

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA**

**FACULTAD DE CIENCIAS MARINAS**

**“ANÁLISIS DE UNA IMAGEN SAR APLICANDO  
LAS TRANSFORMADAS RADON Y WAVELET  
PARA MEJORAR LA VISUALIZACIÓN DE  
ONDAS SUPERFICIALES E INTERNAS EN EL  
OCÉANO”**

**TESIS DE LICENCIATURA**

Que para obtener el título de

**O c e a n ó l o g o**

Presenta:

**Bernardo Esquivel Trava**

**Ensenada, B. C., Junio del 2004**

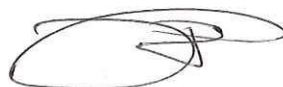
## RESUMEN

Con el propósito de mejorar la visualización de las señales de oleaje y ondas internas y otras señales que aparecen en imágenes de la superficie del mar adquiridas por un radar de apertura sintética (SAR) mediante la eliminación del ruido, en el presente trabajo se propone una metodología para su análisis, aplicando de forma combinada las transformadas Radon y Wavelet 1-D. Para el caso de señales de oleaje se utilizó una imagen SAR, del satélite ERS-2, de la Bahía de Todos Santos, Baja California, donde se encontró que la metodología propuesta puede mejorar la visualización de las olas siendo más eficiente en señales que presenten oleaje (swell) sin modificaciones debidas a la batimetría y efectos por difracción por bordes debido a islas. En el caso de señales de ondas internas se utilizó una imagen SAR ERS-1 del Golfo de Tehuantepec, donde se encontró que la metodología propuesta mejora la visualización de señales de ondas internas obteniendo información más clara del fenómeno.

**“ANÁLISIS DE UNA IMAGEN SAR APLICANDO LAS  
TRANSFORMADAS RADON Y WAVELET PARA  
MEJORAR LA VISUALIZACIÓN DE ONDAS  
SUPERFICIALES E INTERNAS EN EL OCÉANO.”**

**T E S I S  
QUE PRESENTA:  
BERNARDO ESQUIVEL TRAVA**

Aprobada por:



---

Presidente del Jurado  
Dr. Rafael Hernández Walls



---

Sinodal Propietario  
Dr. Francisco Javier Ocampo  
Torres



---

Sinodal Propietario  
Dr. José Antonio Martínez  
Alcalá

## AGRADECIMIENTOS

A mis padres, Rafael F. Esquivel Méndez y Rosa Elena Trava Bolio, por su ejemplo, cariño y apoyo incondicional que me dieron durante mi infancia y mi desarrollo profesional.

A mis hermanos Cynthia y Rafa, por no influir en mi manera de ser.

A mis abuelas Moza y Catita por el cariño que siempre me demostraron y que nunca olvidare.

A mi director Rafael Hernández Walls, por sus excelentes clases, que determinaron mi gusto por la física del mar; por la oportunidad y confianza que hicieron posible la realización de este trabajo y mi desarrollo profesional.

A mis sinodales Francisco Ocampo y Antonio Martínez por sus críticas y el apoyo que me dieron durante la elaboración de este trabajo.

A la Facultad de Ciencias Marinas (UABC), maestros y trabajadores, que hacen posible que la educación en México tenga futuro.

A Edgar Escalante por facilitarme los programas que hicieron posible el desarrollo de este trabajo y al grupo de Oc. Física del CICESE por su apoyo y comentarios.

A Socorro, por su amor y aceptarme tal y como soy.

Y por supuesto no por ser los últimos los menos importantes, sino todo lo contrario, a Vlad, Sanx, Amilcar, Diego, Charro, Diane y la demás banda, por su excelente amistad y hacer de esta carrera algo mas que estudio.

## ÍNDICE

<b>1. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
<b>1.1 IMÁGENES DE LA SUPERFICIE DEL MAR ADQUIRIDAS POR UN RADAR DE APERTURA SINTETICA.....</b>	<b>2</b>
1.1.1 Obtención de la imagen.....	2
1.1.2 Procesamiento Multi-Look.....	5
1.1.3 Representación de las imágenes SAR.....	5
1.1.4 Correcciones radiométricas.....	6
1.1.5 Características generales de una imagen SAR.....	9
<b>1.2 El Oleaje y las Ondas Internas en imágenes SAR.....</b>	<b>9</b>
1.2.1 Oleaje.....	10
1.2.2 Ondas Internas.....	12
<b>1.3 Transformaciones Matemáticas.....</b>	<b>13</b>
1.3.1 Transformada Radon.....	14
1.3.2 Transformada Wavelet.....	15
<b>1.4 Antecedentes.....</b>	<b>18</b>
<b>1.5 Planteamiento del Trabajo.....</b>	<b>20</b>
<b>2. OBJETIVOS.....</b>	<b>21</b>
<b>2.1 Generales.....</b>	<b>21</b>
<b>2.2 Particulares.....</b>	<b>21</b>
<b>3. MATERIALES Y METODOS.....</b>	<b>22</b>
<b>3.1 Área de Estudio.....</b>	<b>22</b>
<b>3.2 Metodología.....</b>	<b>23</b>
3.2.1 Análisis Radon.....	23

3.2.2 Análisis Wavelet 1-D.....	24
3.2.3 Reconstrucción de la Imagen.....	25
<b>4. RESULTADOS.....</b>	<b>27</b>
4.1 <b>Swell</b> (Imagen Bahía de Todos Santos).....	27
4.1.1 Subimagen 2 (S2-BTS).....	28
4.1.2 Subimagen 1 (S1-BTS).....	39
4.2 <b>Ondas Internas</b> (Imagen Golfo de Tehuantepec).....	49
4.2.1 Subimagen 1 (S1-GT).....	50
<b>5. DISCUSIÓN.....</b>	<b>60</b>
<b>6. CONCLUSIONES.....</b>	<b>67</b>
<b>REFERENCIAS.....</b>	<b>68</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.- Geometría básica de obtención de imágenes SAR.....	3
Figura 2.- Intervalo de apertura sintética.....	4
Figura 3.- Ejemplo de "looks" = 3. ....	5
Figura 4.- Representación del píxel en formato complejo.....	6
Figura 5.- Algunos procesos que intervienen en las observaciones del oleaje mediante radares. ....	12
Figura 6.- Representación de las ondas internas (adaptado de Haury et al. 1979).....	13
Figura 7.- Ejemplo de cómo integra TR una imagen en la dirección $\theta$ . Las líneas paralelas son las integrales con las que se obtiene la proyección en dirección $\theta$ .....	15
Figura 8.- (a) Serie a la cual se le aplico la transformada Wavelet 1D. (b) Espectro de poder Wavelet de (a), los contornos de color negro encierran regiones mayores al 95% de nivel de confianza. La línea cóncava indica el "cono de influencia", la información por debajo de esta es dudosa. (c) Espectro Wavelet global, la línea punteada indica el 95% nivel de confianza, toda energía que este arriba es significativa. (d) Señal después de un filtro pasa banda > 14m. ....	17
Figura 9.- Localización de las imágenes utilizadas.....	22
Figura 10.- Esquema de la metodología propuesta para el análisis de una imagen SAR-ERS .....	26

Figura 11.- Imagen de la Bahía de Todos Santos, los recuadros azules son las subimágenes tomadas para hacer el análisis. ....	27
Figura 12.- Subimagen 2 BTS, origen (2560,6720) .....	28
Figura 13.- Transformada radon de S2-BTS. La barra de colores indica intensidad.....	30
Figura 14.- Análisis W1D de las proyecciones de 94°, cada 2°, a la de 100°. Los incisos (a) son las señales de cada proyección. Los incisos (b) son los espectros de poder Wavelet correspondientes a cada señal (a). Los incisos (c) son los espectros Wavelet globales. ....	31
Figura 15.- Similar a figura 14 pero para las proyecciones de 102°, cada 2°, a la de 108° .....	32
Figura 16.- Similar a figura 14 pero para las proyecciones de 110°, cada 2°, a la de 1116° .....	33
Figura 17.- Transformada radon de S2-BTS después de aplicarle el filtro W1D de 160 m a 400 m de longitud. ....	34
Figura 18.- Subimagen S2-BTS después del análisis RW1D con un filtro pasa-banda de 200 a 400 m .....	35
Figura 19.- a) Espectro direccional (FFT) de S2-BTS; los círculos azules representan las localizaciones de las componentes del oleaje con 400m, 200m y 100m de longitud de onda. b) Espectro direccional de S2-BTS filtrada. ....	36
Figura 20.- En la parte superior se muestran las imágenes con los transectos marcados. a) Espectro Wavelet de poder para el transecto de la imagen original. b) Comparación de transectos obtenidos de las subimágenes S2-	

BTS original y filtrada. c) Espectro de poder Wavelet para el transecto de la imagen filtrada. A la derecha de (a) y (c) se encuentra los espectros globales correspondientes.....	38
Figura 21.- Subimagen 1 BTS, origen (2560,5600) .....	39
Figura 22.- Transformada radon de S1-BTS .....	40
Figura 23.- Análisis W1D de las proyecciones que contiene picos entre las longitudes de onda de 180 m y 250 m. Los incisos (a) son las señales de cada proyección. Los incisos (b) son los espectros de poder Wavelet correspondientes a cada señal (a). Los incisos (c) son los espectros Wavelet globales.....	41
Figura 24.- Similar a figura 23 pero para las proyecciones, entre los 88° y 96°, que contiene picos entre las longitudes de onda de 180 m y 250 m. ...	42
Figura 25.- Similar a figura 23 pero para las proyecciones, entre los 88° y 96°, que contiene picos entre las longitudes de onda de 180 m y 250 m. ...	43
Figura 26.- Transformada radon filtrada de S1-BTS.....	44
Figura 27.- Espectro direccional (FFT) de S1-BTS; los círculos azules representan las localizaciones de las componentes del oleaje con 400m, 200m y 100m de longitud de onda. ....	45
Figura 28.- Subimagen 1 BTS filtrada. ....	46
Figura 29.- Espectro de energía (FFT) de S1-BTS filtrada, los círculos azules representan las localizaciones de las componentes del oleaje con 400m, 200m y 100m de longitud de onda. ....	47
Figura 30.- Comparación de transectos obtenidas de la subimagen S1-BTS original y filtrada. En la parte superior se muestran los transectos para cada	

imagen. a) Espectro Wavelet de poder para el transecto de la imagen original. b) Espectro de poder Wavelet para el transecto de la imagen filtrada. A la derecha de (a) y (c) se encuentra los espectros globales correspondientes.....	48
Figura 31.- Bahía de Todos Santos con las subimágenes filtradas 1 y 2 sobrepuestas. ....	49
Figura 32.- Imagen del Golfo de Tehuantepec los recuadros azules son las subimágenes tomadas para hacer el análisis.....	50
Figura 33.- Subimagen 1 del Golfo de Tehuantepec donde se observa un paquete de 8 a 9 OI. La "textura" granulosa que se observa en toda la imagen esta asociada al ruido speckle.....	51
Figura 34.- Transformada Radon de S1-GT, la barra de colores indica la intensidad.....	52
Figura 35.- Análisis W1-D de las proyecciones de 34°, cada 2°, a la de 40°. Los incisos (a) son las señales de cada proyección. Los incisos (b) son los espectros de poder Wavelet correspondientes a cada señal (a); los contornos rojos indican picos de mucha energía y decrecen los valores hacia el azul. ....	53
Figura 36.- Similar a la figura 35 pero para las proyecciones de 42°, cada 2°, a la de 48°.....	54
Figura 37.- Similar a la figura 35 pero para las proyecciones de 50°, cada 2°, a la de 56°.....	55
Figura 38.- Transformada Radon filtrada de S1-GT, la barra de colores indica la intensidad de las proyecciones ( $\theta$ ). ....	56

Figura 39.- Subimagen 1-GT filtrada, las bandas de color claro corresponden a las cresta de los valles y las bandas de color oscuro corresponden a los valles..... 57

Figura 40 a) Espectro direccional (FFT) de S1-GT; los círculos azules representan las localizaciones de las componentes del oleaje con 400m, 200m y 100m de longitud de onda. b) Espectro direccional de S1-GT filtrada. .... 58

Figura 41 Comparación de transectos obtenidas de la S1-GT original y filtrada. En la parte superior se muestran los transectos para cada imagen. a) Espectro Wavelet de poder para el transecto de la imagen original. b) Espectro de poder Wavelet para el transecto de la imagen filtrada. A la derecha de (a) y (c) se encuentra los espectros globales correspondientes. .... 59

Figura 42 Señal de ondas internas en la imagen del Golfo de Tehuantepec., con las subimágenes filtradas superpuestas. .... 60

Figura 43 Comparación entre un método de análisis local y el método RW1D, en la subimagen S1-BTS. a) Espectro wavelet del transecto de la imagen con el filtro Wiener. b) Perfil de los transectos para cada imagen. El perfil de color negro corresponde al transecto de la imagen original mostrado en la figura 30. b) Espectro Wavelet para el transecto de la imagen filtrada con el método RW1D. .... 62

Figura 44 Comparación entre un método de análisis local y el método RW1D, en la subimagen S2-BTS. a) Espectro wavelet del transecto de la imagen con el filtro Wiener. b) Perfil de los transectos para cada imagen. El

perfil de color negro corresponde al transecto de la imagen original mostrado en la figura 20. b) Espectro Wavelet para el transecto de la imagen filtrada con el método RW1D. ....	63
Figura 45 Comparación entre un método de análisis local y el método RW1D, en la subimagen S2-GT. a) Espectro wavelet del transecto de la imagen con el filtro Wiener. b) Perfil de los transectos para cada imagen. El perfil de color negro corresponde al transecto de la imagen original mostrado en la figura 41 figura 30. b) Espectro Wavelet para el transecto de la imagen filtrada con el método RW1D.....	64

## 1. INTRODUCCIÓN

El oleaje es la principal fuente de energía en el océano que provoca grandes cambios en la línea de costa. Las ondas internas son uno de los fenómenos a nivel mesoescala más importantes en el océano, inician la resuspensión de sedimento en el fondo y la mezcla de nutrientes a la zona fótica, además de poseer gran energía que puede tener un poder destructivo en las construcciones marinas, como las plataformas petroleras. Estos fenómenos afectan directamente a las actividades humanas que pueden ser, de carácter turístico, industrial o habitacional, por lo que su estudio es de vital importancia para un buen desarrollo y manejo de las zonas costeras.

Existen diversos métodos para obtener datos en el océano, como los muestreos "in-situ", con sensores que obtienen datos puntuales brindando valiosa información en el dominio del tiempo, con la desventaja de que si se requiere obtener una distribución espacial, se necesitaría un mayor número de sensores, lo que aumentaría el costo y el tiempo del trabajo, que muchas veces son el principal impedimento en los proyectos de investigación.

A través del avance tecnológico en los sistemas de percepción remota se ha logrado obtener información de áreas grandes del océano en intervalos cortos de tiempo. Los satélites ERS (European Remote-sensing), contruidos por la industria europea bajo gestión de la Agencia Espacial Europea, estaban dotados de un sistema activo de microondas que puede

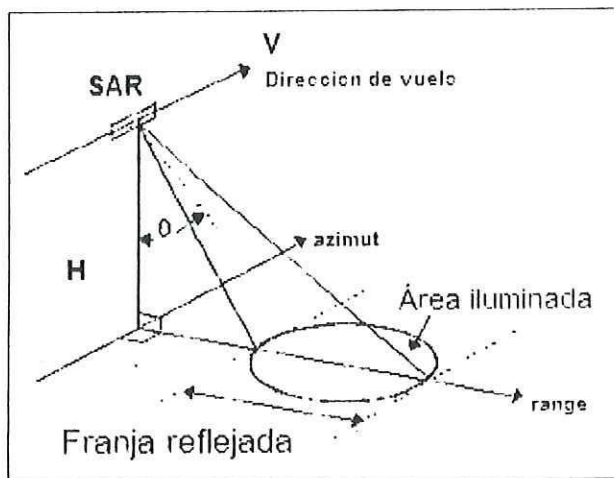
obtener datos de la superficie del mar atravesando gruesas masas nubosas y durante la noche; dentro de los sensores con los que cuentan están: el difusómetro (scatterómetro), que detecta la dirección y la velocidad del viento; el altímetro, que puede medir la altura del nivel del mar; el radar de apertura sintética (Synthetic Aperture Radar o SAR) que obtiene imágenes de la superficie.

### **1.1. IMÁGENES DE LA SUPERFICIE DEL MAR ADQUIRIDAS POR UN RADAR DE APERTURA SINTÉTICA**

La interpretación de una imagen adquirida por un radar de apertura sintética es muy distinta a la de una imagen de un sensor óptico o infrarrojo. Estas imágenes proporcionan datos relacionados con la rugosidad de la superficie. Por ejemplo, la superficie del mar con olas medias o altas constituye una superficie rugosa; un mar en calma o con pequeñas olas representa una superficie lisa.

#### **1.1.1. Obtención de la imagen**

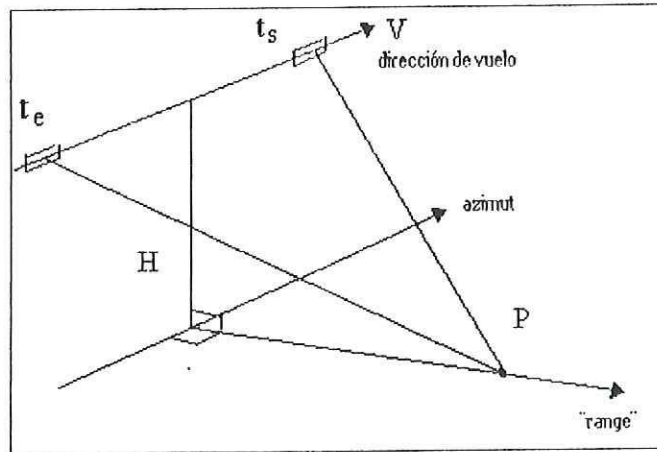
En la figura 1 se muestra la geometría básica del sistema del radar de apertura sintética para la obtención de imágenes de la superficie del mar; la plataforma (avión o satélite), con el radar, se desplaza a una velocidad  $V$  en relación al suelo, a una altura  $H$  y orientando la antena lateralmente con un ángulo  $\theta$  en relación al nadir.



**Figura 1.-** Geometría básica de obtención de imágenes SAR.

A medida de que la plataforma se desplaza el transmisor envía pulsos a intervalos regulares de tiempo. El pulso transmitido es modulado linealmente en frecuencia (*chirp*), con una variación de frecuencia de  $f_{\min}$  a  $f_{\max}$ , conocida como ancho de banda del pulso,  $B_p = f_{\max} - f_{\min}$  y determina la resolución en la dirección perpendicular al vuelo (*range*).

Para explicar el funcionamiento del sistema de un radar de apertura sintética, imaginemos un punto "P" (figura 2) que entra en el campo visual de la antena en el instante  $t_e$ , y sale en el instante  $t_s$ . En este intervalo de tiempo ( $t_s - t_e$ ), el radar envía cierto número de pulsos, obteniendo N muestras del eco del punto P, mientras la plataforma SAR se desplaza a razón de  $V \cdot (t_s - t_e)$  metros, que se conoce como la longitud de la "Apertura Sintética".



**Figura 2.-** Intervalo de apertura sintética.

El eco reflejado de cada pulso enviado, sufre una variación de frecuencia (efecto Doppler) debido a la velocidad relativa entre la plataforma. La variación de frecuencia en el intervalo  $(t_e - t_s)$  es conocida como ancho de banda Doppler  $B_D$ . Las variaciones de frecuencia  $B_P$  y  $B_D$  influyen directamente en las resoluciones en dirección del *range* y del *azimut*: cuantos mayores sean las variaciones de frecuencia, menores serán las resoluciones en dirección del *range* y del *azimut*.

