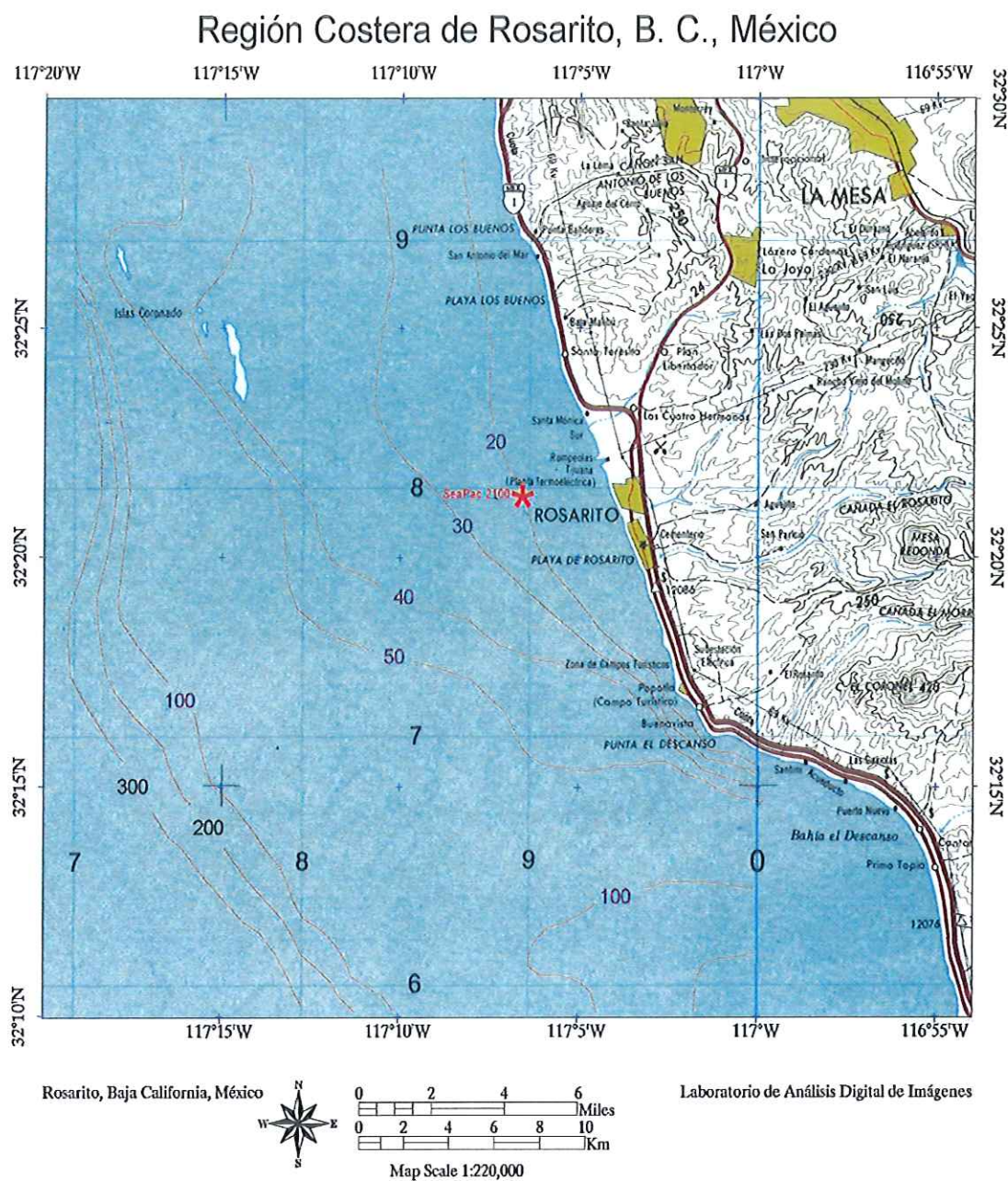


Figura 3.1 Localización geográfica de la franja costera de Rosarito, Baja California, incluyendo desde Punta Los Buenos hasta Bahía El Descanso. En el mapa se muestra la batimetría sobre la Plataforma de Rosarito referida en metros, así como la ubicación del sensor de presión Sea Pac 2100 y la boya meteorológica.

3.2.- Selección de las Imágenes.

Se eligió un conjunto de 5 imágenes SAR/ERS-2 correspondientes a diferentes pases (órbitas) del satélite sobre el marco 2961. La selección se llevó a cabo con base en su calidad visual, tomando como criterio de calidad la ausencia de ruido (sombras, frentes, listados, etc.) y la presencia de patrones de oleaje en la zona costera de Rosarito. Se consideró además como criterio de selección, la disponibilidad de información de viento y de oleaje para las fechas de adquisición de las imágenes (ver la Tabla 3.I). Esta información fue adquirida mediante una boya meteorológica y un sensor de presión, ubicados a unos 4 Km mar adentro sobre la isobata de 20 m aproximadamente (ver la Figura 3.1).

Los datos de oleaje son promedios hechos a partir de registros de 20 minutos tomados cada hora. Estas mediciones fueron tomadas durante campañas de campo del proyecto “Fase 1 de Oceanografía por Satélite” (DAJ J002/750/00C-834/00) patrocinado por el CONACYT. Las imágenes de SAR fueron adquiridas por medio del proyecto “Wind, Waves and Mixing in the Coastal Zone” (ESA A03-379) patrocinado por la Agencia Espacial Europea (ESA). La última imagen, correspondiente a la órbita 20293, se utilizó para analizar la evolución espacial del oleaje y las 4 primeras imágenes se utilizaron para la inversión de los espectros.

Con el propósito de obtener los espectros de olas para usarse como primera aproximación, se corrió el modelo SWAN utilizando la configuración implementada por Peirache y Lombardi (2001), y se calcularon espectros de olas en el sitio de anclaje del sensor de presión (ver la Figura 3.1).

Tabla 3.I- Información de las imágenes seleccionadas, indicando la órbita, fecha y hora de adquisición. Los datos anotados con (*) fueron tomados de Peirache y Lombardi (2001). Todas las imágenes corresponden al marco 2961. Las direcciones se indican con respecto al norte geográfico.

Órbita	Fecha	Hora(UTC)	Viento*(m/s)	Viento*(°)	Hs.Ola*(m)	Dir.Ola*(°)	Per.Ola*(s)
19019	9-Dic-98	18:26:08	6.63	252.90	2.00	50.80	15.80
20021	17-Feb-99	18:26:12	2.97	158.78	2.47	59.29	15.05
23528	20-Oct-99	18:29:09	3.42	124.45	0.63	25.40	15.55
24029	24-Nov-99	18:26:08	4.50	131.12	0.88	73.40	10.90
20293	8-Mar-99	18:29:01	3.46	29.14	1.53	51.21	10.30

En la Tabla 3.II se muestran los parámetros característicos del oleaje medidos por el sensor en las fechas de las 4 primeras imágenes seleccionadas y los parámetros del oleaje calculados por el modelo SWAN en el sitio de anclaje del sensor. El propósito de esta comparación no es validar el espectro de olas generado mediante SWAN, sino poder contar con cierto nivel de certidumbre en cuanto a la calidad de los espectros de primera aproximación que serán empleados en el proceso de inversión. Aunque el número de observaciones disponibles es reducido, la similitud que se observa entre los valores arrojados por el modelo y las mediciones de campo nos permite argumentar que los espectros generados por el modelo se apegan a la realidad. Como se mencionó anteriormente (Ocampo-Torres, 1998), es difícil modelar los patrones de oleaje que se generan en esta región y por lo tanto estos espectros serán tomados como una aproximación a las condiciones del oleaje.

Tabla 3.II- Tabla comparativa en la que se muestran los parámetros de oleaje medidos en el sitio de anclaje del sensor y los parámetros de oleaje generados con el modelo SWAN. Los datos fueron tomados de Peirache y Lombardi (2001) y coinciden con las fechas de las órbitas correspondientes.

Orbita	Sensor (SeaPac 2100)			Modelo SWAN		
	Hs (m)	Dir (°)	Per (s)	Hs (m)	Dir (°)	Per (s)
19019	2.00	50.80	15.80	2.67	78.05	12.82
20021	2.47	59.29	15.05	0.99	64.14	13.12
23528	0.63	25.40	15.55	0.56	35.24	13.36
24029	0.88	73.40	10.90	0.86	72.49	9.46

3.3.- Algoritmo WASAR

El Algoritmo WASAR fue desarrollado en el Max-Planck-Institut für Meteorologie, Hamburgo, Alemania (Hasselmann et al., 1998). El algoritmo consiste en una versión mejorada (Hasselmann et al., 1996) de la técnica de inversión propuesta originalmente por Hasselmann y Hasselmann (1991). En parte, esta mejora consiste en la adición de un lazo iterativo que permite el refinamiento del espectro invertido mediante la iteración del proceso de inversión. Durante este proceso de iteración se intenta extraer toda la información del espectro SAR observado.

Como se explica en el Capítulo 4, el espectro inicial de olas se utiliza para eliminar la ambigüedad direccional y para completar la información faltante en el espectro SAR. Esto se logra mediante la ejecución de un lazo iterativo, en el cual se reemplaza al espectro inicial de olas por un nuevo espectro mejorado. En cada iteración la información del espectro inicial (espectro de primera aproximación) disminuye, mientras que la información proveniente del espectro SAR aumenta. En consecuencia la información que se retiene es aquella que el espectro SAR no tenía.

En cada iteración se produce un espectro de olas mejorado mediante un proceso de partición espectral y la reasignación de sistemas de olas. Posteriormente este espectro de olas mejorado es utilizado para generar un espectro SAR simulado mediante modelado directo, el cual será comparado con el espectro SAR observado para estimar su ajuste. El proceso de inversión se repite y el espectro de olas inicial es remplazado sucesivamente por el espectro mejorado. En cada paso se obtiene un espectro invertido (oleaje) como resultado intermedio del proceso de inversión y es en la iteración final donde se obtiene el espectro recuperado (ver Figura 3.2). La filosofía tras este procedimiento es la siguiente. En primera instancia se considera que la teoría de formación de la imagen es correcta, lo cual ha sido comprobado mediante experimentación y observaciones de campo (Alpers et al., 1986; Monaldo y Lyzenga, 1988; Brüning et al., 1988). Por lo tanto, si el espectro SAR simulado a partir de un espectro inicial de olas no concuerda con el espectro SAR observado, entonces se concluye que el espectro inicial de olas era incorrecto. Por otro lado, si se ajusta el espectro de olas de manera que su espectro SAR simulado concuerde exactamente con

el espectro SAR observado, entonces se habrá extraído toda la información posible del espectro SAR observado y se habrá recuperado el espectro de olas.

El algoritmo WASAR fue diseñado originalmente con el propósito de asimilar información de la superficie del mar adquirida mediante un SAR y con el objeto de analizar oleaje en mar abierto. Para ello se utilizan espectros iniciales de olas generados con el modelo WAM y espectros de imagen generados a partir de los productos ERS.SWM.FDP (Heimbach, et al., 1998). En este sentido, la principal contribución de este trabajo consiste en aplicar este algoritmo para recuperar el espectro del oleaje en la región costera utilizando imágenes de SAR. En esta metodología se propone utilizar espectros de primera aproximación generados mediante el modelo SWAN (Holthuijsen, et al., 2003) , así como el uso de espectros de imagen generados a partir de segmentos de imágenes SAR extraídos de los productos ERS.SAR.PRI.

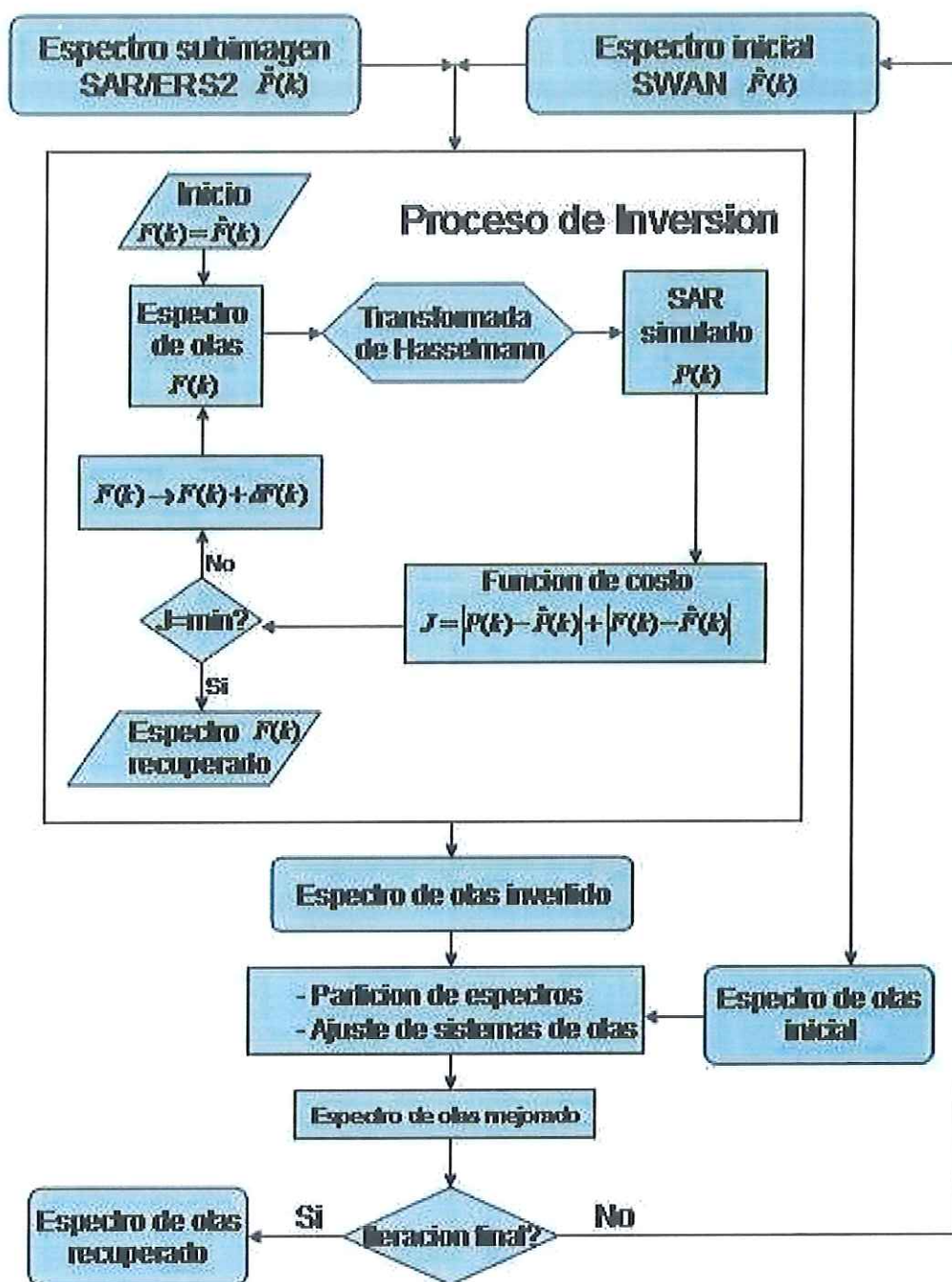


Figura 3.2 Diagrama de flujo del algoritmo WASAR, utilizando como datos de entrada un espectro de subimagen SAR y un espectro de olas inicial SWAN.

3.4.- Procedimiento de Análisis

Para cada una de las imágenes seleccionadas, se extrajo una subimagen de 512 x 512 píxeles lo más cercana posible al sitio de anclaje del sensor. Estas subimágenes fueron procesadas con la transformada rápida de Fourier (FFT), como se explica en el siguiente apartado, y sus espectros fueron invertidos con el objeto de determinar cuáles de ellas eran las más apropiadas para el estudio, tomando como base la calidad de su inversión.

Se efectuaron inversiones para los espectros de las subimágenes extraídas de las 4 órbitas referidas en la Tabla 3.II y se obtuvieron los resultados que se presentan en la Tabla 3.III. Esta Tabla muestra un resumen de los resultados obtenidos al invertir los espectros de las subimágenes extraídas sobre el sitio del sensor, para cada una de las órbitas seleccionadas.

Todas las inversiones fueron realizadas con 5 iteraciones. En la segunda columna de esta tabla se muestra el número de iteración en que el algoritmo convergió, alcanzando el mejor ajuste entre el espectro SAR calculado y el observado. Las siguientes columnas muestran el valor de la función de costo en la última iteración y el error entre los espectros SAR observado y SAR calculado. El algoritmo genera además un valor entre 0 y 4 como criterio de calidad de la inversión, el cual es asignado en función del factor de error y el costo en la iteración. El valor cero se le asigna a la iteración que tenga el valor más bajo en costo, considerándose la mejor iteración en el proceso de inversión. Estos conceptos de costo y error se explican en el Capítulo 4.

Las subimágenes de las órbitas 23528 y 20021 fueron descartadas del análisis debido a los pobres resultados de su inversión. El análisis de la órbita 23528 resultó inestable

debido a su error y costo elevados, y la órbita 20021 no alcanzó ajuste en el cálculo del “cutt-of” acimutal.

Por otra parte, debido a que presentó los mejores resultados en su inversión, la subimagen de la órbita 24029 fue elegida para utilizarse en el análisis del proceso de iteración. En esta parte del estudio se analiza el cambio en los parámetros característicos del espectro recuperado para cada paso de iteración, así como los niveles de correlación entre los espectros resultantes.

Finalmente la subimagen de la órbita 19019 fue empleada para analizar la influencia del espectro de primera aproximación en el proceso de inversión. Como se explicará más adelante, en esta parte del estudio se realizan inversiones usando los espectros extraídos en diferentes sitios de la zona de pruebas y se intercambian los espectros de primera aproximación con la finalidad de observar el resultado al ser utilizados para invertir el espectro de la subimagen correspondiente al sitio de anclaje del sensor. Debido a que se cuenta con observaciones de oleaje en este sitio, será posible analizar comparativamente la influencia del espectro inicial.

Tabla 3.III .- Tabla que muestra los resultados obtenidos al invertir los espectros de las subimágenes extraídas sobre el sitio de anclaje del sensor, para cada una de las órbitas seleccionadas. Los resultados se obtuvieron utilizando el algoritmo WASAR con 5 iteraciones.

Orbita	Conv (it)	Costo	Error	Calidad
19019	4	0.1857	0.3808	1
20021	5	0.4043	7.0960	4
23528	5	1.0000	3.1419	3
24029	5	0.0969	0.4329	0

3.4.1.- Generación de espectros

Con el fin de extraer información direccional de los patrones de oleaje presentes en las subimágenes SAR, se calcularon sus espectros direccionales mediante transformada rápida de Fourier (FFT). El procesamiento consistió en los siguientes pasos. En primer lugar se promedió la subimagen original con una ventana de 2 x 2 resultando en una nueva imagen de 256 x 256 píxeles a la cual le fue removida la tendencia regional (nivel de brillo). Posteriormente se calculó la FFT en dos dimensiones y el espectro resultante fue promediado de nuevo con una ventana de 4 x 4. En seguida se definió el centro del espectro como el origen de un espectro simétrico y se transformaron sus componentes direccionales a valores en número de onda. Finalmente los valores de los coeficientes fueron normalizados en relación al máximo de energía espectral.

Los espectros fueron transformados al formato de los productos ERS.SWM.FDP para ser utilizados como espectros observados en el algoritmo de inversión. Estos resultados se discuten en el capítulo 6.

La Figura 3.3 es un segmento de la imagen correspondiente a la órbita 24029. En ella se muestra un recuadro correspondiente al sitio donde se extrajo la subimagen S1, la cual corresponde al sitio de anclaje del sensor y fue utilizada para analizar el proceso de iteración en el algoritmo WASAR. En la Figura 3.4 se muestra la subimagen S1 y su correspondiente espectro direccional calculado mediante FFT. Tomaremos como referencia el norte en la parte superior de la imagen original (ver Lámina C.1), aunque se sabe que el norte geográfico implica una declinación de 13° al oeste debido a la inclinación de la órbita del satélite, como se observa en las flechas de la esquina superior izquierda del gráfico. Es necesario mencionar que este criterio de referencia geográfica se utilizará en todas las subimágenes analizadas en este capítulo, sin embargo el algoritmo WASAR lleva a cabo internamente esta corrección y por lo tanto los parámetros de olas resultantes estarán referidos al verdadero norte geográfico.

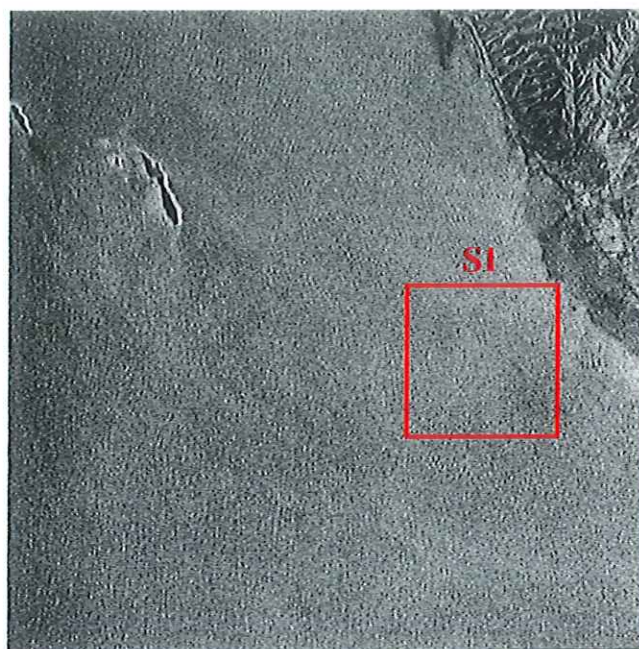


Figura 3.3.- Segmento de la imagen SAR correspondiente a la órbita 24029 y al marco 2961. En ella se muestra el recuadro donde se extrajo la subimagen S1.

La subimagen S1 (Fig. 3.4 a) está localizada en la región más somera de la plataforma, cercana a la línea de costa y muestra un campo de olas bien definido propagándose aproximadamente en dirección este. El espectro direccional (Fig. 3.4 b) está representado en términos del número de onda; K_x en dirección de alcance y K_y en la dirección de vuelo del satélite (acimut). Los círculos concéntricos denotan la ubicación geométrica de sistemas de olas con longitudes de onda de 50, 100, 200 y 400 metros. Las isolíneas representan niveles de energía y están espaciadas logarítmicamente en relación al nivel máximo de densidad de energía espectral.

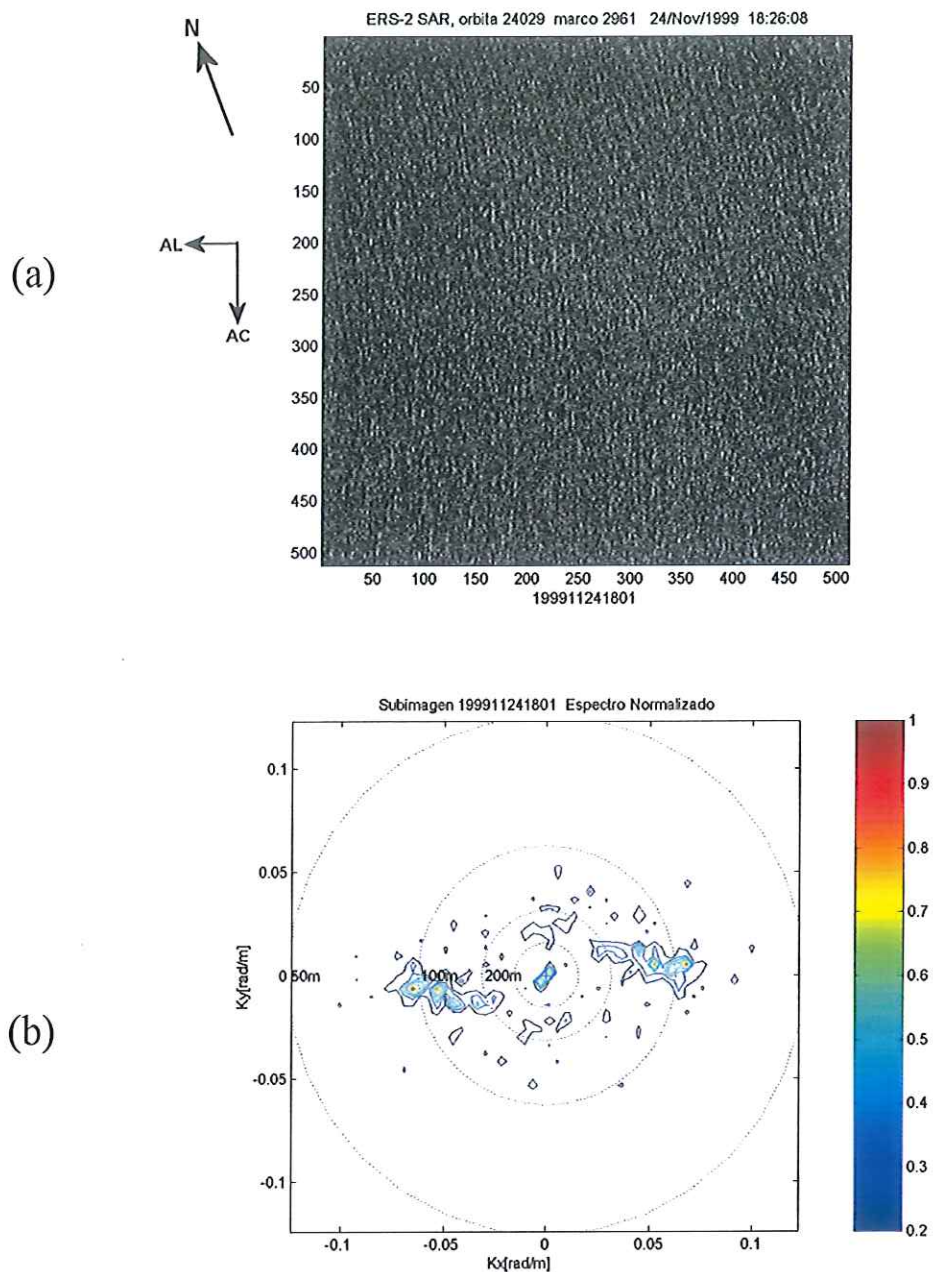


Figura 3.4.- Subimagen extraída en el sitio S1 (a) y su espectro direccional (b). AC y AL indican las direcciones de acimut y alcance del radar respectivamente. Las isolíneas están espaciadas logarítmicamente en relación al máximo de energía espectral.

En el espectro direccional se pueden apreciar más claramente los sistemas que constituyen a este campo de olas. Aunque el oleaje tiene una dirección preferencial hacia el este, a partir del espectro se deduce que el campo de olas está influenciado por efecto de refracción, lo cual se observa en la amplia distribución direccional de las componentes del espectro. El campo de olas está formado por sistemas bien definidos con direcciones que van de los 70° a los 85° y cuyas longitudes de onda varían entre los 90 y los 150 m aproximadamente. La banda de 100 a 200 m de longitud contiene la mayor concentración de energía, mostrando dos picos espectrales a los 70° y 85° aproximadamente.

En la banda de 200 a 400 m se observa otro par de sistemas con dirección de propagación predominantemente acimutal. Seguramente estas componentes fueron desvanecidas debido al proceso de síntesis de la imagen y es muy probable además que otras componentes de menor longitud no hallan sido detectadas por el radar. En este punto es importante remarcar que este espectro mantiene una ambigüedad direccional de 180° y que sus componentes espectrales han sido distorsionadas debido al proceso de formación de la imagen. Debido a lo anterior es necesario invertir este espectro en su correspondiente espectro de olas, con el objeto de conocer los parámetros característicos del oleaje en la región, como se explica en la sección 6.1.1 de este documento.

La Figura 3.5 es un segmento de la imagen correspondiente a la órbita 19019, del cual se extrajeron las subimágenes utilizadas para analizar la influencia del espectro de primera aproximación en el proceso de inversión. Se observa un swell bien definido proveniente del noroeste, el cual forma complejos patrones de oleaje sobre la

plataforma debido a los mecanismos de refracción y difracción originados al interaccionar con el fondo y las islas. En esta imagen se seleccionaron 3 sitios para llevar a cabo inversiones. La subimagen E1 fue seleccionada lo más cerca posible al sitio de anclaje del sensor. El oleaje en este sitio tiene características del oleaje proveniente de aguas profundas, así como del oleaje refractado con el fondo. En la subimagen E2 el campo de olas tiene las características del oleaje proveniente del oeste, el cual puede considerarse en aguas profundas. Finalmente la subimagen E3 presenta un campo de olas complejo, en el cual predominan ambos procesos de refracción y difracción. Las Figuras 3.6, 3.7 y 3.8 muestran las subimágenes extraídas en los sitios E2, E1 y E3 respectivamente, en conjunto con sus espectros direccionales. En la sección 6.1.2 se presenta un análisis detallado sobre los resultados obtenidos al invertir los espectros de estas subimágenes.

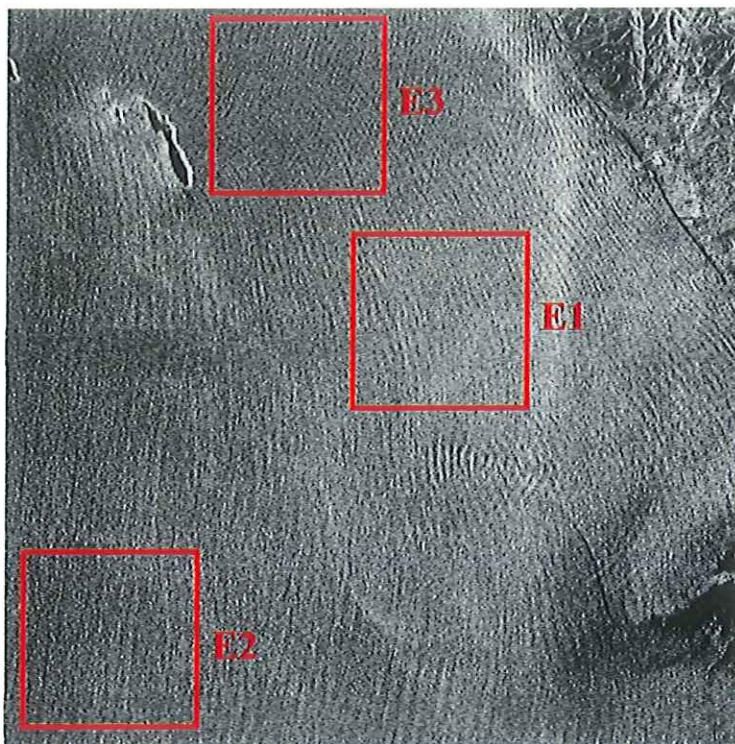


Figura 3.5 .- Segmento de imagen correspondiente a la órbita 19019, marco 2961. En esta imagen se observa un swell bien definido proveniente del noroeste, el cual forma complejos patrones de oleaje sobre la plataforma debido a los mecanismos de refracción y difracción originados al interactuar con el fondo y las islas. Los recuadros indican los sitios donde fueron extraídas las subimágenes E1, E2 y E3.

En la Figura 3.6 (a) se presenta la subimagen E2 situada al sur de las islas. Su espectro muestra un swell bien desarrollado que se propaga con dirección característica y con una leve componente en dirección sureste. Este sistema está conformado por trenes de olas con longitudes de onda que van desde los 80 hasta 400 m. Muestra una componente predominante en los 400 m, y debido a que las profundidades en este sitio rebasan los 300 m el campo de olas puede considerarse en aguas profundas.

En la Figura 3.7 se muestra la subimagen E1 ubicada sobre la región somera de plataforma. En este sitio, el oleaje proveniente del oeste ha experimentado un cambio leve en su dirección de propagación (noroeste) debido al efecto de refracción. Por otra parte, algunos componentes espectrales de baja energía han desaparecido, prevaleciendo únicamente dos componentes con longitudes de onda de 110 y 300 m aproximadamente.

Por otra parte la subimagen E3 (Fig. 3.8 a) muestra un patrón de olas más complejo, dando como resultado un espectro con amplia dispersión direccional (Fig. 3.8 b). En este sitio las componentes de 200 a 400 m mostradas en la Figura 3.7 (b) han sido refractadas, adquiriendo una dirección acimutal de aproximadamente 45° con respecto al norte. Probablemente esto ha originado el desvanecimiento de las componentes de alta energía, debido a los mecanismos formadores de imagen que actúan en dirección acimutal (ver Apéndice B). La existencia de otras componentes de mayor frecuencia en esta dirección será determinada mediante la inversión del espectro, como se discute en la sección 6.1.2 de este documento.

Adicionalmente este espectro muestra 3 nuevos sistemas de olas que viajan en dirección sureste con rumbos entre los 100° y 120° . Estos sistemas tienen longitudes de onda de 80, 110 y 300 m aproximadamente y son resultado del proceso de difracción con las islas. Se observa que ha disminuido el nivel de energía en la banda de los 100 m y aparece otra componente de 80 m como resultado de una reducción en la profundidad.

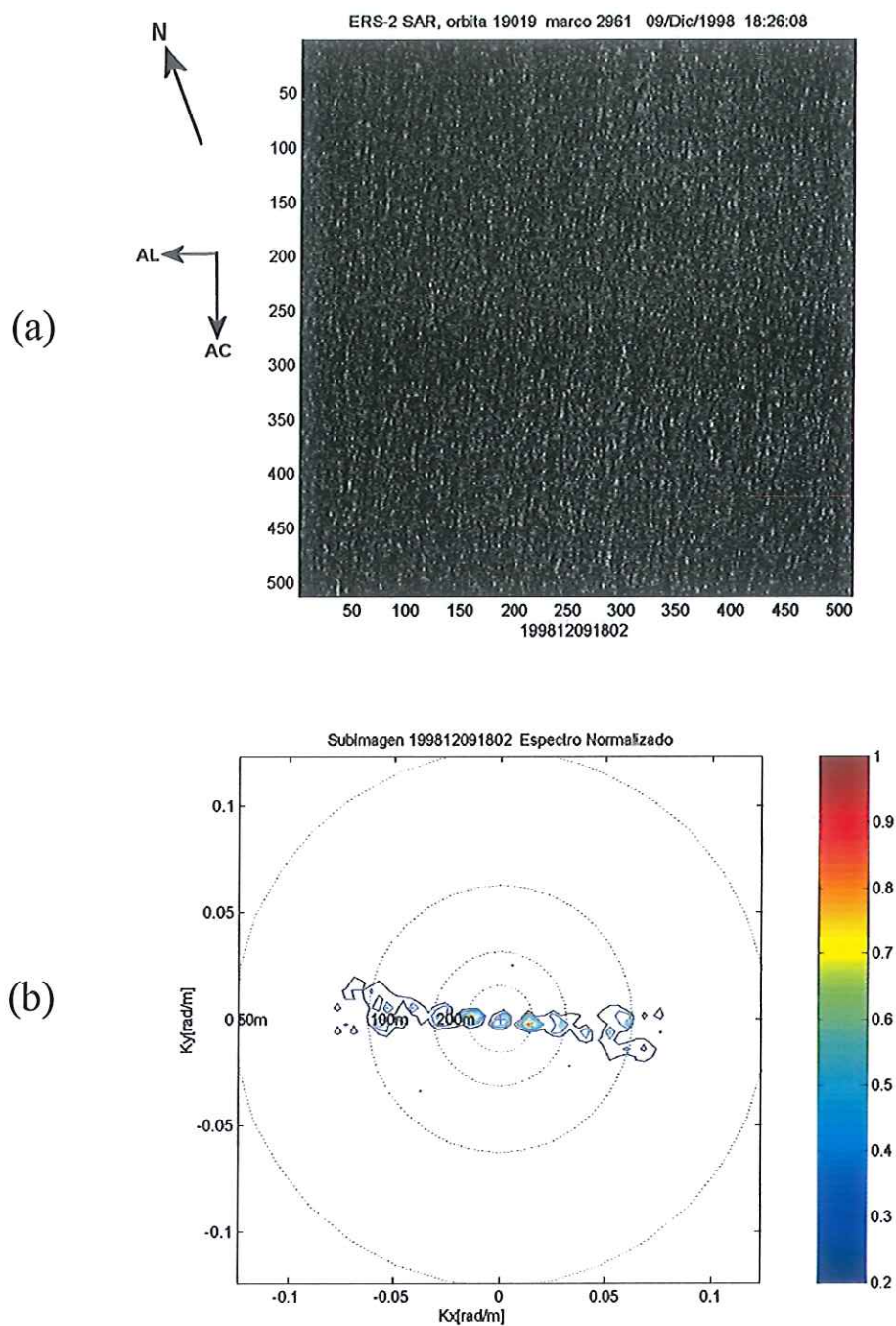


Figura 3.6.- Subimagen extraída en el sitio E2 (a) y su espectro direccional (b). AC y AL indican las direcciones de acimut y alcance del radar respectivamente. Las isolíneas están espaciadas logarítmicamente en relación al máximo de energía espectral.

