

2.3. RADARES DE APERTURA SINTÉTICA SAR

2.3.1. Principios de adquisición de imágenes del SAR

El radar de apertura sintética SAR (figuras 2.3.0 y 2.3.1) es un radar activo que emite la energía en el intervalo de frecuencias de microondas (unos centímetros) en un período pequeño de tiempo y recibe los ecos provenientes de reflexiones de la señal en los objetos dando lugar a una apertura sintética, es decir, debido a la gran velocidad de desplazamiento del vehículo espacial (7,5 Km/s aproximadamente), la antena del dispositivo SAR se convierte en una antena virtual de mayor tamaño. El blanco permanece en el haz de la antena durante unos instantes y está observado por el radar desde numerosos puntos a lo largo de la trayectoria de satélite, lo que es equivalente a prolongar la longitud real de la antena.

La resolución acimutal mejora considerablemente al considerarse el efecto Doppler que tiene lugar como consecuencia del desplazamiento del satélite. Dos blancos puntuales separados ligeramente en la dirección acimutal muestran en cualquier instante velocidades relativas algo diferentes (respecto del radar), por ello, el eco procedente de cada blanco presentará un desplazamiento en frecuencia Doppler distinto (Martínez-Benjamin, 1999). El dispositivo SAR puede ser instalado a bordo de un avión o de un satélite.

El procesamiento de datos obtenidos por SAR es complicado debido a un gran volumen de información correspondiente a cada imagen. Al final de este complejo procesado se obtienen imágenes en tonos de gris de 100x100 Km con una resolución de unos 25 m (ERS) ó entre 12,5 m y 200 m (RADARSAT) por píxel dependiendo del tipo de radar y de las necesidades de usuario.

Los primeros ensayos de obtención de imágenes SAR a bordo de un satélite de la NASA

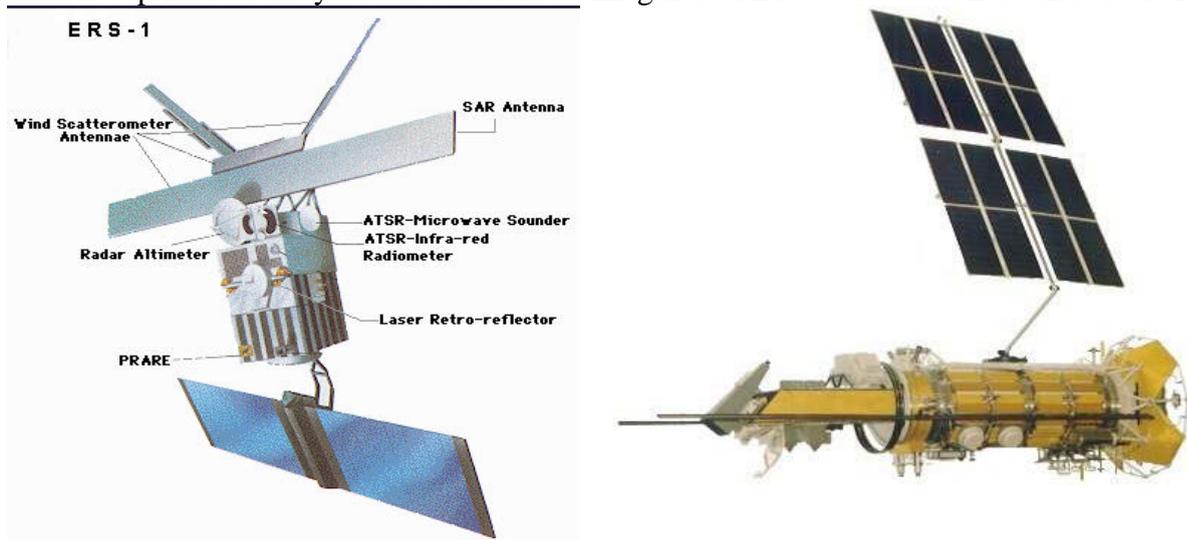


Figura 2.3.0. Satélite ERS-1 de la ESA (izquierda) equipado con el SAR. Funcionó hasta 1996. Fue substituido por el satélite ERS-2. Fuente: ESA. Satélite ruso OKEAN-O de ROSAVIAKOSMOS (derecha) que también posee el dispositivo SAR.