Para que la imagen SAR se genere se necesita procesar los datos (ecos) adquiridos por el sistema. Con la ayuda de computadoras es posible generar imágenes SAR digitales a través de algoritmos apropiados.

### 1.1.2. Procesamiento Multi-Look

Este proceso consiste en dividir la apertura sintética en vistas o "looks" (figura 3). La imagen final se compone por la media de las imágenes de cada *look*, generadas separadamente, suponiendo que las imágenes de cada *look* son estadísticamente independientes entre sí.

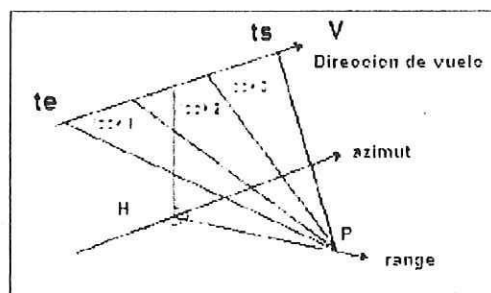


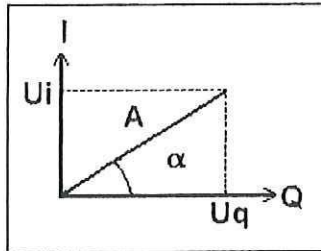
Figura 3.- Ejemplo de "looks" = 3.

De esta forma, la relación señal-ruido de la imagen final aumenta, disminuyendo el efecto del ruido *Speckle*. El procesamiento *multi-look* ocasiona una degradación en la resolución en dirección azimut, debido a que las imágenes de cada *look* poseen un ancho de banda menor al ancho total  $B_D$ , o sea:  $B_{look} = B_D / n_l$ ; donde  $n_l$  es igual al número de "looks".

### 1.1.3. Representación de las imágenes SAR

Las imágenes generadas de 1 *look* se proporcionan en números complejos, para que sea posible el conocimiento de la fase de cada píxel de la imagen. En la figura 4 se observa la representación del píxel en formato

complejo, donde  $U_q$  y  $U_i$  son las componentes real e imaginaria del píxel,  $A$  es el módulo del número complejo que representa la amplitud del píxel y  $\alpha$  la fase del píxel complejo.



**Figura 4.-** Representación del píxel en formato complejo.

Las imágenes *multi-look* normalmente son representadas en imágenes amplitud, o sea:  $A = \sqrt{U_i^2 + U_q^2}$ . Las imágenes amplitud también son conocidas como imágenes detectadas linealmente. También pueden ser representadas en Intensidad, o sea:  $I = U_i^2 + U_q^2$

#### 1.1.4. Correcciones radiométricas

La calidad radiométrica de los datos SAR es afectada por factores inherentes al instrumento y por la geometría de iluminación. Las dos causas principales de distorsiones radiométricas que perjudican la interpretación de las imágenes de radar son: el ruido "*speckle*" y el efecto del patrón de la antena.

### **a) Ruido *Speckle***

El ruido *Speckle* es uno de los principales factores que degradan la calidad de las imágenes SAR. Es un ruido multiplicativo proporcional a la intensidad de la señal recibida. El efecto visual de este ruido origina una textura granular que puede dificultar la interpretación de las imágenes de radar. Existen métodos para disminuir el ruido *Speckle*: como el procesamiento *multi-look*.

El ruido *Speckle* está siempre asociado a sistemas de obtención de imágenes coherentes, tales como, los obtenidos por microondas, láser y ultrasonografía. Se considera que en un píxel de resolución de una escena reflejada, existe un número muy grande de elementos difusores, aleatoriamente distribuidos, de tal forma que puedan interferir unos a los otros constructivamente y destructivamente, haciendo aparecer variaciones súbitas en la intensidad de la imagen, dando lugar al ruido *Speckle*.

### **b) Efecto del Patrón de Antena**

Las variaciones de baja frecuencia en el brillo de las imágenes en la dirección del *range* son causadas principalmente por la pérdida de potencia relacionada con la geometría de vista lateral, que decae con  $1/R^3$  en el caso de las imágenes adquiridas por un radar de apertura sintética, donde R es la distancia entre la antena y un punto dado en la imagen.

Esta pérdida de potencia se corrige en el instante de adquisición de cada pulso, a través del STC (Sensitivity Time Control), con la finalidad de corregir el decaimiento de la potencia. Debido a imperfecciones en el sistema STC u otras perturbaciones de la electrónica del radar y perturbaciones mecánicas o eléctricas, la corrección no es perfecta, permaneciendo alguna variación residual.

### **c) Distorsiones Geométricas**

Las variaciones de la elevación en la superficie o por el cambio de altitud de la plataforma (velocidad, dirección y altitud) provocan ciertas distorsiones. Las variaciones de la elevación en la superficie resultan en distorsiones conocidas como escorzo (*foreshortening*), inversión por relieve (*layover*) y sombreado.

La *inversión por relieve* ocurre cuando la punta de una montaña, por ejemplo, es reflejada antes que su base, causando la impresión de que se invierte del relieve, con las partes altas mapeadas como bajas y viceversa.

El *escorzo* ocurre cuando el área reflejada posee un relieve pronunciado. En este caso, las laderas orientadas para el nadir se presentan reducidas. La vista lateral ocasiona otro tipo de distorsión geométrica que hace que la imagen obtenida tenga una proyección inclinada con relación al suelo, ocasionando una compresión de la imagen. Esta compresión varía a

lo largo de la franja reflejada, cuanto más próximos del nadir estén los píxeles de la imagen, más comprimidos serán.

#### **1.1.5. Características generales de una imagen adquirida por un radar de apertura sintética.**

El radar de apertura sintética en los satélites ERS-1 y ERS-2 provee imágenes de la superficie de la tierra con una resolución 12.5 m por píxel. En el "modo de imagen" las imágenes son tomadas a lo largo de una franja de 100 km de ancho a la derecha del vuelo del satélite. El radar funciona en una frecuencia de 5.3 GHz, transmite y recibe la señal del radar en polarización vertical y ve la superficie de la tierra bajo un ángulo de incidencia centrado alrededor de 23 grados. A causa del alto volumen de datos (105 Mbit/s) no es posible el almacenamiento a bordo y las imágenes SAR sólo pueden ser adquiridas dentro de la zona de recepción por estaciones en tierra adecuadamente equipadas.

### **1.2. EL OLEAJE Y LAS ONDAS INTERNAS EN IMÁGENES SAR**

Las ondas superficiales y las ondas internas pueden ser estudiadas por el radar de apertura sintética, directa o indirectamente, debido a su interacción con las ondas superficiales de escala pequeña (ondas capilares), con longitudes de onda entre 1 cm a 30 cm, que son generadas por el viento local.

### 1.2.1. Oleaje

Una imagen de la superficie del océano, adquirida por un radar de apertura sintética, debe ser vista como un mapa del campo de ondas superficiales. Frecuentemente muestran patrones que se asemejan al oleaje, y esto lleva a la expectativa de usar la transformada de Fourier para obtener el espectro del oleaje con longitudes de onda mayores a 100 metros. Por esta razón, las imágenes son examinadas para determinar las condiciones en las cuales estas ondas pueden ser reflejadas, la correspondencia entre los patrones de olas en las imágenes y las olas en el mar y la exactitud con la que el espectro puede ser calculado.

El radar de apertura sintética no mide directamente la amplitud de la ola, solo mide la variación en la reflectividad de la superficie, todavía no hay un consenso completo en cuanto a los mecanismos exactos por los que las ondas son reflejadas y qué direcciones y longitudes de onda del oleaje son preferentemente reflejadas en las imágenes SAR.

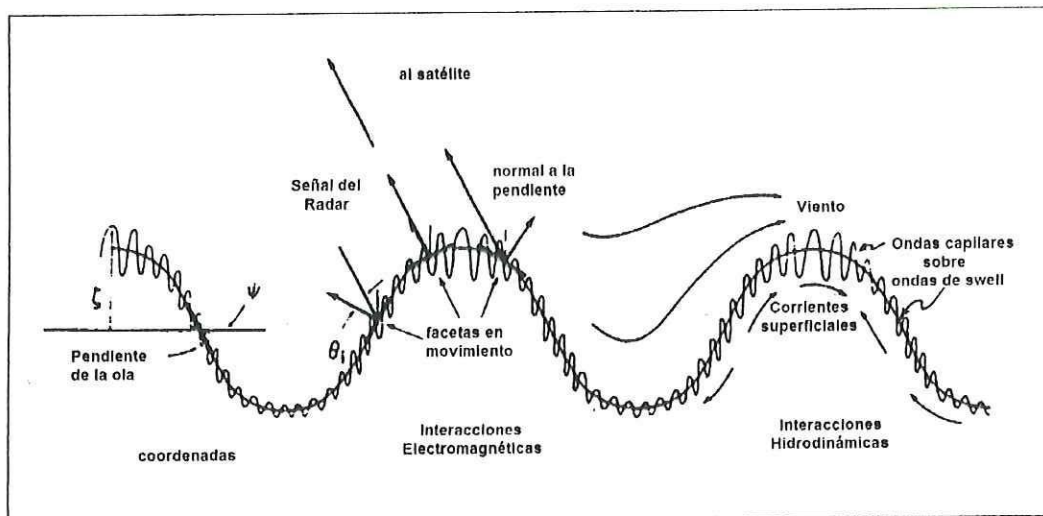
La variabilidad en las secciones transversales del radar son atribuidos principalmente a las interacciones hidrodinámicas y las interacciones electromagnéticas, entre las ondas capilares y las ondas de swell.

### **a) *Interacciones hidrodinámicas***

El mecanismo hidrodinámico incorpora todos los procesos de la dinámica de fluidos que modulan las ondas capilares que se propagan sobre las ondas de swell. La progresión del swell provoca una distribución no uniforme de las ondas capilares, dependiendo si se propagan en secciones donde el flujo superficial sea convergente o divergente (figura 5). Esto hace que el radar detecte variaciones en la rugosidad de la superficie del mar, que dan como resultado mapas de la superficie del mar. Los patrones de divergencia y convergencia son creados por las velocidades orbitales de las partículas de agua en la superficie. Estos movimientos superficiales afectan a las ondas capilares, aumentando su amplitud cerca de la cresta del swell y una reducción en la amplitud cerca del valle de la onda.

### **b) *Interacciones electromagnéticas***

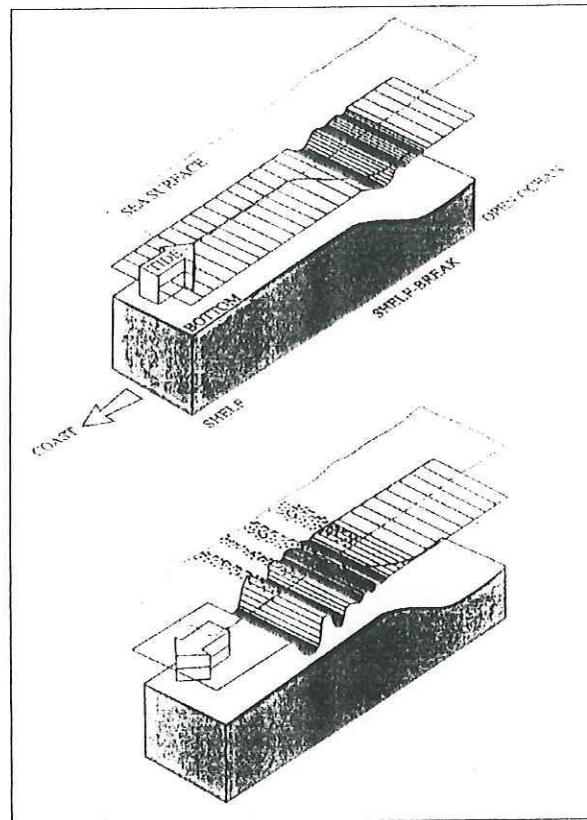
Las interacciones electromagnéticas son los mecanismos por los que el swell altera la manera en la cual responde el pulso del radar a la rugosidad de las ondas capilares, en función del ángulo de incidencia. A medida que la pendiente o inclinación de las ondas largas cambia, las ondas capilares se presentan en ángulos de incidencia diferentes al haz del radar. El efecto de la inclinación ocurre de manera independientemente de la modulación hidrodinámica.



**Figura 5.-** Algunos procesos que intervienen en las observaciones del oleaje mediante radares.

### 1.2.2. Ondas Internas

Paquetes de ondas internas, llamadas mareas internas ó solitones, ocurren comúnmente en imágenes SAR. Pueden ser observados en regiones marinas costeras con una pycnoclina estacional marcada. Estas mareas internas son generadas por la interacción de las corrientes de marea y por los cambios abruptos en la topografía del fondo (figura 6). Deben su existencia a los gradientes verticales de densidad en la columna de agua, particularmente en la interfaz entre dos capas de distinta densidad (picnolina). A diferencia de las ondas superficiales, las ondas internas no producen un cambio discernible en la elevación de la superficie del mar, por lo que solo pueden ser detectadas por las variaciones en la rugosidad de la superficie, debido a que causan flujos convergentes o divergentes en la superficie y eso comprime o estira las ondas capilares.



**Figura 6.-** Representación de las ondas internas (adaptado de Haury et al. 1979)

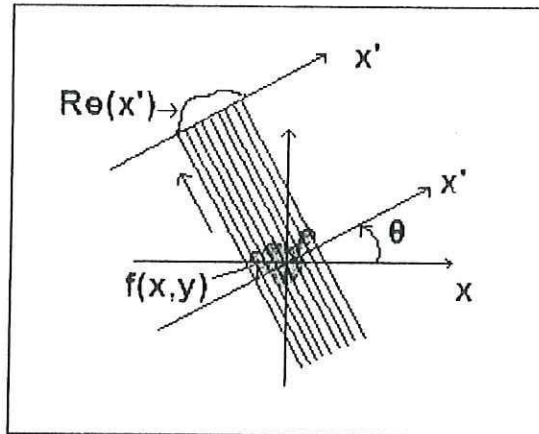
### 1.3. TRANSFORMACIONES MATEMÁTICAS

Al analizar una señal, comúnmente se requiere el uso de transformaciones para resaltar algún rasgo de la información. En imágenes las transformaciones matemáticas se aplican para obtener otra información que no esté fácilmente disponible en la señal cruda (Polikar, 19961). Por lo general se aplican a señales que contienen series de tiempo en su formato crudo, pero esta representación de la señal no es siempre la mejor, en

muchos casos la información más distinguida se encuentra en el contenido de la frecuencia de la señal, llamado espectro de frecuencias.

### 1.3.1. Transformada Radon

La transformada Radon (TR) es un método poderoso para detectar bordes en imágenes y es utilizada para la reconstrucción de imágenes en la tomografía. Computa la proyección (integración) de una matriz (imagen) sobre un eje polar coordinado "X'", a través de cierta dirección  $\theta$  (figura 7). El programa Matlab puede obtener la TR en muchas direcciones y genera una matriz "R" donde cada columna (eje "X") contiene la TR en una dirección. La primera columna de TR corresponde a la proyección en  $0^\circ$ , que se obtiene integrando en la dirección vertical. La columna de en medio corresponde a la proyección en  $90^\circ$  que es integrada en la dirección horizontal. El eje "Y" contiene las coordenadas ( $\rho$ ) del eje "X'" (donde fue proyectada la imagen) con el origen en el centro de la imagen. Por esta razón, la TR puede detectar ondas, cuando las integra en dirección de la cresta ó valle de la onda.



**Figura 7.-** Ejemplo de cómo integra TR una imagen en la dirección  $\theta$ . Las líneas paralelas son las integrales con las que se obtiene la proyección en dirección  $\theta$ .

### 1.3.2. Transformada Wavelet

“La transformada Wavelet es una herramienta de descomposición, que hace posible un análisis *tiempo-frecuencia* (ó *espacio-# de onda*) de una determinada función, convirtiendo la función a un nuevo dominio. Este dominio transformado posee tanto resolución frecuencial como resolución espacial (en el caso de imágenes), gracias a la estructura que posee la base de descomposición. Esto la diferencia, de la transformada de Fourier, donde el dominio transformado sólo posee resolución frecuencial y no espacial, debido a que las componentes de la base de descomposición (exponenciales complejas) tienen una longitud infinita” (López y Fábregas, 2000).

La transformada Wavelet de una señal unidimensional implica su descomposición sobre una base obtenida de una función (Wavelet), que

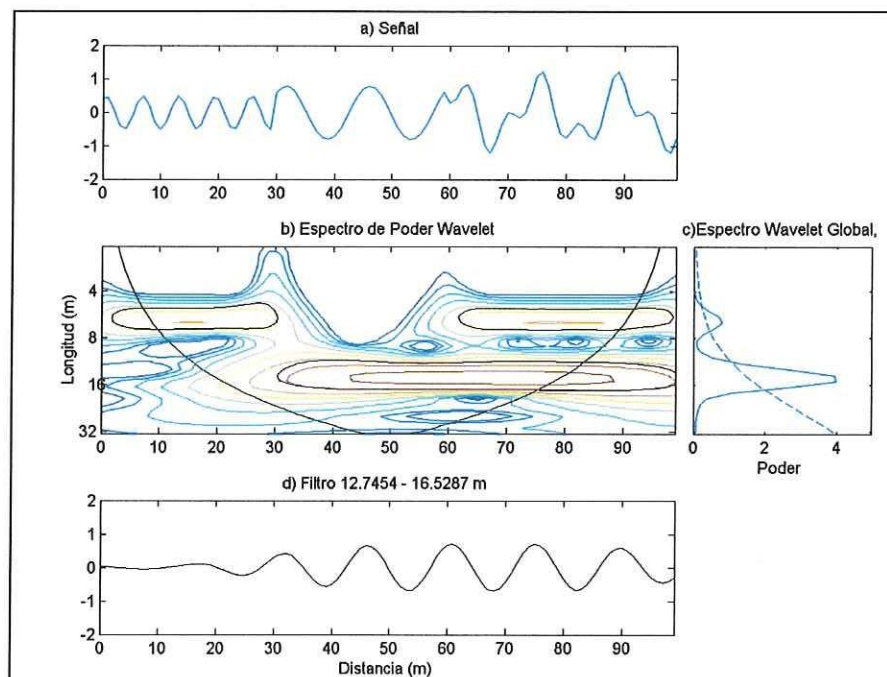
posee algunas características específicas, de dilatación y translación. Cada una de las funciones de esta base acentúa una frecuencia espacial ó temporal específica y su localización en el espacio físico ó en el tiempo.

"La transformada Wavelet puede usarse para analizar series que contengan un poder no estacionario en muchas frecuencias diferentes" (Daubechies, 1990, citado por Torrence y Compo, 1998)

Torrence y Compo (1998) desarrollaron una guía, para el análisis Wavelet (1-D), que incluye pruebas estadísticas de significancia e intervalos de confianza. "La transformada Wavelet puede interpretarse como un filtro "pasa banda" de forma uniforme con una localización y anchura que varían". Por lo que usando la función inversa es posible reconstruir la señal original filtrando determinadas frecuencias (longitud de onda).

Para entender que beneficios ofrece el análisis Wavelet 1-D, imaginemos una señal (figura 8a) que contiene dos ondas con frecuencias diferentes localizadas de la siguiente manera: en los primeros 30 m solo esta presente la onda de mas alta frecuencia (7 m de longitud de onda); de los 31 m a los 60 m la señal contiene únicamente la onda de mayor longitud (15 m) y en los 40 m restantes la señal consiste de la suma de las dos ondas anteriores. La figura 8b es el espectro de poder Wavelet, el eje-y es la longitud de onda (frecuencia), el eje-x es la distancia (metros) de la serie, los contornos de colores son las varianzas normalizadas de la energía. Los

contornos negros encierran regiones de más del 95% nivel de confianza. A la derecha se muestra el espectro global Wavelet que es la suma de las frecuencias de toda la señal, que es similar al resultado de un espectro de # de onda de Fourier. La figura 8d es la señal después de aplicarle un filtro Wavelet ó pasa-banda, quedando eliminada la onda con la frecuencia mas alta.