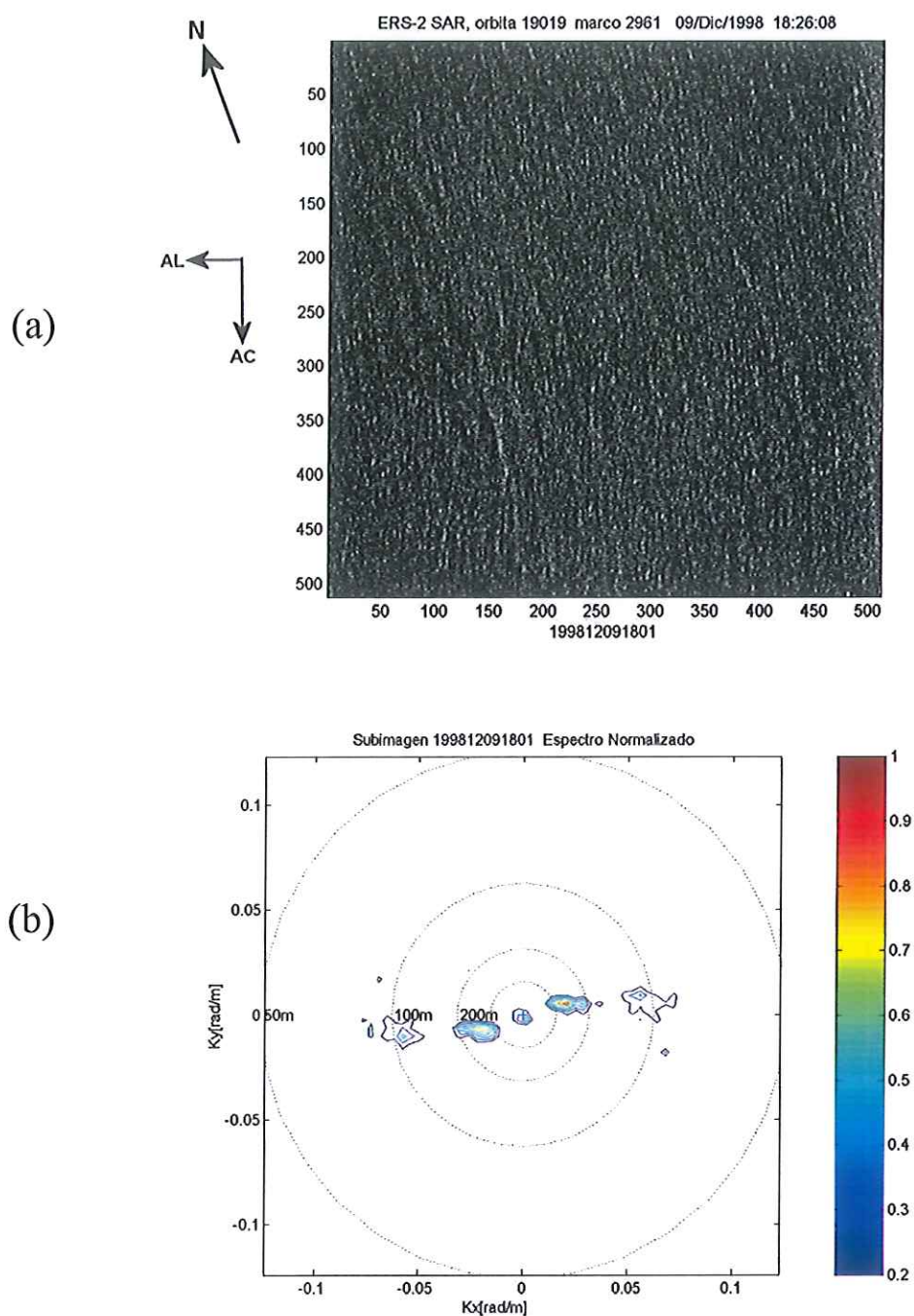


Figura 3.7.- Subimagen extraída en el sitio E1 (a) y su espectro direccional (b). AC y AL indican las direcciones de acimut y alcance del radar respectivamente. Las isolíneas están espaciadas logarítmicamente en relación al máximo de energía espectral.

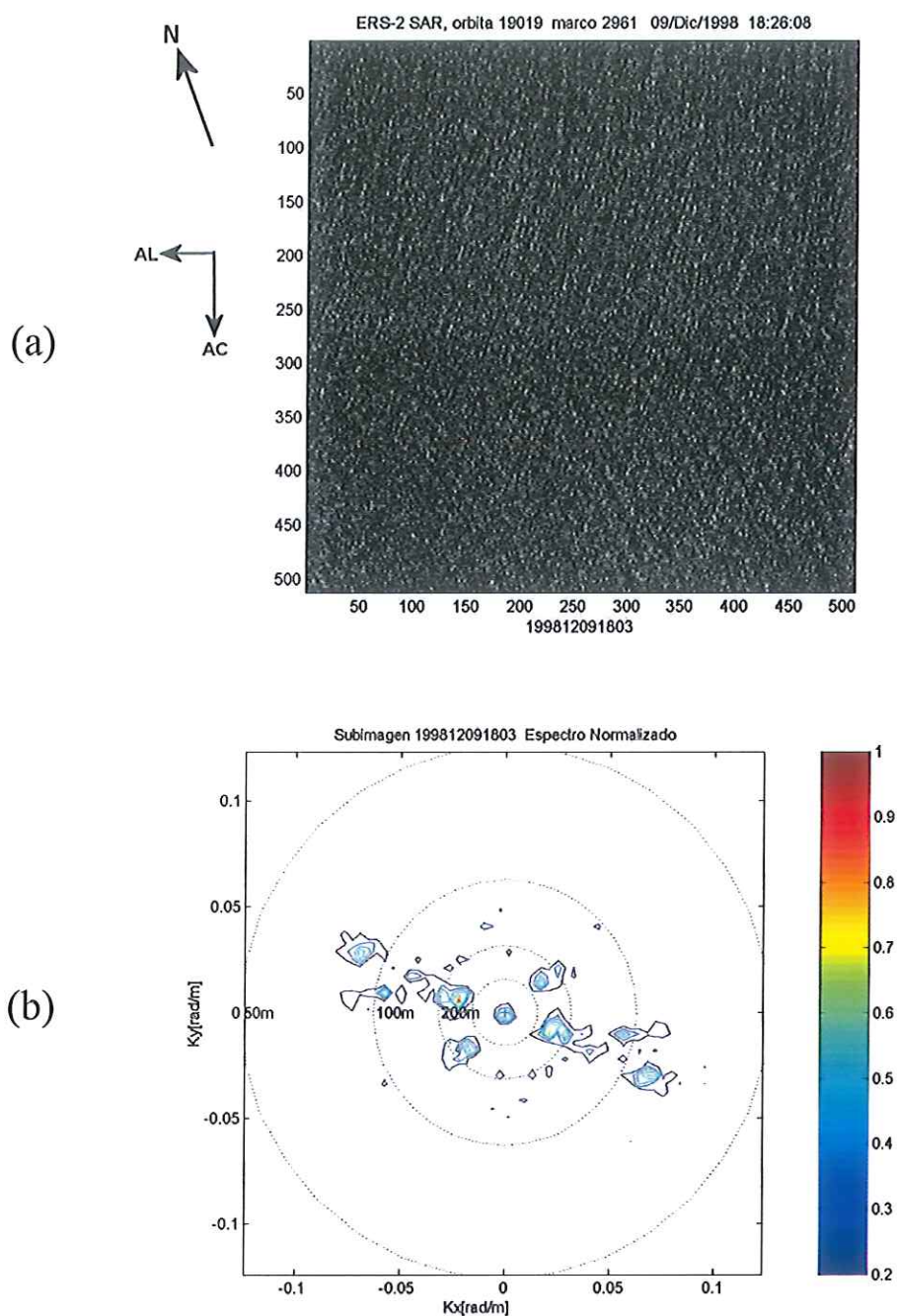


Figura 3.8.- Subimagen extraída en el sitio E3 (a) y su espectro direccional (b). AC y AL indican las direcciones de acimut y alcance del radar respectivamente. Las isolíneas están espaciadas logarítmicamente en relación al máximo de energía espectral.

3.4.2.- Extracción de perfiles

Se eligió la imagen correspondiente a la órbita 20293 para analizar espacialmente la evolución del campo de olas (ver Figura 3.9). El amplio cubrimiento de la zona costera en esta imagen permite la observación de una franja con aproximadamente 100 Km de longitud, sobre la cual se desarrolla un swell oceánico proveniente del oeste.

En esta imagen se seleccionaron 4 regiones para extraer perfiles en dirección de mar profundo hacia aguas someras. Se eligieron zonas libres de sombras y en donde los trenes de olas se apreciaban claramente. Los dos primeros perfiles (P1 y P2) corresponden a regiones de aguas profundas, el perfil P3 se encuentra cercano a la zona de transición de aguas profundas a someras y finalmente el perfil P4 corresponde a la zona más somera, sobre la plataforma (ver Fig. 3.1).

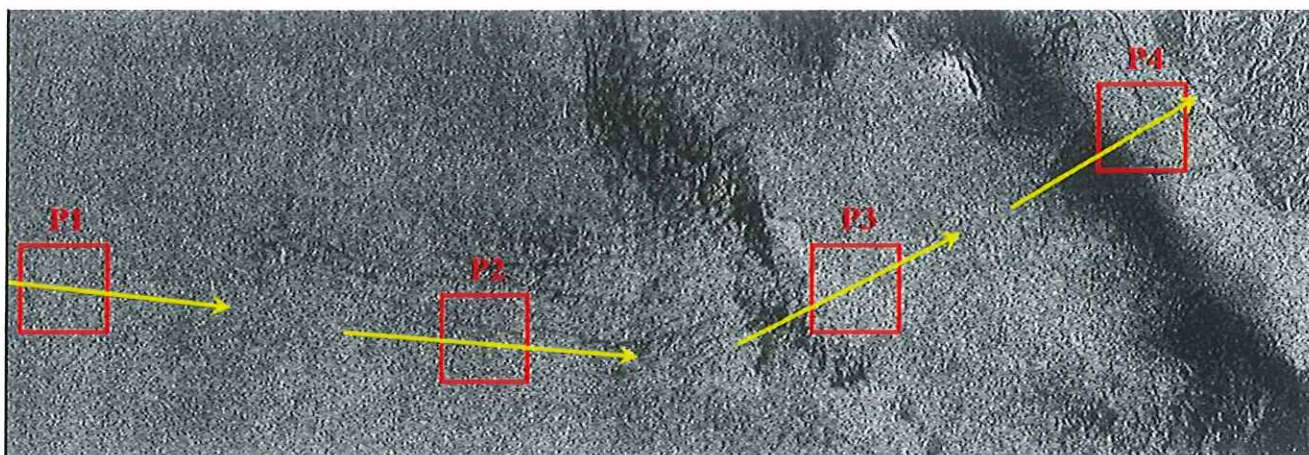


Figura 3.9.- Segmento de imagen correspondiente a la órbita 20293, marco 2961. En color rojo se muestran los recuadros donde se extrajeron las subimágenes P1, P2, P3 y P4, y en color amarillo sus perfiles correspondientes. La imagen cubre una distancia horizontal de aproximadamente 100 Km.

En los cuatro recuadros mostrados en la Figura 3.9 se extrajeron subimágenes de 512 x 512 píxeles y posteriormente se calculó su correspondiente espectro direccional mediante FFT. Estos espectros fueron obtenidos con el objeto de estimar la dirección en que debían extraerse los perfiles en la imagen original, de tal forma que las series de datos fueran perpendiculares a las crestas de las olas, como lo muestran las flechas amarillas en la Figura 3.9.

De la misma manera que en la sección anterior, en este apartado se considera la la parte superior de la imagen (Lámina C.2) como referencia direccional para el análisis de las subimágenes. Las Figuras 3.10 a la 3.13 muestran las subimágenes P1, P2, P3 y P4 que se extrajeron de la Figura 3.9, así como sus respectivos espectros direccionales. Como se mencionó anteriormente, estas subimágenes se ubican en sitios que continúan en secuencia la dirección de propagación de los trenes de olas, siguiendo aproximadamente la trayectoria de sus rayos. Las subimágenes de las Figuras 3.10 y 3.11 corresponden a zonas de aguas profundas, la subimagen de la Figura 3.12 se localiza en la transición de aguas profundas a someras y la subimagen de la Figura 3.13 corresponde a la región somera sobre la plataforma. En esta secuencia de subimágenes podemos observar variaciones del campo de olas originadas por el comportamiento noestacionario del oleaje en la costa. La característica más sobresaliente en esta secuencia de imágenes es el cambio en la dirección de propagación de los trenes de olas. Los listados y sombras (ruido) como los que se observan en la Figura 3.13, también pueden contribuir con la condición de no homogeneidad para una serie de datos (perfil) extraída de la imagen. Las variaciones espaciales en longitud de onda y en dirección de propagación del oleaje

se hacen más evidentes en la secuencia de espectros direccionales calculados a partir de estas subimágenes. La Figura 3.10a muestra un campo de olas bien definido, con dirección de propagación aproximada de 95° respecto a la dirección de iluminación del radar y con componentes de longitud de onda que van de los 100 m hasta los 300 m. Debido a su dirección preferencial en alcance del radar, se puede suponer que las longitudes de onda de estos patrones son similares a las longitudes reales del oleaje.

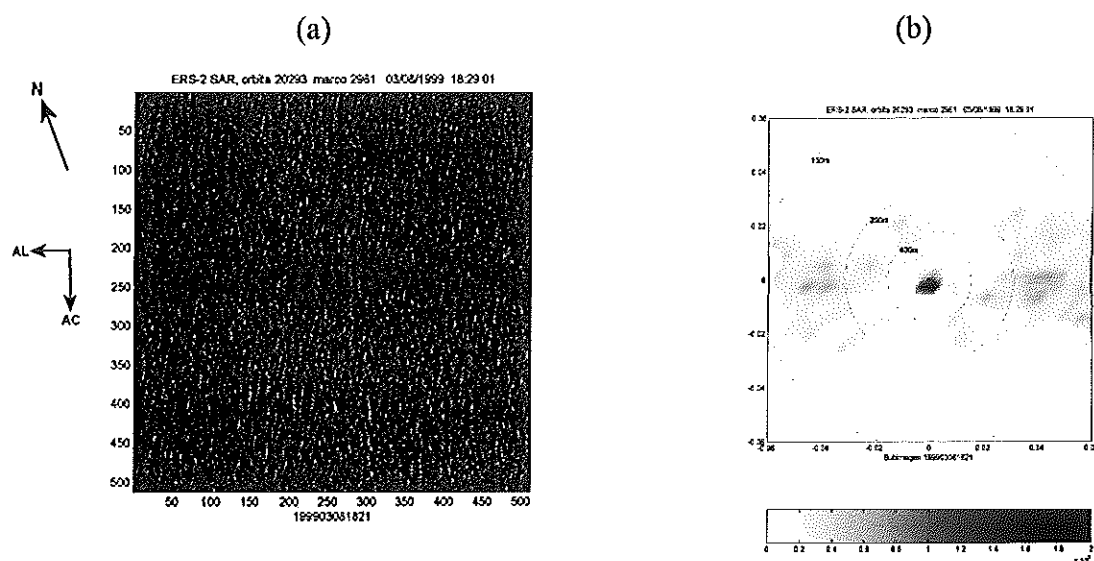


Figura 3.10.- Detalle de la subimagen P1 (a) y su espectro direccional (b). AC y AL indican las direcciones de acimut y alcance del radar respectivamente.

Las componentes del espectro de la Figura 3.11b mantienen una dirección similar a las componentes de la figura anterior, sin embargo en éste se enfatizan las componentes con longitudes entre los 180 y 200 m, apareciendo además una nueva componente de 600 m aproximadamente.

El espectro de la subimagen P3 (Fig. 3.12b) muestra un pico predominante en dirección 70° con longitud de onda de 150 m, presentando además un incremento en la energía de sus componentes mayores a los 400 m. Una característica especial de este espectro es la aparición de nuevos sistemas de olas en la banda de los 100 a 200 m, produciéndose una dispersión direccional en el espectro de 45° aproximadamente.

Finalmente, el espectro de la subimagen P4 (Fig. 3.13b) muestra un corrimiento en sus componentes hacia longitudes de onda más cortas, así como una reducción del ángulo de dispersión direccional y un desplazamiento del pico espectral principal hacia el norte (aproximadamente a los 50°). Una característica particular de este espectro es la aparición de sistemas de olas alineados en dirección acimutal, los cuales probablemente se originaron por efecto de refracción con el fondo. Es evidente que todas estas características son resultado de las características no homogéneas del oleaje en aguas someras, haciéndose más acentuadas conforme el oleaje se aproxima a la costa.

Otra característica notoria en la Figura 3.13b es el realce de las componentes de baja frecuencia, aunque esto puede interpretarse como un artificio originado por la sombra en la esquina inferior izquierda de la subimagen (ver Fig. 3.13a).

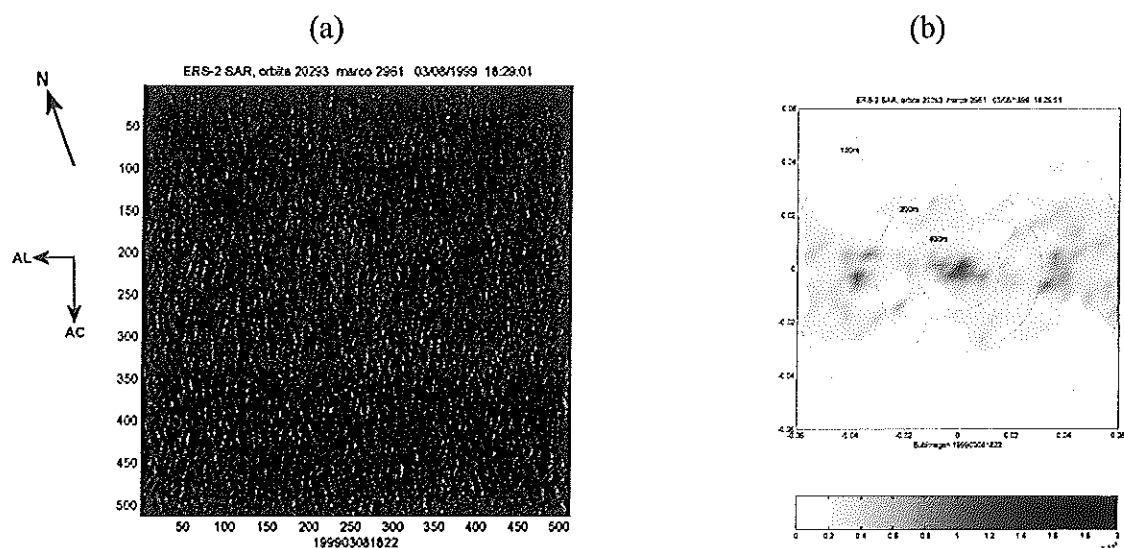


Figura 3.11.- Detalle de la subimagen P2 (a) y su espectro direccional (b). AC y AL indican las direcciones de acimut y alcance del radar respectivamente.

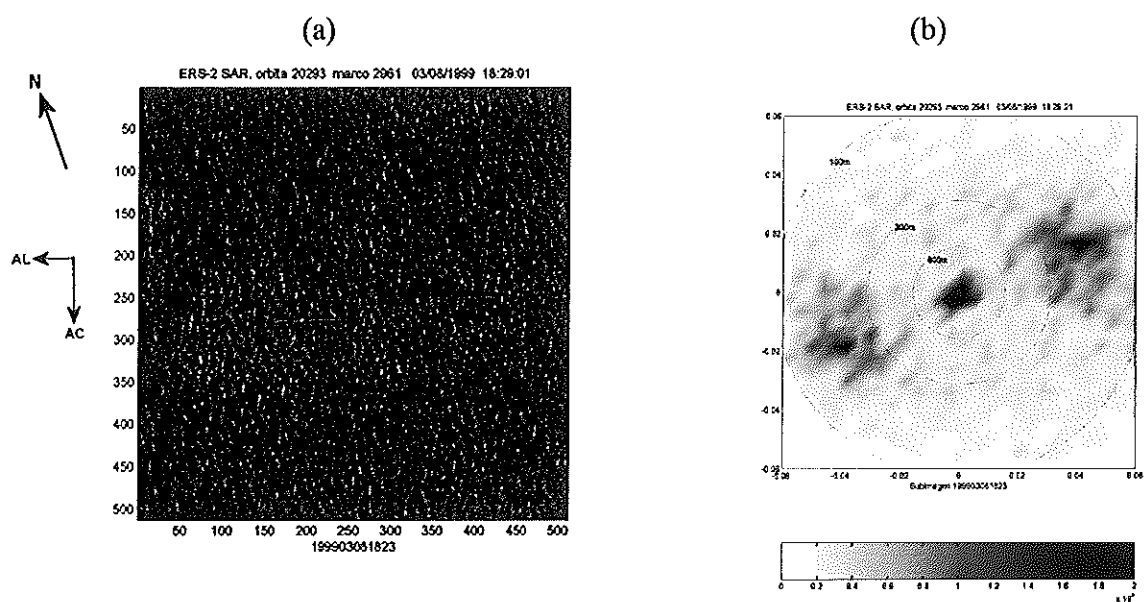


Figura 3.12.- Detalle de la subimagen P3 (a) y su espectro direccional (b). AC y AL indican las direcciones de acimut y alcance del radar respectivamente.

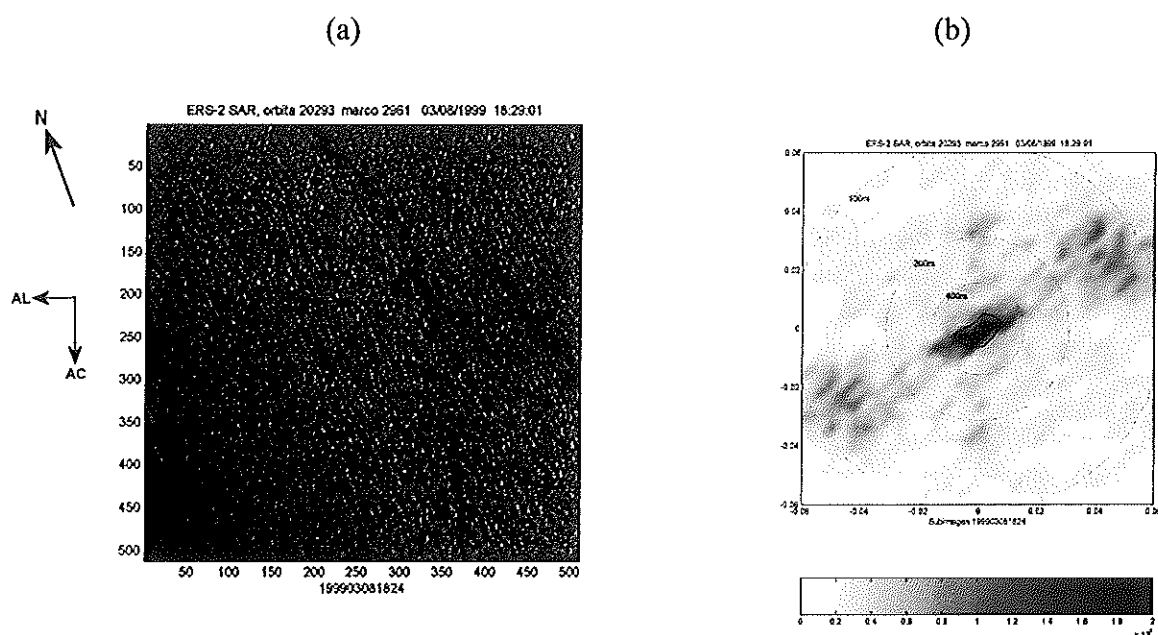


Figura 3.13.- Detalle de la subimagen P4 (a) y su espectro direccional (b). AC y AL indican las direcciones de acimut y alcance del radar respectivamente.

Una vez analizadas las características direccionales del oleaje en los espectros de Fourier, se extrajeron perfiles de intensidad y se analizaron las propiedades de agrupamiento y dispersión del campo de olas mediante el uso de transformada de ondículas. Este análisis se llevó a cabo con base en los siguientes argumentos (Doneland, 1996):

- 1) El espectro direccional es el promedio estadístico de las características de propagación del oleaje.

- 2) La energía puede estar concentrada en un vector número de onda determinado para cualquier instante o posición.
- 3) Las olas se propagan en grupos (paquetes) que están definidos en intervalos relativamente estrechos en número de onda y dirección.
- 4) Estos grupos pueden coexistir aun teniendo diferente dirección y número de onda.
- 5) La variabilidad del espectro (en tiempo o espacio) se origina debido a la presencia de grupos con diferente amplitud y vector número de onda.

De acuerdo a lo anterior se puede suponer que si se extrae un perfil de datos sobre la imagen en la dirección del pico espectral principal y si esta dirección es muy cercana a la dirección de alcance del radar, entonces se podrá estimar la longitud de onda del oleaje, a lo largo de la serie, a partir del espectro de ondículas. Sin embargo esta condición debe tomarse con cautela, ya que los trenes de olas que viajen en dirección oblicua al perfil proyectarán una longitud de onda mayor sobre el transecto analizado. Por otra parte debemos también considerar que los trenes de olas que viajan en dirección acimutal probablemente han sido distorsionados durante el proceso de mapeo al plano de imagen, y por lo tanto su longitud y dirección no son reales.

Con base en los cinco argumentos anteriores se extrajeron perfiles con longitud suficiente para no mantener condiciones de homogeneidad (13 a 21 Km) y se les calculó su espectro de ondículas. Los resultados de este análisis se discuten en la sección 6.2 de este trabajo.

4.- RECUPERACIÓN DEL ESPECTRO DEL OLEAJE

El análisis cuantitativo de los espectros derivados de imágenes SAR de la superficie del océano no es un proceso que se pueda llevar a cabo de manera directa. Debido al mecanismo formador de imágenes de SAR, existen dos limitantes que impiden su interpretación directa. En primera instancia una ambigüedad direccional de 180° en el sentido de propagación del oleaje y en segundo lugar la pérdida de información en las componentes acimutales con número de onda alto, esta última debida al corrimiento Doppler de los reflectores en el plano de la imagen. Sin embargo, el entendimiento del proceso de formación de la imagen (Alpers et al., 1981; Hasselmann et al., 1985) ha permitido avanzar en el desarrollo de técnicas que permiten representar el mapeo de un espectro del oleaje hacia un espectro de imagen (Hasselmann y Hasselmann, 1991; Krogstad, 1992) para poder llevar a cabo la inversión del espectro de la imagen SAR en su correspondiente espectro de olas (Hasselmann et al., 1996; Hasselmann, et al., 1998).

La inversión del espectro de la imagen está basada en un proceso iterativo que minimiza un funcional de costo, el cual requiere de un modelo de partida como espectro de olas inicial. A este espectro se le denomina espectro de primera aproximación. No es posible obtener información de oleaje a partir del espectro de imagen para frecuencias mayores a la frecuencia de corte acimutal (azimuthal cutt-off), siendo necesario recuperar esta información, en conjunto con la dirección de propagación, a partir del espectro de olas de primera aproximación.

El SAR a bordo de los satélites ERS-1 y 2 ha sido empleado para analizar oleaje de período largo (swell) en condiciones de aguas profundas y en estudios de escala global (Heimbach et al., 1998). En estos estudios se ha utilizado el modelo WAM (WAMDI Group, 1988) para generar los espectros de primera aproximación, y se han empleado espectros de imagen derivados de productos ERS.SWM.FDP (imagettes) generadas por el SAR operando en el modo olas (wavemode). Para más información acerca de los productos ERS.SWM.FDP favor de referirse al Apéndice A de este documento.

Una de las aportaciones de este trabajo consiste en implementar metodologías basadas en técnicas de inversión, que permitan la obtención de los parámetros característicos del oleaje en regiones costeras, a partir de imágenes de radar de apertura sintética. Para ello se propone utilizar como espectro de primera aproximación un espectro de olas generado con el modelo SWAN - Simulation of WAves in the Nearshore - (Booijt, et al., 1999), ya que se espera que este modelo reproduzca de manera más precisa las variaciones espaciales de los parámetros del oleaje en la región costera. Además se propone el uso de espectros de imagen derivados a partir de segmentos (subimágenes) de los productos ERS.SAR.PRI, permitiéndonos con ello seleccionar de manera más precisa la ubicación espacial del espectro de imagen que será invertido. Para más información acerca de los productos ERS.SAR.PRI favor de referirse al Apéndice A de este documento

4.1.- Modelado Directo

La relación de mapeo Φ entre un espectro de olas $F(k)$ y un espectro de imagen $P(k)$

$$P(k) = \Phi(F(k)) \quad (4.1)$$

se puede representar en forma lineal para un espectro simétrico, de la siguiente manera:

$$P^S(k) = \frac{1}{2} \left[|T^S(k)|^2 F(k) + |T^S(-k)|^2 F(-k) \right]. \quad (4.2)$$

k es el vector número de onda y T^S es la función de transferencia total SAR, la cual está dada por

$$T^S(k) = T^R(k) + T^{vb}(k) \quad (4.3)$$

donde T^R y T^{vb} son las funciones de transferencia relacionadas con el proceso de formación de la imagen RAR, y con los mecanismos de agrupamiento de reflectores (velocity bunching) respectivamente.

Aunque la teoría lineal tiene aplicación limitada para este caso, la transformada espectral que se presenta a continuación permite (en su orden más bajo) una representación casi-lineal de la Ecuación (4.2). Esto permite una descripción

cuantitativa aceptable de un espectro de imagen SAR aún en casos altamente no-lineales (Hasselmann y Hasselmann, 1991).

La transformada espectral no-lineal puede representarse en dos formas: como una integral espectral no-lineal, o como una expansión en series de potencias. La expresión integral no se presta para ser calculada mediante técnicas rápidas de transformación, mientras que los términos de la serie de potencias pueden ser evaluados individualmente mediante transformadas de Fourier. Además, la descomposición en series de potencias permite analizar las relaciones entre los distintos mecanismos (lineales y no-lineales) formadores de la imagen (Hasselmann y Hasselmann, 1991).

La integral espectral tiene la siguiente forma

$$\begin{aligned}
 P^S(k) = (2\pi)^{-2} \exp[-k_x^2 \xi'^2] \int d\mathbf{r} \{ & \exp[-ik \cdot \mathbf{r}] \exp[k_x^2 \beta^2 f^v(\mathbf{r})] \\
 & \times (1 + f^R(\mathbf{r}) + ik_x \beta [f^{Rv}(\mathbf{r}) - f^{Rv}(0)] \\
 & + (k_x \beta)^2 [f^{Rv}(\mathbf{r}) - f^{Rv}(0)][f^{Rv}(-\mathbf{r}) - f^{Rv}(0)] \} \quad (4.4)
 \end{aligned}$$

donde k_x es la componente número de onda en dirección acimutal y $\mathbf{r}$ es el vector de posición

$$\xi'^2 = \beta^2 \langle v^2 \rangle = \beta^2 \int |T^{vel}(k)|^2 F(k) dk, \quad (4.5)$$

ξ' es el error cuadrático medio del desplazamiento acimutal de los reflectores, y v es la componente de velocidad orbital del oleaje de período largo en la dirección de alcance del radar.

Las funciones f^{Rv} , f^R y f^v representan la covarianza y autovarianza del campo de velocidad v con respecto a la imagen fija generada mediante el proceso de formación de imagen de RAR (Radar de Apertura Real). Estas tres funciones pueden representarse como transformadas de Fourier de la siguiente manera

$$f^v(r) = \int F(k) |T^v(k)|^2 \exp[ik \cdot r] dk \quad (4.6)$$

$$f^R(r) = \frac{1}{2} \int [F(k) |T^R(k)|^2 + F(-k) |T^R(-k)|^2] \exp[ik \cdot r] dk \quad (4.7)$$

$$f^{Rv}(r) = \frac{1}{2} \int [F(k) T^R(k) T^v(k)^* + F(-k) T^R(-k) T^v(-k)] \exp[ik \cdot r] dk \quad (4.8)$$

donde $T^R(k)$ y $T^v(k)$ son funciones de transferencia relacionadas al proceso de formación de la imagen RAR y al campo de velocidad en dirección de alcance, respectivamente.

Para mayor información el lector puede consultar a Hasselmann y Hasselmann (1991).

La integral de la Ec. 4.4 tiene la forma de una transformada de Fourier. Sin embargo su dependencia en el factor k_x^2 destruye la estructura lineal de la integral. Si se expande el segundo término exponencial se obtiene una serie de transformadas de Fourier con la forma

$$P^S(k) = \exp[-k_x^2 \xi'^2] \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=2n-2}^{2n} (k_x \beta)^m P_{nm}^S(k) \quad (4.9)$$

donde k_x es la componente número de onda del oleaje de período largo en dirección acimutal, β es la relación distancia/velocidad de la plataforma espacial, y los factores espectrales P_{nm}^S consisten en transformadas de Fourier de los productos de n -ésimo orden entre las funciones f^{Rv} , f^R y f^v . El índice n indica el orden de no linealidad con respecto a un espectro de olas inicial y el índice m el orden con respecto al parámetro β asociado al agrupamiento por velocidad (velocity bunching). Una característica importante de la expresión anterior es la ocurrencia de un factor exponencial común

$$C = \exp[-k_x^2 \xi'^2] \quad (4.10)$$

el cual representa una aproximación a la región de corte acimutal asociada al agrupamiento por velocidad. Sumando sobre el índice m para un nivel fijo de no linealidad n , se produce una estratificación de la expansión con respecto al grado de no linealidad.

$$P^S(k) = \exp[-k_x^2 \xi'^2] \times [P_1^S(k) + P_2^S(k) + \dots + P_n^S(k) + \dots] \quad (4.11)$$

$P_{0,0}^S$ no es considerado en la sumatoria anterior debido a que representa la contribución en $k=0$ asociada al nivel de intensidad promedio en la imagen (nivel dc).

El término P_1^S es idéntico al espectro SAR de la Ecuación (4.2), dando como resultado la aproximación “casi-lineal”

$$P_{q_l}^s(k) = \exp[-k_x^2 \xi'^2] P_1^s(k) \quad (4.12)$$

la cual se ha demostrado que es una descripción aceptable del espectro SAR (Hasselmann y Hasselmann, 1991).

El cálculo de la transformada espectral es relativamente rápido debido a que se basa en transformadas de Fourier. Aún para espectros altamente no lineales normalmente se alcanza convergencia para n con valores entre 4 y 6. Las contribuciones de los términos de orden superior se concentran principalmente en las regiones de corte acimutal, por lo que generalmente no son importantes.

4.2.- Inversión de la Transformada Espectral

El propósito al invertir el espectro SAR de una imagen de la superficie del mar es recuperar el espectro del oleaje a partir del espectro de dicha imagen. Sin embargo, debido a una ambigüedad direccional de 180° y a la pérdida de información espectral en la dirección de vuelo del satélite, la solución no es única para este problema. Para resolver esta indeterminación se utiliza un término de regularización que proporciona información adicional proveniente de un espectro de olas de primera aproximación $\hat{F}(k)$. De esta manera, la transformada espectral descrita en la sección anterior puede ser invertida mediante la minimización de un funcional de costo J que penaliza el error

entre el espectro SAR observado por el radar y el espectro SAR calculado a partir de un espectro de olas optimizado.

$$J = \int [P(k) - \hat{P}(k)]^2 \hat{P}(k) dk + \mu \int \frac{[F(k) - \hat{F}(k)]^2}{\{B + \min[F(k) - \hat{F}(k)]\}^2} dk + \eta \frac{(\alpha \lambda_c^2 - \hat{\lambda}_c^2)^2}{\max[\lambda_c^4, \hat{\lambda}_c^4]} \quad (4.13)$$

donde $\hat{P}(k)$ y $P(k)$ representan respectivamente al espectro SAR observado y al espectro SAR simulado a partir del espectro de olas. En este trabajo $\hat{F}(k)$ es un espectro de olas de primera aproximación generado con el modelo SWAN y $F(k)$ es el espectro de olas optimizado a partir del cual se simula $P(k)$. α es un parámetro de escalamiento de la energía espectral. $\hat{\lambda}_c$ y λ_c son las longitudes de onda en las que ocurre pérdida de información espectral en dirección acimutal (región de corte acimutal) para los espectros SAR observado y simulado respectivamente. Éstas se definen como la longitud de onda a la cual, la media acimutal del espectro SAR decrece a un valor de 3 dB sobre el nivel de ruido. El factor μ impide que la solución final sea altamente dependiente del espectro inicial y B es una constante que impide que el denominador se haga cero. El peso de η se elige de manera que los términos primero y tercero sean del mismo orden de magnitud.