SEASAT se realizaron en el año de 1978. Desde aquel momento se desarrollaron distintos dispositivos mejorados basando en principios de SAR. En los últimos años los satélites equipados con radares SAR más conocidos son: JERS-1 (NASA/NASDA), RADARSAT de *RADARSAT International* (RSI) (*Canadian International Development Agency* (CIDA), NASA y NOAA), ERS-1/2 de la Agencia Espacial Europea ESA Figura (2.3.2). También los países como India, Japón y Rusia participaron en el desarrollo de las técnicas de obtención de imágenes SAR. El último con sus satélites OKEAN-01 (1983),

Almaz-1 (desde 31 de marzo de 1991 hasta 17 de octubre de 1992) y OKEAN-02 (desde 1999). El reciente evento relacionado con las nuevas tecnologías del SAR fue el lanzamiento del satélite ENVISAT (Figura 2.3.1) de la ESA del 1 de marzo de 2002 equipado entre otros dispositivos con el *Advanced Synthetic Aperture Radar* (ASAR), que permite diferentes resoluciones, según el modelo en que trabaja.

2.3.2. Datos técnicos generales del satélite ERS-2 con dispositivo tipo SAR a bordo

Fecha de lanzamiento: 21 de abril de 1995. Vehículo espacial: Ariane V72.

Plataforma: MMS Spot (Mark 1).

Período de tiempo de funcionamiento programado: 3 años.

Órbita: 785 Km. Inclinación: 98.6°. Período de rotación 100,5 min.

Masa: 2500 kg. Longitud: 11.8 m. Antena del SAR: 10 x 1 m.

Resolución máxima de imagen: 26 metros en un píxel.

Anchura de franja superficial de obtención de imágenes: 99 Km.

Período de adquisición de imagen del mismo punto: 35 días.

Misión: adquisición de imágenes SAR de alta resolución en cualquier condición meteorológica, 24 horas del día, de tierra y de océano; monitoreo de fenómenos medioambientales y provocados mediante actividades antropogénicas (Figura 2.3.2).



Figura 2.3.1. Imagen virtual del satélite ENVISAT en su órbita polar. Fuente: ESA.

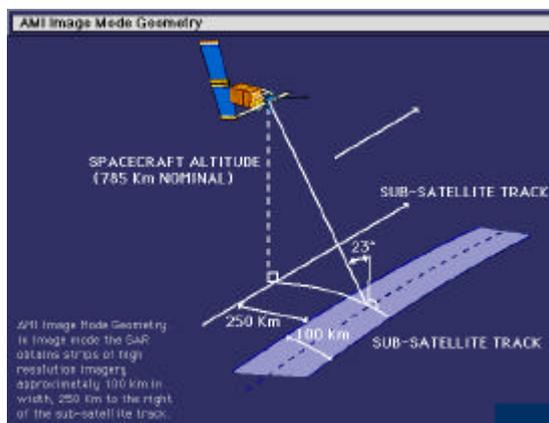


Figura 2.3.2. El esquema de adquisición de imágenes mediante el satélite ERS-1/2. Fuente: ESA.

Tabla 2.3.0. Datos principales de distintos satélites con dispositivo tipo SAR a bordo.

Fuente: *Journées thématiques de L'Escole Doctorale, 2002.*

Año	Satélite	Dispositivo	Franja, km	Resolución m/píxel
1991 - 2000	ERS-1	AMI/SAR	100	30
1992-1998	JERS-1		75	18
1995 ->	RADARSAT-1		100-170	25-100
1995 ->	ERS-2	AMI/SAR	100	30
2001	ENVISAT	ASAR	100-400	10-1000
2003	RADARSAT-2		100-170	25-100

2.3.3. Fundamentos y condiciones hidrometeorológicas de la detección de los fenómenos medioambientales mediante las imágenes del SAR

Los sistemas del SAR emiten ondas cortas de unos centímetros. La intensidad de la señal recibida es debida principalmente a la rugosidad a pequeña escala de la superficie. Cuando la superficie

monitoreada mediante radar es rugosa y contiene pendientes pequeñas cuyo tamaño es comparable con la longitud de la onda de la señal de radar, entonces se observa el fenómeno de difracción. En el caso de la superficie del mar, la señal del SAR dispersada por los trenes de las ondas capilares o pequeñas de altura comprendida entre 0,1 mm y 10 cm se suma coherentemente, es decir se produce una dispersión resonante de tipo Bragg (Figura 2.3.3).