**Figura 8.-** (a) Serie a la cual se le aplico la transformada Wavelet 1D. (b) Espectro de poder Wavelet de (a), los contornos de color negro encierran regiones mayores al 95% de nivel de confianza. La línea cóncava indica el “cono de influencia”, la información por debajo de esta es dudosa. (c) Espectro Wavelet global, la línea punteada indica el 95% nivel de confianza, toda energía que este arriba es significativa. (d) Señal después de un filtro pasa banda  $\geq 14m$ .

## ANTECEDENTES

Las imágenes del océano se volvieron muy populares en 1978 después de la misión de Seasat, el primer satélite con un radar de apertura sintética a bordo dedicado al estudio de los mares (Fu y Holt, 1982, citado por Ocampo-Torres, 1999).

Fu L. L. y B. Holt (1984) de nueve imágenes SAR del satélite SeaSat que revelaban una variación temporal en el campo de ondas internas en la parte norte del Golfo de California, encontraron que la actividad de las ondas internas está altamente correlacionadas con la amplitud y fase de las mareas locales.

Con el lanzamiento de los satélites ERS-1 (julio 17, 1991), y ERS-2 (abril 20, 1995), una gran cantidad de investigaciones oceanográficas se han realizado utilizando imágenes ERS-SAR. Estas imágenes, cuando están utilizadas conjuntamente con otros datos de observación remota, datos *in situ* y con modelos numéricos, han conducido a nuevos resultados significativos en oceanografía (Alpers, et al, 2002).

"La transformada Radon acentúa características lineales en imágenes y ha sido exitosamente aplicada al realce y la detección de problemas en imágenes SAR del océano abierto" (Warrik y Delaney, 1997).

"Recientemente, la transformada Wavelet ha sido aplicada en la detección y el realce de problemas en imágenes SAR" (Warrick y Delaney, 1997).

Ocampo-Torres (1999) determinó la variación espacial del campo de oleaje en aguas costeras usando imágenes SAR-ERS 1, y utilizó datos *in situ* de la región noroeste de Baja California para validar algunas de las observaciones remotas.

Zheng et al, 1999 utilizaron una técnica para remover el ruido presente en imágenes digitales aéreas, esta técnica combina la transformada Wavelet rayos-X y el Campo aleatorio de Markov (MRF por sus siglas en inglés) aplicadas en la dirección de propagación de las ondas.

Existen diversos métodos para eliminar el ruido speckle en las imágenes SAR. Todos ellos se basan en aplicar un cierto algoritmo en una ventana de análisis que típicamente contienen entre 20 y 100 píxeles aproximadamente. Dichos métodos realizan un análisis local de la imagen, para después adaptarse a toda la localidad (López, Fàbregas, 2000).

#### 1.4. PLANTEAMIENTO DEL TRABAJO

Con este trabajo se pretende proponer una metodología para el análisis de una imagen adquirida por un radar de apertura sintética aplicando las transformadas Radon y Wavelet 1-D, con el fin de mejorar la visualización de las señales de oleaje y ondas internas que se observan en estas imágenes y dar un paso más que permita hacer de los sensores remotos una herramienta cada vez más precisa y eficiente que pueda complementar la información proveniente de métodos "in-situ". En este trabajo se supone que la imagen tiene las correcciones relacionadas con el mecanismo de obtención y los errores que esto pueda causar.

## 2. OBJETIVOS

### 2.1. GENERALES:

- Mejorar la visualización del oleaje y de las ondas internas que se observan en imágenes SAR-ERS, mediante el uso combinado de las transformadas Radon y Wavelet 1-D.

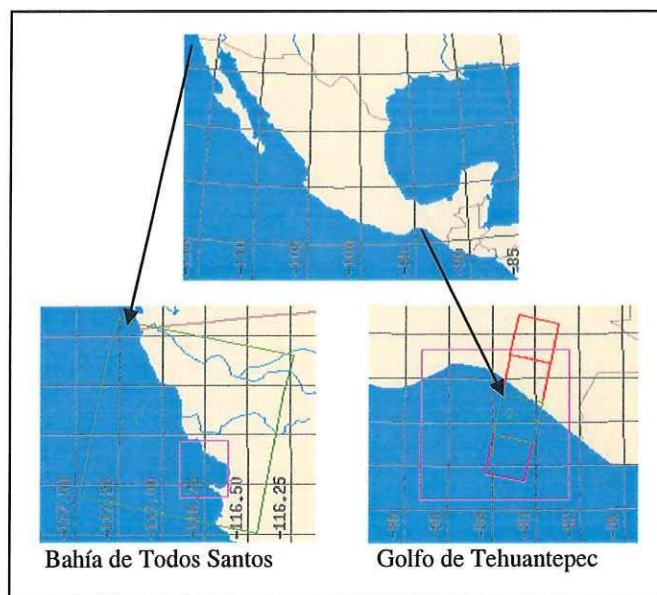
### 2.2. PARTICULARES:

- Detectar las direcciones predominantes del oleaje u ondas internas aplicando la transformada Radon a una subimagen de una Imagen SAR.
- Filtrar la transformada Radon aplicando la transformada Wavelet 1-D, para eliminar el ruido presente en la imagen.
- Reconstruir la imagen mejorada mediante la transformada Radon Inversa.

### 3. MATERIALES Y METODOS

#### 3.1. AREA DE ESTUDIO

Se utilizaron dos imágenes (figura 9); una Imagen SAR del satélite ERS-1 del Golfo de Tehuantepec (GT), orbita: 11980, cuadro: 3303, del 30 de octubre de 1993; el GT se localiza entre los 12° y 16° 50' de latitud norte y entre los 92° y 97° de longitud sur, en las costas del sur de Oaxaca y Chiapas; y una Imagen SAR ERS-2 de la Bahía de Todos Santos (BTS), orbita: 12005, cuadro: 2961, del 6 de agosto 1997; la BTS se localiza entre los 31° 40' y 31° 56' de latitud norte y los 116° 36' y 116° 50' de longitud oeste, al noroeste de la Península de Baja California, a 110 km al sur de la frontera de México con los Estados Unidos de Norteamérica y en la cabecera del Municipio de Ensenada.



**Figura 9.-** Localización de las imágenes utilizadas.

Aun cuando el tamaño de las imágenes es de 8000 x 8000 píxeles y con el fin de agilizar el tiempo computacional en este trabajo, se delimitaron 2 subimágenes de 724 x 724 píxeles en cada imagen (figura 11 y figura 32).

### 3.2. METODOLOGÍA

La figura 10 es un esquema que ejemplifica los pasos de la metodología propuesta para el análisis Radon-Wavelet 1-D (RW1D) de imágenes adquiridas por un radar de apertura sintética, que a continuación se describe.

**3.2.1. Análisis Radon:** como primer paso se aplica la TR (ecuación 1) a una subimagen "S" obteniendo la matriz "R". Para ello se utilizó la función "Radon" del programa Matlab (Bracewell, 1995).

$$R(x') = \int_{-\infty}^{\infty} S(x' \cos \theta - y' \sin \theta, x' \sin \theta + y' \cos \theta) dy' \quad \dots\dots\dots 1$$

- Donde:

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}$$

- Para agilizar el tiempo de cómputo las imágenes se proyectaron de 0° cada 2° hasta 178°, para dar un total de 90 proyecciones, con las cuales aseguramos que la reconstrucción de la imagen sea muy cercana a la original.

**3.2.2. Análisis Wavelet 1-D:** Cada columna (ó proyección) de la matriz R fue representada mediante la superposición de los modos obtenidos con la transformada Wavelet 1-D (ecuación 2).

$$W_n(s) = \sum_{k=0}^{N-1} \hat{X}_k \hat{\psi}^*(s\omega_k) e^{i\omega_k n \delta t} \dots\dots\dots 2$$

Donde:

- |                                |  |
|--------------------------------|--|
| $X$ = Secuencia discreta.      | $\psi$ = Función wavelet                 |
| $*$ = Conjugada compleja.      | $s$ = Escala wavelet                     |
| $\omega$ = Frecuencia angular. | $N$ = Numero de puntos en la serie.      |
| $n$ = índice del tiempo        | $k = 0, \dots, N-1$ índice de frecuencia |
| $dt$ = diferencial de tiempo   |  |

- Para este trabajo se utilizó la función "morlet" como wavelet madre y el algoritmo utilizado fue proveído por C. Torrence y G. Compo (1998) y esta disponible en Internet (en código Matlab).
- En cada análisis Wavelet se aplica un filtro Wavelet (ecuación 3), para retener las longitudes de onda deseadas. Esta ecuación tiene una función de respuesta dada por la suma de las funciones Wavelet entre las escalas  $j_1$  y  $j_2$ . (Torrence y Compo, 1998)

$$x'_n = \frac{\delta_j \delta t^{1/2}}{C_\delta \psi_0(0)} \sum_{j=j_1}^{j_2} \frac{\Re\{W_n(s_j)\}}{s_j^{1/2}} \dots\dots\dots 3$$

- Donde:

$C_\delta$  = Factor de reconstrucción.       $\psi_0(0)$  = Remueve la escala energética.

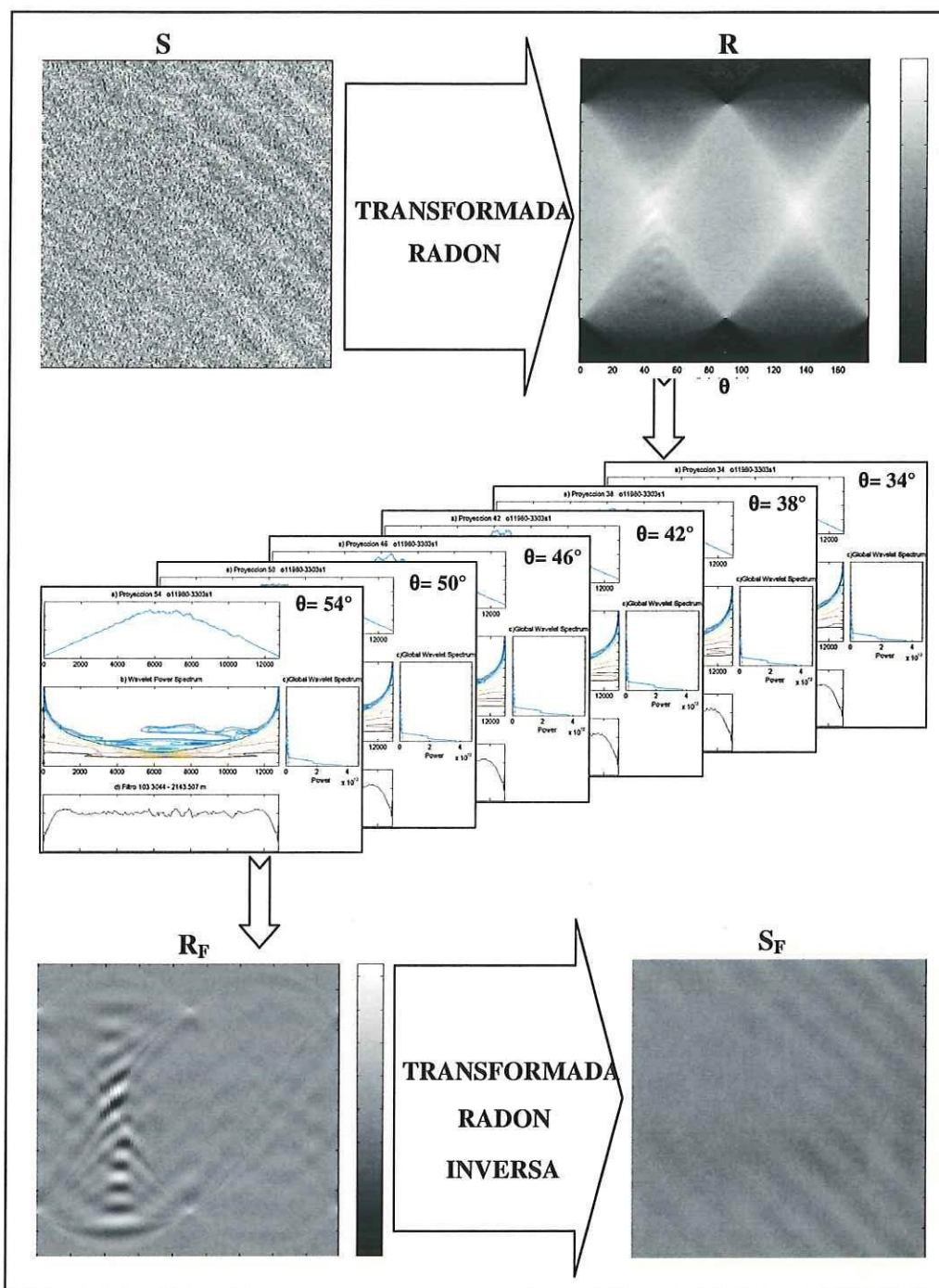
$s$  = Escala wavelet.       $j$  = Índice de la escala.

$\omega$  = Frecuencia angular.       $k$  = Índice de frecuencia.

$W_n$  = Transformada Wavelet.

- Cada columna de R se reemplaza por el resultado de la ecuación 3 obteniendo una matriz  $R_F$  (matriz filtrada).

**3.2.3. Reconstrucción de la Imagen:** Se reconstruye la subimagen  $S_F$  aplicando la transformada Radon Inversa a  $R_F$ . En este trabajo se utilizó la función "*iradon*" de Matlab.

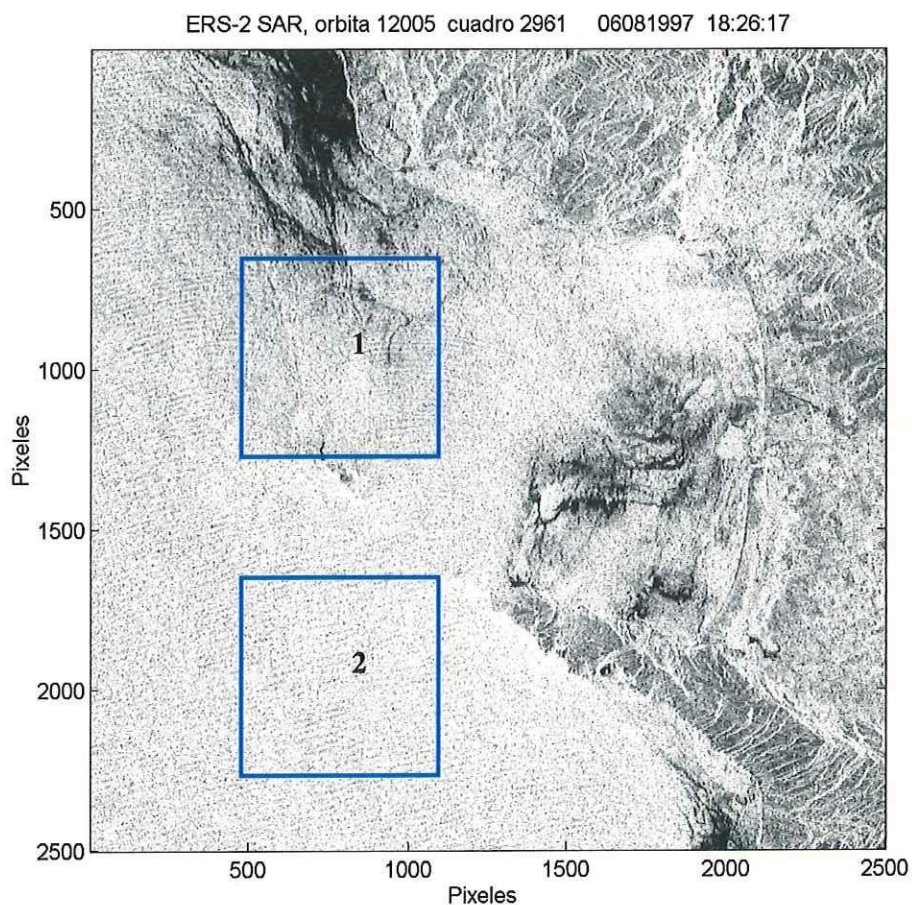


**Figura 10.-** Esquema de la metodología propuesta para el análisis de una imagen SAR-ERS

## 4. RESULTADOS

### 4.1. SWELL (Imagen Bahía de Todos Santos)

En esta imagen (figura 11) se observa una señal del oleaje (swell) que se aproxima desde el sur (tomando la parte superior central de las imágenes como el norte). Para probar la capacidad del análisis RW1D para filtrar la señal del oleaje presente en la imagen se delimitaron dos subimágenes con características diferentes. Para facilitar la explicación de la interpretación de los resultados empezaremos con la subimagen 2.



**Figura 11.-** Imagen de la Bahía de Todos Santos, los recuadros azules son las subimágenes tomadas para hacer el análisis.

#### 4.1.1. Subimagen 2 (S2-BTS)

La importancia de esta imagen (figura 12) radica en que se observa una dirección predominante del oleaje (swell), ya que se encuentra fuera de la bahía donde el swell no ha sido modificado por efectos de batimetría ni por difracción por bordes, lo que posiblemente facilite el análisis de la misma. A continuación se hará una descripción de lo encontrado en cada paso de la metodología propuesta



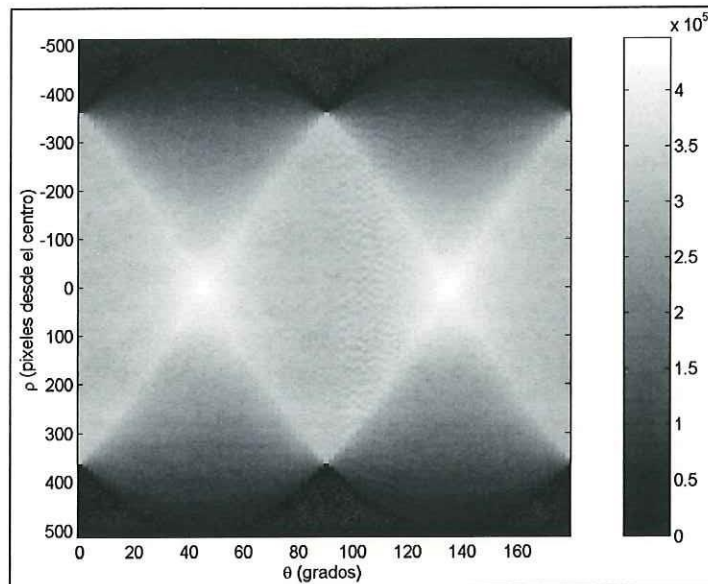
**Figura 12.-** Subimagen 2 BTS, origen (2560,6720)

#### 4.1.1.1. Análisis Radon

La figura 13 muestra la transformada radon (TR) de la subimagen S2-BTS. Lo primero que se puede observar son picos de mucha intensidad (color blanco) en las proyecciones  $0^\circ$  y  $90^\circ$ , coordenadas  $\rho = -362$  y  $362$ , que son las proyecciones de los bordes de la imagen.

La geometría de la imagen (cuadrada) provoca que todas las proyecciones presenten una tendencia, relacionada con la cantidad de información que detectan las integrales en cada proyección, observándose líneas (diagonales) de color blanco, que no necesariamente son picos de bordes ó líneas detectadas en la imagen. En las proyecciones  $45^\circ$  y  $135^\circ$  también se observan picos de mucha intensidad (color blanco) en las coordenadas  $\rho=0$  que es donde las proyecciones integran la mayor cantidad de información. Esta tendencia, relacionada con la geometría cuadrada de la imagen, se puede observar mejor en las figuras 14, 15 y 16 que se describirán mas adelante. Entre las proyecciones de  $96^\circ$  y  $110^\circ$  se observa un cambio en la rugosidad de TR, donde se pueden encontrar los picos asociados a la señal del oleaje, aunque no se pueden apreciar con claridad por la tendencia, debida a la geometría de la imagen, en las proyecciones.