La solución para una condición de mínimo local se alcanza cuando

$$\frac{\partial J}{\partial F(k)} = 0 \quad (4.14)$$

lo cual se obtiene mediante iteración aplicando sucesivamente la transformada espectral descrita en la sección anterior. El proceso iterativo es como sigue: supongamos que al nivel de iteración n tenemos un espectro de olas F^n y su espectro SAR asociado P^n , el cual ha sido calculado mediante la transformada espectral. El paso de F^n y P^n hacia sus versiones mejoradas

$$F^{n+1} = \alpha^n F^n \Delta F^n \quad (4.15)$$

y

$$P^{n+1} = \Phi(F^{n+1}) \quad (4.16)$$

se fundamenta en la suposición de que los cambios ΔP^n y ΔF^n están relacionados mediante la expresión casi-lineal

$$P(k) = \exp[-k_s^2 \xi'^2] P_1(k) \quad (4.17)$$

Según Hasselmann y Hasselmann (1991) esta expresión es una buena aproximación a la relación de mapeo no lineal a primer orden, lo cual es una ventaja que permite la implementación del algoritmo de inversión en forma iterativa.

Sustituyendo las nuevas estimaciones de F y P en (4.13) y definiendo

$$\Delta P^n = P^{n+1} - P^n \quad (4.18)$$

$$\mu^n = \mu \left[B + \min \{ F^n, \hat{F} \} \right]^2 \quad (4.19)$$

$$\eta^n = \eta \left[\max(\lambda_c^{n4}, \hat{\lambda}_c^4) \right]^4 \quad (4.20)$$

el funcional de costo, expresado en términos de ΔP^n y ΔF^n queda como

$$\begin{aligned} J = & \int \hat{P} \left[\Delta P^n - (\hat{P} - P^n) \right]^2 dk \\ & + \int \mu^n \left[\Delta F^n - (\hat{F} - \alpha^n F^n) \right]^2 dk \\ & + \eta^n (\alpha^n \lambda_c^{n2} - \hat{\lambda}_c)^2 \end{aligned} \quad (4.21)$$

El problema variacional en J se resuelve explícitamente con respecto a ΔF , produciendo una solución mejorada F^{n+1} . Aplicando la transformada espectral no lineal a F^{n+1} se obtiene su nuevo espectro SAR asociado P^{n+1} . El proceso se repite, convergiendo en aproximadamente 6 pasos.

4.3.- Error y Correlación entre Espectros

En ocasiones el proceso de inversión puede llegar a producir un espectro invertido de mala calidad, originándose con ello la pérdida de convergencia. Puede suceder que después de algunos pasos iterativos en los que halla disminuido el error entre los espectros SAR observado y simulado, este error comience nuevamente a crecer. Esto puede deberse a la falta de ajuste entre los sistemas de olas del espectro de entrada con los sistemas de olas del espectro invertido. Para eliminar esta divergencia, se suspende el proceso de iteración cuando el error cuadrático adimensional

$$\varepsilon^2 = \frac{\iint [S_s(f, \theta) - S_o(f, \theta)]^2 df d\theta}{\sqrt{\iint [S_s(f, \theta)]^2 df d\theta \iint [S_o(f, \theta)]^2 df d\theta}} \quad (4.22)$$

dado por la diferencia entre los espectros SAR simulado y observado (S_s , S_o) alcanza un valor mínimo. En la práctica esta condición se alcanza con cierto número fijo de iteraciones (entre 5 y 10) de tal manera que el espectro recuperado se selecciona a partir de la iteración con el error más pequeño. Además del error definido en (4.22) también se puede utilizar un coeficiente de correlación C como medida de ajuste entre los espectros SAR simulado y observado (Brüning et al., 1994) el cual sirve como criterio para garantizar que la mayor parte de la información del oleaje en la imagen SAR ha sido recuperada.

$$C = \frac{\iint S_s(f, \theta) S_o(f, \theta) df d\theta}{\left[\iint S_s^2(f, \theta) df d\theta \iint S_o^2(f, \theta) df d\theta \right]^{1/2}} \quad (4.23)$$

5.- EVOLUCIÓN ESPACIAL DEL OLEAJE

La superficie del mar está compuesta por la superposición de grupos de olas con amplitudes, velocidades y formas variables. Se puede concebir la superficie del mar como un conjunto aleatorio de estos grupos propagándose en varias direcciones y con diferentes niveles de energía de acuerdo a la pendiente de la envolvente que los modula (Mollo-Christensen y Ramamonjariisoa, 1978). Los grupos con pendientes pequeñas se consideran aproximadamente lineales y pueden evolucionar espacialmente de tal forma que adquieren pendientes más pronunciadas (coalescencia entre grupos) o pueden hacerse más planos (dispersión de grupos) dependiendo de las fases de los trenes de olas que los componen en un momento dado. Bajo la suposición de un campo de olas estacionario y ergódico, este modelo considera que la superficie del mar está compuesta por una sumatoria infinita de trenes de olas que se propagan con fases y direcciones aleatorias, y cuya distribución de energía en frecuencia y dirección corresponde a su espectro direccional.

5.1.- Velocidad de Grupo y Dispersión

Las olas con mayor longitud de onda y períodos más largos viajarán más rápidamente en aguas profundas. A este proceso de separación entre olas con diferente período y longitud de onda se le llama dispersión, y las ondas de gravedad que viajan en medios dispersivos mantienen la siguiente relación entre sus parámetros

$$\omega^2 = gk \tanh(kh) , \quad (5.1)$$

donde ω es la frecuencia angular de la ola, g es la aceleración de la gravedad, $k=2\pi/L$ es el número de onda, L es la longitud de onda y h la profundidad.

Para el caso de olas en aguas profundas, cada una de sus componentes se propaga con una velocidad de fase que solo es dependiente de la longitud de onda, por lo que $\omega^2 = gk$ y por lo tanto su velocidad de fase será

$$C = \frac{\omega}{k} . \quad (5.2)$$

Si consideramos la superposición de dos trenes de olas con amplitudes similares pero con número de onda y frecuencia ligeramente diferentes, sus correspondientes velocidades de fase serán

$$C_1 = \frac{\omega_1}{k_1} , \quad C_2 = \frac{\omega_2}{k_2} .$$

La combinación de ambos trenes dará como resultado la generación de patrones repetitivos que forman grupos de olas.

La Figura 5.1 muestra un ejemplo idealizado de los patrones de interferencia generados por dos trenes de olas. Ambos trenes perderán su identidad individual y formarán grupos de olas separados por zonas casi libres de ondulaciones.

Cada componente individual del grupo se propagará con su correspondiente velocidad de fase, mientras que la envolvente del paquete se desplazará con una velocidad menor denominada velocidad de grupo. La velocidad de grupo para 2 trenes de olas se define como la diferencia entre las dos frecuencias angulares dividida por la diferencia de sus correspondientes números de onda.

$$C_g = \frac{\omega_1 - \omega_2}{k_1 - k_2} \quad (5.3)$$

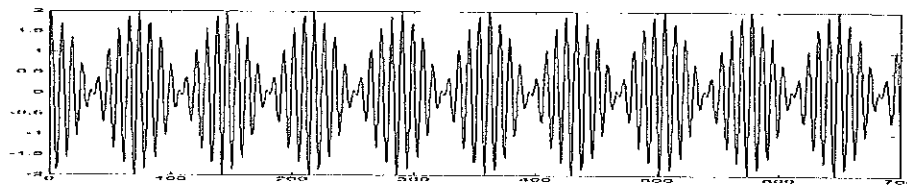


Figura 5.1- Adición de dos componentes sinusoidales con amplitudes similares y número de onda diferente. El eje vertical representa la amplitud de la señal en unidades relativas y el eje horizontal la distancia en número de dato.

5.2.- Interacción con el Fondo

Conforme una ola se aproxima a la costa, ésta empezará a interactuar con el fondo marino cuando la relación entre la profundidad h y su longitud de onda en aguas profundas L_o se aproxime a (Kinsman, 1965)

$$\frac{h}{L_o} \approx \frac{1}{2} .$$

Este efecto de fricción causará una reducción en la velocidad de la ola disminuyendo su longitud de onda. Conforme la ola se interna en aguas someras, su velocidad de fase se reducirá hasta aproximarse a la velocidad de grupo.

De acuerdo a la teoría lineal de olas, la frecuencia debe permanecer constante conforme las olas se aproximan a la costa desde aguas profundas, de tal manera que la Ecuación (5.1) se puede re-escribir como

$$L = \frac{2\pi g}{\omega^2} \tanh\left(\frac{2\pi h}{L}\right) . \quad (5.4)$$

Para el caso de olas en aguas profundas $\frac{2\pi h}{L_o} \rightarrow \infty$.

Por lo tanto, $\tanh\left(\frac{2\pi h}{L_o}\right) \rightarrow 1$, y la Ecuación (5.4) queda como

$$L_0 = \frac{2\pi g}{\omega^2} \quad . \quad (5.5)$$

A partir de la ecuación anterior se puede estimar la frecuencia angular de la ola en aguas profundas de acuerdo a la siguiente expresión

$$\omega = \sqrt{\frac{2\pi h}{L_0}} \quad . \quad (5.6)$$

Esta expresión puede también expresarse en términos de k utilizando la relación de dispersión dada en la Ecuación (5.1).

Por otro lado, a partir de la relación de dispersión también se puede estimar la velocidad de fase mediante la siguiente expresión

$$C^2 = \frac{g}{k} \tanh(kh)$$

que en términos de longitud de onda queda como

$$C^2 = \frac{gL}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi h}{L}\right) \quad . \quad (5.7)$$

La velocidad de fase para olas en aguas profundas estará dada por

$$C_0 = \sqrt{\frac{gL_0}{2\pi}} . \quad (5.8)$$

Alternativamente se puede utilizar la relación de dispersión para estimarla velocidad de fase para olas en aguas someras

$$C_1 = \sqrt{\frac{gL_1}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi h}{L_1}\right)} , \quad (5.9)$$

donde L_1 es la longitud de onda del oleaje en aguas someras.

La idea en este trabajo es aplicar la transformada de ondículas a perfiles de intensidad extraídos de imágenes de SAR de la superficie del mar. Los perfiles serán extraídos en la dirección de alcance del radar y sobre regiones de la imagen que muestren campos de olas bien desarrollados. Al analizar el espectro de ondículas resultante se espera poder identificar grupos de olas a lo largo del perfil y estimar sus correspondientes longitudes de onda asociadas a su nivel de escala. De esta manera, a partir de la relación de dispersión se podrá estimar su frecuencia angular, velocidad de fase, velocidad de grupo y el período.

5.3.- Análisis Espacio-Escala

La representación espectral del oleaje nos permite el desarrollo de modelos que son utilizados en oceanografía e ingeniería costera. Ejemplos de la aplicación de estos modelos los tenemos en estudios de forzamiento por viento, disipación de energía, interacción entre diferentes trenes de olas, o interacciones con el fondo y corrientes. La base para estos modelos se fundamenta en el supuesto de que tratamos con trenes de olas estacionarios. Sin embargo esta suposición nos limita al uso de técnicas de análisis espectral convencionales, lo cual no es estrictamente aplicable cuando tratamos con trenes de olas en la zona costera, o cuando analizamos extensiones de la superficie oceánica del orden de decenas de kilómetros.

A continuación se presentan dos formas diferentes para representar el contenido espectral de una serie de datos. La primera de acuerdo a la teoría de Fourier y la segunda mediante Transformada de Ondículas. Se discuten las ventajas de esta última en el contexto del análisis espacio-escala y se plantea su aplicación como una herramienta alternativa para analizar secuencias de datos relacionadas con el oleaje en la zona costera.

Supongamos que el perfil de un tren de olas se puede representar como una señal $f(x)$ con valores discretos, $x=0...N$, tal que

$$f(x) = a \cos(2\pi\omega_0 x + \phi) , \quad (5.10)$$

donde a es la amplitud de la ola, ω_0 es la frecuencia fundamental y ϕ la fase.

Suponiendo que se trata de una señal estacionaria, se puede demostrar que para frecuencias ω_0 múltiplos de $1/N$, la varianza o potencia promedio de la señal es $a^2/2$ (Jenkins y Watts, 1967). Por lo tanto, si $f(x)$ fuera una serie formada por una combinación de ondas senoidales con frecuencias ω_i y amplitudes a_i , entonces su varianza sería

$$\sigma_f^2 = \sum_i \frac{1}{2} a_i^2 . \quad (5.11)$$

Esto significa que la varianza de $f(x)$ puede fraccionarse en componentes de potencia promedio para cada frecuencia ω_i . Entonces, si $f(x)$ es una señal estacionaria, la varianza de su correspondiente proceso aleatorio puede ser descompuesta en contribuciones sobre un intervalo continuo de frecuencias ω

$$\sigma^2 = \int_{-\infty}^{\infty} \Gamma(\omega) d\omega , \quad (5.12)$$

donde $\Gamma(\omega)$ es el espectro de potencia de $f(x)$, y $\Gamma(\omega) d\omega$ es la potencia promedio en la banda de frecuencia que va desde ω hasta $\omega + d\omega$. El espectro de potencia también puede expresarse como una transformada de Fourier

$$\Gamma(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} \gamma(u) \cos(2\pi\omega u) du \quad (5.13)$$

donde $\gamma(u) = \overline{f(x) f(x+u)}$ es la función de autocovarianza de $f(x)$. Por lo tanto, dada una señal estacionaria (homogénea), si se conoce su función de autocovarianza es equivalente a conocer su espectro de potencia.

Sin embargo la transformada de Fourier es inadecuada para el análisis de señales no estacionarias. Esto se debe a que la transformada de Fourier únicamente provee información promediada en frecuencia, sin indicar la ubicación (espacial/temporal) de los eventos. En contraste con lo anterior, la Transformada de Ondículas (Wavelet Transform - WT) es apropiada para el análisis de señales no estacionarias. En contraposición con los senos y cosenos utilizados en Fourier, las funciones base (ondículas) son localizables en tiempo/frecuencia (espacio/escala) permitiendo de esta manera el análisis de señales no estacionarias.

La WT se representa como la convolución de una señal $f(x)$ con una familia de funciones $\psi(ax + b)$ denominadas ondículas (ver Sección 2.3)

$$WT_f(a, b) = \int f(x) \psi(ax + b) dx \quad (5.14)$$

La función $f(x)$ es transformada en otra función $WT(a, b)$ con dos variables ($a=escala$ y $b=espacio$). Para ello debe cumplirse que $f(x)$ sea una función integrable cuadráticamente, esto es $f(x) \in L^2(R)$, tal que

$$\int f^2(x) dx < \infty$$

Cabe mencionar que un senoide puro, o una señal de corriente continua (nivel **dc**), no son funciones $L^2(R)$, sin embargo todas las funciones de magnitud finita y soporte compacto (*i.e.* ondículas) sí lo son.

Para el caso de una señal discreta, f puede definirse como un vector de observaciones

$$f = \{f(x_i), i=1 \dots N\},$$

donde $x_i = x_0 + i\Delta x$, y Δx es el intervalo de muestreo.

En consecuencia las ondículas se definirán como vectores base

$$\Psi_{j,k} = \{\Psi_{j,k}(x_i), i=1 \dots N\}$$

los cuales estarán organizados en niveles de escala $j=1 \dots L$.

Cada vector en el j -ésimo nivel estará indexado por $k=1 \dots n_j$, con $n_j = 2^j N$.

La escala física relacionada con el nivel j -ésimo estará dada por

$$S_j = \Delta x 2^j. \quad (5.15)$$

Dada una escala j y un vector de observaciones f , éste puede ser descompuesto en un conjunto de coeficientes

$$W_{j,k} = \sum_{i=1}^N f(x_i) \Psi_{j,k}(x_i). \quad (5.16)$$

Por lo tanto la contribución a la varianza total de f , por parte de la escala j estará dada por

$$\sigma_{f,j}^2 = \frac{n_j}{N} \left(\frac{1}{n_j} \sum_{k=1}^{n_j} W_{j,k}^2 \right) . \quad (5.17)$$

Debido a que la transformada de ondículas puede segmentar la varianza de una serie a diferentes niveles de escala, preservando los niveles de energía, su aplicación en el caso de señales no estacionarias puede ser una técnica alternativa a la transformada de Fourier. En este trabajo se propone el empleo de la transformada de ondículas, como una manera alterna para representar el espectro de varianza de señales no estacionarias unidimensionales. La idea es analizar perfiles de intensidad extraídos de imágenes de SAR a lo largo de la dirección de propagación de los trenes de olas, como se explica en la Sección 3.4.2 de este documento.

En la siguiente sección se presentan algunos ejemplos de la aplicación de la transformada de ondículas a series de datos sintéticos, esto es con el objeto de mostrar las ventajas de este análisis sobre diferentes tipos de series de datos. Ejemplos de trabajos relacionados con la aplicación de la transformada de ondículas para el análisis de ondas en la superficie del océano pueden consultarse en Teti y Kritikos (1992b), Liu (1994), Donelan et al. (1996), Torres et al. (1998) y Ocampo-Torres (2001).

5.4.- Espectros de Ondículas

El propósito de los siguientes ejemplos es mostrar algunas características del espectro de ondículas que son útiles en el análisis de señales unidimensionales. Se hace énfasis en la ubicación espacial de las acumulaciones de energía en la señal, y en su relación con el nivel de escala en el espectro de ondículas.

En la Figura 5.2 se muestra una señal monocromática formada por una función seno con longitud de onda 8. Como puede observarse en el espectro, la energía de esta señal está concentrada en el nivel de escala 8, debido a que ésta es la longitud de onda predominante en la señal, y se distribuye uniformemente a lo largo del eje de distancia. Las estructuras blancas verticales representan las líneas de fase cero y corresponden aproximadamente con las crestas de las ondas.

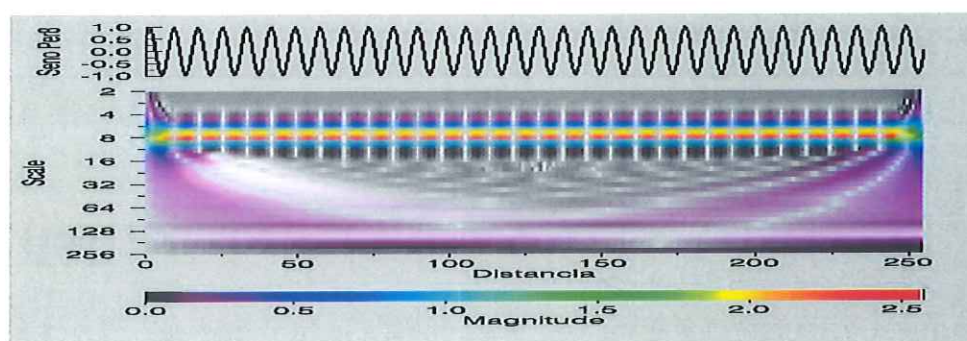


Figura 5.2.- Espectro de ondículas de una señal monocromática consistente en una función seno con longitud de onda 8. El panel superior corresponde a la señal original y su eje vertical representa amplitud en unidades relativas. El panel inferior corresponde a su espectro de ondículas, cuyo eje vertical representa el nivel de escala en número de dato. El eje horizontal es distancia en número de dato. La barra de color inferior representa los niveles de energía en la señal expresados en magnitud.

En la Figura 5.3 se muestra el espectro de ondículas correspondiente a la señal mostrada en la Figura 5.1. Esta señal está formada por la superposición de dos senoides con amplitudes similares pero con longitudes de onda ligeramente diferentes (ambas longitudes son de 8 unidades aproximadamente). Como se aprecia en el espectro de ondículas, la energía de la señal está concentrada en las regiones de agrupamiento a lo largo del eje de la distancia y entre los dos niveles de escala correspondientes a las longitudes de onda de ambos senoides (aproximadamente 8).

Observe como las líneas de fase permiten ubicar individualmente las crestas de las ondas, así como delimitar la longitud de los paquetes y su ubicación espacial.

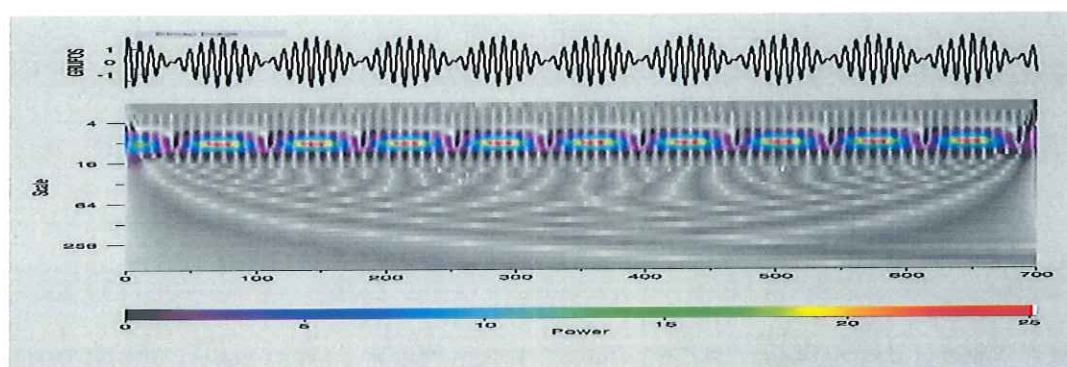


Figura 5.3.- Espectro de ondículas de una señal formada por paquetes de ondas. El panel superior corresponde a la señal original y su eje vertical representa amplitud en unidades relativas. El panel inferior corresponde a su espectro de ondículas, cuyo eje vertical representa el nivel de escala en número de dato. El eje horizontal es distancia en número de dato. La barra de color inferior representa el nivel de energía en la señal expresado en potencia.

La Figura 5.4 muestra el caso de una función seno atenuada. Esta señal mantiene su longitud de onda a lo largo de toda la serie, muestra un nivel de ruido considerable y disminuye su amplitud hacia el extremo derecho de la serie. El espectro de ondículas refleja claramente las características de la señal. Nótese como el nivel de máxima energía se mantiene en la misma escala a lo largo de toda la serie, sin embargo su magnitud decrece hacia la derecha, conforme la amplitud de la señal disminuye. Observe además como a pesar del nivel de ruido contenido en la serie, las crestas de sus ondas pueden ser localizadas mediante las líneas de fase. Este ejemplo es un caso semejante al de un perfil de intensidad extraído de una imagen de SAR.

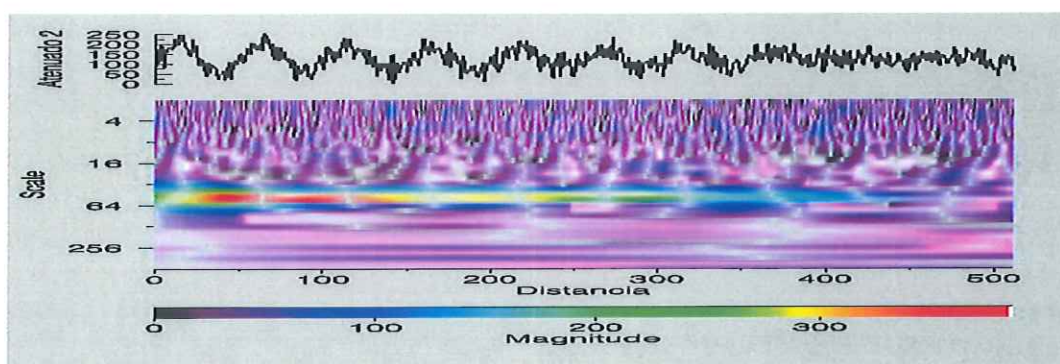


Figura 5.4.- Espectro de ondículas de un senoide atenuado que presenta un nivel de ruido considerable. El panel superior corresponde a la señal original y su eje vertical representa amplitud en unidades relativas. El panel inferior corresponde a su espectro de ondículas, cuyo eje vertical representa el nivel de escala en número de dato. El eje horizontal es distancia en número de dato. La barra de color inferior representa los niveles de energía en la señal expresados en magnitud.

Finalmente, en la Figura 5.5 se muestra un ejemplo típico de una señal no estacionaria. En este caso, tanto la longitud de onda como la amplitud disminuyen con la distancia. Observe como el espectro de ondículas es capaz de caracterizar espacialmente y a diferentes niveles de escala la distribución de energía en la señal, sin importar lo complicada que ésta sea. Inclusive las crestas de sus ondas se pueden ubicar fácilmente mediante las líneas de fase. Combinaciones de los ejemplos presentados en esta sección pueden producir señales aún más complejas, lo cual representa un reto para ser analizadas mediante la transformada de ondículas. Este puede ser el caso de los perfiles de intensidad extraídos de imágenes SAR de la superficie del mar, en los cuales el ruido originado por variaciones en la reflectividad de la superficie puede complicar aún más este análisis.

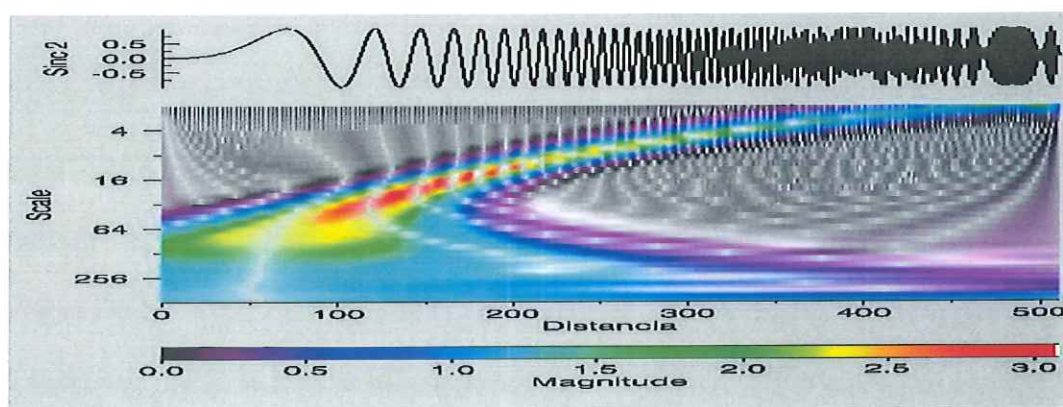


Figura 5.5.- Espectro de ondículas de una señal no estacionaria, consistente en un senoide atenuado y con incremento en frecuencia. El panel superior corresponde a la señal original y su eje vertical representa amplitud en unidades relativas. El panel inferior corresponde a su espectro de ondículas, cuyo eje vertical representa el nivel de escala en número de dato. El eje horizontal es distancia en número de dato. La barra de color inferior representa los niveles de energía en la señal expresados en magnitud.

6.- RESULTADOS Y DISCUSIONES

La primera sección de este capítulo está dedicada a los resultados obtenidos en la recuperación del espectro de olas y su discusión se basa en los conceptos teóricos presentados en el capítulo 4. A su vez esta sección se divide en dos partes; la primera está dedicada al análisis de la subimagen extraída de la órbita 24029, la cual fue empleada para analizar el desarrollo del espectro invertido durante el proceso de inversión, así como para observar la evolución de los parámetros de olas obtenidos en cada paso de iteración. En la siguiente sub-sección se analiza el nivel de influencia del espectro de primera aproximación en el proceso de inversión. Para ello se utilizaron subimágenes derivadas de la órbita 19019 y se analizaron 6 casos de inversión, empleando espectros iniciales con diferentes características, generados con el modelo SWAN.

Por otra parte, la segunda sección de este capítulo está dedicada al análisis espacial del oleaje. Su discusión está basada en los conceptos presentados en el capítulo 5. El análisis consiste en la descomposición espectral de perfiles de intensidad utilizando transformada de ondículas. Los perfiles analizados se extrajeron de la imagen correspondiente a la órbita 20293. Se presenta el análisis de cada perfil, se discute un caso especial en que el oleaje incide en forma oblicua sobre el perfil de datos, y se estiman los parámetros característicos del oleaje.

6.1.- De la Recuperación del Espectro de Olas

6.1.1.- Iteración del Espectro Invertido (órbita 24029)

En esta parte del estudio se analiza el desarrollo del espectro invertido durante el proceso iterativo del algoritmo de inversión. La Tabla 6.I muestra los valores de correlación entre espectros para cada iteración durante el proceso de inversión de la subimagen correspondiente a la órbita 24029. La primera columna indica el número de iteración durante el proceso de inversión, el paso cero corresponde al resultado de la versión no-iterativa del algoritmo WASAR (Hasselmann y Hasselmann, 1991). Los demás renglones contienen el resultado de los siguientes pasos de iteración, en los que el espectro inicial es reemplazado por un espectro optimizado. La segunda columna contiene el valor de correlación entre el espectro inicial (u optimizado) y el espectro de olas recuperado en el correspondiente paso iterativo. La tercer columna muestra el nivel de correlación entre el espectro SAR generado a partir del espectro de olas inicial (u optimizado) y el espectro SAR observado. La cuarta columna contiene el grado de correlación entre el espectro SAR simulado a partir del espectro de olas recuperado y el espectro SAR observado. La columna final contiene el nivel de calidad de la inversión, observándose que la iteración 5 tiene la mejor correlación entre los espectros calculado y observado, al menor costo posible (ver Tabla 3.III).

Tabla 6.I.- Valores de correlación entre los espectros resultantes de la inversión de la subimagen S1 extraída de la imagen correspondiente a la órbita 24029.

Iteración	Inicial vs. Recuperado	SAR (fig) vs. SAR obs	Calculado vs. Observado	Calidad de la Inversión
0	0.7397	0.6132	0.8445	1
1	0.7048	0.6449	0.9065	0
2	0.7794	0.6713	0.9193	0
3	0.7220	0.6446	0.9288	1
4	0.7995	0.7328	0.9367	1
5	0.8365	0.8185	0.9256	0

La Figura 6.1 muestra los espectros resultantes de la iteración 0. El gráfico en la parte superior izquierda es el espectro de olas inicial generado con el modelo SWAN, y el gráfico en la parte inferior derecha es el espectro generado a partir de la subimagen S1. En este punto es necesario aclarar que existen diferencias aparentes entre el espectro de la imagen mostrado en la figura 3.4b y el correspondiente espectro SAR observado que se presenta en la Figura 6.1. Estas diferencias en la apariencia de los espectros se deben a dos causas. En primer lugar el sistema de coordenadas está rotado 90°, siendo vertical la dirección acimutal en la Figura 3.4b, mientras que en la Figura 6.1 es horizontal, siguiendo la convención establecida en Hasslemann y Hasselmann (1991). Otro factor que cambia su aspecto es que el espectro de la Figura 3.4b contiene componentes de número de onda mayores a los 0.06 rad/m, además de haberse interpolado a un tipo de proyección diferente.

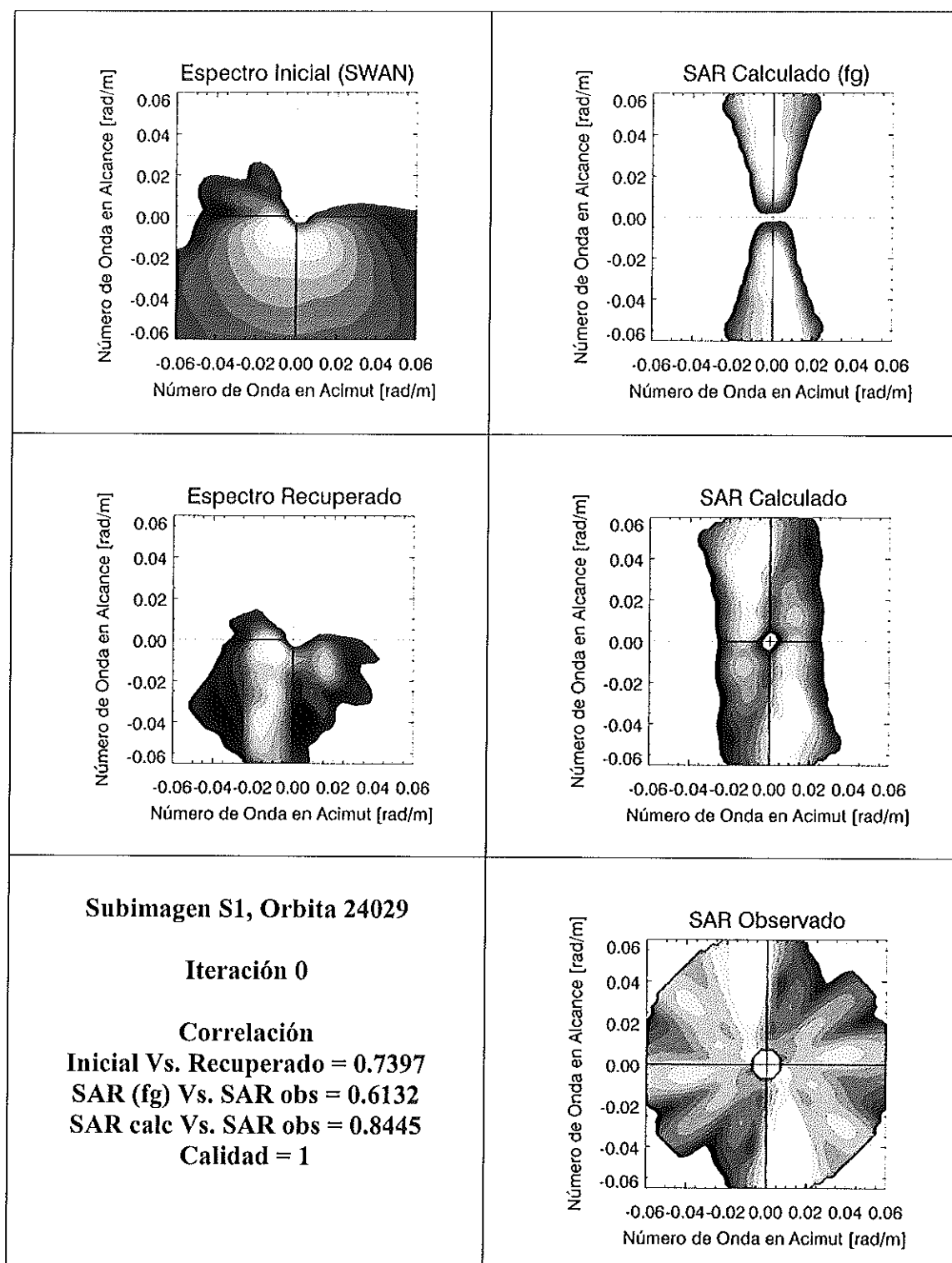


Figura 6.1.- Inversión del espectro de la subimagen S1 utilizando el algoritmo WASAR en su versión no iterativa (ver NOTA descriptiva en la siguiente página).

NOTA: La Figura 6.1 tiene la siguiente organización. En la parte izquierda del panel superior se presenta el espectro de primera aproximación (inicial) generado con el modelo SWAN, y el espectro SAR (fg) calculado a partir del espectro inicial en el lado derecho. En la parte izquierda del panel central se muestra el espectro de olas recuperado en el proceso de inversión, y su correspondiente espectro SAR calculado en el lado derecho. El gráfico en la esquina inferior derecha corresponde al espectro SAR observado por el radar y en la esquina inferior izquierda se reproducen los valores de correlación correspondientes al paso de iteración, tal como se muestran en la Tabla 6.I. Todos los espectros fueron normalizados de acuerdo al valor máximo de densidad espectral y sus intervalos de contorno están espaciados logarítmicamente. Los espectros están proyectados sobre un fondo claro, indicándose el incremento en sus niveles de energía con tonos que van del más bajo (oscuro) a los más altos (claros). Las Figuras 6.2 a la 6.6 tienen la misma organización que la Figura 6.1, la única diferencia consiste en que el espectro inicial (superior izquierdo) se intercambia subsecuentemente por una versión optimizada del espectro de olas recuperado en el paso iterativo inmediato anterior.

Con base en los resultados presentados en la Tabla 6.I se pueden interpretar los espectros mostrados en las Figuras 6.1 a la 6.6. Por ejemplo, en la versión no iterativa del algoritmo WASAR (Iteración 0 - Figura 6.1) es evidente la alta dependencia que tiene el espectro de olas recuperado con respecto al espectro inicial, produciéndose una correlación de 0.74. Sin embargo este nivel de correlación disminuye entre los espectros recuperado y optimizado en las iteraciones 1 y 3 (Figuras 6.2 y 6.4), indicando de manera indirecta una separación del espectro recuperado con respecto al espectro SWAN inicial. Esto es un efecto deseado en el proceso de inversión, debido a que garantiza que la mayor parte de la información proviene del espectro de la imagen. Observe como en las iteraciones 1 y 3 el espectro recuperado experimenta los cambios más drásticos, desarrollando las estructuras que predominan hasta el resultado final. Por otra parte, los espectros SAR observado y el calculado a partir del espectro optimizado

sistemáticamente mantienen un nivel de correlación inferior, reforzándose el argumento acerca de que el espectro de olas que se recupere al final de la inversión, tendrá poca dependencia del espectro SWAN inicial y por tanto tendrá más información proveniente del espectro SAR observado. Finalmente el valor de correlación entre el espectro SAR observado y el espectro SAR calculado a partir del espectro invertido se mantiene siempre en escala ascendente, además de que se obtienen valores aceptables en la calidad de inversión para todas las iteraciones. Este es el principal argumento de que hemos recuperado la mayor parte de información del oleaje a partir del espectro de la imagen SAR.