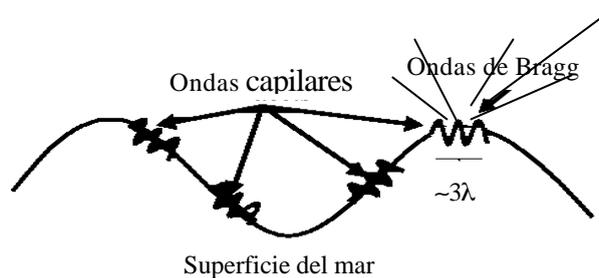


Figura 2.3.3. Dispersión resonante de tipo Bragg.

En efecto, en la imagen se observa un área marina en altos tonos de gris, casi blanca. En el caso contrario, cuando en la superficie del mar no hay olas pequeñas, no se produce la resonancia de la señal y en la imagen se observan unas zonas superficiales oscuras. Las trazas de materia orgánica (como son los productos de crudo, de aceites minerales, de desechos urbanos / rurales, de la vida marina natural etc.) en la superficie marina, con propiedades tensioactivas, producen una disminución local de la rugosidad de la superficie del mar debida principalmente al viento y a las olas capilares, que se reflejan en una menor reflectividad de la señal emitida y detectada por los sensores del SAR (Gade et al., 1998). Estas manchas o penachos oscuros en las imágenes SAR, son independientes de las condiciones de iluminación solar y de cobertura por nubes, sin embargo el posible contraste depende fuertemente de la velocidad del viento (Gade y Alpers, 1999), a saber: cuando la velocidad del viento es mayor de 2-3 m/s y menor de 10-12 m/s las condiciones de la detección de las manchas mediante el SAR son las más favorables.

Las imágenes de los radares activos SAR ayudan a detectar en alta mar y en las proximidades de las costas los derrames de residuos oleosos procedentes de los buques y de otras fuentes de contaminación tal como se ven en las Figuras 2.3.4 y 2.3.5 en las cuales se aprecian estelas detectadas respectivamente mediante fotografía aérea y el dispositivo SAR.

Las propiedades de la superficie que afectan la dispersión de las microondas son las propiedades eléctricas, la rugosidad, forma geométrica y el ángulo de incidencia. Las masas de aguas marinas tienen ciertas propiedades físico-químicas, eléctricas, concentración de las sustancias orgánicas, etc., el hecho que influye en la dispersión de las microondas y en las propiedades de retroreflectancia de la superficie acuática. En efecto, en las mismas condiciones meteorológicas, se observan varios fenómenos dinámicos oceánicos de mesoescala como son ondas internas, corrientes marinas superficiales, frentes oceánicos y vórtices. También las imágenes SAR permiten detectar características topográficas del fondo marino en aguas someras como una expresión de las mismas en la superficie acuática.

Por otro lado, los fenómenos meteorológicos tales como son los ciclones, los frentes sinópticos, los vientos, las ondas internas atmosféricas y las lluvias, actúan en la superficie del mar, lo que nos permite también detectar su presencia mediante las imágenes del SAR.

Otro fenómeno marino que tiene importancia en el caso de utilización del SAR en la monitorización de la superficie del mar es el de la circulación vertical de Langmuir que está relacionado con la concentración superficial de las partículas en la zona de convergencia entre dos células en el mar.

Curioso, pero hay unos ejemplos históricos de las detecciones de este tipo de fenómeno *in situ*. Por ejemplo, el capitán James Cook (1728-1779) una vez anotó en su libro de bitácora: “...on the 9th December 1768 we observed the sea to be covered with broad streaks of a yellowish colour, several of them a mile long, and three or four hundred yards wide”



Figura 2.3.4. Mar del Norte. Derrame de residuos oleosos procedente de un buque. *Copyright* Greenpeace