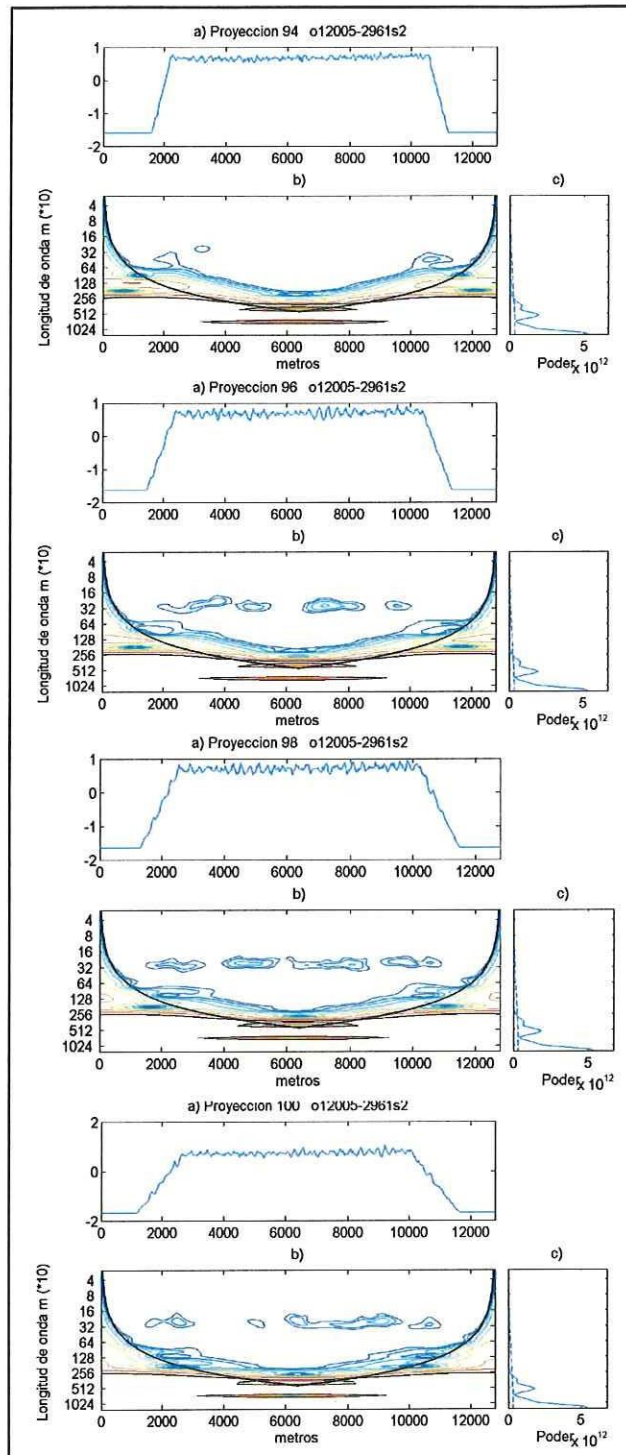
En el análisis posterior se podrá mejorar la visualización de estas proyecciones al aplicarles un filtro pasa banda, usando la transformada Wavelet 1-D.



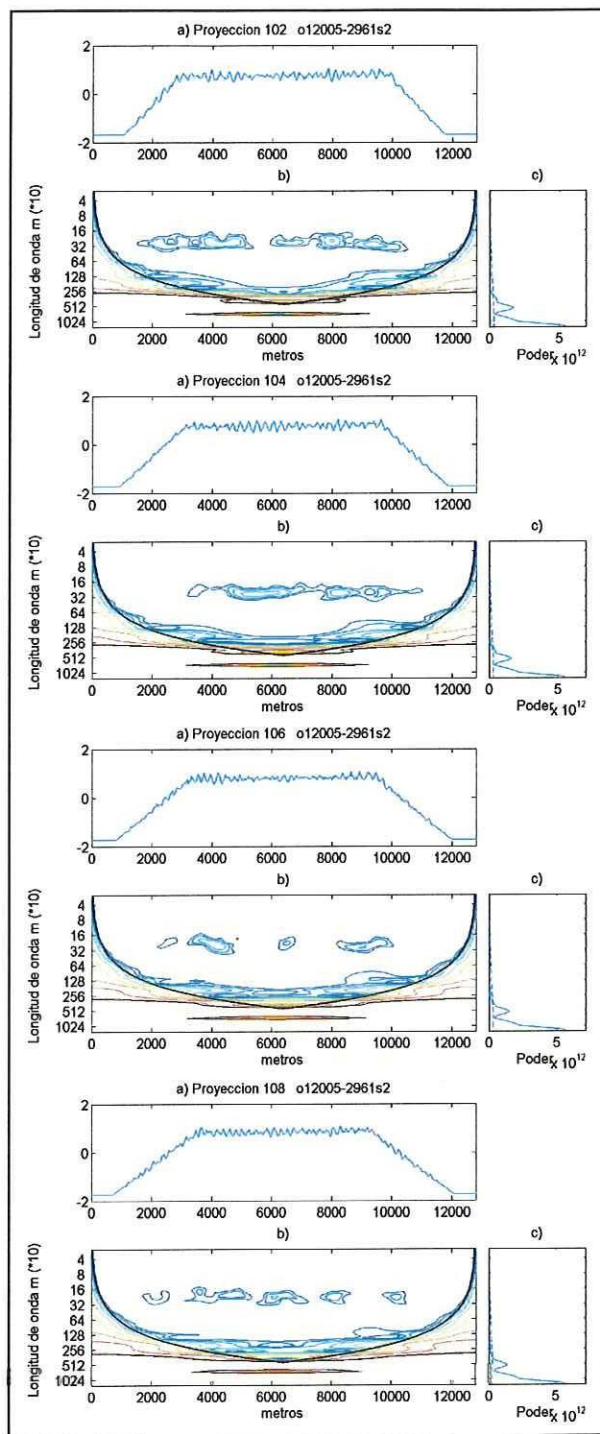
**Figura 13.-** Transformada radon de S2-BTS. La barra de colores indica intensidad.

#### 4.1.1.2. Análisis Wavelet 1-D (W1D)

La figura 14, figura 15 y figura 16 muestran el análisis para las proyecciones entre  $94^\circ$  y  $116^\circ$ . Los incisos (a) son las proyecciones correspondientes, en todas se observa claramente la tendencia antes mencionada. Los incisos (b) son los espectros de poder Wavelet, en todos aparecen picos de mucha energía (contornos rojos) con longitudes muy largas (mayores de 2500 m) atribuidos a la tendencia, debida a la geometría de la imagen. Entre las proyecciones de  $96^\circ$  y  $110^\circ$  se observan picos de menor energía (contornos azul claro) con longitudes entre 200 m y 400 m, características de un swell. Los incisos (c) son los espectros globales, aquí vemos que la tendencia, debida a la geometría de los bordes, en las proyecciones no permite apreciar el poder que tienen los picos asociados con la señal del oleaje.



**Figura 14.-** Análisis W1D de las proyecciones de 94°, cada 2°, a la de 100°. Los incisos (a) son las señales de cada proyección. Los incisos (b) son los espectros de poder Wavelet correspondientes a cada señal (a). Los incisos (c) son los espectros Wavelet globales.



**Figura 15.-** Similar a figura 14 pero para las proyecciones de 102°, cada 2°, a la de 108°.

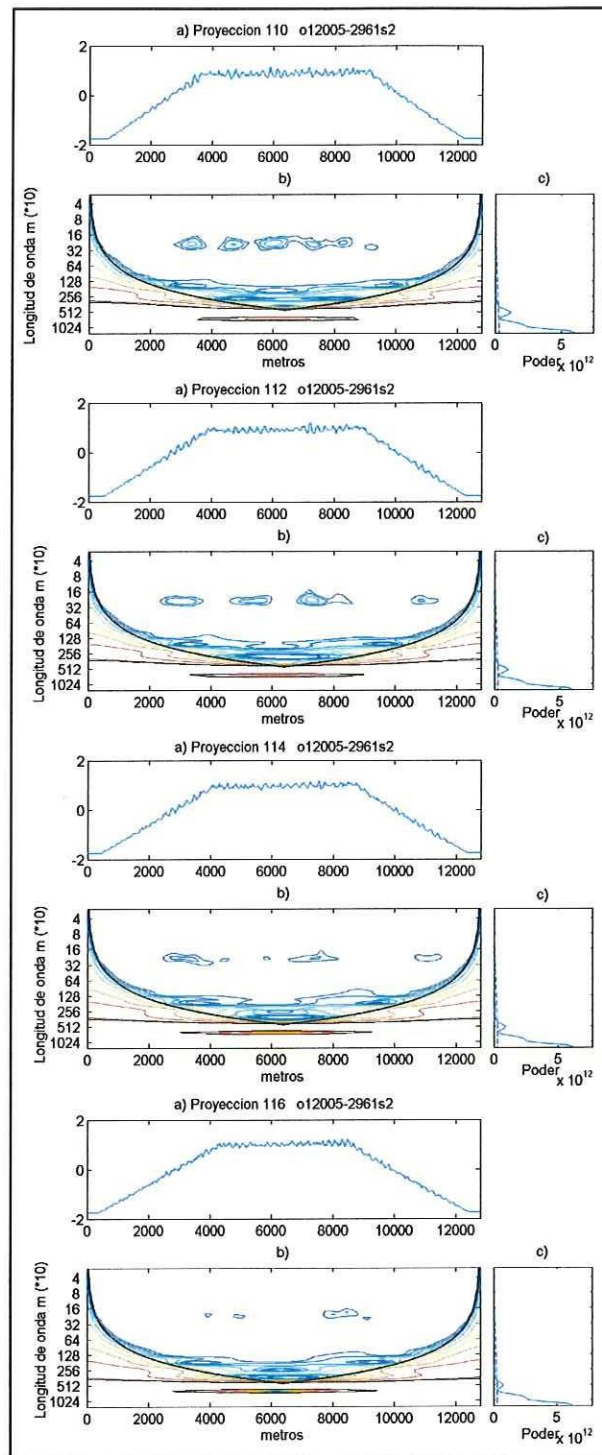
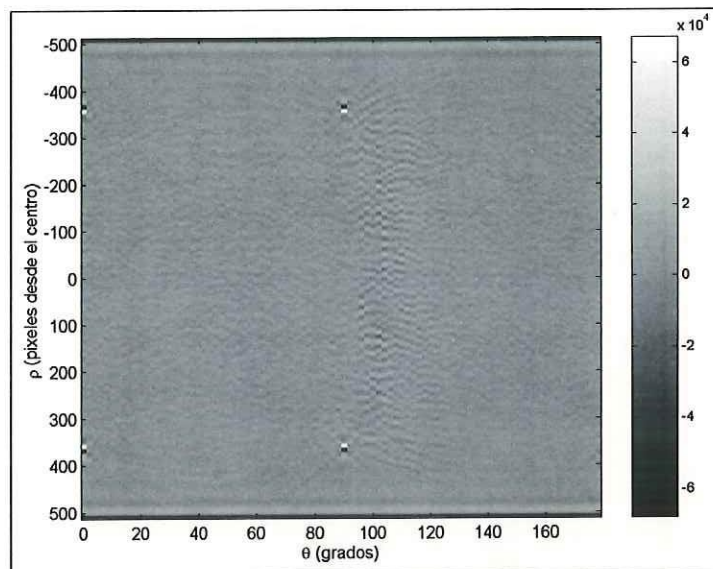


Figura 16.- Similar a figura 14 pero para las proyecciones de 110°, cada 2°, a la de 1116°.

La figura 17 es la TR después del análisis W 1-D, aplicando un filtro pasa banda de 160 m a 400 m a todas las proyecciones. Podemos observar que la tendencia, debida a la geometría de la imagen ha sido eliminada y que se queda información de los bordes de la imagen en las proyecciones de  $0^\circ$  y  $90^\circ$ . Además se observan picos con mayor intensidad entre las proyecciones de  $96^\circ$  y  $110^\circ$ , donde se encontraron picos de energía, en el espectro Wavelet 1-D, con longitudes de onda entre 200 m y 400m.



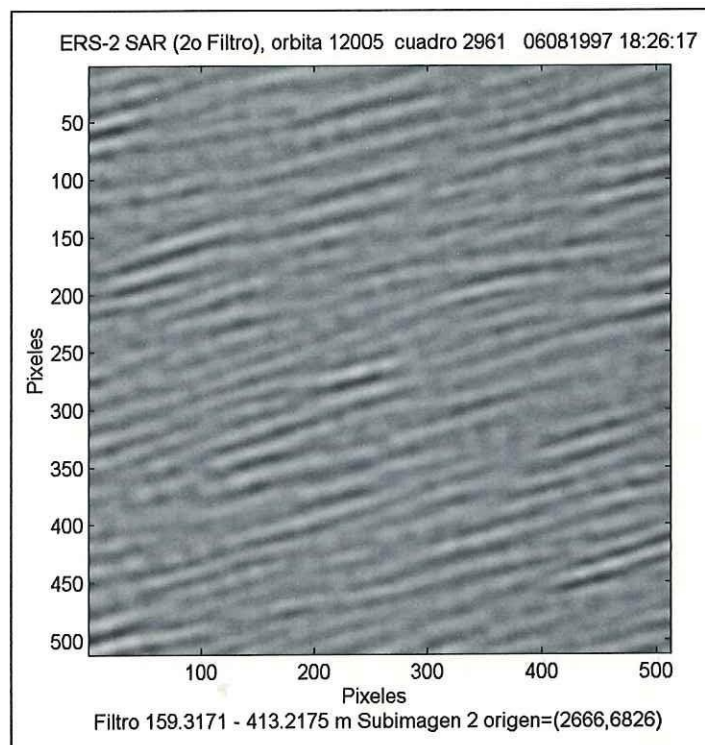
**Figura 17.-** Transformada radon de S2-BTS después de aplicarle el filtro W1D de 160 m a 400 m de longitud.

#### 4.1.1.3. Reconstrucción de la imagen

Para eliminar por completo la información de los bordes se reconstruyó una porción central de la imagen de  $512 \times 512$  píxeles.

La figura 18 es la subimagen S2-BTS reconstruida después de aplicar un filtro pasa banda de 160 m a 400 m a las proyecciones entre 96° y 110°. A las demás proyecciones se les aplico un filtro más estricto para dejar la información del oleaje que pueda existir.

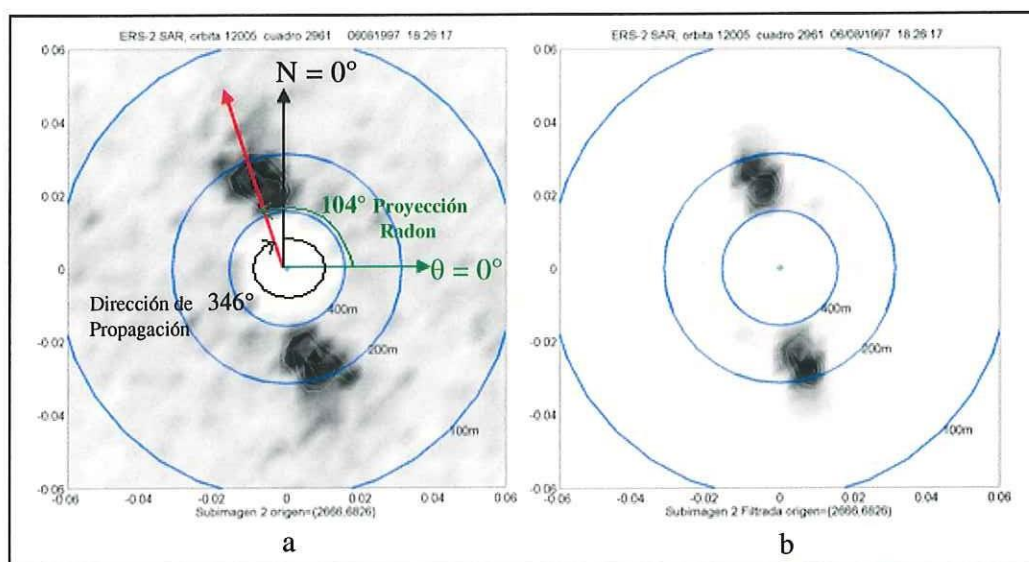
En cuanto a la visualización del oleaje se observa claramente una mejora en la imagen al ser eliminado el ruido *speckle*, observándose paquetes de olas (swell) bien definidos.



**Figura 18.-** Subimagen S2-BTS después del análisis RW1D con un filtro pasa-banda de 200 a 400 m

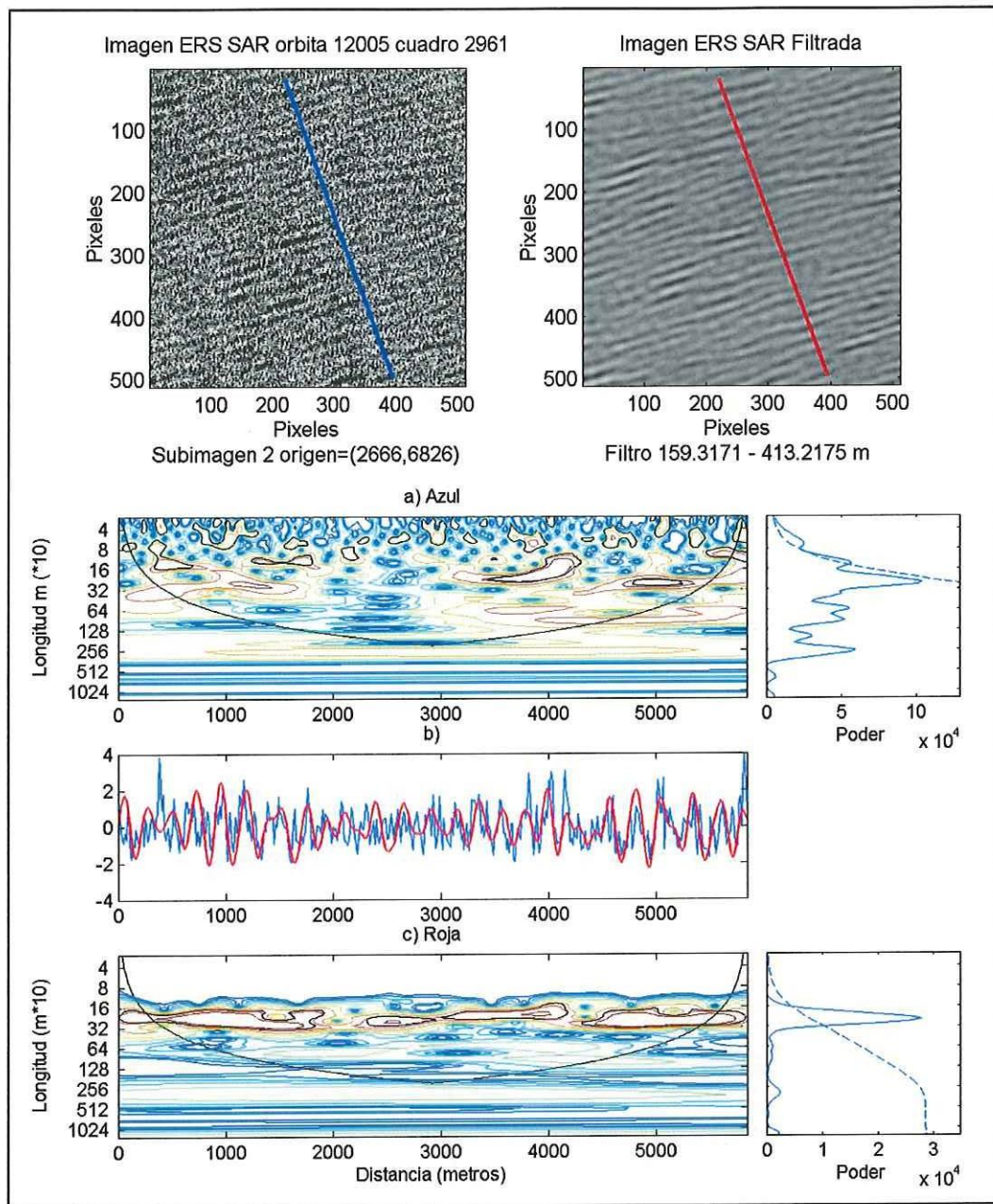
El espectro direccional (FFT) de la subimagen S2-BTS se muestra en al figura 19a; los componentes del pico espectral tienen una longitud de

onda cercana a los 300 m, con una dirección de propagación alrededor de  $346^\circ$ , (azimutal) considerado la parte superior de la imagen como el norte (para un oleaje que se propaga hacia el este su dirección sería de  $90^\circ$ ); esta dirección coincide con la proyección en que se detectaron las señales de oleaje. Es importante resaltar el ruido que aparece alrededor de los picos del espectro, reflejo del ruido speckle de la imagen. La figura 19b es el espectro direccional de la subimagen S2-BTS filtrada, podemos observar como el ruido fue eliminado manteniéndose la información de los picos espectrales.