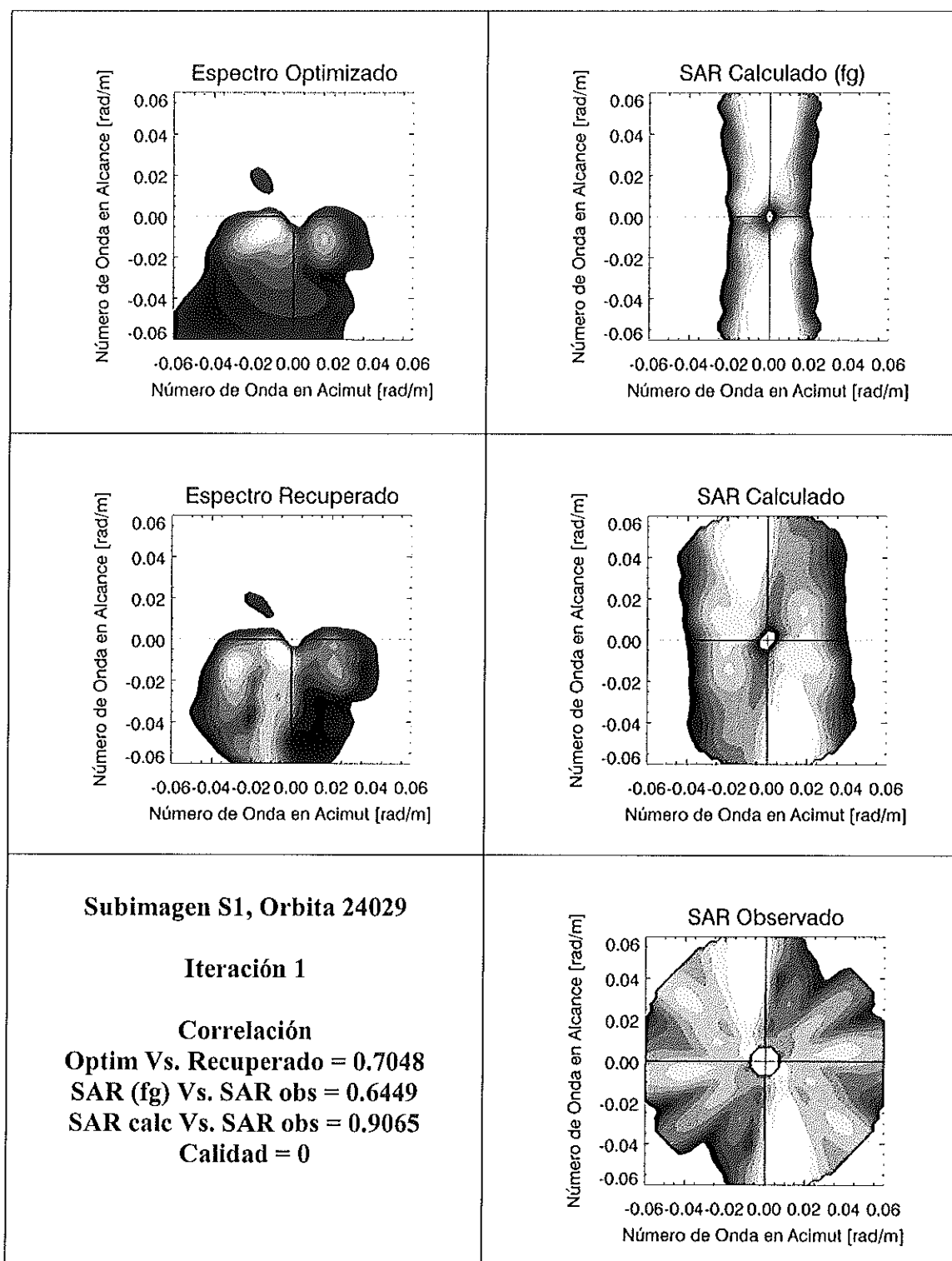


Figura 6.2.- Iteración 1 en la inversión del espectro de la subimagen S1 (ver NOTA descriptiva para la Figura 6.1).

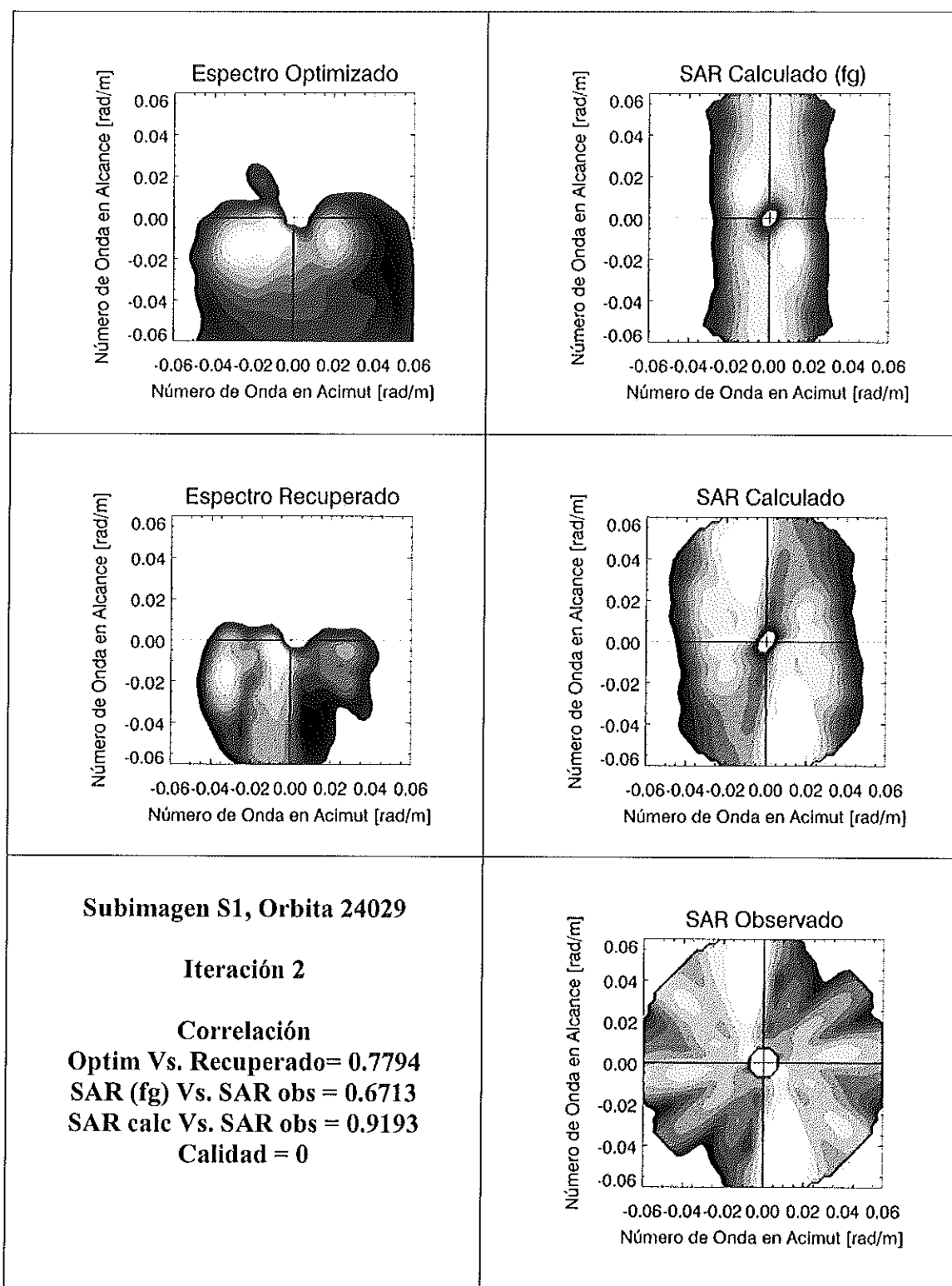


Figura 6.3.- Iteración 2 en la inversión del espectro de la subimagen S1 (ver NOTA descriptiva para la Figura 6.1).

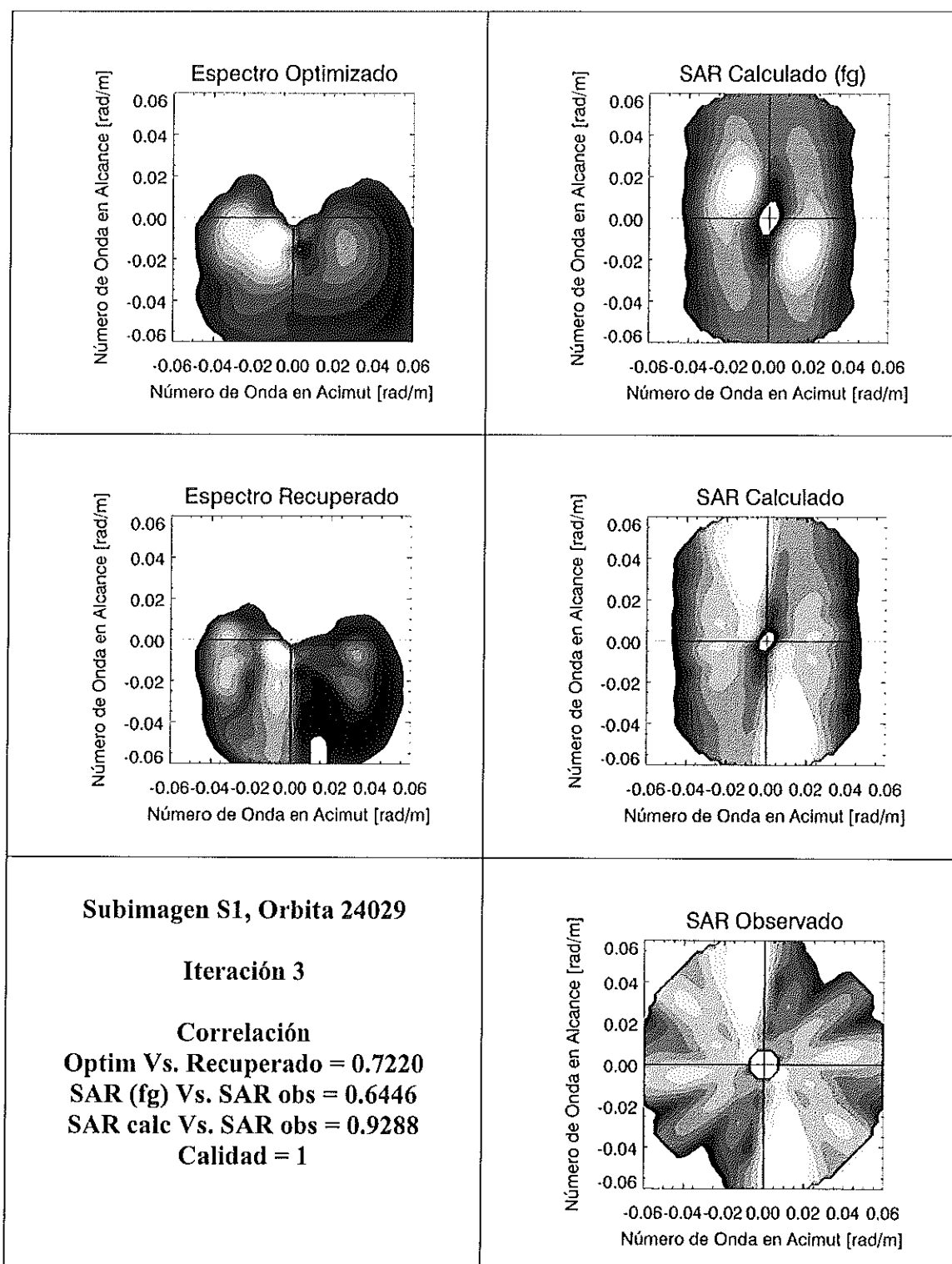


Figura 6.4.- Iteración 3 en la inversión del espectro de la subimagen S1 (ver NOTA descriptiva para la Figura 6.1).

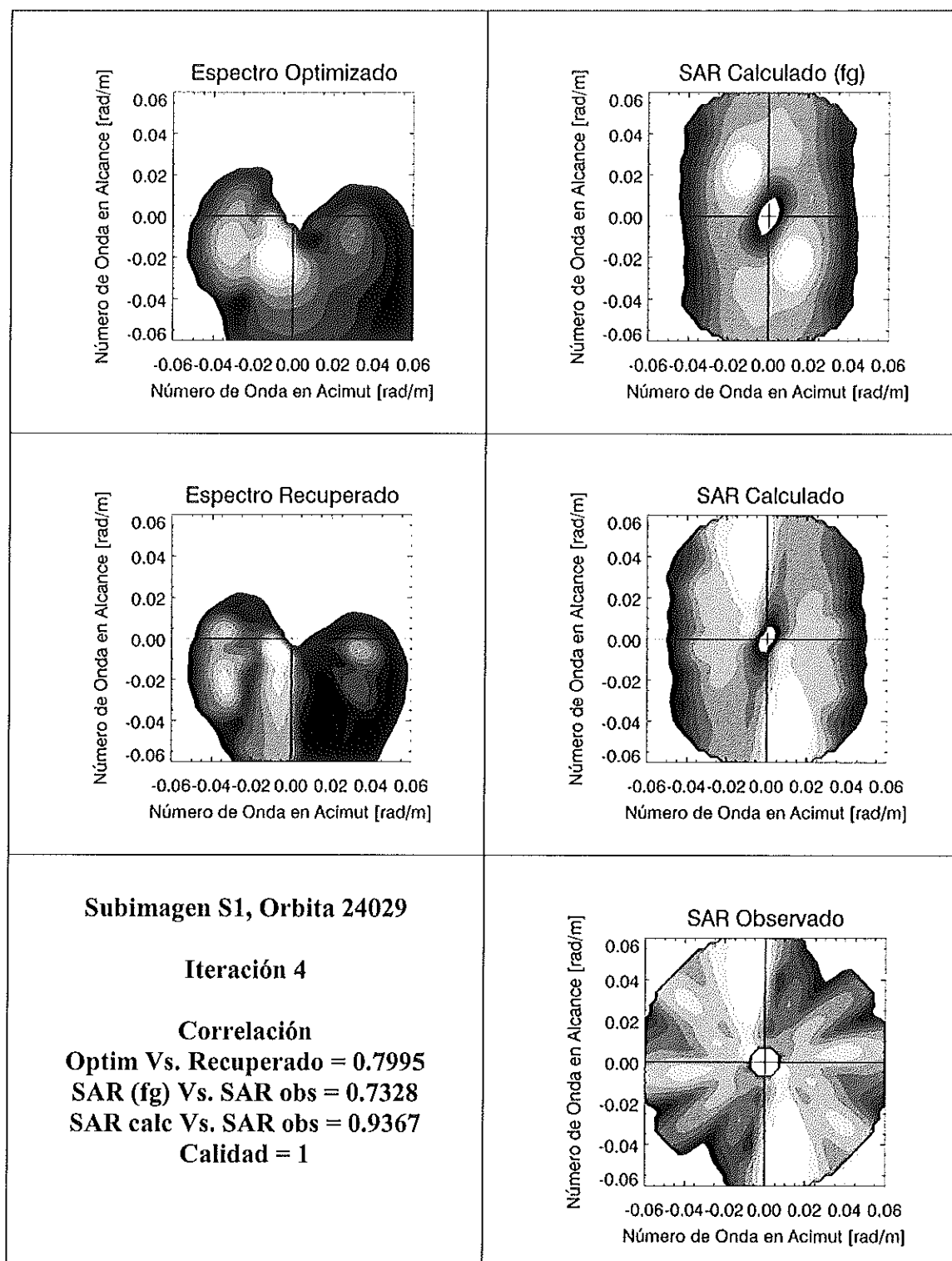


Figura 6.5.- Iteración 4 en la inversión del espectro de la subimagen S1 (ver NOTA descriptiva para la Figura 6.1).

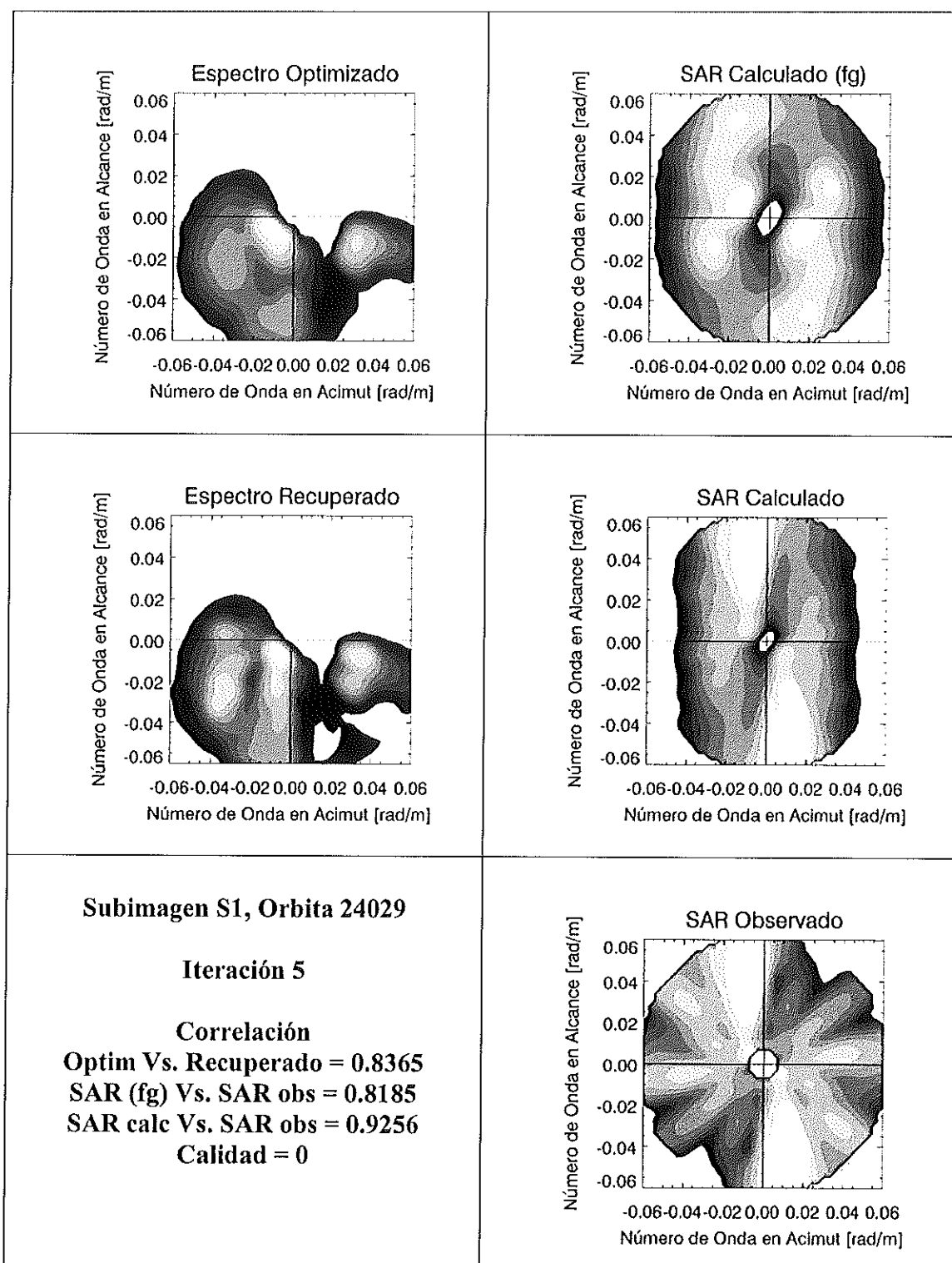


Figura 6.6.- Iteración 5 en la inversión del espectro de la subimagen S1 (ver NOTA descriptiva para la Figura 6.1).

La Figura 6.7 permite visualizar el desarrollo del espectro recuperado durante el proceso de inversión. En esta Figura se presenta el espectro de olas recuperado en cada paso de iteración y su correspondiente espectro SAR calculado. Entre las principales características de los espectros recuperados que se observan en esta Figura, destaca el aumento en el número de sistemas de olas en las iteraciones 1 y 3, y la reorganización de estos sistemas en las iteraciones posteriores. Por otra parte, el espectro SAR calculado presenta en su primera iteración un ensanchamiento en dirección acimutal y continúa en un proceso, durante el cual, se van definiendo sus demás componentes espectrales hasta alcanzar un máximo de correlación con el espectro SAR observado. Conforme el espectro SAR calculado adquiere más información sobre sus componentes acimutales, el espectro de olas recuperado muestra más detalle acerca de los sistemas de olas que viajan en dirección acimutal. El desarrollo de estos espectros es congruente con los valores de correlación mostrados en la segunda y cuarta columnas de la Tabla 6.I, lo que indica respectivamente un alejamiento del espectro inicial y un acercamiento hacia el espectro observado.

En la Figura 6.8 se presentan los espectros de olas y los espectros SAR calculados, antes y después de la inversión. El gráfico en la parte superior izquierda corresponde al espectro inicial generado con el modelo SWAN, y el gráfico en la parte inferior izquierda corresponde al espectro recuperado con el algoritmo WASAR en la quinta iteración. Los espectros de la columna derecha son sus correspondientes espectros SAR calculados mediante modelado directo.

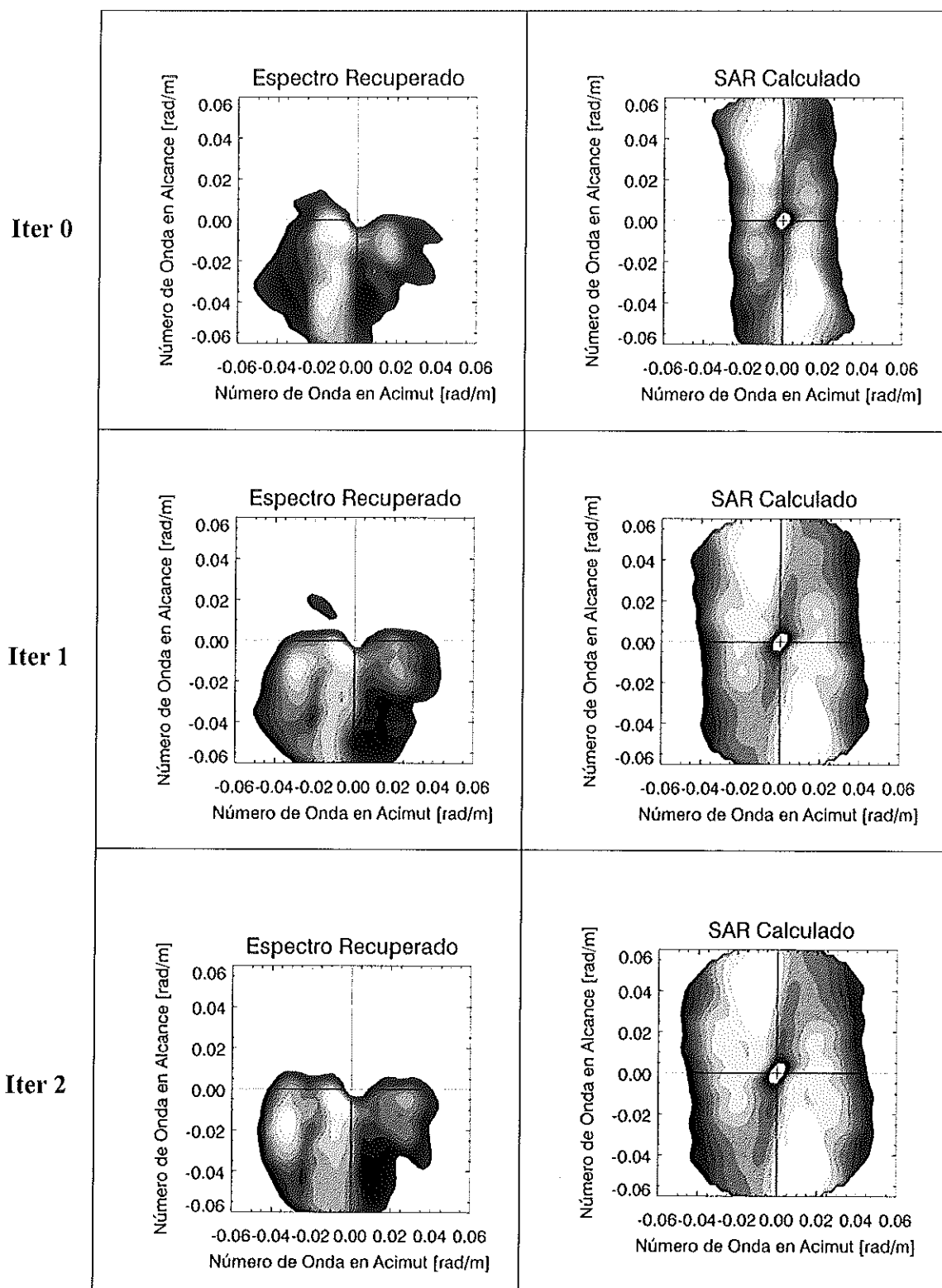
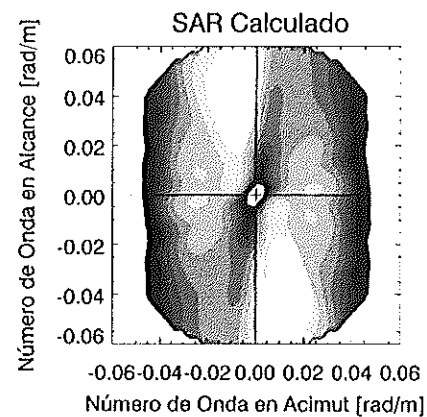
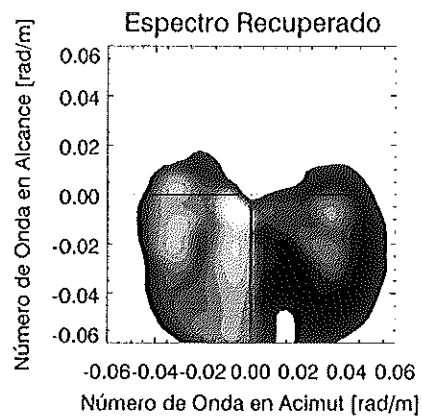
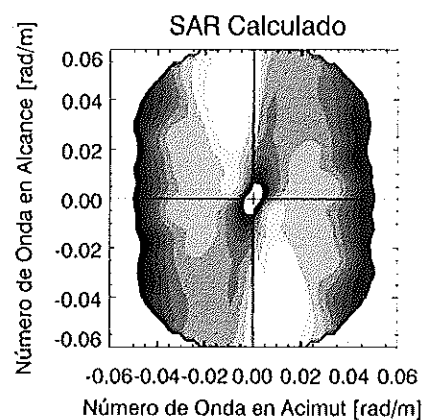
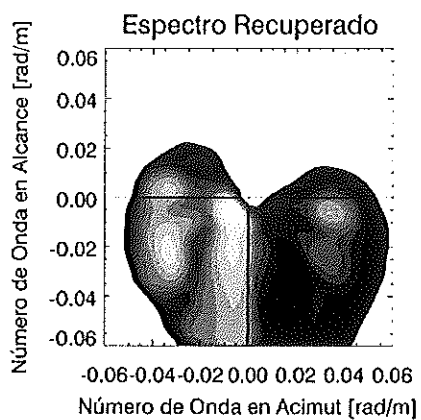


Figura 6.7.- Espectros obtenidos durante la inversión de la subimagen S1. Espectro de olas recuperado (columna izquierda) y espectro SAR calculado (columna derecha).

Iter 3



Iter 4



Iter 5

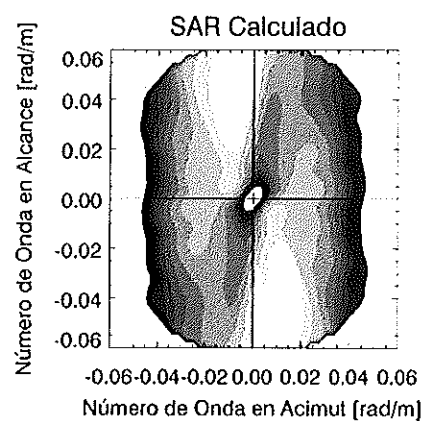
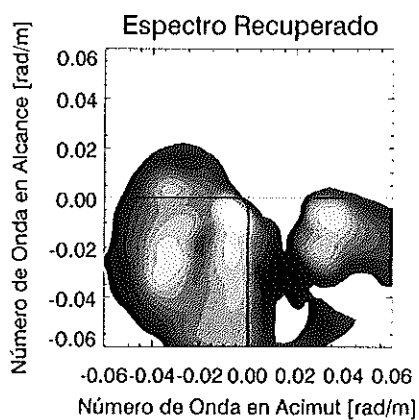


Figura 6.7.- Continuación.

Como se puede observar, el espectro recuperado adquiere únicamente la información direccional del espectro SWAN, así como la identificación de regiones más allá de la región de corte acimutal donde pudieran existir componentes con número de onda alto. Es evidente que el espectro de olas generado con el modelo SWAN es una representación incompleta del estado del mar para la región observada, sin embargo el espectro recuperado es una versión mejorada que incluye la información del oleaje detectado por el radar. En el espectro recuperado podemos observar varios sistemas de olas perfectamente delimitados. El primero aparece en el tercer cuadrante presentando un pico predominante que corresponde al swell proveniente del oeste, este sistema se descompone en una cola espectral formada por componentes de mayor frecuencia que se propagan en dirección este. Otro sistema aparece en el segundo cuadrante representando trenes de olas que viajan con dirección acimutal, probablemente como resultado de refracción con el fondo. Por otra parte, al centro del tercer cuadrante también se observa otro sistema el cual debe estar relacionado con oleaje local, ya que su dirección de propagación concuerda con la dirección del viento mostrada en la tabla 3.I. Un aspecto muy importante que debe ser tomado en cuenta es el siguiente. Aún cuando existe un alto nivel de correlación entre el espectro SAR observado y el espectro SAR calculado a partir del espectro de olas recuperado (ver Fig. 6.6), no es posible establecer visualmente una relación entre el espectro SAR observado y el espectro de olas recuperado. Esto significa que sería subjetivo tratar de interpretar las características del oleaje directamente del espectro de la imagen SAR, sobre todo en regiones con patrones de oleaje complejos y con sistemas de olas que viajan en dirección acimutal.

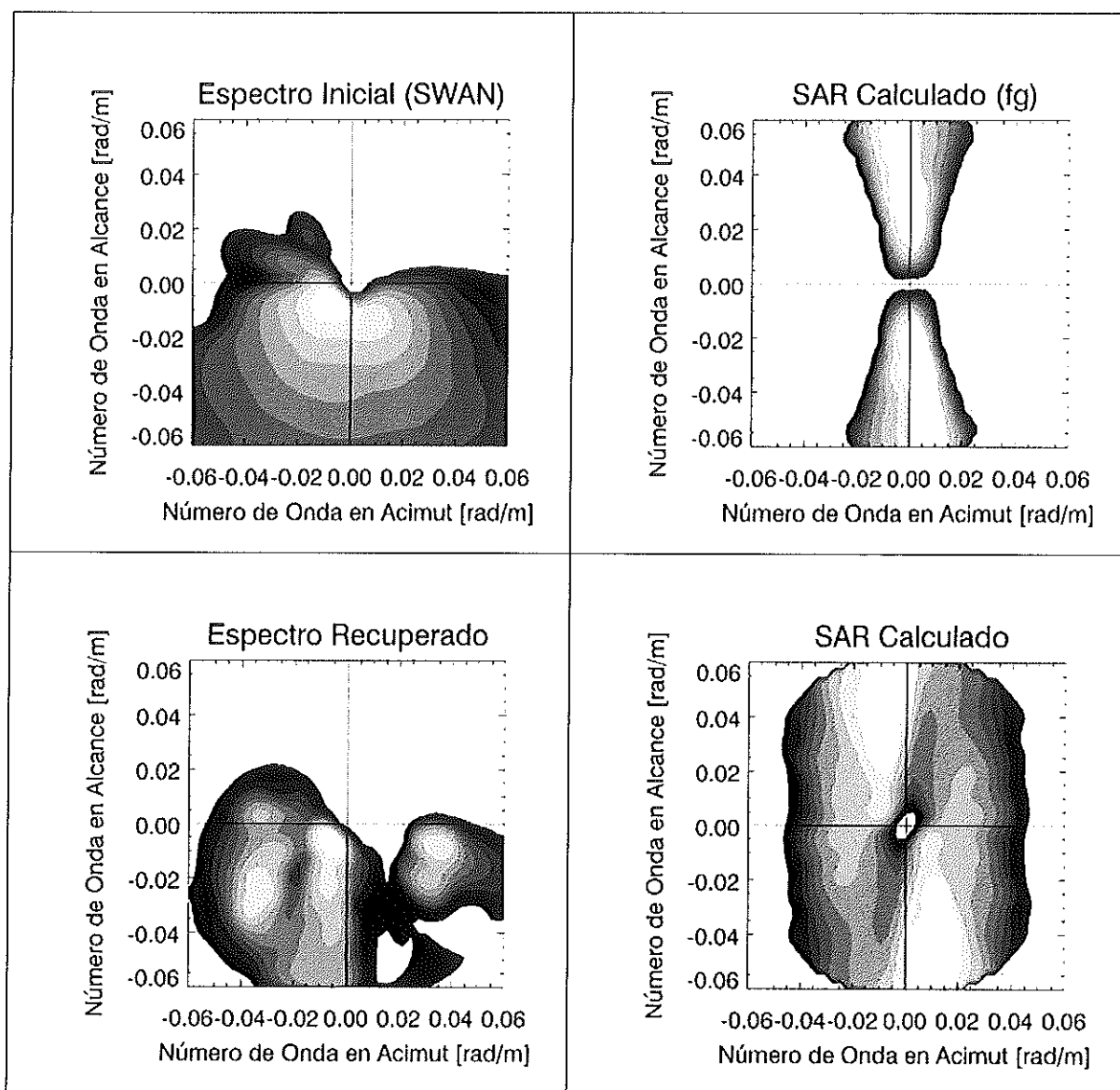


Figura 6.8.- Análisis comparativo entre el espectro de olas inicial (Figura superior izquierda) y el espectro de olas recuperado mediante inversión en la Iteración 5 (Figura inferior izquierda). En la columna derecha aparecen sus correspondientes espectros SAR calculados. Visualmente se puede apreciar la baja correlación que existe entre los espectros calculados, indicando de manera indirecta la no dependencia del espectro recuperado con respecto al espectro inicial.

Finalmente en la Tabla 6.II se muestra un resumen de los resultados obtenidos durante el proceso de inversión de la subimagen S1. Esta Tabla incluye el costo alcanzado en cada iteración, la calidad de la inversión y los parámetros característicos del espectro de olas recuperado en cada iteración: altura significativa (H_s), dirección y período promedio (θ , T), dirección y período asociados al pico espectral (θ_{pk} , T_{pk}).

Una característica relevante de estos resultados es la variabilidad del valor de θ_{pk} y T_{pk} en las primeras iteraciones. Esto se debe probablemente a los ajustes que se llevan a cabo en los sistemas de olas durante el proceso de partición y reasignación espectral. A partir de la tercera iteración θ_{pk} y T_{pk} se mantienen sin cambio, mientras que los procesos de partición y reasignación de componentes operan sobre los sistemas de olas secundarios. Esto puede observarse en la Figura 6.7.

Tabla 6.II.- Parámetros característicos del oleaje obtenidos durante el proceso de inversión de la subimagen S1 (órbita 24029).

Iteración	Costo	Calidad	H_s (m)	θ (°)	T (s)	θ_{pk}	T_{pk}
0	0.4272	1	0.84	102.47	14.31	110.56	15.30
1	0.0720	0	0.91	102.14	13.47	100.62	9.44
2	0.0838	0	0.88	103.52	13.33	112.62	11.03
3	0.1672	1	0.90	100.33	13.23	97.12	9.50
4	0.1765	1	0.94	99.44	12.94	97.12	9.50
5	0.0970	0	0.91	99.51	13.04	97.12	9.50

En cuanto a θ y T , se observa que estos parámetros presentan menos variación en sus valores. θ tiende a ser más cercano a θ_{pk} en las últimas iteraciones, y los valores de T en general son similares a los reportados por Marmolejo-Lara (1985) para esta región. De acuerdo a lo anterior se puede conjeturar que se trata de un sistema de olas que viaja en dirección cercana al alcance del radar y con longitudes de onda entre los 125 y 200 m, lo cual concuerda con el espectro direccional de la Figura 3.4b.