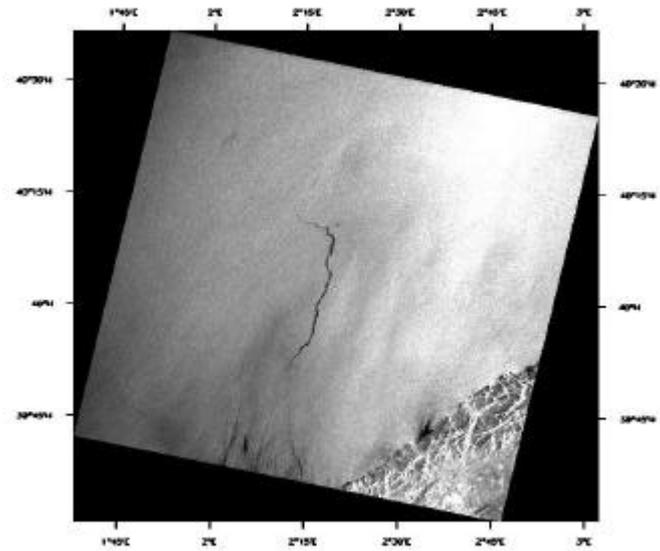


Figura 2.3.5. Ejemplo de una estela que lleva un tiempo en el mar, imagen del SAR de ERS-2 de 05.07.98 del área al Noroeste de Mallorca.

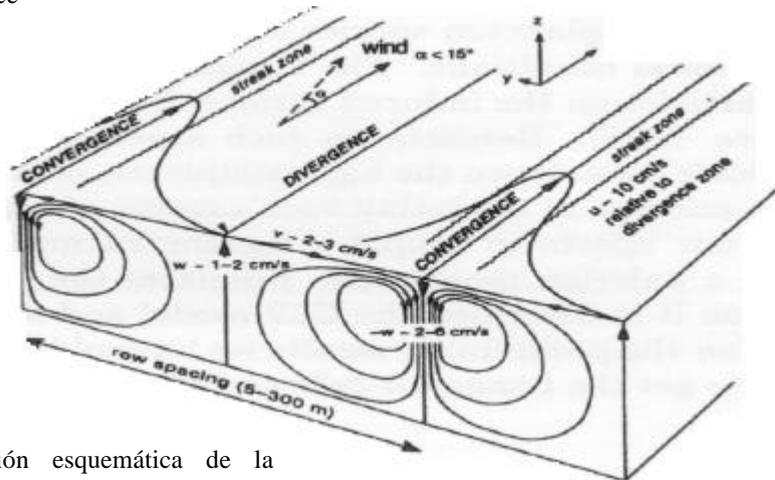


Figura 2.3.6. Presentación esquemática de la circulación de Langmuir. Fuente: Sole, et al., 2000.

Las partículas que pueden ser de origen natural (algas marinas, zooplancton, productos de la vida marina) o artificial (desechos de industrias, derrames de petroleros, penachos de aguas contaminadas, sedimentos en suspensión, etc.) se acumulan en la franja superficial de convergencia entre dos células (Figura 2.3.6) y forman las estelas o franjas de productos tensioactivos que claramente se observan en las imágenes del SAR.

Posteriormente estas estelas se transforman y se transportan mediante las corrientes marinas, oleaje, vórtices, frentes marinos, etc. y de tal manera juegan un papel de trazadores que revelan la compleja dinámica del mar. Según Sole et al. (2000) la distancia horizontal entre dos líneas de convergencia puede ser desde unos cuantos metros hasta centenas de metros y la profundidad máxima de la circulación vertical puede alcanzar los 100-200 metros.

Los estudios recientes muestran que la formación de la células de Langmuir y su detección en forma de espirales horizontales mediante las imágenes de satélites de la superficie de los mares no es un fenómeno raro (Munk, 2001). En Minyaev (1999) se presentan los resultados de observaciones de células de Langmuir en el Mar Báltico. También se señala que en la formación de las células influye mucho el viento superficial de tal manera que se puede establecer algunos criterios numéricos. Con la velocidad del viento inferior a 3-5 m/s la generación de las células no se observa. Con la velocidad del viento dentro del rango 3-5 m/s y 15 m/s se detecta una intensa formación de las células y con la velocidad del viento superior a 15 m/s la generación de células tampoco surge, aún más: las células existentes desaparecen. También es necesario notar que a pesar del movimiento horizontal rotatorio, las partículas en las células tienen una componente vectorial hacia la dirección general de la propagación del viento. No obstante, la velocidad de este movimiento superficial es mayor en las franjas de convergencia que entre ellas. La existencia de las células de Langmuir y las particularidades de distintos tipos de movimientos asociados con ellas son hechos importantes en el caso de estudios de dinámica y transformación de derrames de petróleo, vórtices, giros, etc., es decir de todos fenómenos marinos que pueden ser asociados con la dinámica de los trazadores observados en la superficie marina mediante las imágenes del SAR en particular.