**Figura 19.- a)** Espectro direccional (FFT) de S2-BTS; los círculos azules representan las localizaciones de las componentes del oleaje con 400m, 200m y 100m de longitud de onda. **b)** Espectro direccional de S2-BTS filtrada.

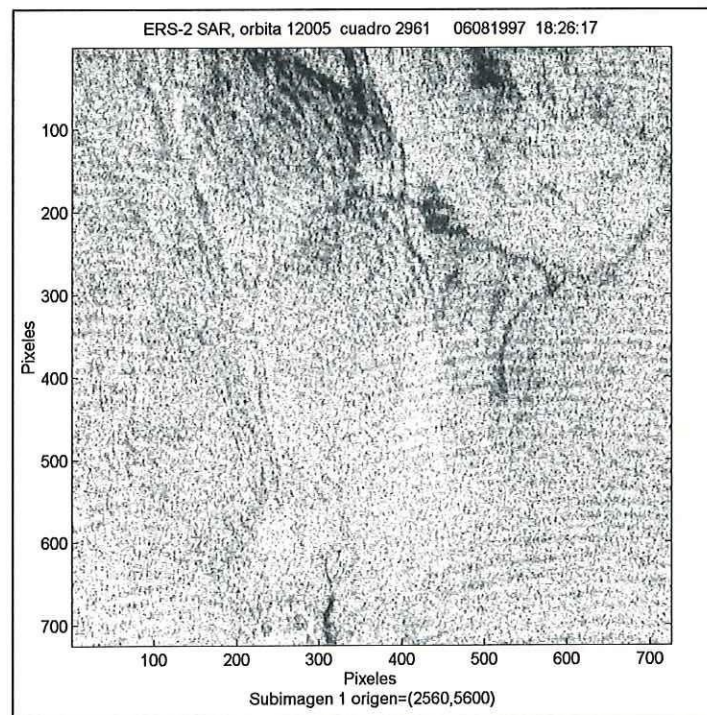
Para comparar la información entre la imagen original y la filtrada, se le aplicó un análisis W 1-D a un transecto de cada imagen (figura 20); la figura 20b muestra la señal de los transectos; se observa que las amplitudes de la señal filtrada (línea roja) son semejantes a las amplitudes de la señal original (línea azul), presentando un relieve más suavizado. El espectro Wavelet de la imagen original (figura 20a) muestra picos significativos de energía baja en las frecuencias altas (longitudes de onda menores a 100m, asociadas al ruido speckle) y picos de mayor energía (contornos rojos) en las longitudes de 300 m; el espectro Wavelet global (derecha) indica que los picos arriba de 150 m de longitud se encuentran debajo del 95% de significancia. En el espectro de poder Wavelet para el transecto de la imagen filtrada (figura 20c) se observa que las frecuencias bajas (ruido speckle) no aparecen, observándose únicamente un pico de energía significativo, con longitudes de onda entre 200 m y 400 m, a lo largo de todo el transecto, y se encuentran dentro del cono de influencia; en el espectro global se observa como este pico asociado al oleaje, se encuentra arriba del 95 % de significancia.



**Figura 20.-** En la parte superior se muestran las imágenes con los transectos marcados. **a)** Espectro Wavelet de poder para el transecto de la imagen original. **b)** Comparación de transectos obtenidos de las subimágenes S2-BTS original y filtrada. **c)** Espectro de poder Wavelet para el transecto de la imagen filtrada. A la derecha de (a) y (c) se encuentra los espectros globales correspondientes.

#### 4.1.2. Subimagen 1 (S1-BTS)

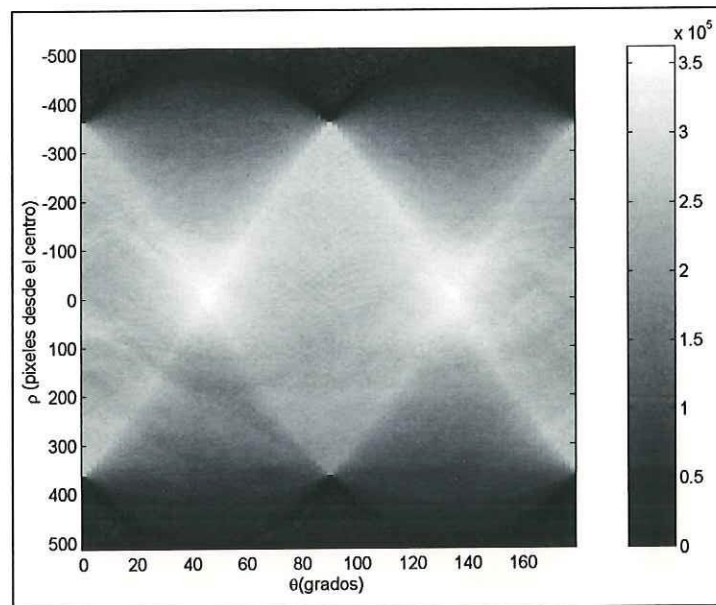
En esta imagen se puede observar que el oleaje no presenta una dirección predominante, debido a que ya sufrió efectos de difracción por bordes causados por la Isla de Todos Santos. Las manchas negras en la parte superior de la imagen son características en las imágenes SAR, que se atribuyen a zonas de sombra donde no hay la presencia de viento local que genere ondas capilares, indispensables para la detección del oleaje (swell) en radares SAR.



**Figura 21.-** Subimagen 1 BTS, origen (2560,5600)

### 4.1.3. Análisis Radon

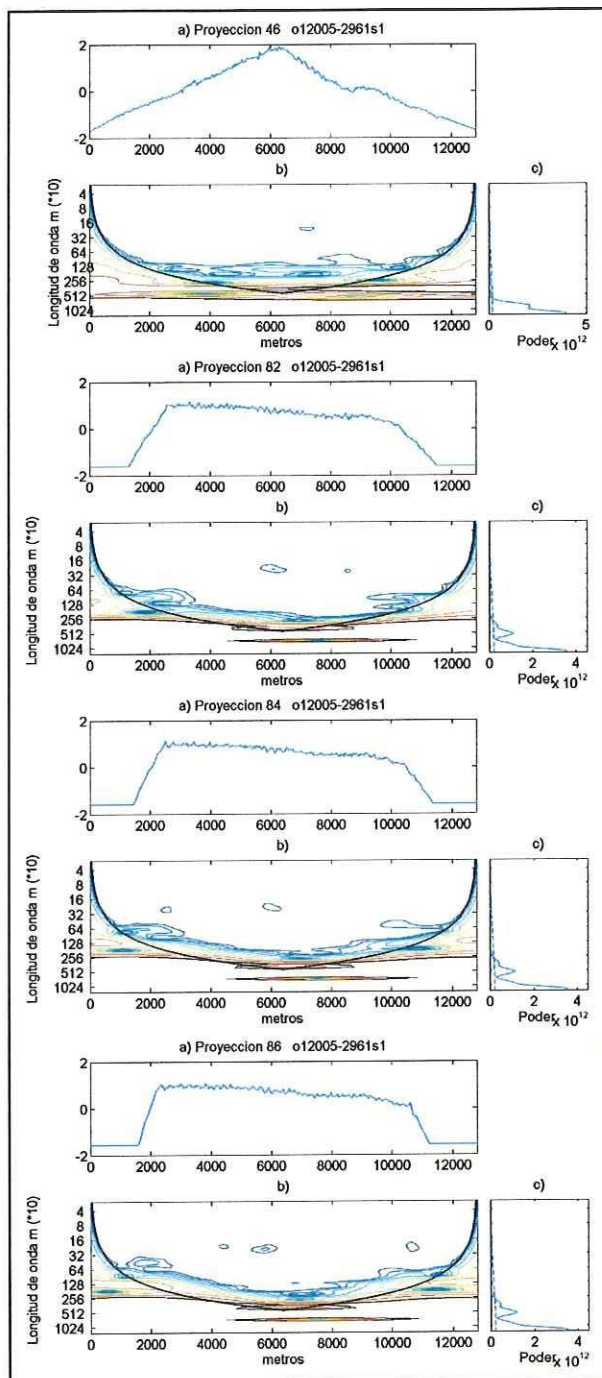
En la transformada radon de S1-BTS (figura 22) no se puede observar con claridad la detección del oleaje, debido a la tendencia debida a la geometría de la imagen y a las características, que presenta el oleaje. Esto hace que sea detectado en un mayor número de proyecciones.



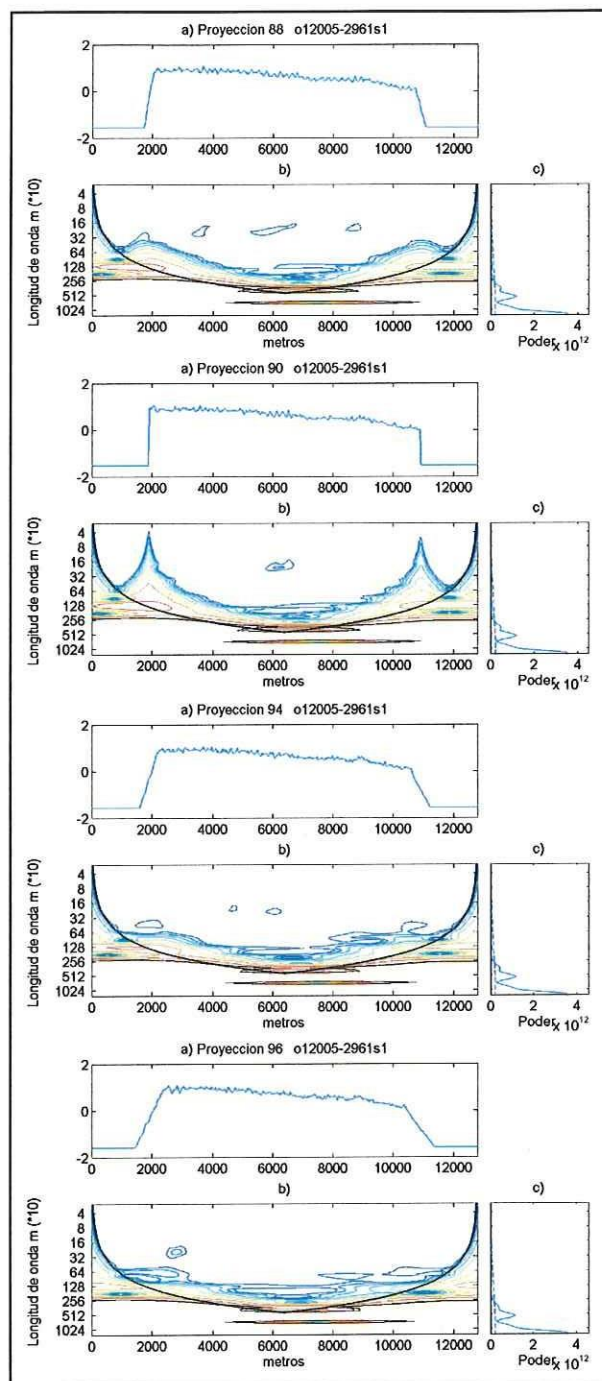
**Figura 22.-** Transformada radon de S1-BTS

#### 4.1.3.1. Análisis Wavelet 1D

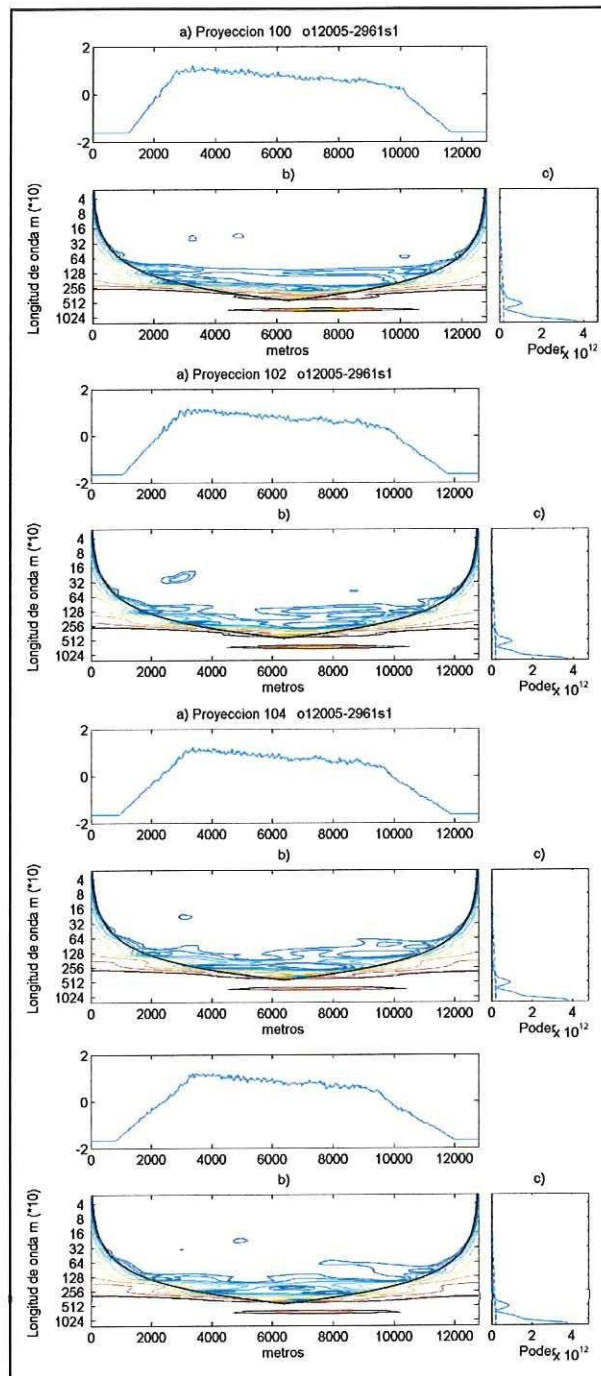
Las figura 23, figura 24 y figura 25 muestran el análisis W 1-D para las proyecciones que presentan picos con longitudes de onda entre 150 m y 300 m. Estos picos presentan muy poca energía y se localizan en regiones muy aisladas en las proyecciones. El intervalo de proyecciones en que se encuentran es muy amplio; a los 46° aparece un pico muy pequeño y después aparecen picos similares entre las proyecciones de 80° y 106°.



**Figura 23.-** Análisis W1D de las proyecciones que contiene picos entre las longitudes de onda de 180 m y 250 m. Los incisos (a) son las señales de cada proyección. Los incisos (b) son los espectros de poder Wavelet correspondientes a cada señal (a). Los incisos (c) son los espectros Wavelet globales.

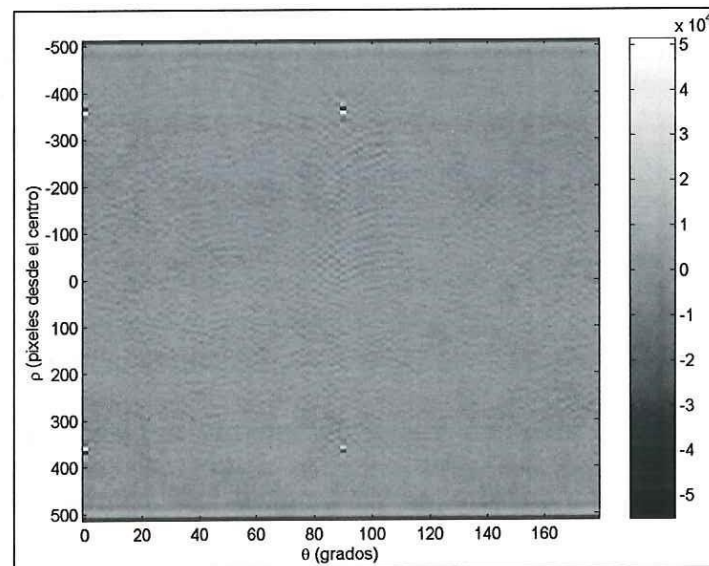


**Figura 24.-** Similar a figura 23 pero para las proyecciones, entre los 88° y 96°, que contiene picos entre las longitudes de onda de 180 m y 250 m.



**Figura 25.-** Similar a figura 23 pero para las proyecciones, entre los  $88^\circ$  y  $96^\circ$ , que contiene picos entre las longitudes de onda de 180 m y 250 m.

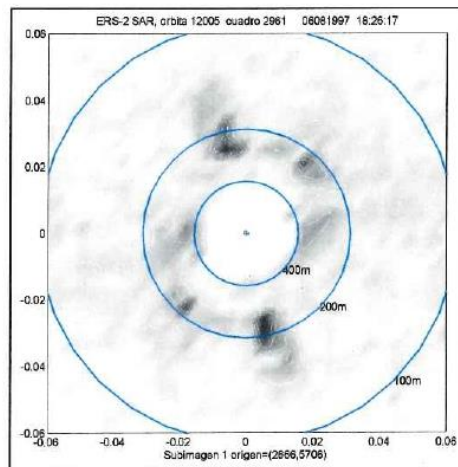
La figura 26 es la TR de la subimagen S1-BTS después del análisis W1-D, se le aplicó un filtro pasa-banda de 150 a m a 350 m, a todas las proyecciones. En este caso no es tan notorio que proyecciones detectaron la señal del oleaje, sin embargo se observan picos de mayor intensidad en algunas proyecciones entre los  $82^\circ$  y  $102^\circ$ , esta ultima tiene una dirección semejante a la que presentaba el oleaje fuera de la bahía (subimagen S2-BTS). También se encuentran picos altos en las proyecciones de  $6^\circ$  a  $10^\circ$  que pueden deberse a las manchas negras que se encuentran en la parte superior de la imagen. En las proyecciones de  $0^\circ$  y  $90^\circ$ , coordenadas  $\rho = -362$  y  $362$ , se quedó información de los bordes de la imagen.



**Figura 26.-** Transformada radon filtrada de S1-BTS

La figura 27 muestra el espectro direccional de la subimagen S1-BTS, observándose dos direcciones de propagación predominantes: una de  $349^\circ$  (azimutal) que corresponde a la dirección que tenía el oleaje antes de cruzar

la isla; el otro pico espectral, de menor intensidad, tiene una dirección de propagación de  $40^\circ$ . Ambos picos se localizan entre 150 m y 300 m de longitud de onda.