La altura significativa obtenida con WASAR es del mismo orden de magnitud, aunque ligeramente mayor, que la reportada por Peirache y Lombardi (2001) con el modelo SWAN, y que la observada en mediciones de campo (ver Tabla 3.II). Además se observa que tanto la dirección promedio derivada del modelo, como la medida por el sensor (Tabla 3.II), presentan una diferencia de aproximadamente 25° hacia el norte con respecto a la dirección derivada de la inversión. Esto puede deberse a diferencias entre las batimetrías del área correspondiente a la subimagen (Fig. 3.3) y donde fue anclado el sensor (Fig. 3.1), así como en los sitios donde se calcularon los espectros SWAN, originando que se produzcan ángulos mayores en los resultados de inversión.

Aunque los resultados presentados en esta sección mantienen congruencia con los valores obtenidos por el modelo SWAN y con los medidos en campo, es necesario aclarar que estos resultados provienen de un experimento aislado y por lo tanto no se cuenta con suficiente respaldo estadístico para validarlos. Sin embargo los resultados pueden considerarse satisfactorios y demuestran la viabilidad del método para recuperar los parámetros característicos de oleaje de acuerdo a los objetivos planteados.

6.1.2.- Influencia del Espectro Inicial (órbita 19019)

Como complemento a la sección anterior, en la cual se hizo un análisis comparativo entre las diferentes etapas del proceso de inversión para una sola subimagen, en esta sección se hace un análisis comparativo entre varios casos de inversión utilizando diferentes subimágenes.

Se generaron espectros iniciales con SWAN y se invirtieron espectros de imagen para los tres sitios mostrados en la Figura 3.5. Debido a que el sitio E1 es el más cercano a la ubicación del sensor (Fig. 3.1), el espectro de esa subimagen fue tomado como referencia y sobre él se llevaron a cabo inversiones intercambiando los espectros SWAN de los sitios E2 y E3. Adicionalmente también se llevó a cabo una inversión utilizando un espectro inicial deficiente. Este último espectro se obtuvo distorsionando los valores de los espectros SWAN anteriores, con el objeto de obtener un espectro de primera aproximación con características lo menos reales posible. El propósito de este experimento es analizar el grado de influencia que ejerce el espectro de primera aproximación (inicial) sobre el proceso de inversión.

La Tabla 6.III resume los resultados obtenidos para cada caso de inversión. En la primera columna se enumeran los diferentes casos en que consistió este experimento. Los casos 1, 2 y 3 corresponden a la inversión de las subimágenes E1, E2 y E3 utilizando sus respectivos espectros iniciales generados con el modelo SWAN. El caso 1-2 y caso 1-3 corresponden a la subimagen E1 utilizando los espectros SWAN de los sitios E2 y E3 respectivamente. Finalmente el caso 4 corresponde a la inversión de la

subimagen E1 utilizando como espectro de primera aproximación el espectro SWAN deficiente.

En este estudio se utilizó el algoritmo WASAR con 10 iteraciones. La segunda columna de la Tabla 6.III muestra el número de iteración en que el algoritmo alcanzó el mejor ajuste. Las columnas tres y cuatro contienen los valores correspondientes al costo y la calidad de la inversión. La quinta columna contiene el valor de correlación entre el espectro SAR calculado a partir del espectro de primera aproximación (SWAN) y el espectro SAR observado. La sexta columna contiene el valor de correlación entre el espectro SAR calculado a partir del espectro de olas recuperado y el espectro SAR observado. Finalmente la séptima columna contiene la diferencia entre los niveles de correlación anteriores. En cierta forma este valor representa el grado de mejora del modelo (Ganancia de información) después del proceso de inversión.

En la Tabla 6.IV se muestran los parámetros característicos del oleaje recuperados en cada caso de inversión. Estos incluyen la altura significativa (H_s), la dirección y el período promedio (θ , T), y la dirección y período asociados al pico espectral (θ_{pk} , T_{pk}).

Tabla 6.III.- Resultados obtenidos al invertir los espectros de las subimágenes E1, E2 y E3 mostradas en la Fig. 3.5. En este experimento se utilizó el algoritmo WASAR configurado para 10 iteraciones.

	Iteración	Costo	Calidad	Eg-Obs	Calc-Obs	Ganancia
Caso 1	5	0.1923	1	0.7864	0.9659	0.1795
Caso 2	9	0.3457	1	0.7864	0.8841	0.0981
Caso 3	6	0.0523	0	0.4493	0.9664	0.5171
Caso 1-2	7	0.1729	1	0.8169	0.9690	0.1521
Caso 1-3	4	0.1591	1	0.7403	0.9723	0.2320
Caso 4	8	0.3056	1	0.7252	0.9420	0.2168

Tabla 6.IV.- Parámetros característicos del oleaje obtenidos para los casos de inversión mostrados en la Tabla 6.III. En este experimento se utilizó el algoritmo WASAR configurado para 10 iteraciones.

	Hs (m)	θ (°)	T (s)	θ_{pk}	T _{pk}
Caso 1	1.09	92.52	15.40	111.80	23.75
Caso 2	1.52	89.50	12.21	81.87	13.85
Caso 3	1.21	85.28	13.00	45.00	28.88
Caso 1-2	0.90	92.69	15.92	111.80	23.75
Caso 1-3	1.12	93.13	16.49	111.80	23.75
Caso 4	1.06	91.29	17.79	111.80	23.75

6.1.2.1.- Caso 1 (E1)

La Figura 6.9 muestra los resultados obtenidos en la inversión del Caso1. El grafico superior izquierdo es el espectro de primera aproximación (inicial) generado con el modelo SWAN en el sitio E1, y su respectivo espectro SAR calculado aparece en el extremo superior derecho. El gráfico en la parte izquierda del renglón central corresponde al espectro de olas recuperado en el proceso de inversión, y su correspondiente espectro SAR calculado es el que aparece en el margen derecho. En la esquina inferior izquierda se reproduce parte de la información contenida en la Tabla 6.III, y la Figura en la esquina inferior derecha corresponde al espectro SAR observado por el radar. Cabe mencionar que el resto de las figuras en esta sección (Fig. 6.10 a la 6.14) tienen la misma organización que esta figura, y que los espectros han sido normalizados y graficados de acuerdo al mismo criterio que los espectros mostrados en la sección anterior. Un vistazo al espectro de olas inicial y al espectro recuperado nos permite apreciar la mejora alcanzada por el espectro de olas durante su proceso de inversión. El espectro recuperado muestra un pico en el tercer cuadrante, del cual deriva una cola espectral que se prolonga hacia el Este-sureste. Adicionalmente este espectro muestra un sistema secundario que se propaga con dirección aproximada de 45° , ubicado en el segundo cuadrante. Estas estructuras pueden aún ser observadas en el espectro inicial e inclusive algunas deficiencias, como la lengüeta del primer cuadrante, han sido corregidas en el espectro recuperado.

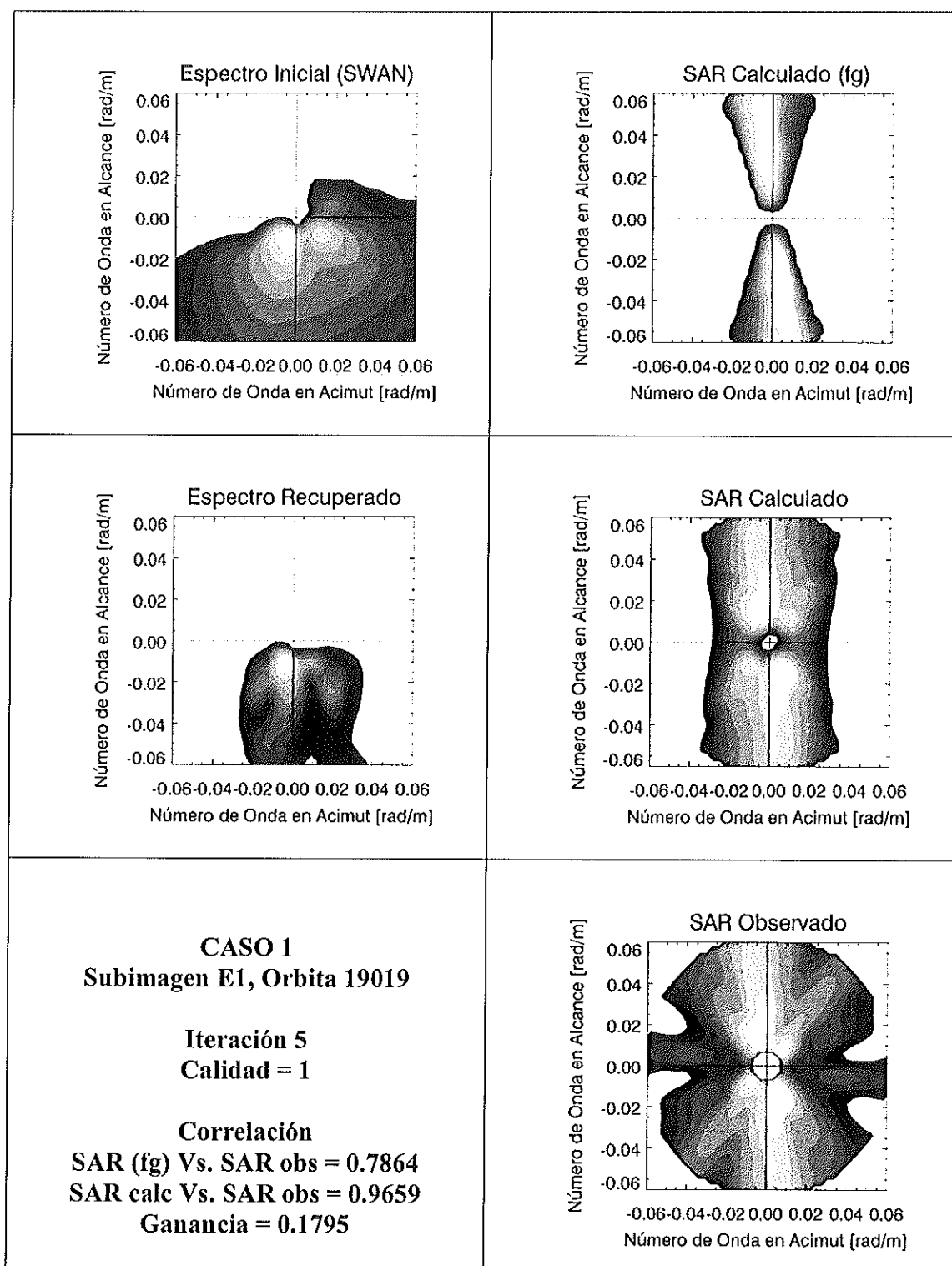


Figura 6.9.- Espectros obtenidos en la inversión del Caso1.

La dirección del pico y de su correspondiente cola espectral, en el espectro de olas recuperado, concuerdan con los valores de θ_{pk} y θ en la Tabla 6.IV.

Por otra parte, observando los niveles altos de energía en los espectros SAR calculado y observado, podemos apreciar claramente su alto grado de similitud, lo cual concuerda con el valor de correlación reportado en la Tabla 6.III.

Debido a que en este caso se partió de un espectro de imagen relativamente sencillo (Fig. 3.7) cuyas componentes son principalmente en dirección de alcance, y debido además a que el espectro inicial es bastante congruente con las características del oleaje local, sus respectivos espectros calculados mantienen un alto nivel de correlación con el espectro SAR observado. Esto significa que el algoritmo alcanzó niveles altos de correlación a un costo bajo, y debido a ello se obtiene una ganancia de información relativamente modesta. Sin embargo esto no significa que la inversión sea deficiente, como puede constatarse en su índice de calidad (Tabla 6.III).

6.1.2.2.- Caso 2 (E2)

La Figura 6.10 se refiere al Caso 2 de inversión. La subimagen y su espectro direccional pueden verse en la Figura 3.6. Se trata de oleaje proveniente de regiones distantes y que se propaga en dirección muy cercana a la del alcance del radar. De los diferentes experimentos realizados, éste es quizás el caso de inversión menos satisfactorio, tanto en términos cualitativos como cuantitativos. Este caso requirió de un mayor número de

iteraciones en su inversión y presentó el costo más elevado en relación a los demás casos. Por otro lado, a pesar de que el nivel de calidad es aceptable, el nivel de correlación entre el espectro SAR calculado y el espectro SAR observado es bajo en relación a los otros casos (Tabla 6.III). Esto último puede observarse en la Figura 6.10, comparando el espectro SAR observado contra el espectro SAR calculado a partir del espectro de olas recuperado. El espectro de olas muestra una estructura más compacta con dirección preferencial en alcance, mostrando adicionalmente otro sistema en la misma dirección, pero con menor nivel de energía y mayor número de onda. Lo anterior es consistente con los valores de θ_{pk} y θ reportados en la Tabla 6.IV, así como con el espectro direccional de la Figura 3.6b.

Por otra parte el espectro de olas recuperado muestra una estructura anómala en el tercer cuadrante, la cual seguramente es la causa de la disminución en el nivel de correlación entre los espectros calculado y observado. El origen de esta estructura no es claro. De acuerdo a sus características podría suponerse que se trata de oleaje de viento generado localmente. Esta información podría provenir del espectro SWAN original, sin embargo la dirección de este sistema no concuerda con los datos de viento reportados en la Tabla 3.I. Lo que si es claro es el hecho de que este sistema no existe en el espectro observado y por lo tanto a ello se debe que el algoritmo no halla alcanzado un ajuste óptimo, requiriendo un mayor número de iteraciones durante su proceso de inversión.

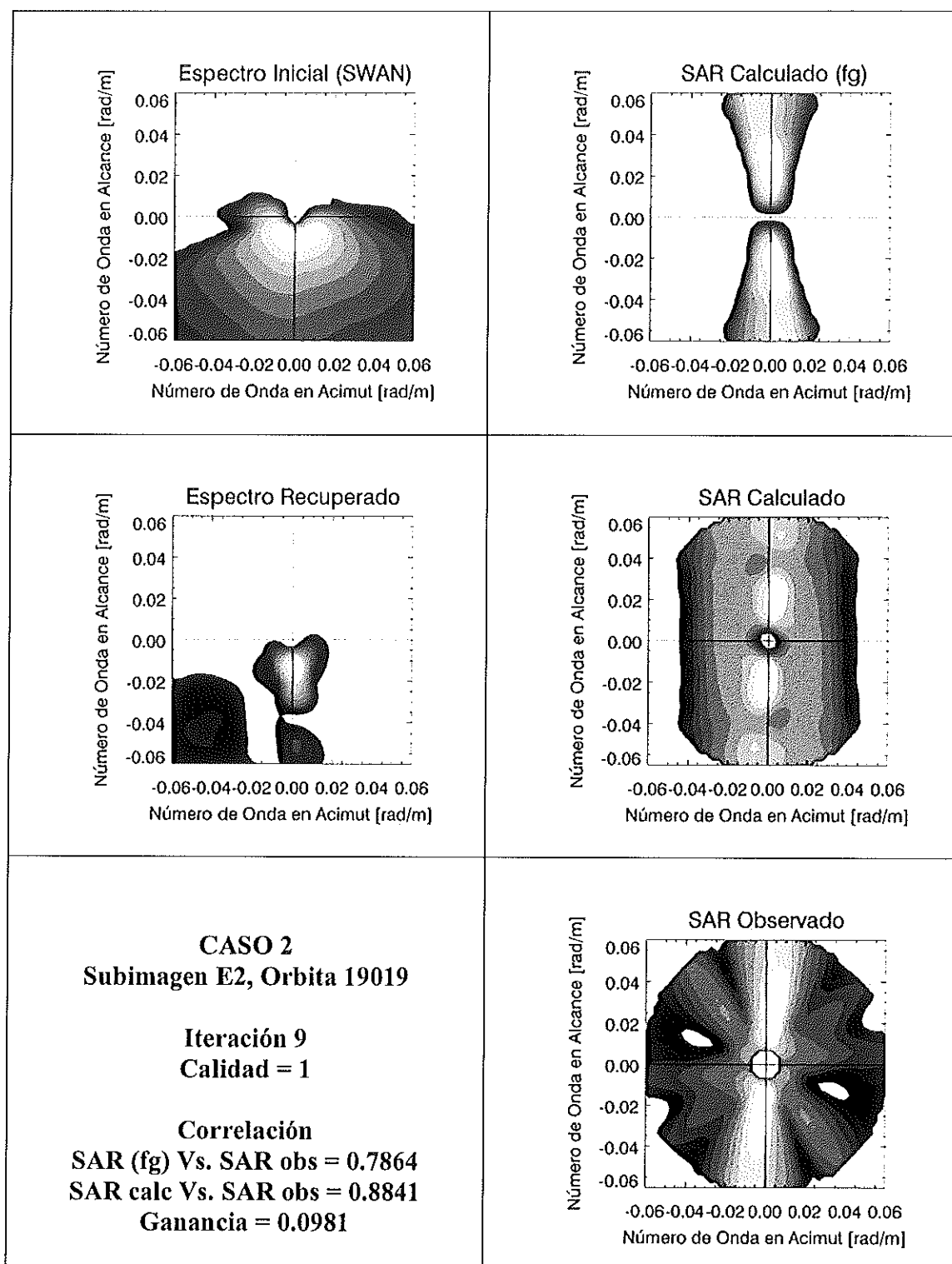


Figura 6.10.- Espectros obtenidos en la inversión del Caso2.

6.1.2.3.- Caso 3 (E3)

En la Figura 6.11 se muestran los resultados obtenidos en la inversión del Caso 3. Este experimento fue el caso de mayor éxito, demostrándose con ello la viabilidad para recuperar el espectro del oleaje a partir de la inversión de imágenes de SAR de la zona costera.

Aunque este sitio presenta patrones de oleaje más complejos que en los dos casos anteriores, incluyendo sistemas con componentes acimutales debido a los procesos de refracción y difracción operantes en la zona (ver Fig. 3.8), en este experimento se obtuvo la mejor calidad de inversión y la mayor cantidad de información recuperada en el espectro de olas. Lo anterior se debe a la congruencia que guardan, tanto el espectro de primera aproximación como el espectro observado por el radar, con las condiciones de oleaje prevalecientes en la región. En la siguiente sección se muestra cómo este mismo espectro inicial, al ser utilizado con otro espectro de imagen, presenta un desempeño diferente en su proceso de inversión.

Por un lado el espectro de primera aproximación muestra dos picos en el segundo y tercer cuadrantes, los cuales en principio pueden estar asociados a sistemas de olas que han sido afectados por procesos de refracción y difracción respectivamente.

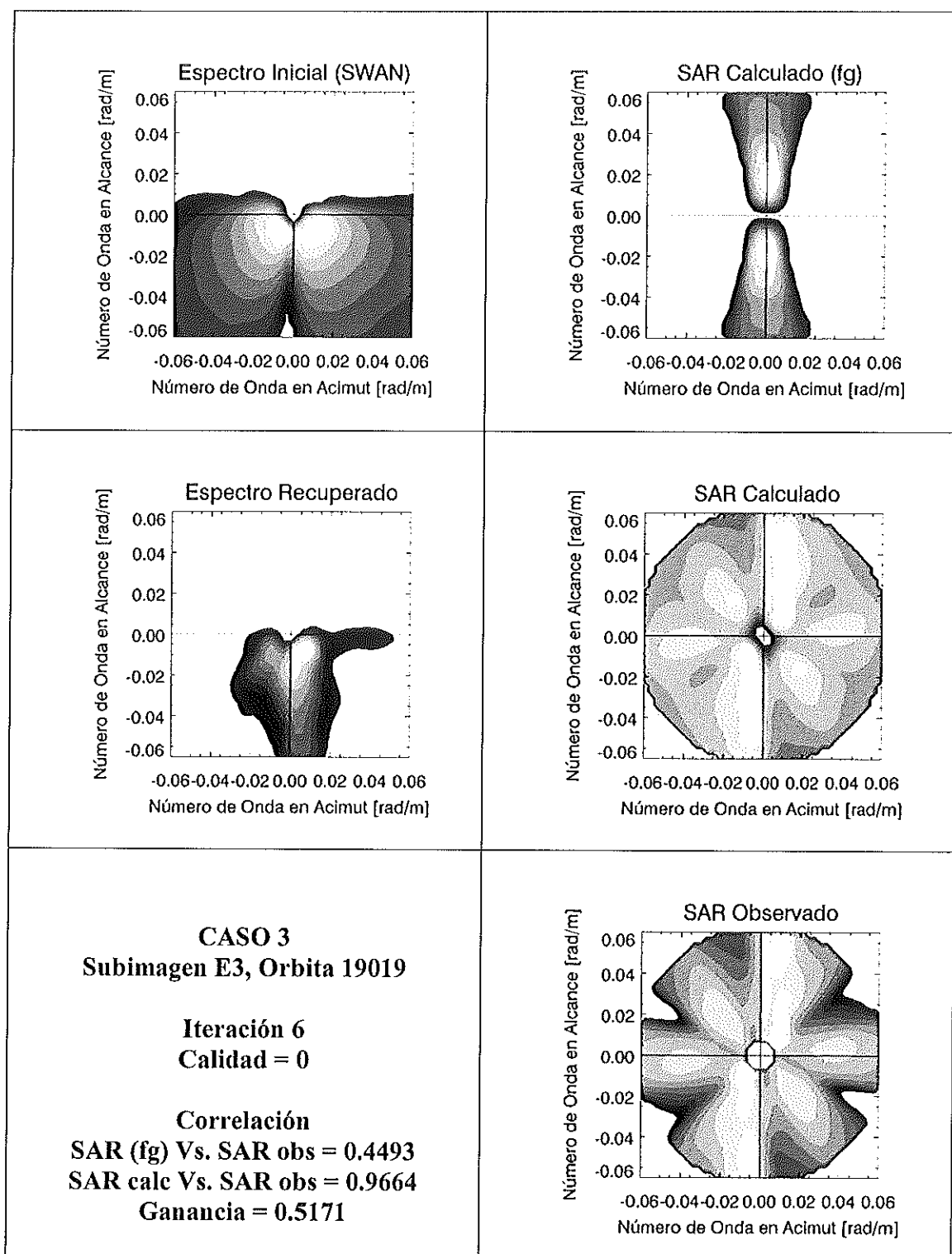


Figura 6.11.- Espectros obtenidos en la inversión del Caso 3.

Por otra parte el espectro recuperado concuerda con la información direccional reportada en la Tabla 3.II para la órbita 19019, tomando en cuenta desde luego, la diferencia que existe entre la ubicación de la subimagen E3 y el sitio de anclaje del sensor.

En la etapa inicial del proceso de inversión el espectro SAR calculado tiene baja correlación con el espectro observado debido a que proviene de un modelo incompleto, sin embargo el espectro SAR calculado a partir del espectro de olas muestra un alto grado de correlación, como resultado del incremento en la información obtenida del espectro de imagen.

Uno de los picos en el espectro inicial no se presenta en el espectro recuperado, mientras que el pico del segundo cuadrante prevalece con dirección aproximada de 45° , representando un sistema de olas con período largo que ha sido refractado sobre la plataforma. El oleaje difractado por las islas constituye un lóbulo de menor energía que viaja en dirección sureste, y ambos sistemas se combinan para formar una cola espectral que se propaga en dirección de alcance a unos 85° aproximadamente. Cabe mencionar que la existencia de esta cola espectral no es evidente en el espectro observado, sin embargo su dirección coincide con la dirección promedio del oleaje (θ), y su período promedio (T) es similar al reportado en la literatura para este sitio (Marmolejo-Lara, 1985). La lengüeta que apunta en dirección norte, probablemente es un artificio originado por la amplia dispersión direccional del espectro inicial y el alto contenido de componentes acimutales en el espectro de imagen. Sin embargo su bajo nivel de energía

lo hace irrelevante en este análisis, asociándose su origen con ruido existente en el espectro de imagen.

Lo más importante que se debe remarcar en este caso, es que a pesar del alto contenido de componentes acimutales en el espectro observado, el algoritmo fue capaz de recuperar la información del oleaje de manera eficiente.

6.1.2.4.- Sustitución de Espectros

Los tres casos restantes consistieron en la inversión del espectro de la subimagen E1 utilizando los espectros iniciales de los sitios E2 y E3, así como el espectro de olas deficiente.

Por una parte, todos los experimentos alcanzaron una calidad de inversión aceptable, siendo el resultado más relevante el hecho de que los parámetros asociados al pico espectral permanecieron constantes (ver Tabla 6.IV). Por otro lado los parámetros promedio experimentaron ligeros cambios dependiendo de la complejidad del espectro inicial. Esto puede estar relacionado con diferencias en el criterio de asignación de sistemas de olas durante el proceso de partición espectral.

La Figura 6.12 muestra los resultados del Caso 1-2. En este caso el espectro inicial es semejante al espectro inicial original (Caso 1).

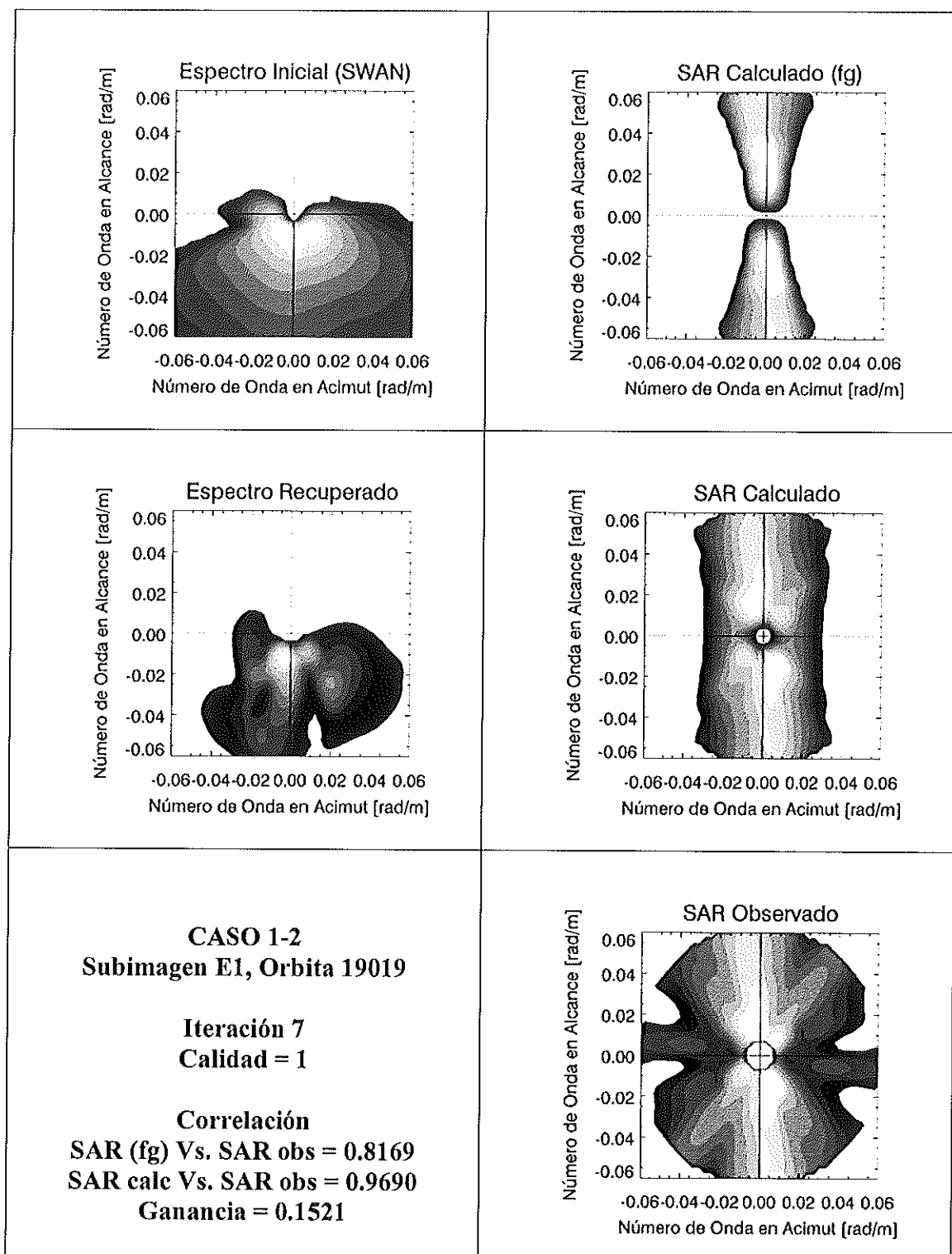


Figura 6.12.- Espectros obtenidos en la inversión del Caso1-2.

Debido a esta semejanza en los espectros, se alcanzan valores similares tanto en los niveles de correlación como en el costo y la ganancia (ver Tablas 6.III y 6.IV).

Como consecuencia de lo anterior, el espectro de olas recuperado tiene en esencia la misma estructura que el espectro recuperado en el Caso 1, manifestándose la influencia de la lengüeta espectral que aparece en el cuarto cuadrante, así como algunas variaciones en la forma de su cola espectral y en la ubicación del sistema secundario de olas. Siendo esto último la causa en la variación de sus parámetros promedio (θ y T).

En la figura 6.13 se muestran los resultados del Caso 1-3. En este experimento se utilizó el espectro inicial del Caso 3, el cual muestra claramente dos picos espectrales que lo hacen incongruente con las características del oleaje en el sitio E1.

Debido a lo anterior se obtiene una correlación relativamente baja entre el SAR calculado y el observado durante la etapa inicial de la inversión (0.7403). Sin embargo el pico espectral del segundo cuadrante es eliminado en sólo cuatro iteraciones, alcanzando un costo relativamente bajo y un alto nivel de correlación entre el SAR observado y el calculado (0.9723). Esto último da como resultado un valor de ganancia relativamente alto durante el proceso de inversión.

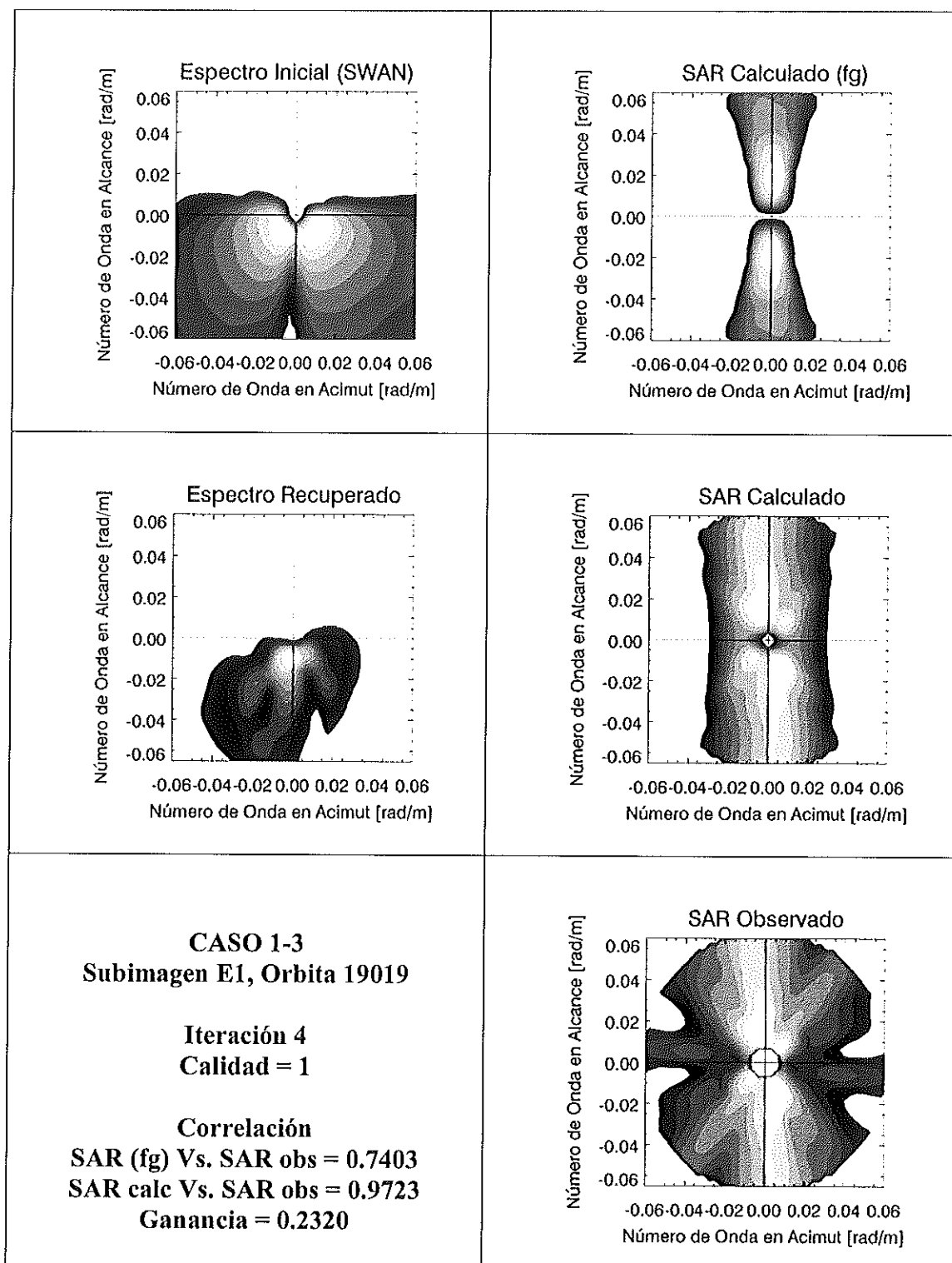


Figura 6.13.- Espectros obtenidos en la inversión del Caso1-3.

Por otra parte se observa la aparición de dos pequeños picos en el primer y tercer cuadrante del espectro SAR calculado. Estas estructuras existen en el espectro SAR observado, sin embargo no fueron detectadas en los experimentos anteriores. Se puede suponer que ésta sea la causa por la que en este experimento se alcanzó el máximo nivel de correlación (0.9723) entre el espectro SAR calculado a partir del espectro de olas recuperado y el espectro SAR observado.

En la Figura 6.14 se presentan los resultados obtenidos para el Caso 4. En este experimento se utilizó deliberadamente un espectro de primera aproximación deficiente. Como se puede apreciar en la Figura 6.14, el espectro inicial SWAN es completamente incongruente con las condiciones del oleaje en el sitio E1, y por este motivo se obtiene una correlación relativamente baja entre los espectros SAR calculado (fg) y observado en la etapa inicial de la inversión (0.7252). Al finalizar el proceso de inversión se alcanza un valor de correlación alto, implicando con ello una ganancia de información relativamente alta (0.2168). Sin embargo esto se logra a expensas de un costo elevado (0.3056) y requiriendo hasta 8 iteraciones.

Al igual que en el experimento anterior, en éste también se pueden observar los pequeños picos secundarios en el primer y tercer cuadrante del espectro SAR calculado. Sin embargo, respecto a los casos anteriores, en este caso se observa un decremento en el nivel de correlación con el espectro SAR observado (0.9420).

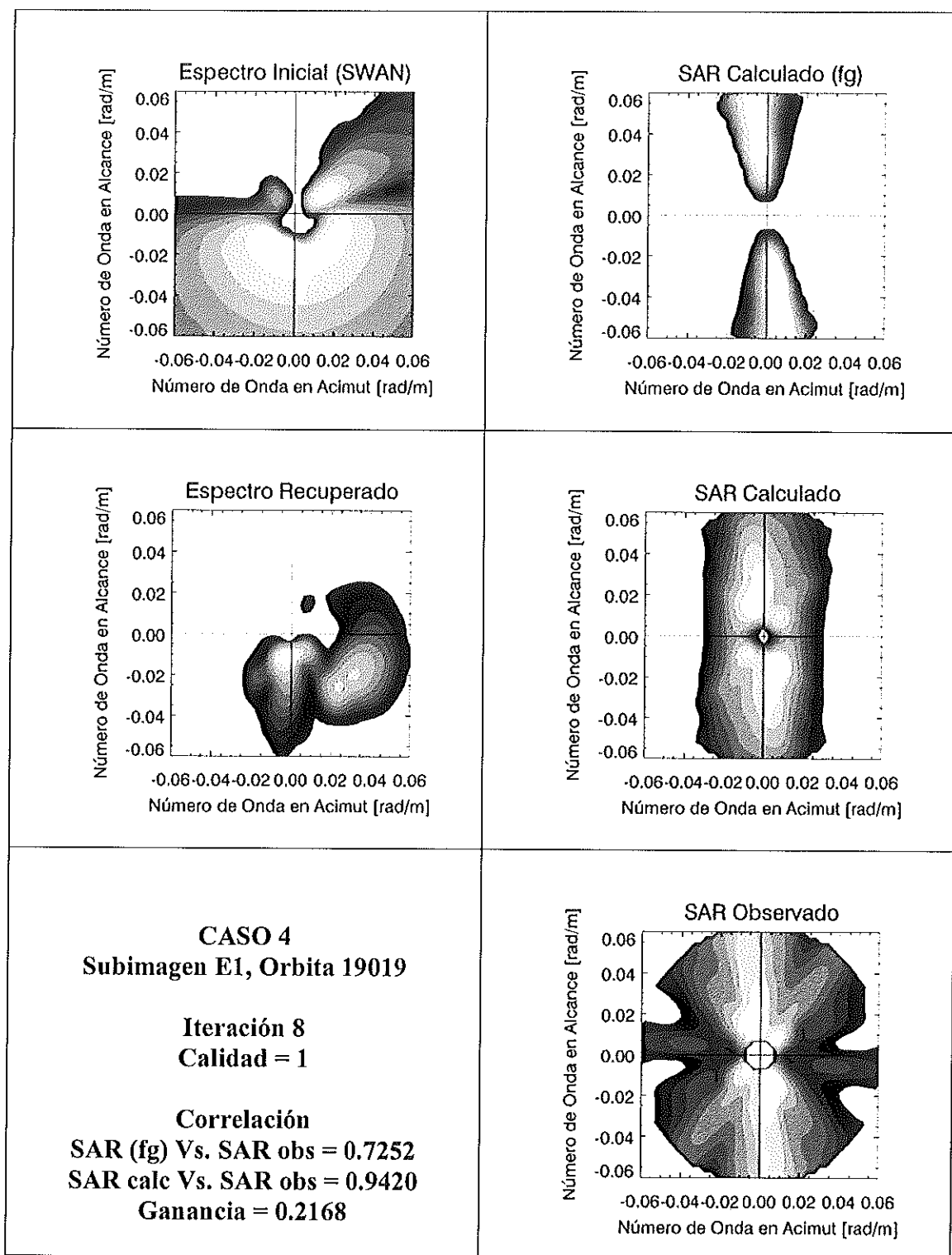


Figura 6.14.- Espectros obtenidos en la inversión del Caso 4.