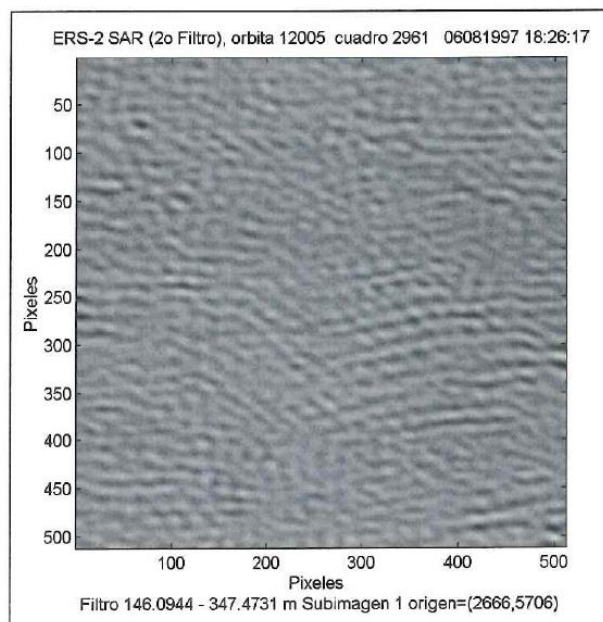


**Figura 27.-** Espectro direccional (FFT) de S1-BTS; los círculos azules representan las localizaciones de las componentes del oleaje con 400m, 200m y 100m de longitud de onda.

#### 4.1.3.2. Reconstrucción de la imagen

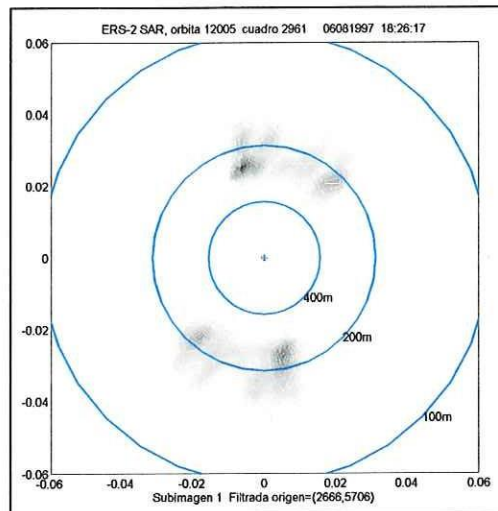
En esta imagen también se reconstruyó una porción central de  $512 \times 512$  píxeles, con el fin de eliminar la información de los bordes. Para obtener la imagen filtrada de S1-BTS (figura 28) se le aplicó un filtro pasa banda de 150 m a 300 m a las proyecciones de  $46^\circ$  a  $106^\circ$ , basándose en la información del análisis W 1-D y del espectro direccional; a las demás proyecciones se le aplicó un filtro más estricto de 200 m a 300 m.

La visualización del oleaje mejora, observándose las distintas direcciones del oleaje que estaban presentes en la imagen original. No fue posible separar las distintas direcciones presentes, debido a que son producto de la modificación que sufre el swell por efectos de la batimetría y la difracción por bordes debida a la isla.



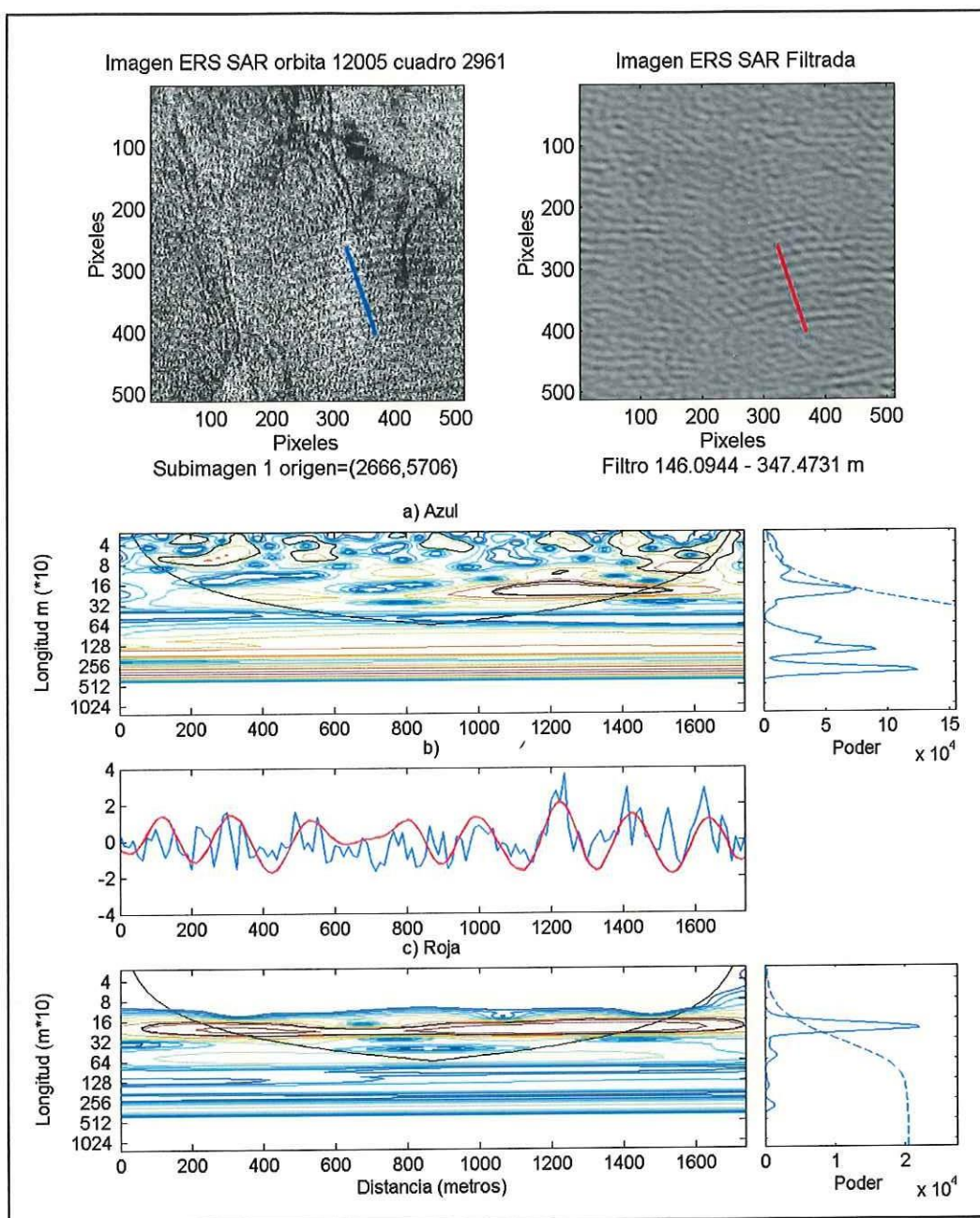
**Figura 28.-** Subimagen 1 BTS filtrada.

El espectro direccional de la subimagen S1-BTS filtrada (figura 29) muestra como ha sido eliminada toda la información que aparece alrededor de los picos espectrales.



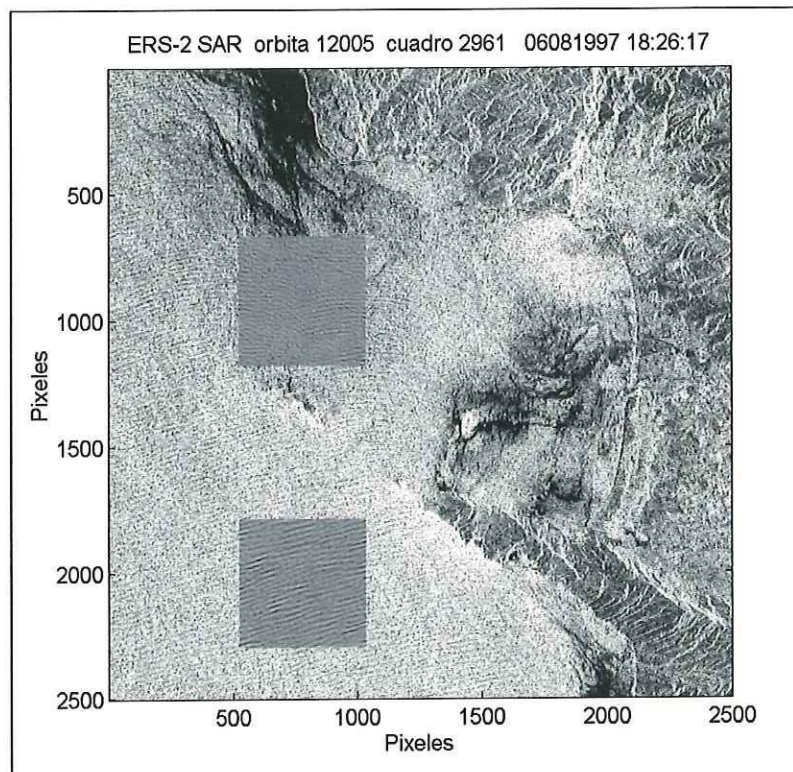
**Figura 29.-** Espectro de energía (FFT) de S1-BTS filtrada, los círculos azules representan las localizaciones de las componentes del oleaje con 400m, 200m y 100m de longitud de onda.

La figura 30 es la comparación entre la imagen original (arriba a la izquierda) y la imagen filtrada (arriba a la derecha). Al igual que la figura 20 observamos una mejora visual en la imagen y un mayor detalle en la información que podemos obtener de un transecto en las imágenes; como es un relieve suavizado (figura 30c) y un espectro de frecuencias W 1-D significativo (figura 30d).



**Figura 30.-** Comparación de transectos obtenidas de la subimagen S1-BTS original y filtrada. En la parte superior se muestran los transectos para cada imagen. **a)** Espectro Wavelet de poder para el transecto de la imagen original. **b)** Espectro de poder Wavelet para el transecto de la imagen filtrada. A la derecha de (a) y (c) se encuentra los espectros globales correspondientes.

En la figura 31 se puede comparar la visualización del oleaje de la señal original contra la filtrada.

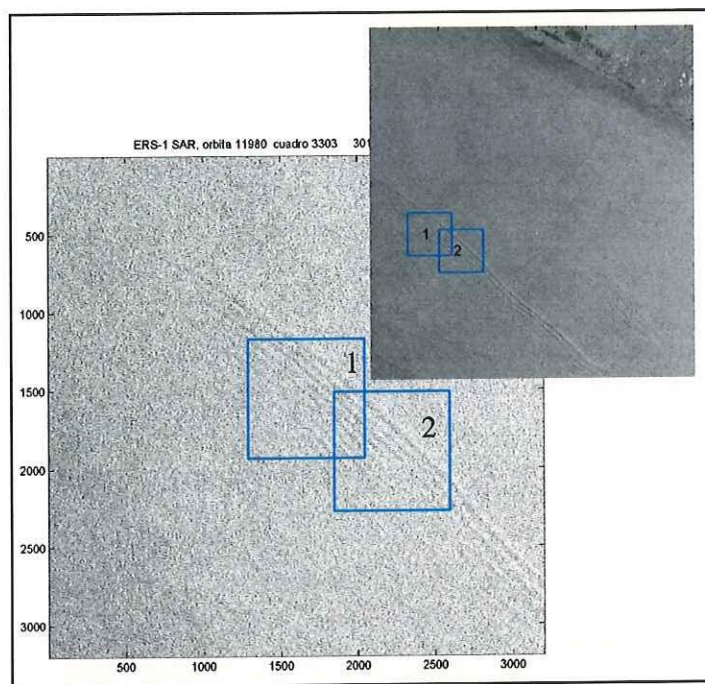


**Figura 31.-** Bahía de Todos Santos con las subimágenes filtradas 1 y 2 superpuestas.

#### 4.2. ONDAS INTERNAS (Imagen Golfo de Tehuantepec)

Similar a lo que se realizó con las imágenes de la Bahía de Todos Santos, para mejorar la visualización del swell, en esta sección se usará la metodología propuesta para mejorar la visualización de algunas características superficiales relacionadas con algunas ondas internas (OI) que se presentan en imágenes SAR. Para mostrar un ejemplo de esto se trabajó con una imagen del Golfo de Tehuantepec (figura 32) la cual

contiene información sobre OI. En esta imagen se delimitaron dos áreas contiguas como subimágenes, que abarcan una parte de un tren de ondas internas que se observa, con el fin de comparar la efectividad del método RW1D. Se le aplicó el mismo filtro a cada subimagen, por simplicidad solo se presentan los resultados del análisis de la subimagen 1.

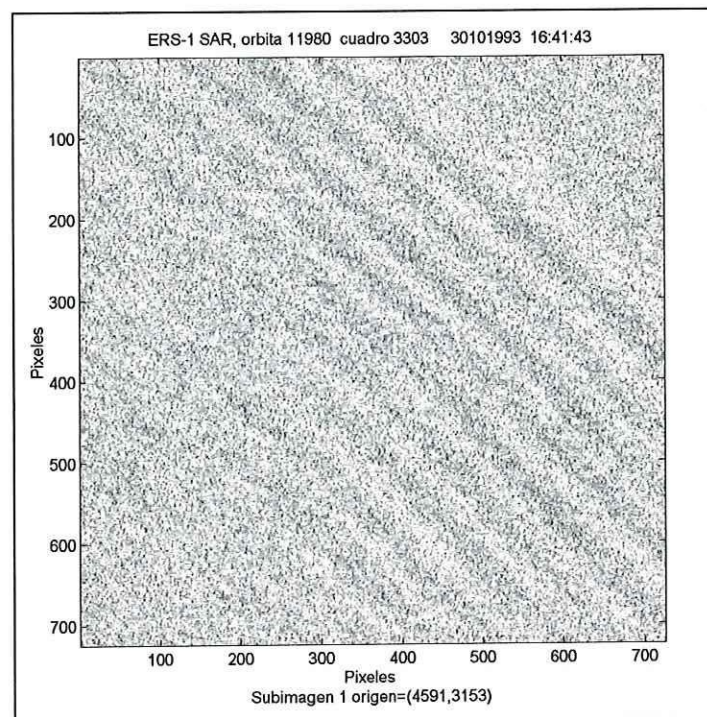


**Figura 32.-** Imagen del Golfo de Tehuantepec los recuadros azules son las subimágenes tomadas para hacer el análisis.

#### 4.2.1. Subimagen 1 (S1-GT)

En esta imagen (figura 33) se observa claramente la señal de un paquete de 8 a 9 ondas internas, con longitudes de onda considerablemente mas grandes que el oleaje; las ondas que se encuentran en la parte superior derecha de la imagen se visualizan con mayor claridad (intensidad), en

cambio en las ondas que están en la parte inferior izquierda son más tenues. A parte de esta señal también se observan señales que podrían ser de oleaje que junto con el ruido speckle hacen que la visualización de las ondas internas no sea tan clara.

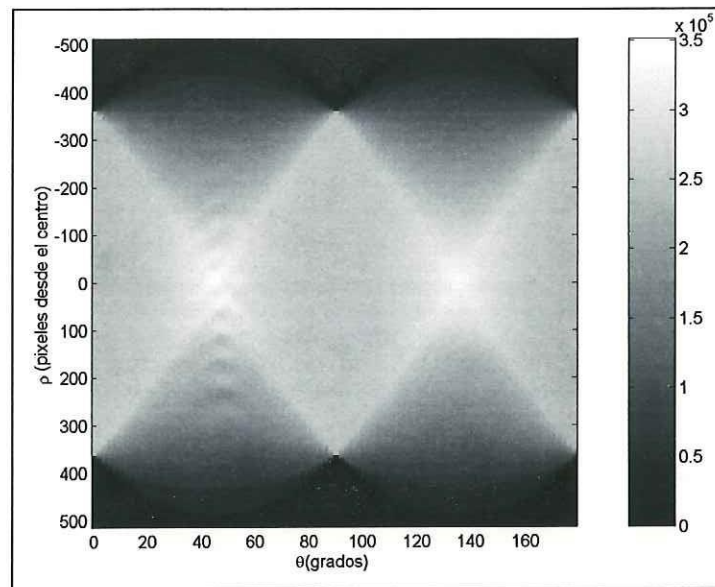


**Figura 33.-** Subimagen 1 del Golfo de Tehuantepec donde se observa un paquete de 8 a 9 OI. La "textura" granulosa que se observa en toda la imagen esta asociada al ruido speckle.

#### 4.2.1.1. Análisis Radon

En la TR de S1-GT (figura 34) se puede observar que la señal de OI es detectada entre las proyecciones de  $40^\circ$  y  $60^\circ$  aproximadamente, notándose claramente bandas de color oscuro y claro. Como en todas las

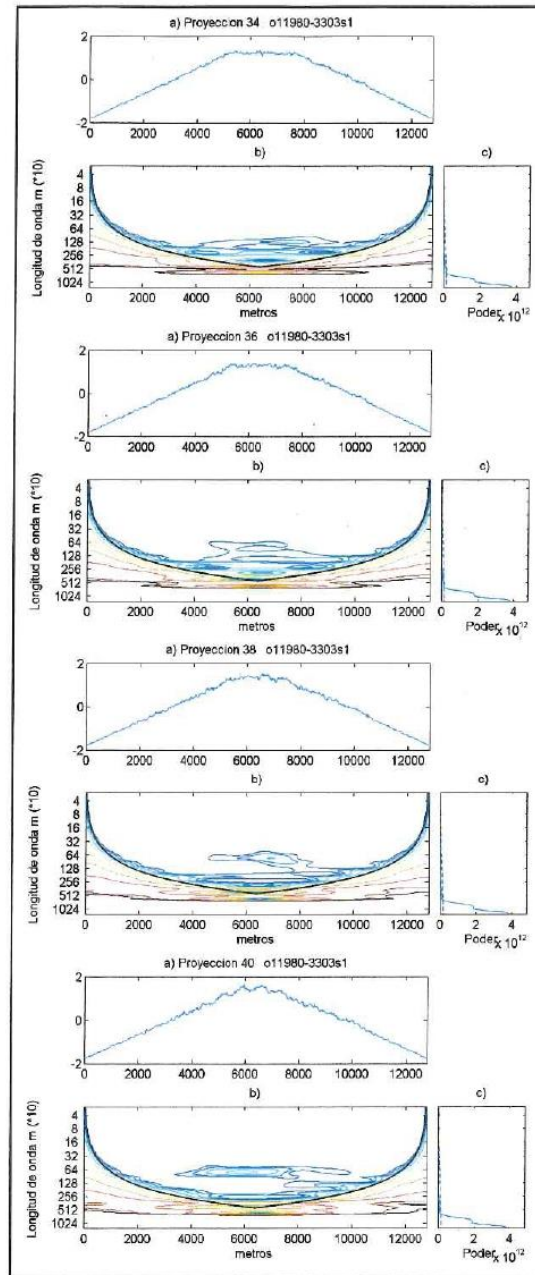
imágenes se observa la tendencia, debida a la geometría de la imagen, en las proyecciones



**Figura 34.-** Transformada Radon de S1-GT, la barra de colores indica la intensidad.

#### 4.2.1.2. Análisis Wavelet 1D

Las figura 35, figura 36 y figura 37 muestran el análisis Wavelet 1-D para las proyecciones que están entre los  $34^\circ$  y los  $56^\circ$ . Los espectros de poder Wavelet, muestran picos con longitudes de onda entre 500 m y 1200 m entre las proyecciones de  $40^\circ$  y  $54^\circ$ . Estos picos no aparecen como significativos en el espectro global, pero se puede detectar perfectamente sus longitudes de onda y en que proyecciones se presentan.



**Figura 35.-** Análisis W1-D de las proyecciones de 34°, cada 2°, a la de 40°. Los incisos (a) son las señales de cada proyección. Los incisos (b) son los espectros de poder Wavelet correspondientes a cada señal (a); los contornos rojos indican picos de mucha energía y decrecen los valores hacia el azul.