Esta ligera disminución en el grado de correlación se debe al acortamiento que presentan los lóbulos del espectro SAR calculado en la dirección de alcance, lo cual puede ser consecuencia de la influencia que ejerce el espectro inicial en la forma del espectro de olas recuperado.

6.1.3.- Altura Significativa

Los valores de H_s están en el mismo orden de magnitud que los reportados para observaciones de oleaje en la región. Los valores obtenidos para la subimagen de la órbita 24029 oscilaron entre 0.84 y 0.94 m (Tabla 6.II) mientras que los valores reportados por Peirache y Lombardi (2001), medidos por el sensor y calculados mediante el modelo SWAN, son de 0.88 y 0.86 respectivamente.

Para el caso de la órbita 19019 los valores de H_s son similares a los valores típicos en la zona (intervalo de 1 a 2 m). Las inversiones que utilizaron la subimagen del sitio E1 (Caso1, Caso 1-2, Caso1-3 y Caso 4) produjeron valores de altura significativa similares (ver Tabla 6.IV), mientras que los valores de los otros experimentos (Caso 2 y Caso 3) son más cercanos al intervalo mencionado anteriormente.

Con base en estos resultados se considera que hay suficiente evidencia para argumentar que la metodología propuesta es viable. Sin embargo se debe hacer énfasis, en que las limitaciones de los datos disponibles, impiden la posibilidad de fundamentar estadísticamente los resultados de este análisis.

6.2.- Del Análisis Espacial del Oleaje (órbita 20293)

En esta sección se discuten los resultados obtenidos a partir del análisis de perfiles de intensidad, con el objeto de analizar la evolución espacial del campo de olas. El análisis se llevó a cabo estableciendo relaciones entre acumulaciones de energía presentes en el espectro direccional y en el espectro de ondículas, permitiendo de esta manera obtener la dirección de propagación de los sistemas de olas y su ubicación espacial en el perfil.

Las Figuras 6.15 a la 6.18 muestran en sus paneles superiores los espectros de ondículas calculados a partir de los perfiles extraídos sobre la región de las subimágenes P1, P2, P3 y P4 (ver Fig. 3.9). Estos espectros tienen sobrepuestas las líneas de fase y fueron acotados a un umbral del 10% en el nivel de significancia. Los perfiles de intensidad, mostrados en la parte superior del espectro, tienen longitudes entre los 13 y 21 km. El gráfico e el margen derecho es el espectro global, el cual está son los valores promedio de espectro de ondículas en la dirección de la distancia. Este espectro se puede considerar como una aproximación al espectro de Fourier suavizado de la serie original.

6.2.1.- Perfil 1 (P1)

El espectro direccional de la Figura 6.15b muestra un sistema principal de olas con longitud de 150 m, seguido por una cola espectral que se extiende hacia longitudes menores que 100 m. Se observa además un sistema secundario de olas con longitud de 300 m aproximadamente. El espectro de ondículas mostrado en la Figura 6.15a corresponde al perfil extraído sobre la subimagen P1 (ver Fig. 3.9) y tiene una longitud

aproximada de 16.7 km. Este perfil se extiende sobre una región de aguas profundas, por lo que se puede suponer que los grupos de olas viajan como ondas dispersivas en dirección Este. En los primeros 500 píxeles de la serie (parte correspondiente a la subimagen) la banda entre las escalas 8-16, seguida por la banda 16-32, contienen la mayor parte de la energía espectral, lo cual es congruente con las acumulaciones de energía en el espectro direccional. En esta última escala las líneas de fase indican que las longitudes de estos paquetes varían entre los 50 y 75 píxeles (630-940 m). La acumulación de energía entre las escalas 32 y 64, a la altura del píxel 900, se atribuye a oleaje con mayor longitud de onda (500 m), sin embargo esta componente no aparece en el espectro direccional debido a que esta región del perfil está fuera de la subimagen P1 (ver Fig. 3.9).

Por otra parte, existen niveles considerables de energía formando grupos entre las escalas 4 y 8, los cuales no se observan en el espectro direccional. Esto se debe a que el perfil se extrajo con la resolución completa de la imagen original, en cambio el espectro fue promediado durante su proceso de generación, perdiendo componentes de frecuencia alta.

En este punto es necesario enfatizar que la variabilidad espacial de las acumulaciones de energía en el espectro de ondículas, es producida por el agrupamiento de trenes de olas en diferentes niveles de escala. Por lo tanto, la irregularidad en la distribución de energía a lo largo de la serie manifiesta el carácter dispersivo del oleaje.

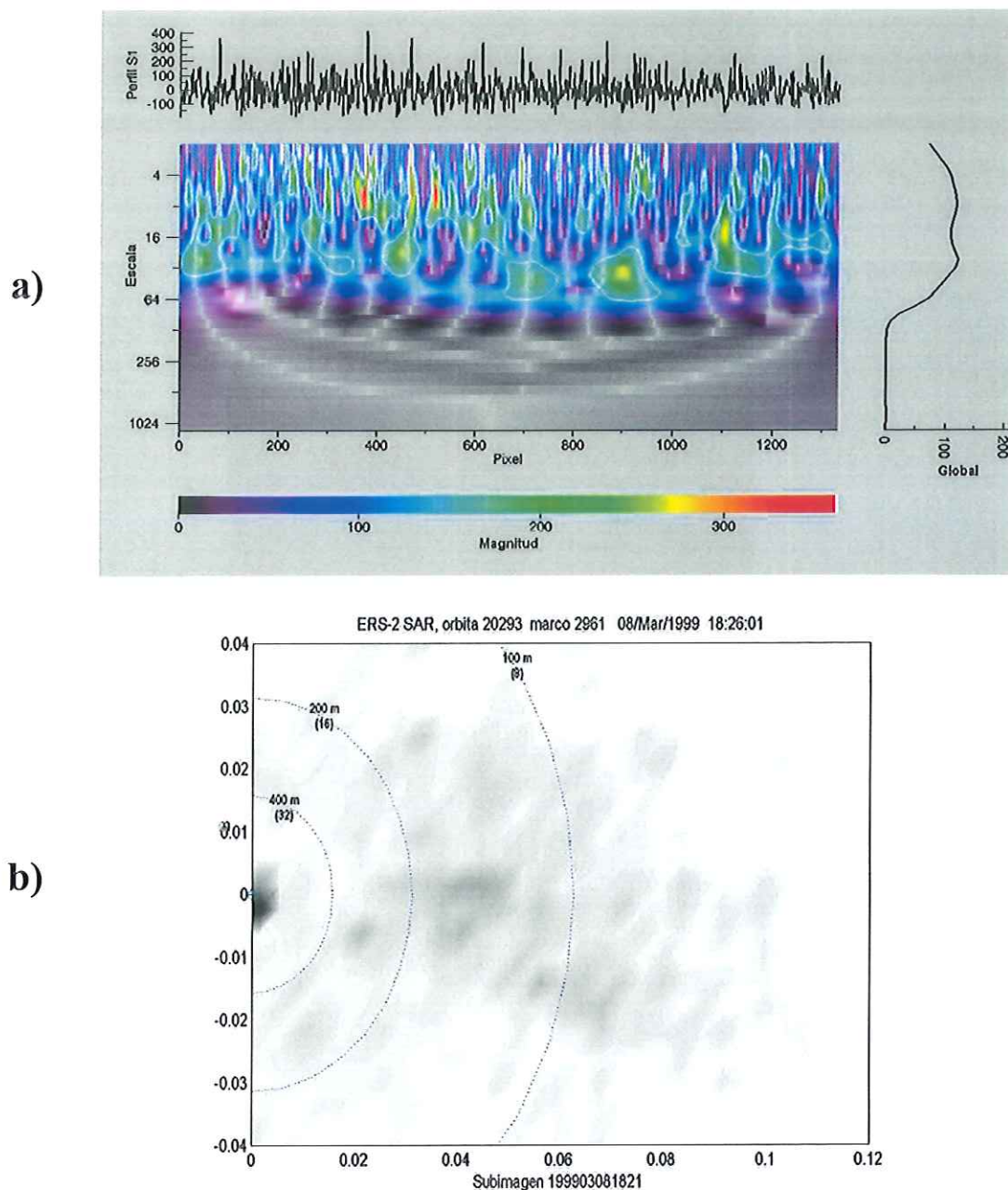


Figura 6.15- (a) Espectro de ondículas del perfil P1. El gráfico superior es el perfil de intensidad. El eje horizontal es la distancia y el vertical es la escala, ambos en unidades de píxel. La barra de color en la parte inferior representa el nivel de energía y el gráfico en el lado derecho es el espectro global, ambos en unidades de magnitud. (b) Detalle del espectro direccional de la subimagen P1, ambos ejes están en número de onda y las longitudes de onda están asociadas a su escala.

6.2.2.- Perfil 2 (P2)

El perfil P2 (Fig. 6.16) tiene una longitud aproximada de 21 Km. El espectro direccional de la subimagen asociada muestra una dirección preferencial de propagación de aproximadamente 5° al sur de la dirección de alcance del radar, concentrándose su energía en sistemas de olas con longitudes entre 100 y 200 m. Se observa además un sistema de olas con longitudes mayores a los 400 m. Lo anterior se puede constatar tanto en su espectro global como en su espectro de ondículas, el cual muestra una mayor concentración de energía al nivel de las escalas 8-16 y 32-64. Al nivel de esta última escala se aprecia un espaciamiento de aproximadamente 100 píxeles entre líneas de fase, indicando con esto una longitud en los paquetes de olas de aproximadamente 1250 m. En el espectro global de este perfil se pueden apreciar claramente cuales son las escalas que contienen mayor concentración de energía (grupos de olas). Al igual que el perfil anterior, el perfil P2 se extiende sobre aguas profundas. Por lo tanto la variabilidad espacial de su espectro de ondículas se puede explicar como efecto del comportamiento dispersivo del oleaje.

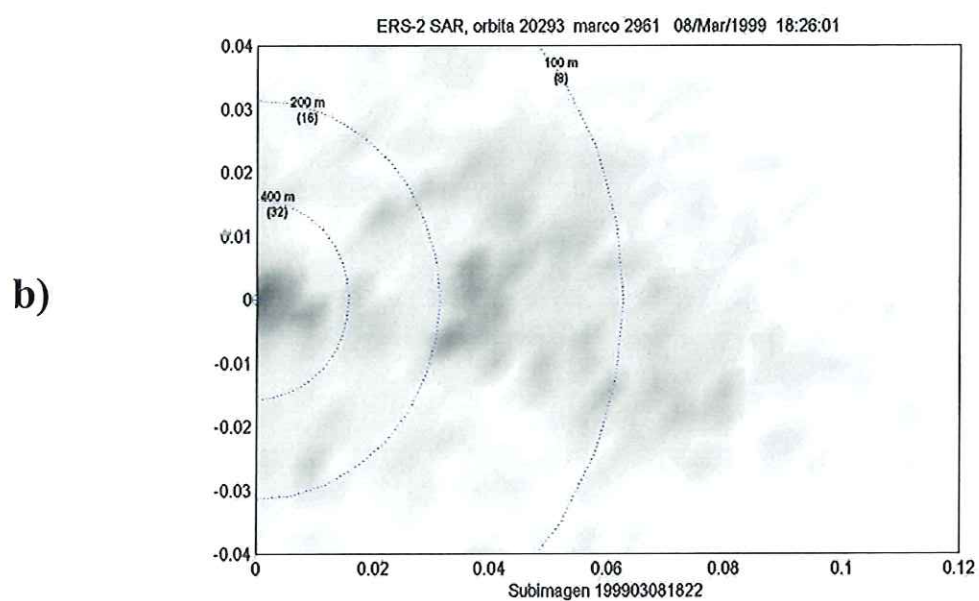
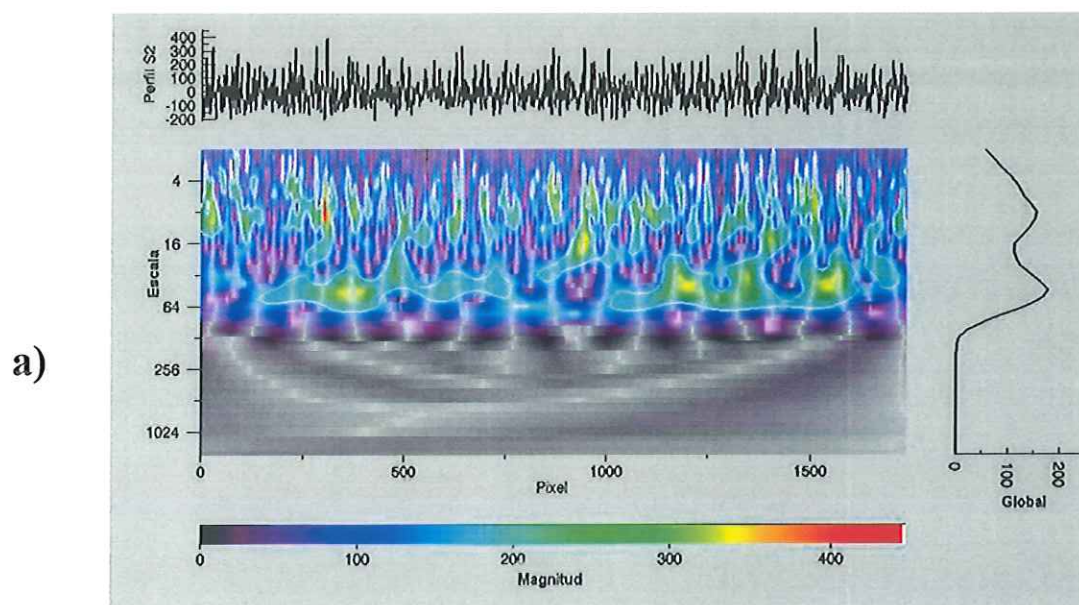


Figura 6.16- (a) Espectro de ondículas del perfil P2. (b) Detalle del espectro direccional de la subimagen P2. Ver descripción para la Figura 6.15.

6.2.3.- Perfil 3 (P3)

En el caso del perfil P3 se aprecia una mayor dispersión en su espectro direccional (Fig. 6.17b). Se observan varios sistemas de olas distribuidos entre los 45° y 95° aproximadamente. Existe además una mayor concentración de energía en la banda de los 100 a 200 m de longitud de onda, con un pico máximo aproximadamente en los 150 m. El origen de este cambio en dirección obedece al efecto de refracción del oleaje al arribar a la región de plataforma.

El perfil P3 se muestra en la parte superior de la Figura 6.17a, tiene una longitud aproximada de 20 km y se extiende sobre una zona de transición de aguas profundas a someras. Su espectro de ondículas muestra una acumulación de energía entre las escalas 8 y 16, lo cual es congruente con el espectro direccional. Se aprecia una tendencia hacia las escalas menores en la mitad derecha del espectro, como resultado del acortamiento de las olas al ingresar a la zona de plataforma.

Las acumulaciones de energía en las escalas altas del extremo izquierdo del espectro de ondículas no están relacionadas con el oleaje, sino con cambios en la reflectividad de la superficie del mar asociados a estructuras de mayor escala. Esta estructura influye en la forma del espectro global, enmascarando la contribución del oleaje en las escalas 8-16.

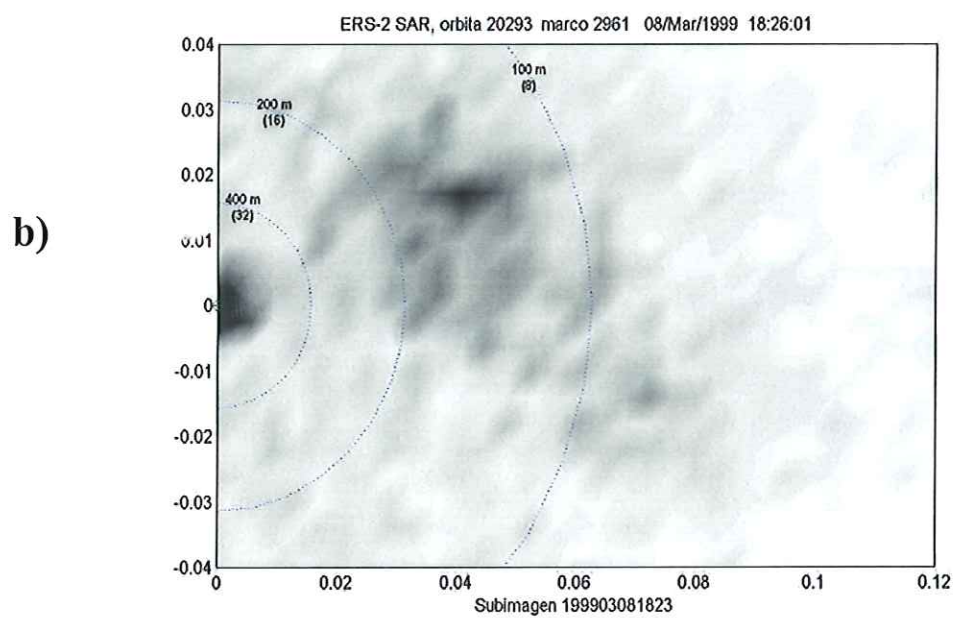
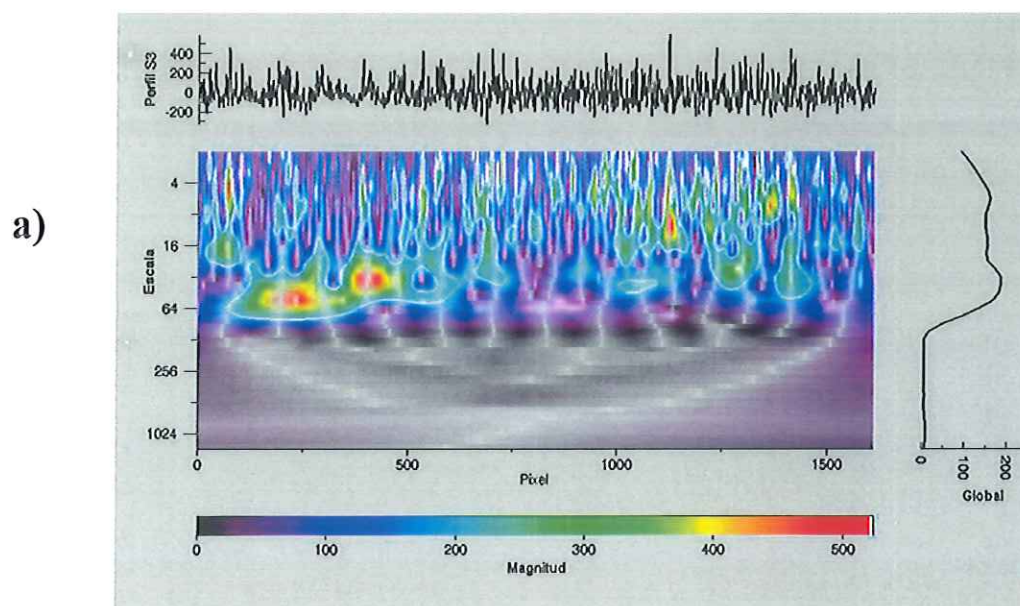


Figura 6.17- (a) Espectro de ondículas del perfil P3. (b) Detalle del espectro direccional de la subimagen P3. Ver descripción para la Figura 6.15.

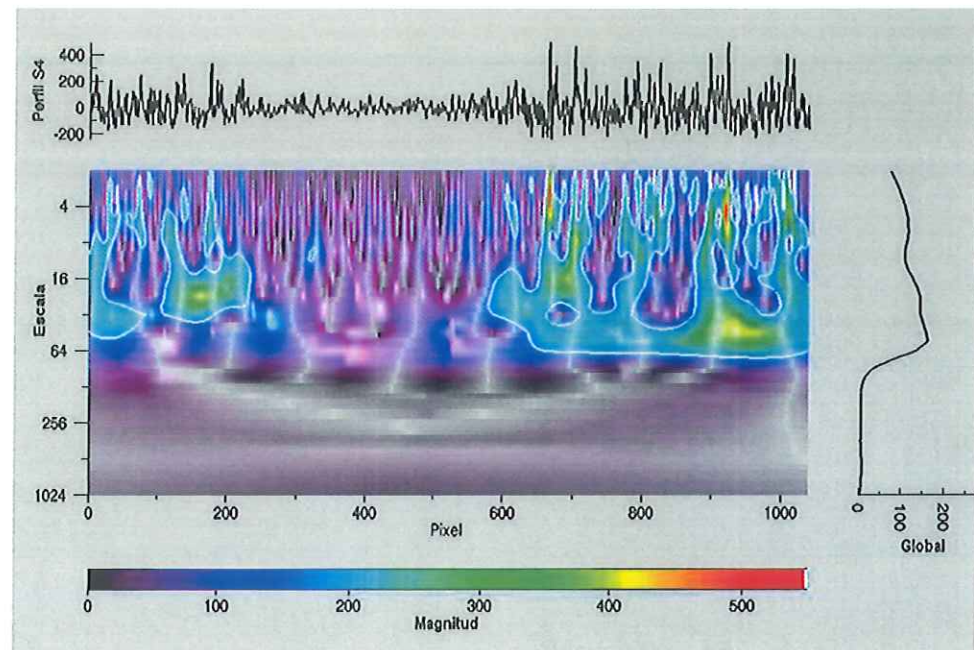
6.2.4.- Perfil 4 (P4)

El espectro direccional de la Figura 6.18 muestra una reorganización en los sistemas de olas, desplazándose estos modos hacia números de onda más altos. Además se reduce su dispersión direccional a unos 30° y los sistemas con mayor concentración de energía adquieren una dirección más norteña.

Por otra parte, este espectro presenta el desarrollo de una lengüeta de alta energía en las longitudes de onda mayores a los 400 m, lo cual se atribuye al efecto de sombra en la esquina inferior izquierda de la subimagen (ver Fig. 3.13a).

El perfil P4 tiene una longitud aproximada de 13 Km y se extiende sobre la zona más somera de la plataforma. La carencia de energía en la parte central del espectro de ondículas se debe a que el perfil atraviesa una franja de baja reflectividad (ver Fig. 3.9), y la contribución energética de esta estructura en las escalas altas del espectro fue eliminada para facilitar su visualización. Por otra parte se puede observar una acumulación de energía en las escalas más bajas de la mitad derecha del espectro (región donde se extrajo la subimagen P4). Esto se debe al acortamiento de las olas al aproximarse a una zona de menor profundidad. Aunque el espectro direccional ha sido promediado, aún es posible observar algunos sistemas de olas con longitudes menores a los 100 m, lo cual es evidente en la mitad derecha del espectro de ondículas al nivel de la escala 4.

a)



b)

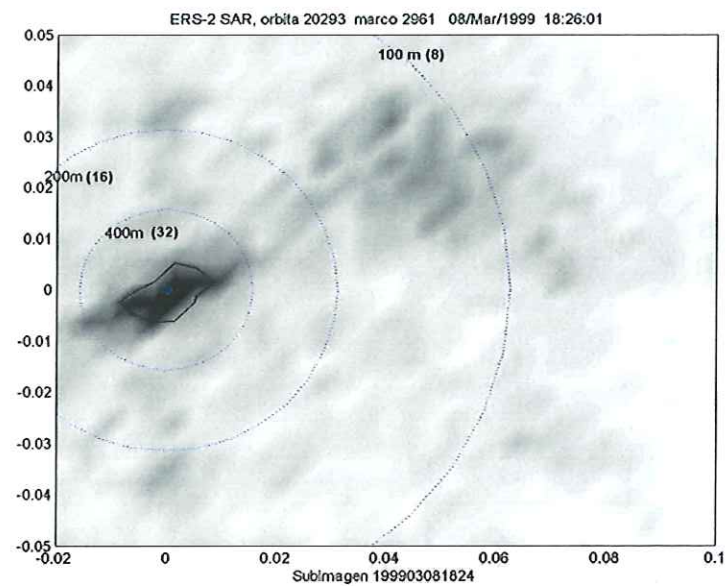


Figura 6.18- (a) Espectro de ondículas del perfil P4. (b) Detalle del espectro direccional de la subimagen P4. Ver descripción para la Figura 6.15.

La distribución más espaciada de los grupos de olas hacia el extremo derecho del perfil P4 es evidencia de la naturaleza no dispersiva del oleaje en aguas someras. Esto es más claro entre las escalas 8 y 16, las cuales corresponden a la banda con mayor energía en el espectro direccional.

La acumulación de energía entre las escalas 32 y 64 en el extremo derecho representa un caso anómalo en la interpretación del espectro de ondículas. Es probable que esta estructura sea el resultado de oleaje refractado sobre la plataforma, el cual intersecta en forma oblicua el perfil de datos proyectando una longitud de onda mayor. Este caso es analizado en la sección 6.2.6.

6.2.5.- Velocidades de Fase y de Grupo

En esta sección se hace el análisis de determinados grupos de olas en los espectros de ondículas presentados en la sección anterior. La finalidad de este experimento es analizar la posibilidad de estimar la velocidad de fase y la velocidad de grupo a partir del espectro de ondículas.

El procedimiento consistió en obtener la longitud de onda a partir del nivel de escala en el espectro de ondículas. Se utilizó la Ecuación (5.15) para relacionar la escala física del tren de olas con la escala del espectro.

Se tomaron como referencia las escalas superior e inferior sobre la línea de umbral al nivel de significancia de 10%, así como el punto con el máximo nivel de energía entre ambas escalas.

A partir del punto de máxima energía se estimaron velocidades de fase usando las Ecuaciones (5.8) y (5.9) para casos de olas en aguas profundas y someras respectivamente, y a partir de los límites superior e inferior del umbral de significancia se efectuaron estimaciones de velocidad de grupo empleando la Ecuación (5.3).

Se analizaron 7 grupos de olas sobre los perfiles mostrados en la Figura 3.9. Los Grupos 1 y 2 corresponden al perfil P1. El Grupo 1 está ubicado aproximadamente en el píxel 375, con un máximo en la longitud de onda de 75 m y límites superior e inferior en las longitudes de 50 y 200 m respectivamente. El Grupo 2 está ubicado aproximadamente en el píxel 900, muestra su máximo de energía en la longitud de onda de 500 m y sus límites superior e inferior corresponden a longitudes de 300 y 800 m.

Los Grupos 3 y 4 están ubicados sobre el perfil P2. El Grupo 3 se encuentra aproximadamente en el píxel 350. Su máximo corresponde a longitudes de onda de 600 m, y sus límites superior e inferior a longitudes de 350 y 800 m respectivamente. El Grupo 4 se encuentra aproximadamente en el píxel 1200. El pico de máxima energía está en los 450 m y los límites superior e inferior son 250 y 700 m respectivamente.

El Grupo 5 se encuentra aproximadamente en el píxel 1110 del perfil P3. Su máximo corresponde a una longitud de 150 m y está ubicado en profundidades mayores que 300 m, por lo que se le considera como un campo de olas en aguas intermedias.

Los Grupos 6 y 7 corresponden al perfil P4 y están localizados en la región más somera de la plataforma. El Grupo 6 tiene su pico en la longitud de 30 m y viaja sobre una profundidad aproximada de 50 m. El Grupo 7 se encuentra en aguas con profundidad de 20 m y tiene una longitud de onda de 50 m.

En la Tabla 6.V se muestran los resultados obtenidos en el análisis de los 4 primeros grupos, los cuales se consideran sistemas de olas en aguas profundas. La primera columna indica el grupo analizado y las siguientes cuatro columnas contienen los valores de los parámetros que intervienen en la Ecuación (5.3). La sexta columna contiene la velocidad de grupo estimada, la séptima columna la velocidad de fase, y finalmente la octava el período.

La característica más sobresaliente de estos resultados es la congruencia que se observa entre los valores obtenidos para velocidad de grupo y de fase, los cuales se apegan a la relación para aguas profundas: $C_g \approx \frac{1}{2} C_o$.

Tabla 6.V.- Parámetros de oleaje derivados del espectro de ondículas del los perfiles P1 y P2 extraídos de la imagen correspondiente a la órbita 20293.

Grupo	σ_1	k_1	σ_2	k_2	C_g	C_o	T
1	1.1097	0.1256	0.5548	0.0314	5.98	10.81	6.93
2	0.4530	0.0209	0.2774	0.0078	13.14	27.93	17.90
3	0.4194	0.0179	0.2774	0.0078	14.05	30.59	19.61
4	0.4962	0.0251	0.2965	0.0089	12.32	26.49	16.78

Por otra parte, considerando que el oleaje mantiene su período al propagarse de aguas profundas a someras, se podría esperar que los períodos del oleaje sobre la plataforma coincidieran con los períodos mostrados en la Tabla 6.V.

Si se calcula el promedio de los períodos estimados en estas cuatro observaciones se obtiene un valor de $T \approx 15.35$ s, el cual es una aproximación aceptable de acuerdo al período medido por el sensor en la fecha de adquisición de la imagen ($T = 10.30$, ver Tabla 3.I). Además resulta significativa la similitud de este valor con los resultados obtenidos mediante inversión presentados en la primera sección de este capítulo. En particular el valor obtenido en la inversión de la subimagen S1 ($T = 13.04$, ver Tabla 6.II), y sobre todo el que se obtuvo en la inversión del Caso 1 ($T = 15.40$, ver Tabla 6.IV). La similitud entre los valores de dichos períodos es relevante, aunque estos dos últimos valores de T se obtuvieron de subimágenes tomadas en fechas diferentes a la imagen del perfil P4.

Finalmente en la Tabla 6.VI se muestran las velocidades estimadas para los Grupos 5, 6 y 7. La segunda y tercera columnas contienen respectivamente los valores de longitud de onda (L) inferidos a partir del espectro de ondículas, y la profundidad (h) estimada para ese punto del espectro de acuerdo a su ubicación en el mapa batimétrico de la zona (Fig. 3.1).

Se utilizó la Ecuación (5.9) para calcular su velocidad de fase debido a que estos grupos de olas pueden considerarse en aguas con profundidad intermedia a somera.

Si consideramos al Grupo 5 como un conjunto de trenes de olas que se propagan en aguas intermedias, y a los Grupos 6 y 7 como el resultado de la refracción del Grupo 5

con el fondo, al internarse en la zona de plataforma, entonces se puede suponer que estos dos últimos grupos viajan con la velocidad de grupo del primero. Los valores en la cuarta columna de la Tabla 6.VI muestran que existe congruencia con lo anterior, ya que las velocidades de los grupos 6 y 7 son aproximadamente la mitad de la velocidad del grupo 5.

Es necesario remarcar que estos resultados fueron obtenidos a partir de observaciones puntuales sobre los valores de máxima energía en el espectro de ondículas, y debido a esto los parámetros de oleaje derivados no pueden ser representativos para toda la región abarcada por el perfil de datos.

Tabla 6.VI.- Estimaciones de velocidad en aguas someras para los Grupos 5, 6 y 7, correspondientes a los perfiles P3 y P4.

Grupo	L	h	C
5	150	≈300	15.29
6	30	50	6.84
7	50	20	8.77

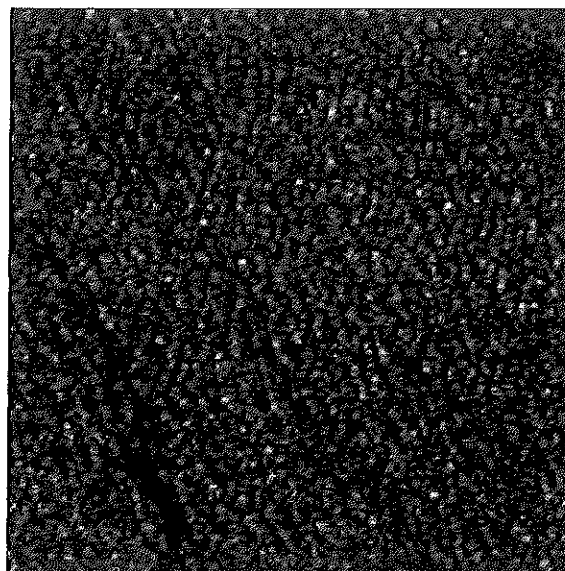
6.2.6.- Oleaje con Aproximación Oblicua

Como se mencionó en la sección 3.4.2, los trenes de olas cuyos rayos intersectan al perfil de datos de manera oblicua, proyectarán sobre el perfil una longitud de onda mayor que la longitud real. Ya que esto representa una limitante en la metodología propuesta, en esta sección se presenta una solución a este problema, tomando como ejemplo el caso de oleaje oblicuo presentado al final de la sección 6.2.4.

Volviendo a la Figura 6.18a, y tomando como referencia la ubicación espacial del perfil P4 en la Figura 3.9, es fácil observar que la acumulación de energía entre las escalas 32 y 64 en el extremo derecho del espectro de ondículas corresponde al cuadrante superior derecho de la subimagen P4 mostrada en la Figura 3.13a.

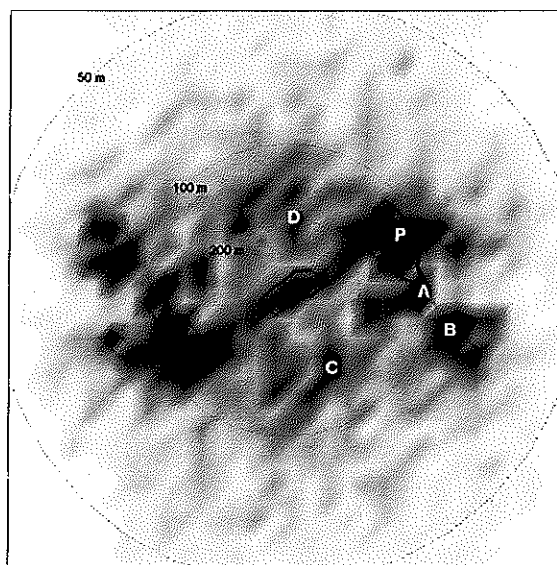
Con base en lo anterior, se procedió a extraer un segmento de 256 X 256 pixeles del cuadrante superior derecho de la subimagen P4. El segmento de imagen y su correspondiente espectro direccional se muestran en la Figura 6.19. Los cúmulos oscuros en el espectro direccional representan acumulaciones de energía asociadas a sistemas de olas. Aproximadamente a 65° se observa el sistema de olas principal “Sistema P”, en cuya dirección se extrajo el perfil P4. Este sistema de olas incluye longitudes de onda en un rango de 80 a 200 m. Tomando como punto de referencia este sistema de olas, se pueden identificar otros cuatro sistemas con diferentes longitudes de onda y dirección de propagación, cuyos rayos incidirán oblicuamente sobre el perfil P4.

a)



Subimagen 256 X 256 pixeles

b)



Espectro direccional

Figura 6.19- (a) Segmento de 256 X 256 pixeles extraído del cuadrante superior derecho de la subimagen P4. (b) Espectro direccional obtenido a partir del segmento de imagen superior. P es el sistema de olas asociado al perfil de intensidad. A, B, C y D son sistemas de olas que intersectan oblicuamente al perfil P4.

A continuación se describe cada uno de estos sistemas tomando como referencia direccional la orientación del perfil P4. Al primer sistema lo denominaremos “Sistema A”. Este se puede observar en la Figura 6.19b justo en la dirección de alcance del radar, a unos 25° de la dirección del perfil P4 y con una longitud de onda nominal de 100 m. El siguiente sistema (Sistema B) está ubicado en el segundo cuadrante del espectro, aproximadamente a 37° del perfil P4 y con una longitud de onda de 80 m. El Sistema C se localiza también en el segundo cuadrante del espectro con un ángulo de 81° respecto al perfil P4 y tiene una longitud de onda de 180 m. Finalmente el cuarto sistema de olas (Sistema D) corresponde a una acumulación de energía ubicada justo en la dirección acimutal del espectro de imagen. Las longitudes de onda de este sistema oscilan entre los 180 y 300 m aproximadamente, y su dirección respecto al perfil P4 es de 65° .

De acuerdo a la relación geométrica que se presenta en la Figura 6.20, donde las líneas intermitentes representan las crestas de olas con longitud de onda λ propagándose en la misma dirección que el perfil P4, se puede deducir que la longitud de onda aparente λ' proyectada por un tren de olas que incide oblicuamente sobre el perfil P4 con un ángulo θ , estará dada por la relación

$$\lambda' = \frac{\lambda}{\cos(\theta)}$$

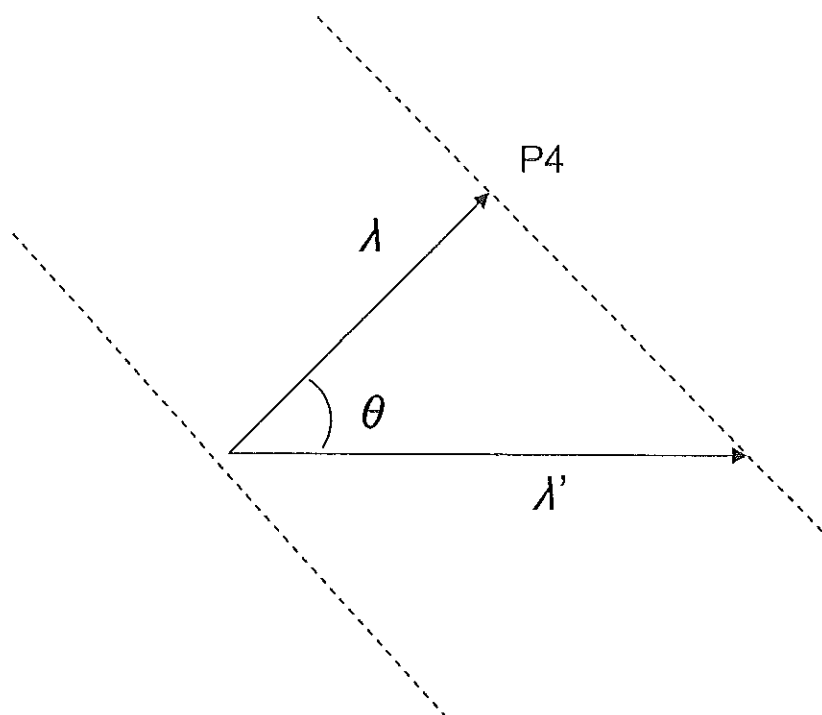


Figura 6.20.- Relación geométrica entre dos olas que se intersectan oblicuamente. λ es la longitud de onda para olas cuyas crestas (líneas discontinuas) se propagan en la misma dirección que el perfil P4. λ' es la longitud de onda aparente, cuando el mismo tren de olas intersecta oblicuamente al perfil P4 con ángulo θ .

En la Tabla 6.VII se muestran las longitudes de onda calculadas para los sistemas de olas de la Figura 6.19b de acuerdo a la relación anterior. La primera columna indica el sistema de olas correspondiente. La segunda columna contiene el valor del ángulo entre la dirección del sistema de olas y el perfil P4. En la columna tres se presentan las longitudes de onda observadas en el espectro direccional, y en la cuarta columna se

presentan las longitudes de onda proyectadas sobre el perfil P4 por cada uno de los sistemas.

En la Tabla 6.VII se puede observar que la magnitud de la distorsión de los sistemas A y B al ser proyectados sobre el perfil P4 no es significativa. Por otra parte, el sistema C muestra el máximo grado de distorsión en su longitud de onda al proyectarse sobre P4, sin embargo estas longitudes de onda están fuera del intervalo de escala representado en el espectro de ondículas de la Figura 6.18b.

Por otro lado, el sistema D fue analizado para longitudes de onda de 180, 250 y 300 m, de acuerdo con su distribución en el espectro direccional. En este caso se puede observar claramente que los valores calculados de λ' coinciden con las escalas en la región anómala del extremo derecho del espectro de ondículas de la Figura 6.18a (escalas 32-64).

Tabla 6.VII.- Longitudes de onda aparentes (λ') proyectadas por sistemas de olas con longitud de onda λ , que intersectan al perfil P4 con un ángulo θ .

Sistema	θ (°)	λ (m)	λ' (m)
A	25	100	110.32
B	37	80	100.17
C	81	180	1,150.64
D	65	180	425.91
	“	250	591.35
	“	300	709.86

El origen del Sistema D puede ser el resultado del oleaje refractado con el fondo al propagarse sobre la plataforma. Aunque es necesario recabar más información de campo para poder determinar la existencia de este patrón de oleaje en la región, se debe considerar el hecho de que un sistema con esta dirección también aparece en el espectro direccional de la Figura 6.18b. Además, en los espectros de olas resultantes en la inversión de la subimagen S1 (Fig. 6.8), así como en el Caso 1 (Fig. 6.9) se puede observar la existencia de componentes espectrales de baja energía propagándose en dirección acimutal. Esto refuerza las conjeturas alcanzadas en esta sección.

7.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1.- Acerca de la recuperación del espectro de las olas

En este trabajo se propone un esquema para recuperar los parámetros característicos del oleaje a partir de imágenes de SAR en la zona costera. A diferencia de mar abierto, donde las condiciones del oleaje son más homogéneas, en la región costera se presenta mayor variabilidad espacial en los parámetros del oleaje, principalmente en sus características direccionales. La metodología propuesta consiste en emplear técnicas de inversión basadas en el algoritmo WASAR, utilizando como espectro de primera aproximación un espectro generado mediante el modelo SWAN. Con la finalidad de conocer el desempeño del algoritmo bajo condiciones de oleaje costero, se analizó la evolución del espectro invertido en cada una de las etapas de la inversión, así como la influencia del espectro de primera aproximación en el proceso de inversión.

Se logró recuperar los parámetros característicos del oleaje (altura significativa, dirección y período), encontrando que los resultados obtenidos concuerdan con la información de oleaje disponible para la zona de pruebas. Las diferencias observadas entre los parámetros recuperados y esta información se atribuyen a las diferencias en ubicación espacio-temporal de las subimágenes con respecto a los datos de oleaje. Aunque los resultados obtenidos en este trabajo son satisfactorios, se hace énfasis en la necesidad de hacer trabajo adicional con la finalidad de validar estadísticamente la metodología propuesta. La principal limitante es la carencia de suficiente información de oleaje que concuerde con las fechas de pase del satélite sobre la región costera analizada.

En términos generales, los espectros de olas recuperados mediante inversión presentan una mejora sustancial en relación a sus correspondientes espectros iniciales generados con el modelo SWAN. Los espectros SWAN generalmente muestran poco detalle en su estructura, ya que sus picos espectrales son más suaves y presentan una distribución de energía más dispersa. Los espectros de olas recuperados, por el contrario, mostraron picos mejor definidos, así como otros sistemas de olas adicionales y estructuras no perceptibles en el espectro de primera aproximación.

De acuerdo con lo establecido en la literatura, se observó una baja dependencia del espectro inicial por parte del espectro recuperado, aunque este último puede llegar a reflejar cierta influencia del espectro inicial en sus parámetros promedio.

Según lo anterior, se podría suponer que puede usarse “cualquier” espectro inicial como modelo de partida, sin embargo esto no es recomendable para casos en los que se requiera conocer a detalle la estructura del espectro, ya que la variación en los parámetros promedio puede influir en la estructura de los sistemas de olas secundarios.

Lo anterior puede ser importante en estudios de oleaje costero, donde sistemas de baja energía generados localmente podrían quedar enmascarados debido a la forma del espectro de primera aproximación. En tales circunstancias es recomendable utilizar un espectro lo más cercano posible a las condiciones reales del oleaje en el sitio analizado.

Se recomienda invertir el espectro de imagen en su espectro de olas, procurando evitar la interpretación directa de los parámetros del oleaje a partir del espectro de la imagen. Esto es indispensable en regiones que presenten sistemas de olas con una cantidad considerable de componentes con dirección acimutal.

7.2.- Acerca del análisis espacial del oleaje

En este trabajo se ha propuesto una metodología basada en la Transformada de Fourier (FFT) y la Transformada de Ondículas (WT), que permite analizar las características del oleaje a partir de perfiles de intensidad extraídos de imágenes de SAR.

Los resultados obtenidos indican que es posible establecer una relación entre el número de onda en el espectro direccional y el nivel de escala en el espectro de ondículas, permitiendo relacionar la dirección de propagación con la ubicación espacial de los trenes de olas, de acuerdo a las acumulaciones de energía en ambos espectros.

Por una parte, se comprobó que mediante el espectro de ondículas es posible observar la coexistencia de sistemas de olas con diferente número de onda y dirección formando grupos. Esto significa que para una posición determinada en el perfil de datos, se pueden identificar concentraciones de energía provenientes de diferentes escalas de resolución. Estas escalas estarán asociadas a trenes de olas con determinada longitud de onda y por lo tanto es posible inferir los parámetros del oleaje de acuerdo a la teoría lineal.

Por otro lado, la variabilidad espacial del espectro de ondículas está relacionada con las propiedades dispersivas del oleaje, facilitando la localización espacial de grupos de olas con diferentes longitudes de onda y permitiendo analizar su evolución conforme estos se aproximan a la costa.

La metodología tiene algunas limitaciones. La principal de ellas es que solo es aplicable a trenes de olas que viajan en la dirección de alcance del radar, o dentro del intervalo lineal del proceso formador de imagen. Otra limitante es la interferencia con otros

trenes de olas que inciden oblicuamente a la dirección del perfil de datos, dando como resultado componentes que aparentan tener una longitud de onda mayor en el espectro de ondículas. Con la finalidad de aminorar estos problemas se recomienda el uso conjunto de la FFT y la WT, así como analizar perfiles con longitud similar a las dimensiones de las subimágenes empleadas. Lo anterior es con el objeto de facilitar el mapco de los picos de energía en ambos espectros y poder analizar selectivamente cada sistema de olas. Estas técnicas, aplicadas en conjunto con el algoritmo WASAR, podrían permitir hacer estimaciones más precisas de los parámetros característicos del oleaje, sobre todo en los casos en que éste se propaga con una componente acimutal considerable.

7.3.- Comentarios Finales

Con base en los resultados obtenidos en este trabajo, se advierte un gran potencial en esta línea de investigación. Por tal motivo se recomienda continuar explorando el funcionamiento del algoritmo WASAR con datos de otros satélites (e. g. RADARSAT, ENVISAT, ALOS, etc.) y bajo diferentes condiciones de configuración, así como analizar con más detalle los procesos de partición y reasignación espectral durante el proceso de inversión. Sería interesante además, trabajar con datos de mayor resolución espacial, utilizando imágenes en el dominio complejo o información adquirida mediante plataformas aéreas.

Aunque los resultados obtenidos son satisfactorios, se debe hacer énfasis en las limitaciones de los datos disponibles. Aún es necesario hacer una validación de la metodología con suficiente respaldo estadístico. Para ello se requiere contar con un mayor número de observaciones de oleaje tomadas al momento del pase del satélite. Además se recomienda contar con modelos de olas y de viento (e. g. WAM, SWAN, MM5) calibrados para la zona de estudio, de manera que éstos aporten información de mejor calidad tanto en la fase de validación, como durante la asimilación de la información de satélite.

En la actualidad la “Oceanografía por Satélite” ha pasado de ser un área de investigación básica, a ser un campo de aplicaciones prácticas donde existe una amplia variedad de oportunidades comerciales. Entre las diferentes tecnologías que se utilizan en esta disciplina, el Radar de Apertura Sintética es una de las más prometedoras en cuanto a aplicaciones en oceanografía costera.

En este sentido se recomienda analizar la factibilidad de desarrollar software especializado para procesar y visualizar información de radar. Un proyecto como este podría consistir en el desarrollo de interfases gráficas para visualización, así como en la implementación de algoritmos de calibración y procesamiento de imágenes, en conjunto con la integración de bases de datos geo-referenciadas.

Lo anterior constituiría un Sistema de Información Geográfica orientado específicamente al estudio de procesos costeros, el cual sería una excelente herramienta de apoyo en temas de investigación sobre modelado de oleaje, o en la solución de problemas en el manejo de la zona costera.

Referencias Bibliográficas

Alvarez, L. G., V. M. Godínez, y M. F. Lavin (1990). Dispersión en la franja costera de Tijuana, Baja California. *Ciencias Marinas*, Vol. 16, No. 4, pp. 87-109.

Alpers, W. R., D. B. Ross y C. L. Rufenach (1981). On the detectability of ocean surface waves by real and synthetic aperture radar. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 86, No. C7, pp. 6481-6498.

Alpers, W. R., C. Brüning, and K. Richter (1986). Comparison of simulated and measured synthetic aperture radar image spectra with buoy-derived ocean wave spectra during the shuttle imaging radar-B mission. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, GE-24, pp 559-566.

Beal, R. C., D. G. Tilley, and F. M. Monaldo (1983). Large-and small-scale spatial evolution of digitally processed ocean wave spectra from SEASAT synthetic aperture radar. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 88, No. C7, pp. 1761-1778.

Beal, R. C., T. W. Gerling, D. E. Irvine, F. M. Monaldo, and D. G. Tilley (1986). Spatial variations of ocean wave directional spectra from the Seasat synthetic aperture radar. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 91, No. C2, pp 2433-2449.

Born, G. H., D. B. Lame, and P. J. Rygh (1981). A survey of the goals and accomplishments of the Seasat mission. IN J. R. F. Gower (ed.) *Oceanography From Space*, pp. 3-14, Plenum, New York.

Breivik, L. A., M. Reistad, H. Schyberg, J. Sunde, H.E. Krogstad, y H. Johnsen (1998). Assimilation of ERS SAR wave spectra in an operational wave model. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 103, NO. C4, pp. 7887-7900.

Brüning, C., W. Alpers, L. F. Zambresky, and D. G. Tilley (1988). Validation of a SAR ocean wave imaging theory by the shuttle imaging radar-B experiment over the North Sea. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 93, pp. 15403-15425.

Brüning, C., S. Hasselmann, K. Hasselmann, S. Lehner, and T. Gerling (1994). A first evaluation of ERS-1 synthetic aperture radar wave mode data. *The Global Atmosphere and Ocean System*. Vol. 2, pp. 61-98.

Chapron, B., A. K. Liu, C. Y. Peng, and E. Mollo-Christensen (1995). Higher order spectral and scale analysis of surface wave height. *The Global Atmosphere and Ocean System*, Vol. 3, pp. 151-173.

Daubechies, I. (1992). *Ten Lectures On Wavelets*. SIAM Press, Philadelphia, PA.

Donelan, M. A., W. M. Drennan, and A. K. Magnusson (1996). Nonstationary analysis of the directional properties of propagating waves. *Journal of Physical Oceanography*, Vol. 26, pp. 1901-1914.

Engen, G., H. Johnsen, H. E. Krogstad, and S. F. Barstow (1994). Directional wave spectra by inversion of ERS-1 synthetic aperture radar ocean imagery. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 32, pp. 340-352.

ESA (European Space Agency) (1989). ERS-1 A new tool for global environmental monitoring in the 1990's. ESA BR-36, November 1989.

ESA (European Space Agency) (1992). ESA ERS-1 Product specification. ESA Special Publication, ESA SP-1149.

ESA (European Space Agency) (1993). ERS user handbook, ESA Special Publication, ESA SP-1148.

ESA (European Space Agency) (1994). ERS-1 SAR.PRI CCT Format. er-is-epo-gs-0506.4, January 1994.

ESA (European Space Agency) (1995). ERS-2: A continuation of the ERS-1 Success, ESA Bulletin, Number 83, August 1995.

ESA (European Space Agency) (1996). Applications achievements of ERS-1, ESA Special Publication, ESA SP-1176/II.

Gonzalez, F. I., R. C. Beal, W. E. Brown, P. S. DeLeonibus, J. W. Sherman III, J. F. R. Gower, D. Lichy, D. B. Ross, C. L. Rufenach and R. A. Shuchman (1979). Seasat synthetic aperture radar: Ocean wave detection capabilities, *Science*, Vol 204, pp. 1418-1421.

Grossman, A. and J. Morlet (1984). Decomposition of Hardy functions into square integrable wavelets of constant shape. *SIAM Jour. Math. Anal.*, Vol. 15, pp. 723-736.

Hasselmann, K., R.K. Raney, W. J. Plant, W. Alpers, R. A. Shuchman, D. R. Lizenga, C. L. Rufenach y M. J. Tucker (1985). Theory of synthetic aperture radar: a MARSEN view. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 90, No. C3, pp. 4659-4686.

Hasselmann, K. and S. Hasselmann (1991). On the nonlinear mapping of an ocean wave spectrum into a synthetic aperture radar image spectrum and its inversion. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 96, No. C6, pp. 10713-10729.

Hasselmann, S., C. Brüning, K. Hasselmann and P. Heimbach (1996). An improved algorithm for the retrieval of ocean wave spectra from synthetic aperture radar image spectra. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 101, No. C7, pp. 16615-16629.

Hasselmann, S., P. Heimbach, y C. Bennefeld (1998). The WASAR algorithm for retrieving ocean wave spectra from SAR image spectra. Technical Report No. 14, Max-Planck Institut für Meteorologie, Hamburg, Germany.

Heimbach, P., S. Hasselmann, and K. Hasselmann (1998). Statistical analysis and intercomparison of WAM model data with global ERS-1 SAR wave mode spectral retrievals over 3 years. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 103, No. C4, pp. 7931-7977.

Holthuijsen, L. H., N. Booij, R. C. Ris, I. J. G. Haagsma, A. T. M. M. Kieftenburg, E. E. Kriez, and M. Zijlema (2003). SWAN Cycle III User Manual (not the short version). Delft University of Technology, The Neatherlands.

Janssen, P. A. E. M. y P. Viterbo (1996). Ocean waves and the atmospheric climate. *Journal of Climatology*, Vol. 9, pp 1269-1287.

Jenkins, G. M., and D. G. Watts (1967). *Spectral Analysis And Its Applications*. Holden-Day, San Francisco.

Kinsman, B. (1965). *Wind Waves*. Dover, New York.

Krogstad, H. E. (1992). A simple derivation of Hasselmann's non-linear ocean synthetic aperture radar transform. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 97, pp. 2421-2425.

Krogstad, H. E., O. Samset and P. W. Vachon (1994). Generalizations of the non-linear ocean-SAR transform and a simplified SAR inversion algorithm. *Atmosphere-Ocean*, Vol. 32, pp. 61-82.

Lehner, S., J. Schulz, A. Neidermeier, J. Horstmann, and W. Rosenthal (2002). Extreme waves detected by satellite borne synthetic aperture radar. *Proceedings of OMAE2002, 21st International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, June 23-28, 2002, Oslo Norway.

Liu, P. C. (1994). Wavelet spectrum analysis and ocean wind waves. IN Foufoula-Georgiou, E., y P. Kumar (eds.), *Wavelet Analysis And Its Applications*, Vol. 4, *Wavelets in Geophysics*. Academic Press.

Macklin, J. T. and R. A. Cordey (1991). Seasat SAR observations of ocean waves. *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 12, No. 8, pp. 1723-1740.

- Mallat, S. G. (1989). A theory for multiresolution signal decomposition: the wavelet representation. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 11, No. 7, pp. 674-693.
- Marmolejo-Lara, Mario (1985). Control de azolvamiento en una obra de toma de agua marina. Tesis de Licenciatura, Facultad de Ciencias Marinas, Universidad Autónoma de Baja California. Ensenada, B. C., México.
- Mastenbroek, C., G. Burgers, and P. A. E. M. Janssen (1993). The dynamical coupling of a wave model and a storm surge model through the atmospheric boundary layer. *Journal of Physical Oceanography*, Vol. 23, pp. 1856-1866.
- Mollo-Christensen, E., and A. Ramamonjiarisoa (1978). Modeling the presence of wave groups in a random wave field. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 83, pp. 4117-4122.
- Monaldo, F. M. and D. R. Lyzenga (1988). Comparison of shuttle imaging radar-B ocean wave spectra with linear model predictions based on aircraft measurements. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 93, No. C12, pp. 15374-15388.
- Ocampo-Torres, F. J. (2001). On the homogeneity of the wave field in coastal regions as determined from ERS-2 and RADARSAT synthetic aperture radar images of the ocean surface. *Scientia Marina*, Vol. 65 (Suppl. 1), pp 215-228.
- Ocampo-Torres, F. J. (1998). Spatial variations of directional wave spectra in coastal waters. *Proc. Provision and engineering/operational application of ocean wave data*. UNESCO, Paris, 25-26 September, 1998.
- Peirache, A., and P. Lombardi (2001). Validation of the numerical model of waves prediction SWAN, using SAR images and insitu data, in the region of Rosarito, Mexico B.C., CICESE, Depto. de Oceanografía Física, Rapport de stage d'option scientifique.
- Phillips, O.M. (1977). *The Dynamics Of The Upper Ocean*. Cambridge University Press, New York.
- Raney, R. K. (1971). Synthetic aperture imaging radar and moving targets. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, AES-7, No. 3, pp. 499-505.
- Raney, R. K. (1980). SAR processing of partially coherent phenomena. *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 1, pp. 29-51.
- Robinson, I. S. (1985). *Satellite Oceanography: An Introduction For Oceanographers And Remote-Sensing Scientists*. Ellis Horwood Limited.

Shuchman, R. A., E. S. Kasischke, A. Klooster, and P. L. Jackson (1979). Seasat SAR coastal ocean wave analysis: A wave refraction and diffraction study. ERIM Final Report N. 131700-3-F, Ann Arbor, Michigan.

Teti, J. G. Jr., and H. N. Kritikos (1992a). SAR ocean image decomposition using the Gabor expansion. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 30, No. 1, pp. 192-196.

Teti, J. G. Jr., and H. N. Kritikos (1992b). SAR ocean image representation using wavelets. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 30, No. 5, pp. 1089-1094.

Torres, J., J. Favela, F. J. Ocampo-Torres, y A. Da S. Mascarenhas (1998). Ocean wave parameter retrieval from SAR imagery using wavelet analysis. *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium Proceedings: Vol II*, Seattle, WA.

Weber, S. L., H. von Storch, P. Viterbo, y L. Zambresky (1993). Coupling an ocean wave model to an atmospheric general circulation model. *Clim. Dyn.* Vol. 9, pp 63-69.

WAMDI (Wave Model Development and Implementation) Group (1988). The WAM model- A third generation ocean wave prediction model. *Journal of Physical Oceanography*, Vol. 18, pp. 1775-1810.

Apéndice A

El Radar de Apertura Sintética

El radar de apertura sintética (Synthetic Aperture Radar- SAR) es un dispositivo activo con vista lateral que funciona a bordo de una plataforma en movimiento (Figura A.1). El SAR que opera a bordo del satélite ERS-2 viaja a una altura de 785 km, su antena rectangular está alineada con la dirección de vuelo del satélite (dirección acimutal) de tal forma que puede dirigir un haz oblicuo sobre la superficie terrestre y en dirección perpendicular a la dirección de vuelo (dirección de alcance). De esta manera, una serie de pulsos electromagnéticos son transmitidos hacia la Tierra en dirección de alcance, iluminando la superficie del terreno con un patrón elíptico de acuerdo a las características de directividad de la antena.

La potencia de la señal reflejada por el área que cubre el patrón de iluminación (huella) dependerá de las características físicas de la superficie. La cantidad de energía reflejada por un objeto está dada por su "Radar Cross Section"-RCS (σ), la cual es el producto entre el área efectiva proyectada en dirección hacia el radar, y la ganancia del objeto al ser considerado como emisor de energía en esta misma dirección.

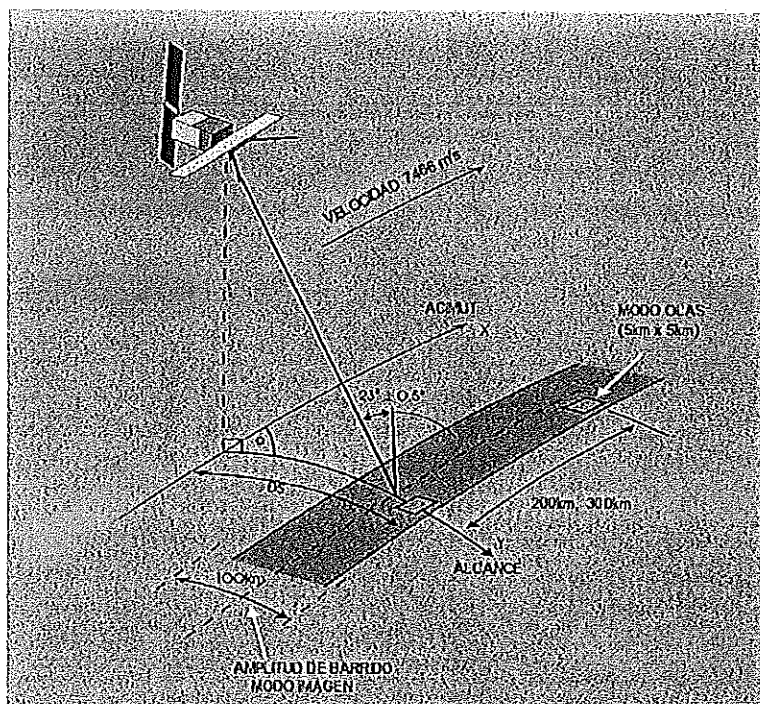


Figura A.1- Geometría y cobertura espacial del radar de apertura sintética que opera a bordo del satélite ERS-2. Modificado de ESA (1993).

Con la intención de simplificar la amplia variedad de formas que pueden existir para los objetos naturales, se ha definido σ como el área proyectada (πr^2) por una esfera metálica con radio ($r \gg \lambda$) mayor que la longitud de onda del radar y que refleja la misma cantidad de energía que el objeto. Para el caso de un objeto difuso, como puede ser un bosque o la superficie del océano, se utiliza σ^0 , la cual se define como el promedio normalizado de σ con respecto al área iluminada en el terreno. De esta manera, σ^0 se expresa como una relación de potencias entre las señales transmitida y recibida por el radar. σ^0 se expresa en dB, siendo cero dB el equivalente a un área proyectiva de 1 m^2 de una esfera, por cada metro cuadrado de área en el terreno. El

análisis cuantitativo de σ permite relacionar los niveles de energía recibidos por el radar con las propiedades físicas de la superficie.

El SAR a bordo de los satélites ERS (European Remote-sensing Satellite) produce imágenes bidimensionales con resolución en alcance de 26 m y resolución acimutal de entre 6 y 30 m, dependiendo del número de tomas efectuadas (looks). Puede adquirir datos durante 12 minutos por órbita, dependiendo de la disponibilidad de estaciones terrenas receptoras en línea de vista, y a lo largo de una franja de barrido (swath) con 100 km de ancho (Figura A.1). La imagen se construye a partir de la potencia (amplitud) y el retardo en tiempo (fase) de las señales reflejadas, lo cual dependerá principalmente de la rugosidad y las propiedades dieléctricas del terreno, así como de su distancia (alcance) al satélite. A este tipo de productos con cobertura completa de 100 km y en valores de amplitud se les denomina ERS.SAR.PRI (ESA, 1994). La Tabla A.I muestra algunas de las principales especificaciones técnicas del SAR/ERS-2.

Una característica especial del SAR a bordo de los satélites ERS, es la implementación de un modo intermitente de muestreo denominado “modo olas” (wave mode). Este modo permite la adquisición de subimágenes (imagettes) de 10 km por 5 km de cobertura, espaciados a cada 200 km sobre la franja de barrido del satélite (ver Fig. A.1). Este modo de operación del SAR es más económico en consumo de energía y le permite permanecer en operación continua, almacenando datos para su posterior descarga al pasar sobre una estación receptora.

Tabla A.I- Especificaciones técnicas del SAR/ERS-2. Tomado de ESA (1993).

Parámetro	Valor
Altura de vuelo	785 Km (nominal)
Frecuencia de operación	5.3 Ghz
Longitud de onda (λ)	5.6 cm (banda C)
Ancho de banda	15.55 MHz
Resolución espacial	< 30 m, en acimut <26 m, en alcance
Resolución radiométrica	< 2.5 dB
Intervalo dinámico	< 25 dB
Franja de barrido	100 Km
Precisión de localización	< 1 Km acimut < 0.9 Km alcance
Dimensión de la antena	10 m longitud, 1 m ancho
Angulo de incidencia (Θ)	23° (nominal)
Polarización	Lineal vertical, Tx y Rx
Tiempo máximo de operación	12 minutos
Tasa de descarga	105 Mbit/s

El SAR/ERS-2 puede proveer un muestreo global continuo de la superficie del mar, produciendo alrededor de 1500 subimágenes por día. Los espectros de estas subimágenes se obtienen mediante FFT y se codifican como espectros en número de onda en arreglos de 512 x 512 bins. Posteriormente éstos son promediados para formar espectros de 12 x 12 cuyos valores se almacenan en coordenadas polares (ESA, 1992; Hasselmann et al., 1998).

Un ejemplo de estas subimágenes y su correspondiente espectro se muestran en la Figura A.2. A este tipo de productos se les denomina ERS.SWM.FDP y propósito principal de este tipo de productos es proveer información espectral del oleaje en forma rápida y con cobertura global.

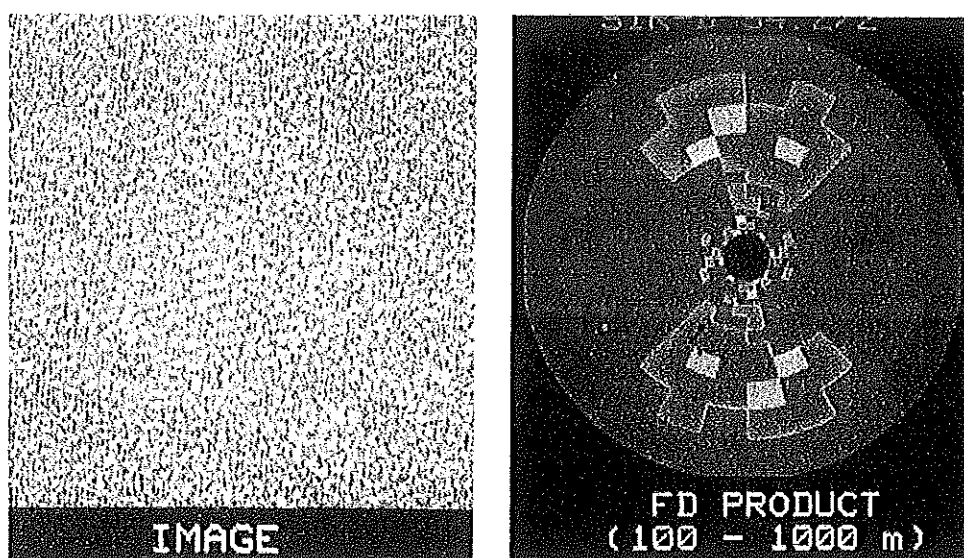


Figura A.2- Productos ERS.SWM.FDP (subimagen y su espectro direccional). Tomado de ESA (1993).

Mecanismo de Reflexión Bragg.

Debido al ángulo de incidencia oblicuo en la geometría del SAR, prácticamente no habría reflexión hacia el sensor sobre una superficie lisa como el océano. Sin embargo se supone que el efecto de resonancia Bragg, entre la señal del radar y las pequeñas ondulaciones en la superficie del mar generadas por el viento, es el principal mecanismo de reflexión. La Figura A.3 muestra la relación que existe entre un tren de olas con longitud λ_S (cuyas crestas son perpendiculares a la línea de vista del radar) y las ondas del radar con longitud λ_R incidiendo con un ángulo θ sobre la superficie del mar.

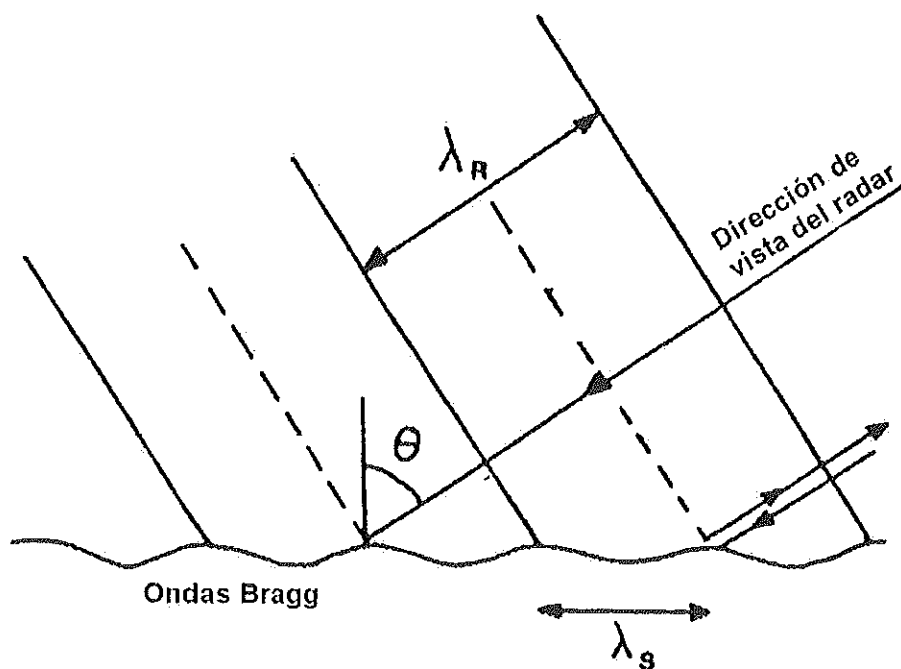


Figura A.3- Geometría Bragg para trenes de olas que se propagan en la dirección de alcance del radar. Modificado de Robinson (1985).

La reflexión Bragg consiste en el efecto aditivo de los ecos provenientes de múltiples estructuras reflectoras sobre la superficie rugosa del mar. Si estas estructuras (ondas capilares) tienen un tamaño apropiado en relación a la longitud de onda del radar, éstas entrarán en resonancia reforzando la señal. De lo contrario el proceso de interferencia será destructivo, eliminando las contribuciones de los demás reflectores. El efecto de resonancia Bragg ocurrirá cuando la relación entre la longitud de onda del oleaje y la señal del radar sea

$$\lambda_s \approx \frac{\lambda_R}{2 \sin(\theta)} \quad (\text{A.1})$$

La señal del radar y la altura h de las ondas Bragg están relacionadas por

$$h < \frac{\lambda_R}{8} \cos(\theta) \quad (\text{A.2})$$

Para trenes de olas cuyas crestas tienen una componente angular Φ con respecto a la dirección de vista del radar, el criterio Bragg guarda la siguiente relación (ver Figura A.4).

$$\lambda_s \approx \frac{\lambda_R \sin(\Phi)}{2 \sin(\theta)} \quad (\text{A.3})$$

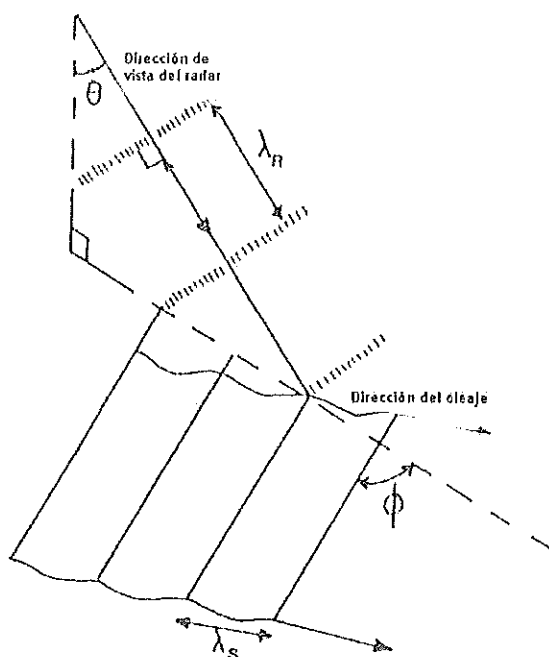


Figura A.4- Geometría Bragg para trenes de olas que se propagan con un ángulo Φ respecto a la dirección de alcance del radar. Modificado de Robinson (1985).

Se supone que las ondas Bragg son el principal mecanismo formador de imágenes sobre la superficie del océano, de otra manera la superficie del mar aparecería completamente oscura en las imágenes de radar, debido a un tipo de reflexión puramente especular. Sin embargo debe considerarse que las ondas Bragg son moduladas por olas de período largo, las cuales son estructuras móviles que modifican la orientación de los reflectores (parches de olas capilares). Esto origina la generación de complicados patrones en las imágenes de radar, haciendo difícil una interpretación directa de las mismas. Los principales mecanismos de modulación responsables de la generación de estos patrones se describen en el Apéndice B.