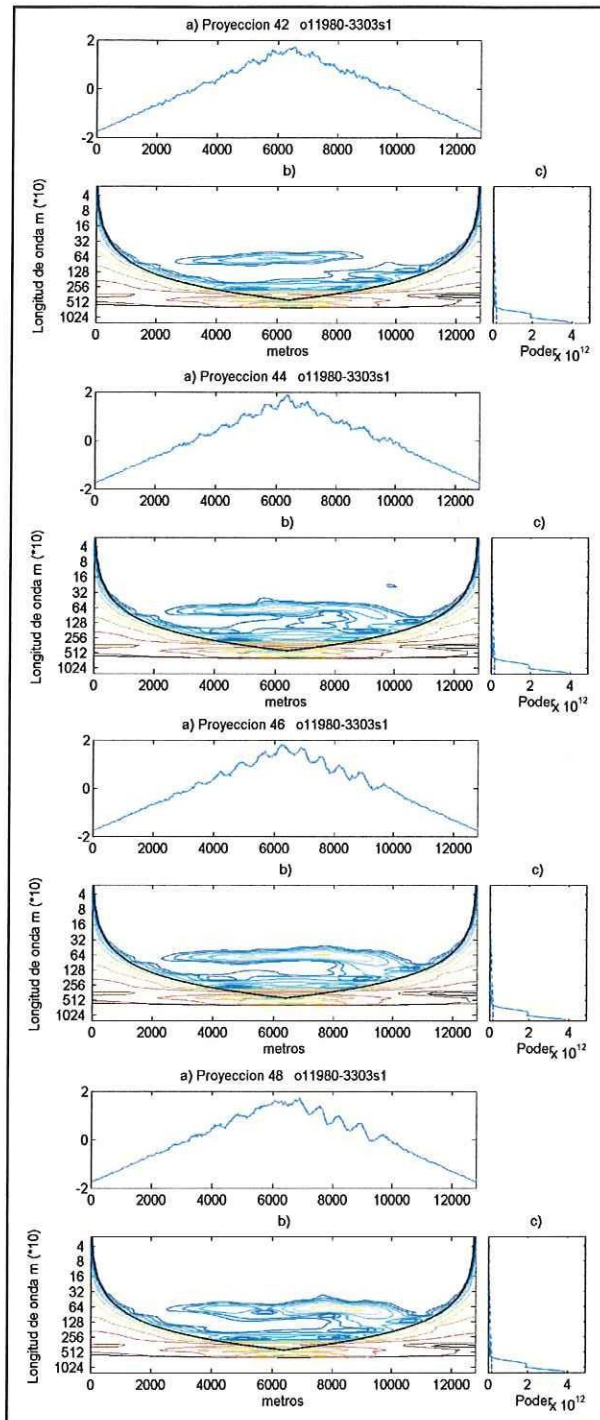


Figura 36.- Similar a la figura 35 pero para las proyecciones de 42°, cada 2°, a la de 48°.

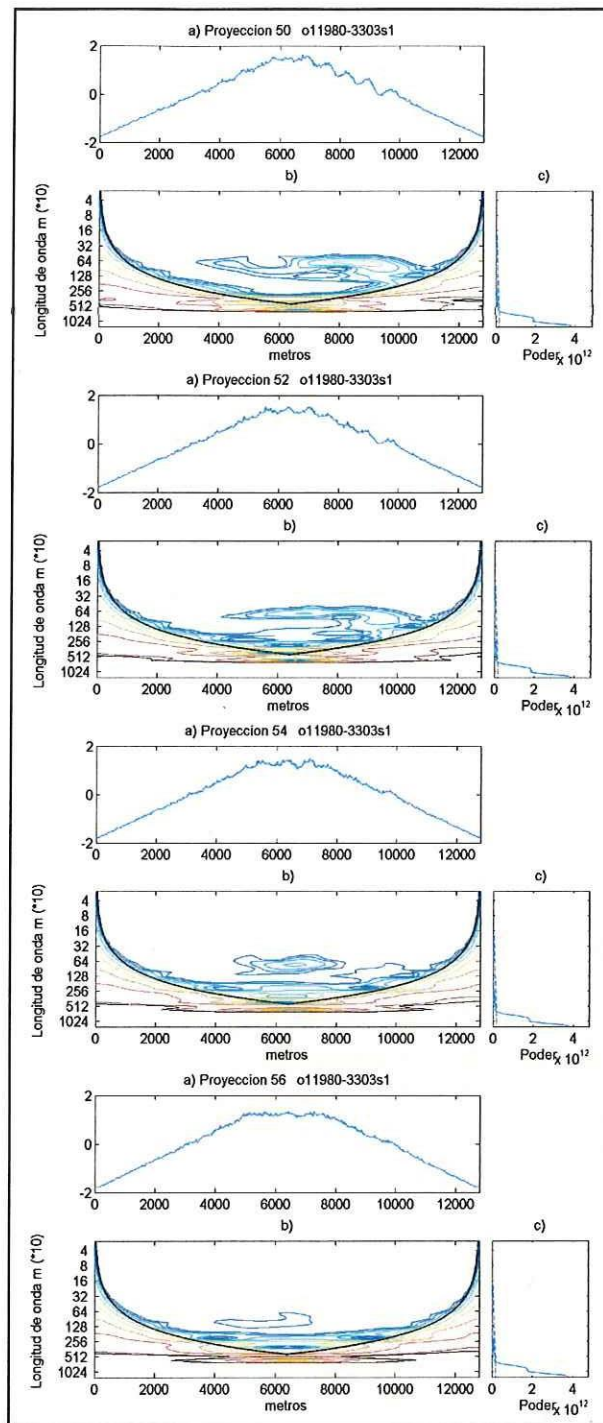
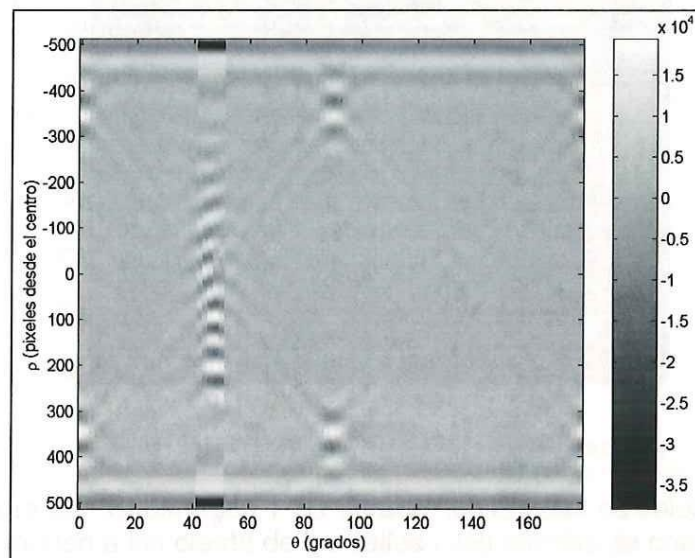


Figura 37.- Similar a la figura 35 pero para las proyecciones de 50°, cada 2°, a la de 56°.

La figura 38 es la TR filtrada de la subimagen S1-GT, a la cual se le aplico un filtro pasa banda de 500 m a 1200 m a las proyecciones entre  $42^\circ$  y  $50^\circ$ , que es donde se detectan los picos con mayor energía. A las demás proyecciones se les aplicó un filtro pasa-banda mas estricto de 700 m a 900 m. Las bandas negras y blancas se ven mas acentuadas entre las proyecciones de  $40^\circ$  a  $50^\circ$  y también se queda información del borde de la imagen en las proyecciones de  $0^\circ$  y  $90^\circ$ , entre las coordenadas  $\rho = -300$  y  $-400$ . Y  $\rho = 300$  y  $400$ .

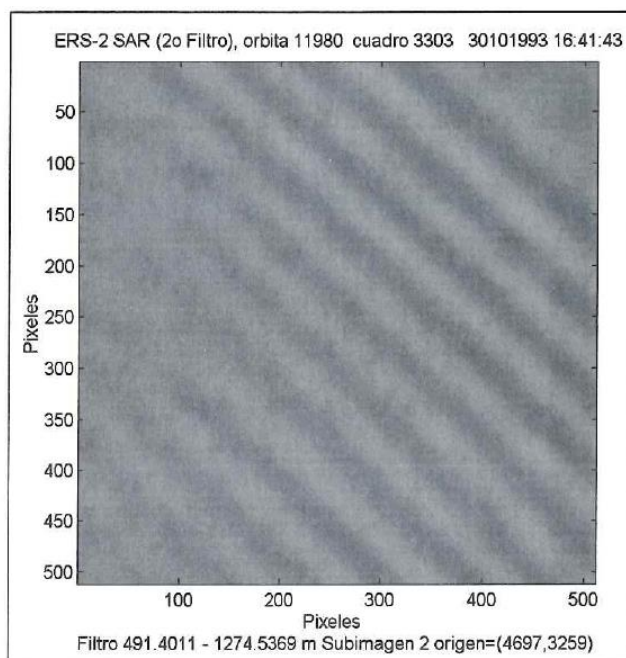


**Figura 38.-** Transformada Radon filtrada de S1-GT, la barra de colores indica la intensidad de las proyecciones ( $\theta$ ).

#### 4.2.1.3. Reconstrucción de la imagen

Al igual que en las imágenes anteriores se reconstruyo una porción de  $512 \times 512$  píxeles, eliminando por completo la información de los bordes de la imagen. La figura 39 es la imagen reconstruida después del filtro Wavelet

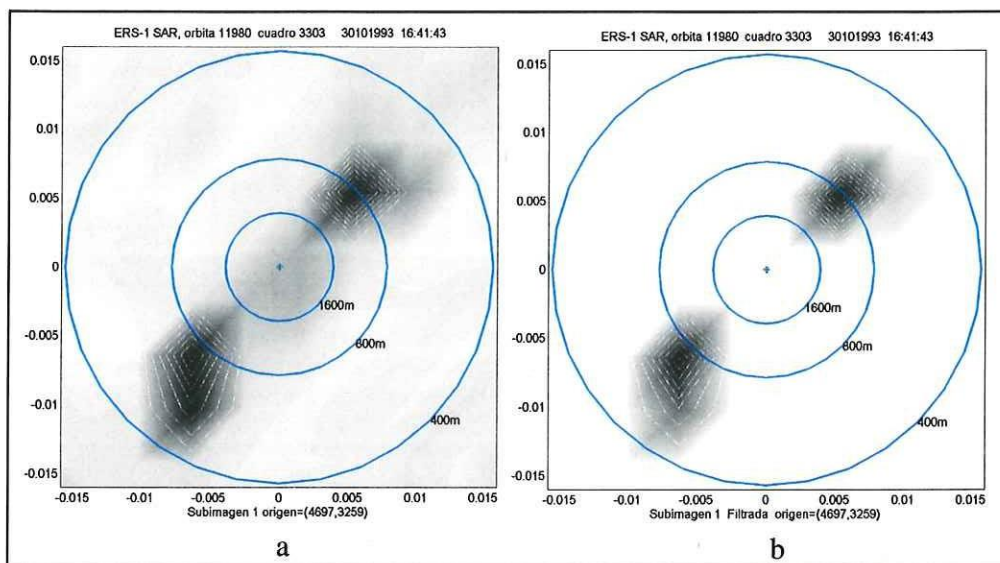
1-D; se puede observar que la visualización de la imagen mejora notablemente, al ser totalmente eliminado el ruido speckle, visualizándose más crestas que en la figura 33; en la figura 41 podremos observar con mayor claridad esta diferencia.



**Figura 39.-** Subimagen 1-GT filtrada, las bandas de color claro corresponden a las crestas de los valles y las bandas de color oscuro corresponden a los valles.

El espectro direccional de S1-GT (figura 40a) muestra un pico espectral entre los 500 m y 1200 m de longitud de onda; la dirección de propagación no se puede determinar a partir de la visualización de la imagen, se necesita más información (como batimetría del lugar, distribución vertical de densidad y el comportamiento de la marea) para poder determinarla. En el espectro direccional de la subimagen S1-GT filtrada

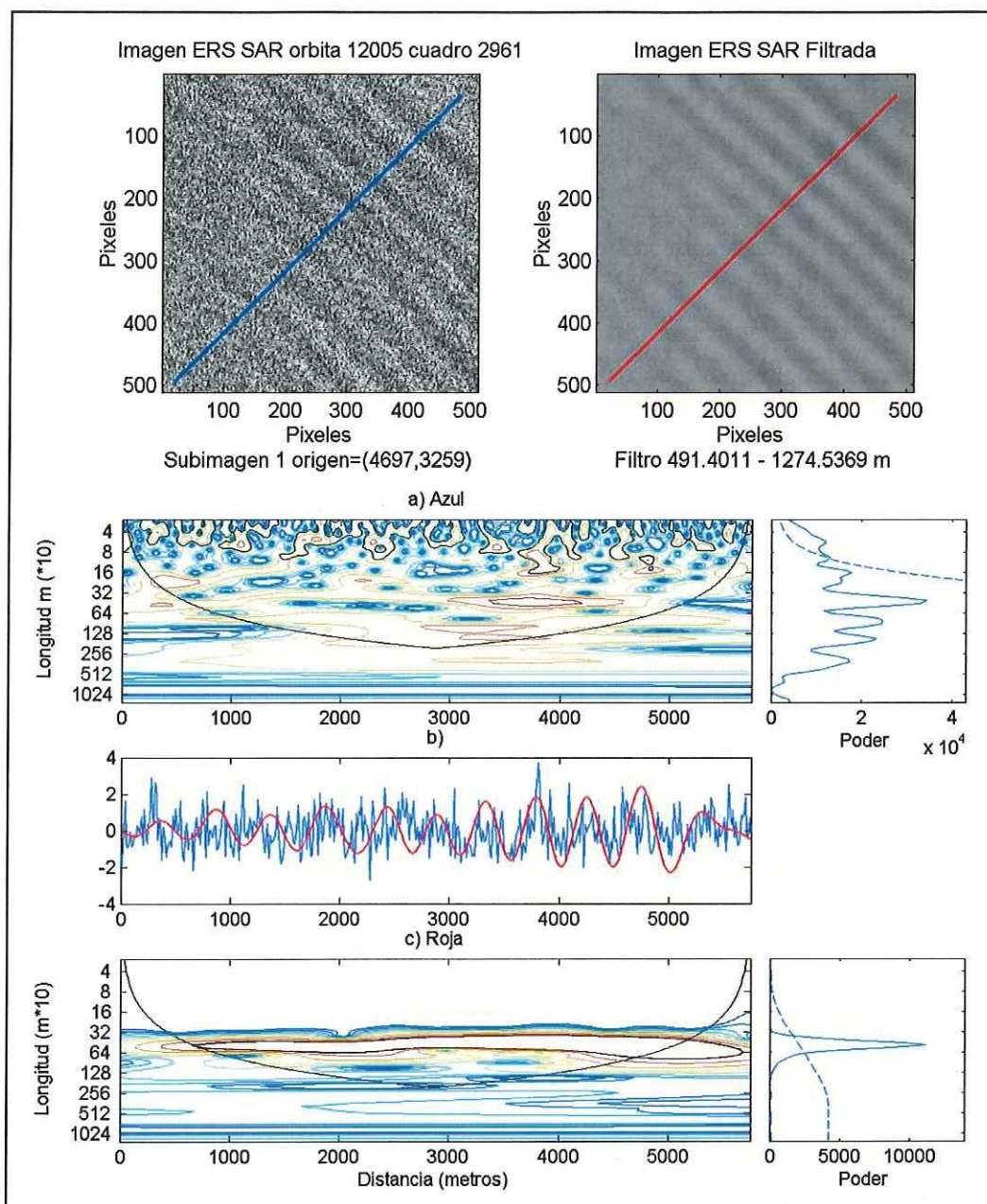
(figura 40b) podemos notar como el ruido que aparece alrededor de los picos espectrales son eliminados.



**Figura 40 a)** Espectro direccional (FFT) de S1-GT; los círculos azules representan las localizaciones de las componentes del oleaje con 400m, 200m y 100m de longitud de onda. **b)** Espectro direccional de S1-GT filtrada.

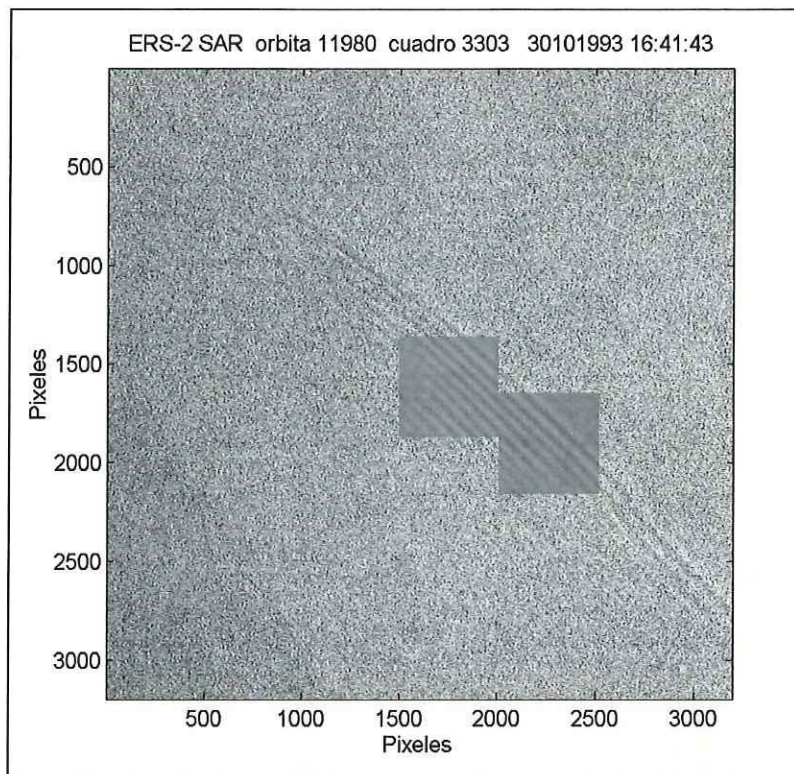
La figura 41c es la comparación de transectos en S1-GT original y filtrada, se puede observar como el transecto de la imagen filtrada (línea roja) está suavizado, pudiéndose notar que la amplitud de las ondas va aumentando. La figura 41a y la figura 41b son los espectros de poder Wavelet para el transecto original y el filtrado respectivamente, se observa que todas las longitudes debajo de 200 m (oleaje y ruido speckle) que aparecen en (b) son eliminados en (c). En (a) se detectan picos con mayor energía (contornos rojos), con longitudes de onda entre los 500 m y los 900 m, localizados en el centro de la señal y el espectro global indica que se encuentran debajo del nivel de confianza. En (c) se observa el mismo pico

pero a o largo de toda la señal y en el espectro global se encuentra arriba del 95% de significancia.



**Figura 41** Comparación de transectos obtenidas de la S1-GT original y filtrada. En la parte superior se muestran los transectos para cada imagen. **a)** Espectro Wavelet de poder para el transecto de la imagen original. **b)** Espectro de poder Wavelet para el transecto de la imagen filtrada. A la derecha de (a) y (c) se encuentra los espectros globales correspondientes.

La figura 42 muestra una visión mas amplia de la señal del paquete de OI analizado con las subimagenes filtradas sobrepuestas, se puede observar la mejora en la visualización de las ondas internas.



**Figura 42** Señal de ondas internas en la imagen del Golfo de Tehuantepec., con las subimagenes filtradas sobrepuestas.