Apéndice B

Detección de Oleaje Mediante el SAR

Modelo 2-Escalas

La modulación de las ondas Bragg debida al oleaje de período largo se puede describir mediante el modelo 2-Escalas (Alpers et al, 1981; Hasselmann et al, 1985). En este modelo se supone que las longitudes del oleaje son mucho mayores que las longitudes de las ondas Bragg. De acuerdo a la teoría Bragg, la señal reflejada por los reflectores individuales (facetas) en la superficie del océano, se origina debido al el efecto de resonancia entre las dos componentes Bragg, una que se propaga desde la antena del radar, y otra propagándose desde la superficie del mar hacia la antena.

En el modelo 2-Escalas los reflectores o facetas se consideran grandes en relación a la longitud de las ondas Bragg, y pequeños comparados con las ondas largas del oleaje que las modula. Estas facetas pueden considerarse como elementos de la superficie del mar, cuya orientación y velocidad local estarán determinadas por la pendiente de la superficie y la velocidad orbital de las olas.

Existen dos versiones del modelo 2-Escalas (Figura B.1). Por un lado se tiene el modelo electromagnético-hidrodinámico (EMH), en el cual la escala de separación depende únicamente de las características geométricas de reflexión y de las interacciones hidrodinámicas entre los trenes de olas.

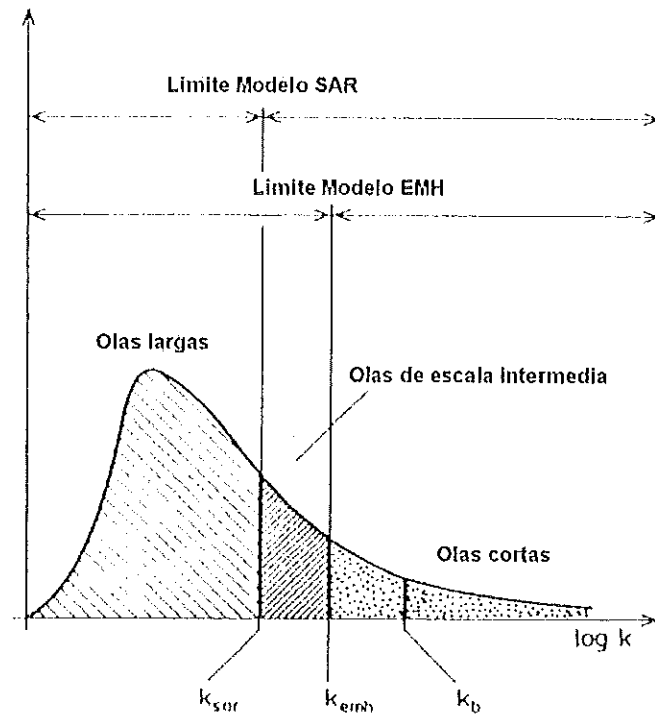


Figura B.1- El modelo 2-Escalas. Modificado de Hasselmann, et al. (1985).

Mientras que por otra parte se tiene el modelo SAR, en el que la escala de separación está determinada por la escala de resolución del SAR y por su tiempo de coherencia.

En el marco de la teoría de modulación lineal, la elevación de la superficie del océano $\zeta(r,t)$ y las variaciones locales de la energía reflejada $\sigma(r,t)$ pueden ser representadas como una superposición de ondas propagándose en la superficie del océano,

$$\zeta(r,t) = \sum_k \zeta_k \exp[i(k \cdot r - \omega t)] + c.c. \quad (B.1)$$

y

$$\sigma(r, t) = \sigma_o \left\{ 1 + \sum_k M_k \exp[i(k \cdot r - \omega t)] + c.c. \right\} \quad (B.2)$$

donde σ_o es un término aditivo relacionado con el promedio normalizado de la reflectividad (RCS) de la superficie del océano, r es el vector de posición, k es el vector número de onda y $\omega = (gk)^{1/2}$ es la frecuencia angular para ondas restauradas por la fuerza de gravedad. El factor de modulación M_k está relacionado con la amplitud del oleaje ζ_k mediante

$$M_k = T_k \zeta_k. \quad (B.3)$$

Bajo un régimen de parametrización lineal, la función de transferencia T_k es una combinación de términos que contienen los diferentes mecanismos de modulación

$$T_k = T_k^{tilt} + T_k^{hydro} + T_k^{vb} \quad (B.4)$$

los cuales se describen a continuación.

El efecto de modulación es representado por el producto entre T_k y ζ_k , el cual es la transformada de Fourier de la elevación de la superficie del mar, asociada con el oleaje de período largo. En este punto es importante remarcar que σ es el parámetro detectado por el radar a bordo del satélite, mientras que ζ es el parámetro oceanográfico que se desea estimar a partir de la imagen de SAR. De ahí la necesidad de determinar una forma para T_k tal que al ser invertida podamos encontrar ζ , como se explica en el Capítulo 4.

Formación de la Imagen de SAR

El radar de apertura sintética forma imágenes de alta resolución mediante el registro de las amplitudes y las fases de la señal reflejada por los elementos de la escena, durante el tiempo de integración de la imagen. Posteriormente esta información es procesada mediante técnicas de filtrado con el objeto de ubicar cada reflector en la escena. La fase es el resultado del movimiento relativo entre la plataforma satelital (antena) y cada elemento reflector en la escena. Para el caso de un elemento estático la fase es una función determinística debido a que la velocidad de rotación terrestre y la velocidad de la plataforma se consideran constantes. Por lo tanto el filtro estará diseñado para ajustar la fase perfectamente. Sin embargo para el caso de una superficie altamente dinámica, como lo es el mar, el movimiento de los reflectores en la escena distorsiona esta función de fase, produciendo los siguientes efectos.

Por un lado, la componente del movimiento del reflector respecto al satélite causa un desplazamiento acimutal en la ubicación del reflector en la imagen. Esto significa que el movimiento oscilatorio de los reflectores, acercándose y alejándose del radar debido al movimiento orbital del oleaje, producirá patrones ondulatorios en la imagen, los cuales pueden ser interpretados indirectamente como trenes de olas. A este mecanismo se le conoce como agrupamiento por velocidad (velocity bunching) y es un proceso no-lineal, incrementando su grado de no linealidad conforme la relación entre la distancia en alcance y la velocidad del satélite (R/V) aumenta.

Por el otro lado las componentes de movimiento con frecuencia alta, como es en el caso de mares desarrollados, provocan una degradación en la resolución acimutal del SAR

debido a su limitación en tiempo de coherencia. Esta degradación también es proporcional a la razón R/V .

Por lo tanto la detección del oleaje en la superficie del mar implicará un compromiso entre el proceso de formación de la imagen (agrupamiento por velocidad) y la degradación de la imagen (desvanecimiento) debida a su limitante en tiempo de coherencia. Para el caso de los satélites ERS-1 y 2, $R/V = 115$ s, considerándose un valor relativamente alto para poder detectar con precisión trenes de olas con longitudes menores a los 100 ó 200 m.

Modulación por Inclinación

La modulación por inclinación (T^{tilt}) es debida exclusivamente al efecto geométrico de la superficie de las olas sobre la reflexión Bragg. Esta se origina debido a la variación del ángulo de incidencia de la señal del radar (Figura B.2).

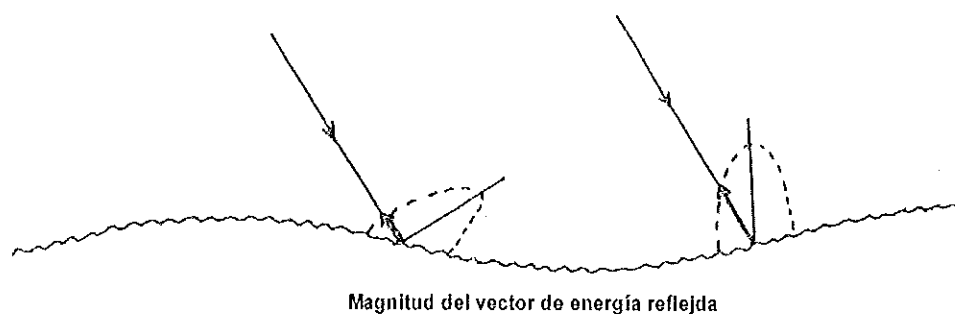


Figura B.2- Modulación por inclinación. Modificado de Robinson (1985).

Para ángulos de incidencia menores que 60° y polarizaciones VV, como es el caso del SAR/ERS-2, la función de modulación por inclinación se expresa como

$$T_k^{tilt} = 4ik_l \cot(\theta)[1 + \sin^2(\theta)]^{-1} \quad (B.5)$$

mientras que para polarizaciones HH será

$$T_k^{tilt} = 8ik_l[\sin(2\theta)]^{-1} \quad (B.6)$$

donde θ es el ángulo de incidencia de la señal de radar y k_l es la componente número de onda en la dirección de vista del radar (alcance).

Modulación Hidrodinámica

Este tipo de modulación se origina a partir de las interacciones de las ondas Bragg con el oleaje de período largo (Figura B.3). Adicionalmente al efecto geométrico, las ondas largas pueden también modular el viento que actúa sobre las ondas Bragg. La función de transferencia resultante tiene la forma

$$T_k^{hidro} = \frac{\omega - i\mu}{\omega^2 + \mu^2} (4.5)k\omega \left(\frac{k_y^2}{k^2} + Y_r + iY_i \right) \quad (B.7)$$

donde μ es un término de relajación asociado a un factor de atenuación, K_y es la componente número de onda en la dirección de alcance del radar y $Y_r + iY_i$ representa la modulación del viento sobre la superficie de las olas con longitudes largas (swell).

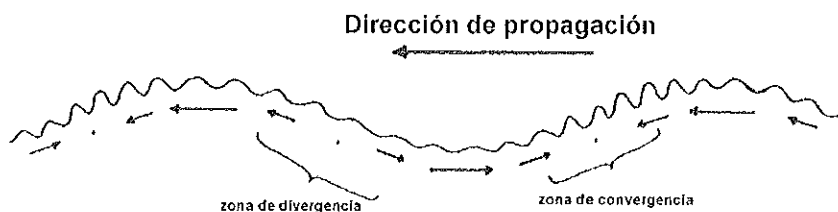


Figura B.3- Modulación hidrodinámica. Modificada de Robinson (1985).

Efectos por Movimiento

La combinación de las funciones de modulación por inclinación e hidrodinámica (T^{tilt} , T^{hidro}) dan como resultado la función de transferencia RAR (Radar de Apertura Real)

$$T^R = T^{tilt} + T^{hidro} \quad (B.8)$$

la cual describe el proceso de formación de imagen por un radar de apertura real. En adición a estos dos mecanismos existe un tercer mecanismo de modulación asociado al proceso de formación de imagen para un radar de apertura sintética (SAR). Este

mecanismo hace uso de la información de fase del SAR para ubicar la posición acimutal de los elementos reflectores en la escena. Sin embargo, el movimiento orbital de las olas le añade un corrimiento Doppler a esta señal, el cual es interpretado erróneamente por el procesador, desplazando acimutalmente el reflector en el plano de la imagen (Raney, 1971). El movimiento oscilatorio de un campo de olas produce desplazamientos acimutales alternantes de los reflectores en la superficie del océano, resultando en variaciones de la densidad aparente de reflectores en el plano de la imagen SAR y produciendo patrones ondulatorios que son interpretados como oleaje (Robinson, 1985) (ver Figura B.4). A este proceso se le denomina agrupamiento por velocidad (velocity bunching). En teoría éste proceso posibilitaría la detección de las olas en imágenes de SAR aun cuando T^R fuera muy pequeña.

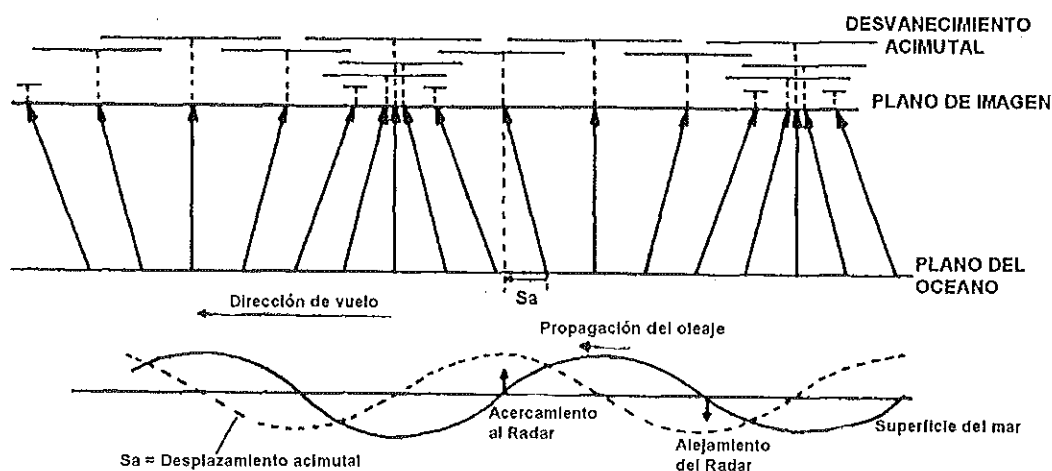


Figura B.4- Agrupamiento por velocidad. Modificado de Robinson (1985).

Si el desplazamiento acimutal ξ fuera pequeño comparado con la longitud de onda del oleaje predominante, entonces el efecto del agrupamiento podría considerarse lineal. Sin embargo, si el desplazamiento es similar o mayor que la longitud de las olas, entonces los patrones de oleaje observados en la imagen serán distorsionados (inclusive pueden ser desvanecidos completamente) debido a las limitaciones en el tiempo de coherencia impuestas por el SAR (Raney, 1980). Esta distorsión aumentará conforme aumente la velocidad orbital de los reflectores, limitando la resolución acimutal del SAR a un determinado número de onda (cutt-off wavenumber). En el dominio lineal (ver Figura B.5), la función de modulación por agrupamiento está dada por

$$T_k^{vb} = -i\beta k_x T_k^v \quad (\text{B.9})$$

donde

$$T_k^v = -\omega \left[\text{sen}(\theta) \frac{k_l}{k} + i \cos(\theta) \right] \quad (\text{B.10})$$

denota la velocidad de los reflectores en la dirección de alcance del radar.

El desplazamiento acimutal ξ de un reflector es proporcional a la componente de velocidad orbital del oleaje en dirección del radar (v) y a la razón de su distancia al radar R con respecto a la velocidad V del satélite

$$\xi = \beta v \quad (\text{B.11})$$

donde

$$v = \sum_k T_k^v Z_k \exp[i k r] + c.c. \quad (B.12)$$

y

$$\beta = \frac{R}{V} \quad (B.13)$$

En resumen, el espectro direccional de una imagen SAR estará dado por la expresión

$$P_k = |T_k^s|^2 F_k \quad (B.14)$$

donde F_k es el espectro direccional del oleaje y T_k^s es la función de transferencia SAR que involucra los tres mecanismos de modulación que intervienen en la formación de la imagen

$$T_K^S = T_K^R + T_K^{vb} \quad (B.15)$$

En la Figura B.5 se muestra la dependencia de las tres funciones de transferencia según el ángulo de aproximación de las olas con respecto a la dirección acimutal. La contribución de T^{vb} es nula en el proceso de detección de las olas cuando éstas viajan en la dirección de iluminación del radar (90°), y alcanza su máximo en la dirección acimutal. Por otra parte, las contribuciones de T^{tilt} y T^{hydro} serán máximas en la dirección de iluminación del radar (alcance), mientras que en dirección acimutal serán

prácticamente nulas. Existe un estrecho intervalo angular en el cual las tres funciones de transferencia se comportan linealmente. Sin embargo, en la mayoría de los casos los mecanismos de modulación contribuyen de manera no lineal en el proceso de formación de la imagen, imposibilitando la representación de la superficie de un mar en movimiento mediante una función de transferencia lineal. Bajo estas circunstancias debemos considerar el caso no lineal como se explica en el Capítulo 4 de este trabajo.

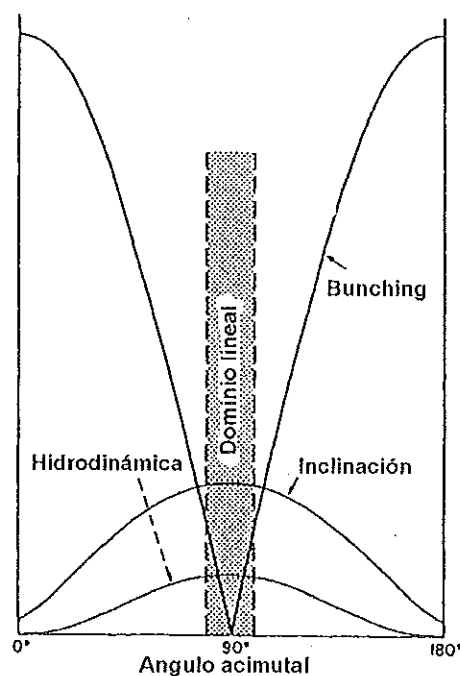


Figura B.5- Dependencia acimutal de los tres mecanismos de modulación. Tomado de Alpers et al (1981).

Apéndice C

Descripción de las Imágenes Utilizadas

El propósito de este apéndice es presentar una descripción general de las imágenes de SAR utilizadas en este trabajo. Como se menciona en el Capítulo 3, las imágenes fueron adquiridas por medio del proyecto “Wind, Waves and Mixing in the Coastal Zone” (ESA A03-379) patrocinado por la Agencia Espacial Europea (ESA) y forman parte de un acervo de imágenes existente en el Laboratorio de Oleaje del Departamento de Oceanografía Física, en la División de Oceanología del CICESE. El acondicionamiento y procesamiento de las imágenes fue llevado a cabo en el Laboratorio de Análisis Digital de Imágenes del Departamento de Ciencias de la Computación, en la División de Física Aplicada del CICESE. En la Tabla C.I se muestra la información más relevante sobre las imágenes utilizadas. Todas estas imágenes son productos ERS-2.SAR.PRI adquiridos por el radar en modo imagen, con una resolución nominal de 12.5 m por píxel y un cubrimiento de 100 km por 100 km aproximadamente (ESA, 1992).

Tabla C.I.- Información sobre las imágenes de SAR utilizadas.

Imagen		Adquisición		Coordenada Central	
Órbita	Marco	Fecha	Hora (UTC)	Latitud	Longitud
19019	2961	9-Dic-1998	18:26:08	32° 4' 12"	116° 51' 36"
20293	2961	8-Mar-1999	18:29:01	32° 4' 12"	117° 34' 48"
24029	2961	24-Nov-1999	18:26:08	32° 4' 12"	116° 51' 36"

En la Lámina C.1 se muestra la imagen correspondiente a la órbita 19019. Aproximadamente el 50% del cubrimiento de esta imagen corresponde a superficie marina y el 50% restante corresponde a superficie continental. La región con zonas brillantes en el extremo superior izquierdo corresponde a la región conurbada de Tijuana y San Isidro, California, destacando la traza del Río Tijuana como un lineamiento oscuro en dirección noroeste-sureste, y una estructura triangular en su extremo oeste correspondiente al Estuario del Río Tijuana. En el extremo inferior derecho destaca la Península de Punta Banda, delimitando por su parte sur a la Bahía de Todos Santos.

Justo a la derecha del centro de la imagen aparece una región de brillo intermedio y con forma romboidal, correspondiente a la zona del Valle de Guadalupe. El resto de la superficie continental es dominada por patrones con forma de facetas triangulares, originadas por efecto del terreno montañoso en la reflexión de la señal del radar.

En el margen superior izquierdo se aprecia el archipiélago de las Islas Coronado, el cual se localiza justo al oeste de la región costera de Rosarito, Baja California.

Siguiendo la línea de costa, destacan por su prominencia: Punta el Descanso en el primer cuarto superior, Punta Salsipuedes justo en el centro de la imagen, siguiéndole Punta San Miguel, la Bahía de Ensenada, y las Islas de Todos Santos en el extremo noroeste de la península de Punta Banda.

En esta imagen la zona costera está dominada por un oleaje bien definido, con longitudes de onda larga, y una dirección característica proveniente del oeste-noroeste.

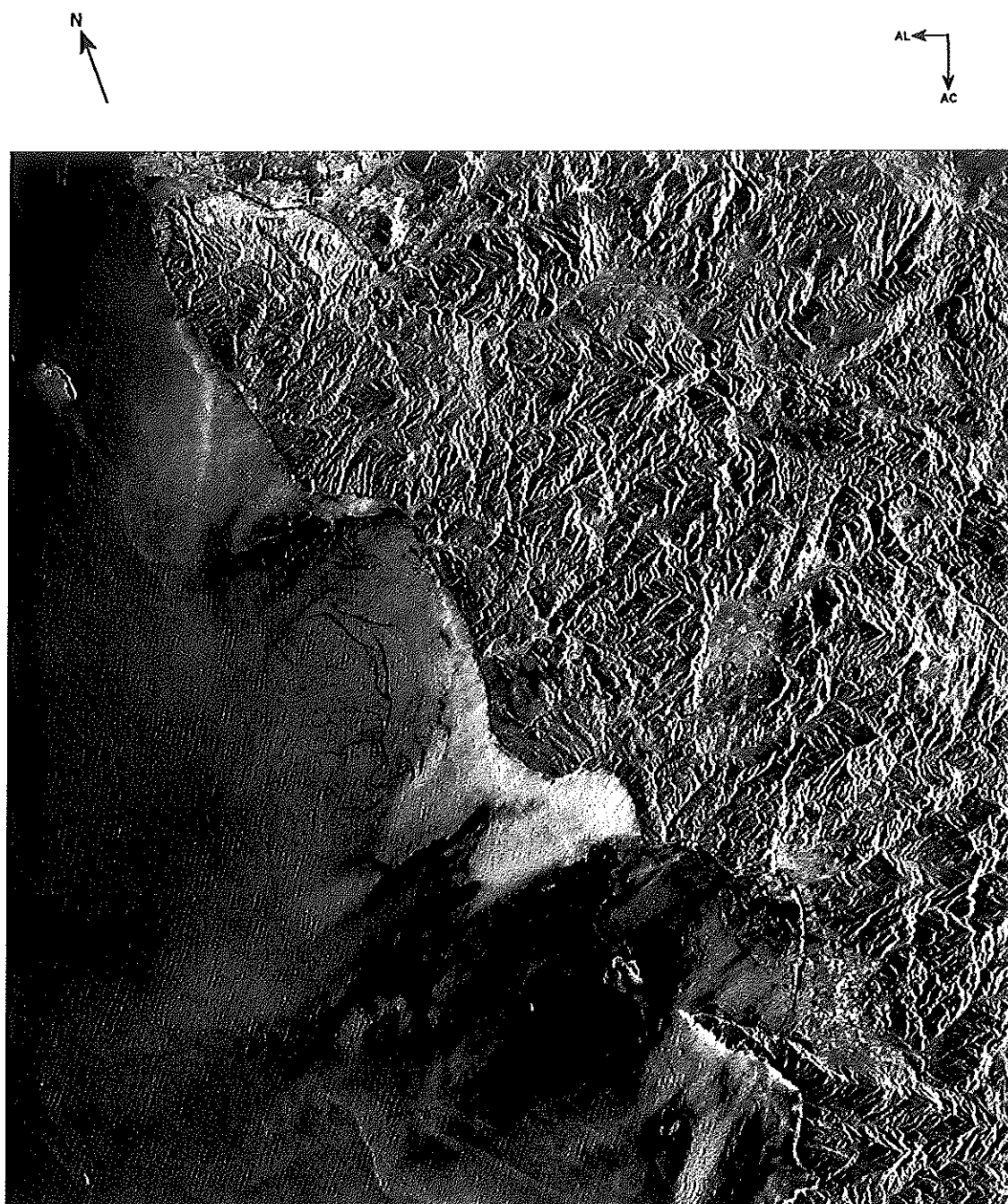


Lámina C.1.- Imagen ERS-2.SAR (órbita 19019, marco 2961) de la región costera del noroeste de Baja California, adquirida el 9 de Diciembre de 1998 a las 18:26 UTC. El cubrimiento total de la imagen es de 100 km por 100 km. La resolución nominal por píxel es de 12.5 m por 12.5 m. En la parte superior de la imagen se muestra la dirección del norte geográfico, así como la dirección de iluminación del radar (AL) y de vuelo del satélite (AC). Ver descripción de la imagen en el texto. © ESA 1998.

Debido a su alto nivel de brillo, a lo largo de la línea de costa se pueden distinguir algunas zonas influenciadas fuertemente por el viento. El caso más evidente es la zona de Bahía Salsipuedes, la cual posiblemente está influenciada por una condición de viento Santa Ana durante la adquisición de la imagen. Por el contrario, en la zona del Puerto de Ensenada, así como en las regiones alrededor y al oeste de las Islas Todos Santos y al sur de Punta Banda, las condiciones prevalecientes del viento son de baja intensidad. De igual manera, la zona sombreada en la esquina superior izquierda, al norte de las Islas Coronado, manifiesta una condición de viento de baja intensidad.

Los listados que aparecen al sur de Punta el Descanso y al oeste de Punta Salsipuedes podrían ser de origen natural, como resultado de procesos biológicos asociados al plankton. Lo anterior se deduce por su orientación con respecto al régimen del oleaje local. Los puntos brillantes en la esquina inferior izquierda y al oeste de las Islas Todos Santos son embarcaciones.

En la Lámina C.2 se muestra la imagen correspondiente a la órbita 20293. Aunque el centro de esta imagen tiene la misma latitud geográfica que las otras dos imágenes, su centro está recorrido aproximadamente 43' hacia el oeste. Por este motivo en la esquina superior derecha se observan las Islas Coronado y un segmento de la línea de costa entre Rosarito y Punta el Descanso.

Debido a que esta imagen tiene un mayor cubrimiento de la zona costera, el primer tercio superior de la imagen fue utilizado para llevar a cabo el análisis sobre la evolución espacial del oleaje en la región costera.

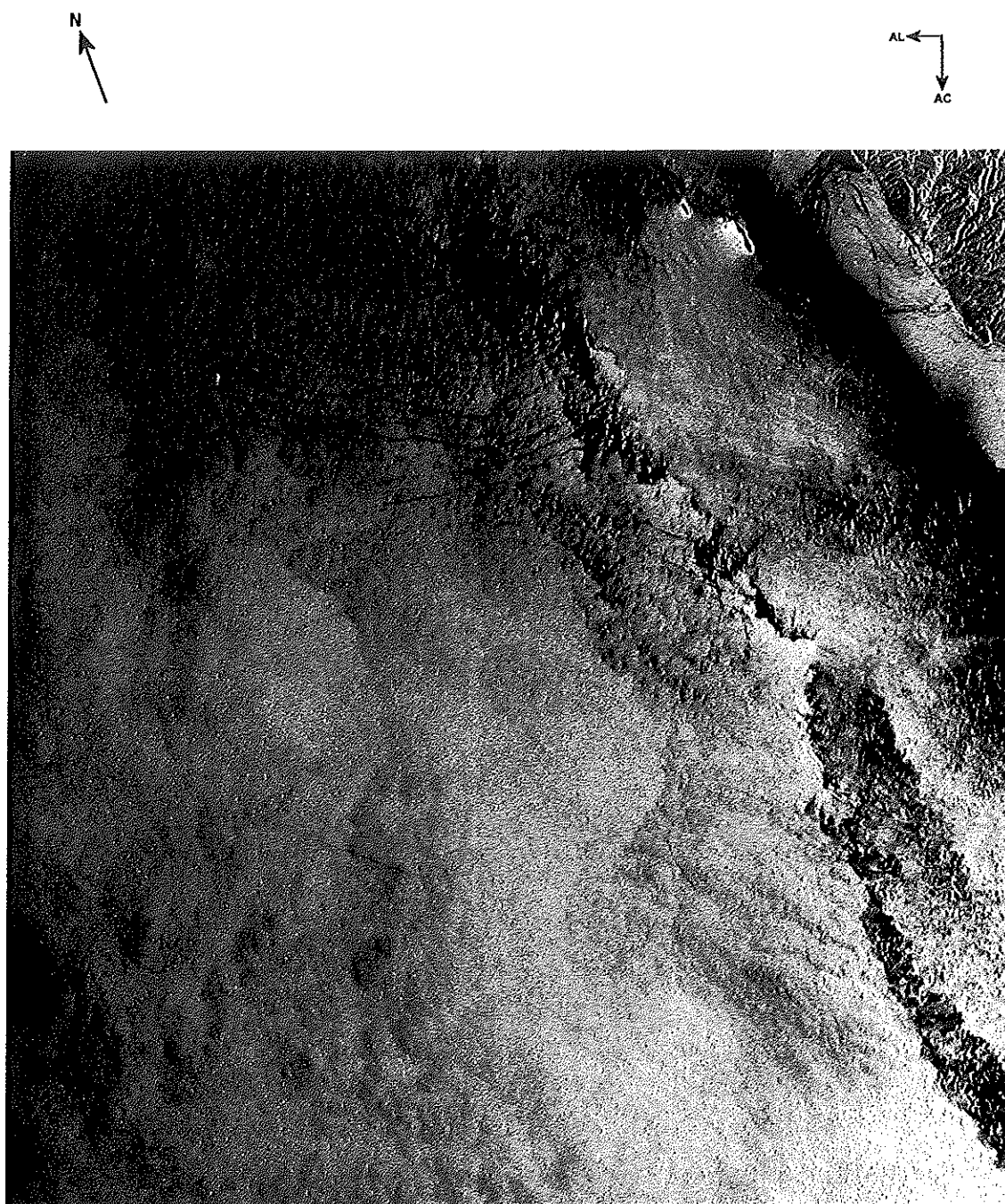


Lámina C.2.- Imagen ERS-2.SAR (órbita 20293, marco 2961) de la región costera del noroeste de Baja California, adquirida el 8 de Marzo de 1999 a las 18:29 UTC. El cubrimiento total de la imagen es de 100 km por 100 km. La resolución nominal por píxel es de 12.5 m por 12.5 m. En la parte superior de la imagen se muestra la dirección del norte geográfico, así como la dirección de iluminación del radar (AL) y de vuelo del satélite (AC). Ver descripción de la imagen en el texto. © ESA 1999.

De las 3 imágenes disponibles con esta cobertura, la imagen correspondiente a la órbita 20293 presentó la mejor calidad visual, mostrando con mayor claridad patrones de oleaje propagándose hacia la costa. En esta imagen se pueden apreciar estructuras relacionadas con frentes atmosféricos y/o oceánicos, así como zonas con vientos de baja intensidad y algunos listados en la región cercana a la costa.

La estructura más notoria en esta imagen es una franja oscura, asociada a viento de baja intensidad, con dirección noroeste-sureste, ubicada entre la línea de costa y las Islas Coronado.

La disponibilidad de sustancias hidrofóbicas, constituyentes de los listados presentes en la imagen, puede deberse a la ocurrencia de una floración primaveral, originada por un posible proceso de surgencia asociado al borde de la plataforma.

La región suroeste de la imagen está dominada por estructuras posiblemente relacionadas con celdas de viento, lo cual se manifiesta en el alineamiento de algunos filamentos y estrías de viento en la parte centro-inferior de la imagen. El incremento en el nivel de brillo hacia el extremo inferior derecho de la imagen puede deberse al incremento en la velocidad del viento y a la cercanía con la fuente de iluminación del radar. El punto brillante en el centro del cuadrante superior izquierdo de la imagen es una embarcación.

En la Lámina C.3 se muestra la imagen correspondiente a la órbita 24029. Esta imagen tiene la misma ubicación geográfica que la órbita 19019 y ambas fueron tomadas bajo condiciones estacionales similares. Debido a lo anterior, la zona continental muestra características de reflexión similares a las de la órbita 19019.

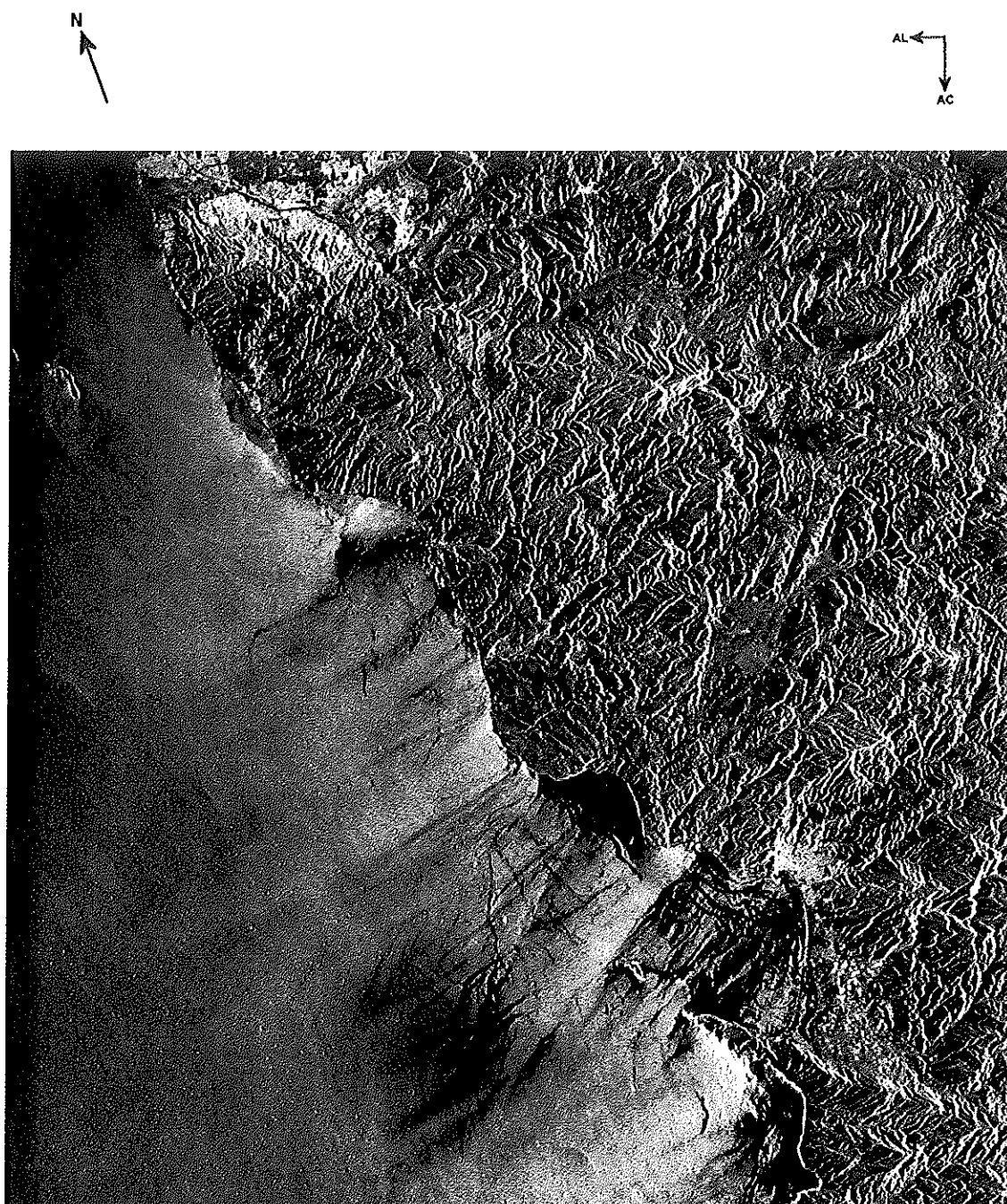


Lámina C.3.- Imagen ERS-2.SAR (órbita 24029, marco 2961) de la región costera del noroeste de Baja California, adquirida el 24 de Noviembre de 1999 a las 18:26 UTC. El cubrimiento total de la imagen es de 100 km por 100 km. La resolución nominal por píxel es de 12.5 m por 12.5 m. En la parte superior de la imagen se muestra la dirección del norte geográfico, así como la dirección de iluminación del radar (AL) y de vuelo del satélite (AC). Ver descripción de la imagen en el texto. © ESA 1999.

Sin embargo la región costera muestra diferentes características debido a diferencias en el régimen de vientos.

La característica más relevante es la presencia de algunas zonas con viento de baja intensidad al oeste de la Península de Punta banda, así como en algunos sitios de abrigo al sur de algunas de las estructuras más sobresalientes, como son Punta Salsipuedes, la Península de Punta Banda, y el interior de la Bahía de Todos Santos.

Se observa la presencia de listados oscuros en regiones cercanas a la línea de costa, principalmente en el interior de la bahía, por lo cual se puede suponer que en parte su origen provenga de la actividad humana a lo largo de la costa.

En términos generales, toda la región marina muestra un oleaje bien definido, con longitud de onda y dirección característica, proveniente del oeste-noroeste.

El punto brillante en el centro inferior de la imagen es una embarcación.