## 5. DISCUSIÓN

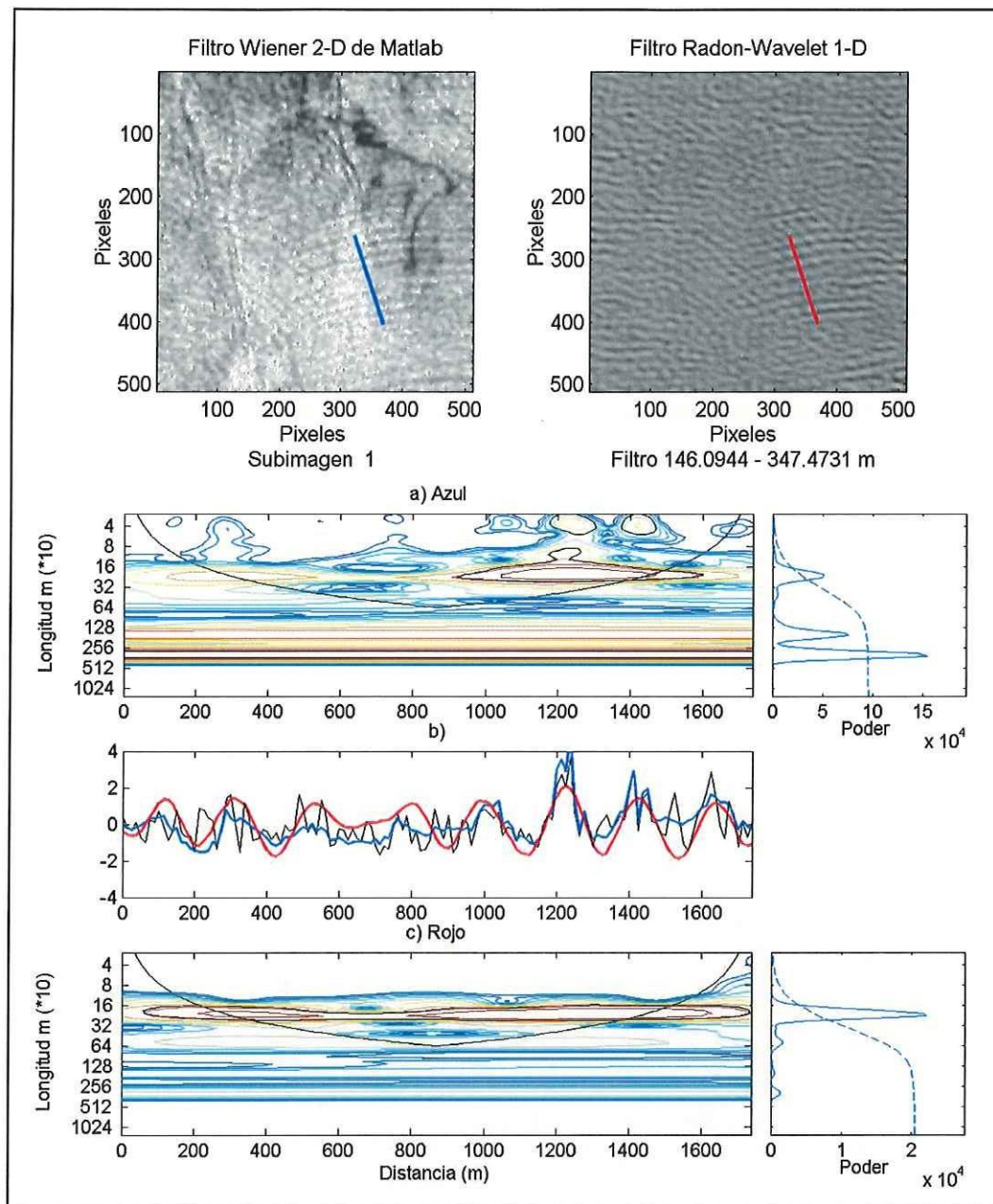
### 5.1. Método Radon Wavelet 1-D

Con el método *Radon-Wavelet 1-D* (RW1D) es posible mejorar la visualización de las señales de oleaje (swell) y ondas internas que aparecen en imágenes adquiridas por un radar de apertura sintética. La capacidad de

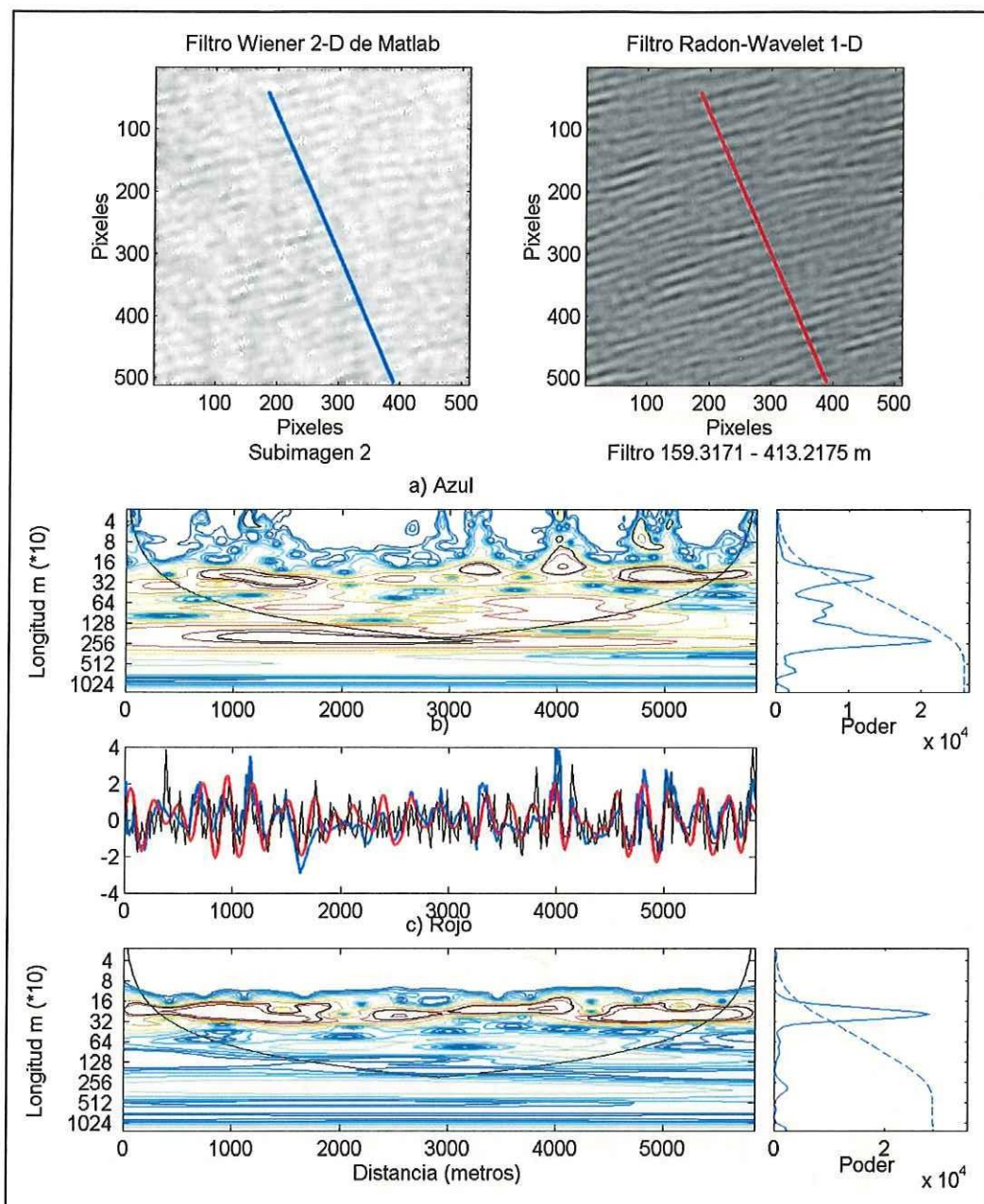
la transformada Radon para detectar, al integrar a lo largo de las crestas y los valles, las direcciones que presentan estas señales y de sintetizar en una o mas proyecciones sus longitudes de onda, permite hacer un análisis Wavelet 1-D a una imagen SAR, sin importar la dirección de propagación que estas ondas presenten, simplificando el análisis de frecuencias de la imagen (en comparación de un análisis Wavelet 2-D), con el fin de eliminar las frecuencias relacionadas con el ruido speckle (frecuencias altas) y otras señales que puedan ser detectadas por un radar de apertura sintética.

Al comparar los espectros direccionales de las imágenes originales con los de las imágenes filtradas, observamos que el filtro RW1D mantiene la información del pico espectral y elimina todo el ruido que aparece alrededor de ellos, lo que nos permite formular la hipótesis de que la metodología propuesta puede obtener información mas precisa y detallada del fenómeno (swell u ondas internas) que se quiera estudiar.

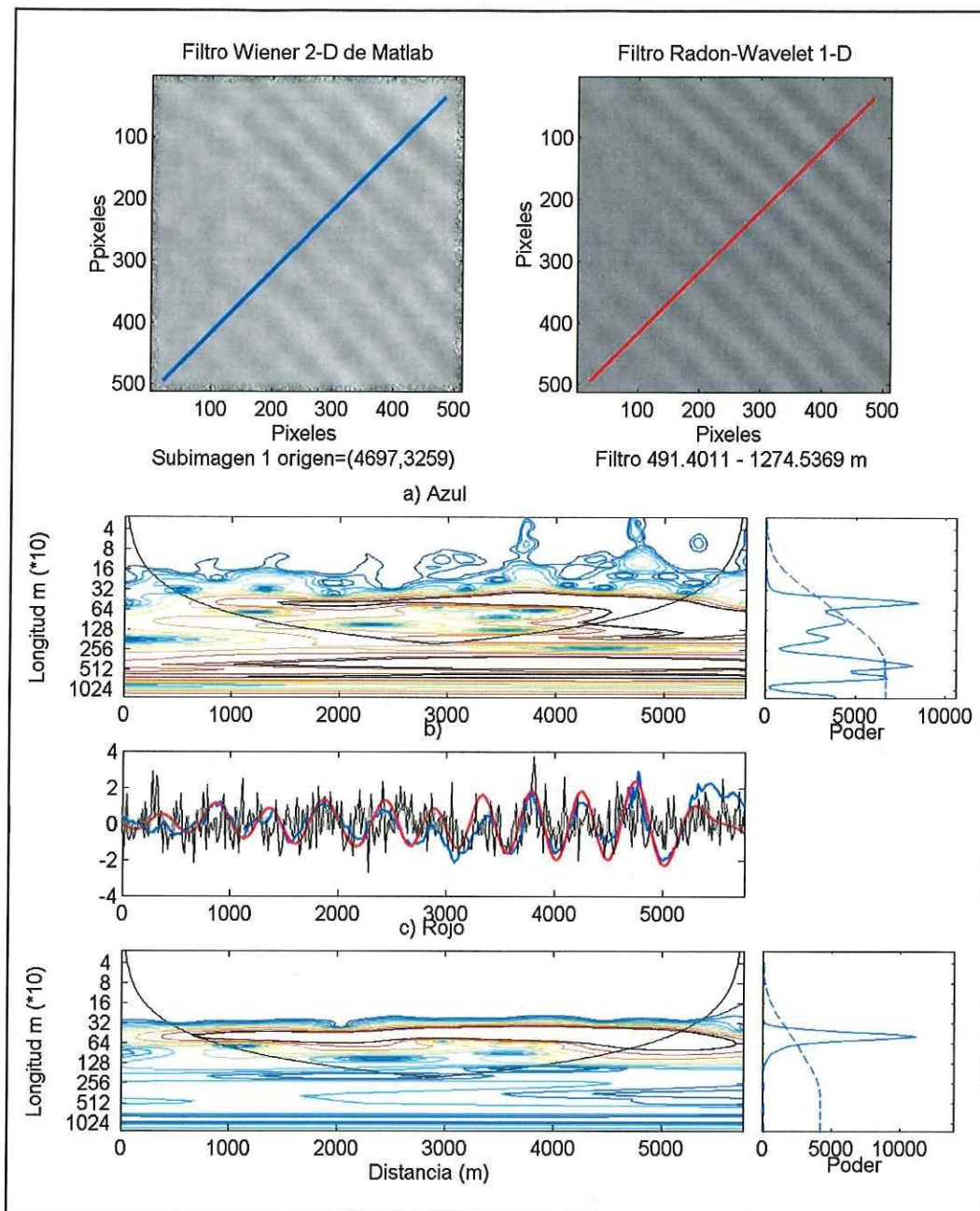
El algoritmo propuesto elimina el ruido speckle sin realizar ningún tipo de análisis local, como en el caso de otros métodos (por ejemplo el filtro Wiener2 de Matlab), obteniendo mejores resultados en la visualización y la interpretación (figura 43, figura 44, figura 45) de los fenómenos analizados en esta tesis. También se caracteriza por mantener las zonas de baja coherencia como zona de ruido.



**Figura 43** Comparación entre un método de análisis local y el método RW1D, en la subimagen S1-BTS. **a)** Espectro wavelet del transecto de la imagen con el filtro Wiener. **b)** Perfil de los transectos para cada imagen. El perfil de color negro corresponde al transecto de la imagen original mostrado en la figura 30. **b)** Espectro Wavelet para el transecto de la imagen filtrada con el método RW1D.



**Figura 44** Comparación entre un método de análisis local y el método RW1D, en la subimagen S2-BTS. **a)** Espectro wavelet del transecto de la imagen con el filtro Wiener. **b)** Perfil de los transectos para cada imagen. El perfil de color negro corresponde al transecto de la imagen original mostrado en la figura 20. **b)** Espectro Wavelet para el transecto de la imagen filtrada con el método RW1D.



**Figura 45** Comparación entre un método de análisis local y el método RW1D, en la subimagen S2-GT. **a)** Espectro wavelet del transecto de la imagen con el filtro Wiener. **b)** Perfil de los transectos para cada imagen. El perfil de color negro corresponde al transecto de la imagen original mostrado en la figura 41 figura 30. **b)** Espectro Wavelet para el transecto de la imagen filtrada con el método RW1D.

## **5.2. Imagen de la superficie del mar en la Bahía Todos Santos (Swell)**

La efectividad del método RW1D para filtrar una imagen adquirida por un radar de apertura sintética, que contiene señales de oleaje (swell), depende principalmente de la capacidad de la transformada Radon para detectar estas señales. En base al análisis Wavelet 1-D, hecho a las proyecciones de TR, se encontró que la señal del oleaje se detectó con mayor detalle en la subimagen S2-BTS, esto debido a que la señal del oleaje en esta subimagen presenta una dirección predominante en toda ella, lo que hace que la TR detecte las señales en pocas proyecciones que presentan picos de mucha intensidad. En cambio en la subimagen S1-BTS no se pudo detectar a detalle que proyecciones y que longitudes de onda presentaba la señal del oleaje, esto debido a las características que presenta esta señal, como la difracción, provocando que la TR detectara las señales en un intervalo de proyecciones mas amplio que contienen picos de menor intensidad, por lo que fue necesario apoyarse en la información que nos da el espectro direccional de Fourier (figura 27) para determinar las direcciones que podrían tener información relevante de la señal del oleaje.

Se esperaba que la transformada Radon pudiera funcionar como un filtro "direccional" del oleaje. Con esto quiero decir que seria posible reconstruir una imagen filtrada en donde solo se observara una de las direcciones presentes en la imagen. Esto no fue posible en la subimagen

que contenía distintas direcciones (S1-BTS) debido a que estas son producto de la modificación que sufre el swell (subimagen S2-BTS), por la batimetría y la difracción que provoca la Isla de Todos Santos. La TR podría funcionar como filtro "direccional" en imágenes que presenten señales con distintas direcciones de oleaje que provengan de lugares distintos.

### **5.3. Imagen de la superficie de la mar en el Golfo de Tehuantepec (Ondas Internas)**

El método RW1D es eficiente para filtrar las señales de ondas internas que aparecen en esta imagen. Es importante recordar que las señales de ondas internas que se ven en imágenes SAR no ocurren en la superficie, sino que, son una representación de lo que está ocurriendo en la picnoclina, por ello las amplitudes que se observan no son las reales. Con el método propuesto además de obtener una mejor visualización de la señal, obtenemos una mejor representación del fenómeno.

## 6. CONCLUSIONES

La metodología propuesta en esta tesis realmente mejora la visualización de ondas superficiales (swell) e internas (mareas internas y solitones) que se observan en imágenes adquiridas por un radar de apertura sintética, mediante el uso combinado de las transformadas Radon y Wavelet 1-D.

La transformada Radon detecta las direcciones que presentan las señales del oleaje y ondas internas que aparecen en imágenes adquiridas por un radar de apertura sintética, sintetizando la información referente a sus longitudes de onda. Siendo mas clara en señales que presentan una dirección de propagación predominante como en el caso de un swell que no ha sido modificado por efectos de batimetría y difracción por bordes.

Es posible filtrar la transformada Radon de una imagen adquirida por un radar de apertura sintética, mediante la transformada Wavelet 1-D, para eliminar el ruido speckle y resaltar las características (longitudes de onda) de las señales de oleaje ó de ondas internas que aparecen en éstas imágenes.

Mediante la transformada Radon Inversa es posible reconstruir una imagen adquirida por un radar de apertura sintética, a partir de una transformada Radon filtrada, obteniendo una mejora en la visualización de las señales de oleaje y ondas internas que aparecen en estas imágenes.

## REFERENCIAS

ALPERS, W., MITNIK, L., HOCK, L & CHEN K S. - 21 Mar 2002, "The Tropical and Subtropical Ocean viewed by ERS-SAR".

URL:<http://www.ifm.uni-hamburg.de/erssar/Sdata/index.html>

ASTAF' EVA, N M. - 1991 "Wavelet analysis: theory and some applications". Physics-Uspekhi 39 (11)1085-1108, 1996. Russian Academy of Sciences.

BRACEWELL, Ronald N. - 1995. Two-Dimensional Imaging, Prentice-Hall, pp. 518-525.

CARY, Peter W. - 1998. "The simplest discrete Radon Transform". SEG Expanded Abstracts,

DAUBECHIES, I. - 1990. "The Wavelet transforms time-frequency localization and signal analysis." IEEE Trans. Inform. Theory, 36, 961-1004.

FU, L.-L. And B, Holt - 1982. Seasat views ocean and sea ice with synthetic aperture radar. Publ. 81-120, Jet Propulsion Laboratory, Pasadena California.

FU, L.-L. And B, Holt. -1984. Internal waves in the Gulf of California: observations from a space born radar. J. Geophysics. Res., 89 (C2): 2053-2060.

HAURY, L.R., BRISCOE, M.G., and ORR, M.H., 1979. Tidally generated internal wave packets in Massachusetts Bay. Nature, 278(5702), p. 312-317.

LÓPEZ, Carlos, FÀBREGAS Xavier. (2000). "SAR Interferometric phase enoising. A new approach based on wavelet transforms". En: *Proc.*

*EUROPTO'2000 Remote sensing for Agriculture, Ecosystems, and Hydrology II*. EUROPTO'2000, p. 199-210. ISBN/ISSN: 0277-786X

OCAMPO-TORRES, Francisco J. – 1999. "On the homogeneity of the wave field in coastal regions as determiner from ERS-2 and RADARSAT synthetic aperture radar images of the ocean surface". *Scientia Marina*, 65 (Supl. 1): 215 – 228.

POLIKAR, Robi. - 1996. "The Wavelet Tutorial: Partes I, II, III y IV". Segunda edición, Rowan University, Glassboro, NJ 08028, Correo-e: [polikar@rowan.edu](mailto:polikar@rowan.edu).

TORRENCE, Christopher, COMPO, Gilbert P. - 1998. "A Practical Guide to Wavelet Analysis". *Bulletin of the American Meteorological Society*, Vol. 79, No. 1, pp 71 – 78. URL: <http://paos.colorado.edu/research/Wavelets/>

WARRICK, Abbie L.<sup>1</sup>, DELANEY, Pamela A. -1997. "Detection of linear features using a Localized Radon transform with a Wavelet filter". ICASSP-97 <sup>1</sup>Imaging and Detection Program, Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, California, 94550. <sup>2</sup>Electrical Engineering Department Wichita State University, Wichita, Kansas, 67260-0044.

ARVELYNA, Yessey, OSHIMA, Masaki. – 2002. "Internal Wave Detection in SAR Image". <http://www.gisdevelopment.net/aars/acrs/2002/sar/>

ZHENG, L., K, Andrew. CHAN, K. et. al. – 1999. "Directional Clutter Removal of Aerial Digital Images Using X-ray Wavelet Transform and Markov Random Field". *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*. Vol. 37, No. 5, September.