2.3.4. Ejemplos de la detección de distintos fenómenos hidrometeorológicos mediante las imágenes del SAR

Tabla 2.3.1. Posibilidades de detección de distintos fenómenos oceánicos mediante los satélites (Ivanov et al, 1997)

	ALMAZ-1	ERS-1/2	JERS-1	RADARSAT
Clorofila	-	-	+ radiómetro	-
Línea de costa	+	+	+	+
Corrientes, nivel del mar	-	+ altímetro	-	-
Vórtices	-	+	-	+
Frentes oceánicos	+	+	+	+
Afloramiento	+	+	+	+
Oleaje	+	+	+	+
Ondas internas	+	+	+	+
Viento superficial	-	+ <i>scatterometer</i>	-	-
Derrames de crudo	+	+	+	+
Topografía submarina de litoral	+	+	-	+
Hielo marino	+	+	+	+
Estelas de los barcos	+	+	+	+

Las ventajas del SAR permiten detectar distintos fenómenos atmosféricos y oceánicos. Un buen número de los ejemplos de imágenes de los fenómenos detectados se encuentra en ESA, (1992, 1994) y aquí presentamos solamente algunos ejemplos de imágenes. La tabla 2.3.1 muestra las posibilidades de detección de distintos fenómenos oceánicos mediante los satélites ALMAZ-1, ERS-1/2, JERS-1 y RADARSAT (Ivanov et al, 1997).

En las figuras 2.3.7 – 2.3.14 se muestran algunos ejemplos de distintos fenómenos oceanográficos y meteorológicos detectados mediante las imágenes del SAR. Habitualmente las imágenes del SAR suelen ser en colores blanco y negro, es decir cada píxel de la imagen final tiene su tono de gris en la escala de 256 tonos (desde 0 (el fondo de la imagen está completamente negro) hasta 255 (el fondo de la imagen

está completamente blanco)). La imagen del SAR de la figura 2.3.7 está transformada en “falso color” para mejorar su presentación visual.



Figura 2.3.7. Imagen del SAR en falso color del Estrecho de Gibraltar. Se observan claramente los trenes de las ondas internas en la parte Este del estrecho. Fuente: NASA.

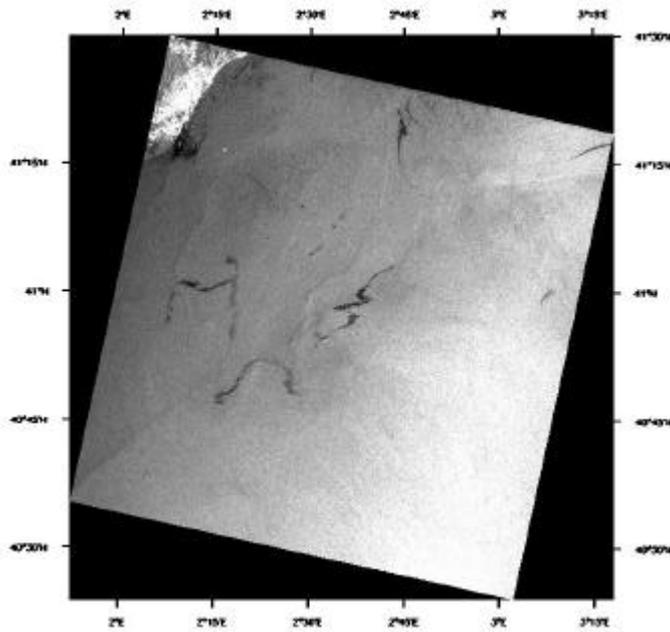


Figure 2.3.8. Imagen del SAR de ERS-2 de 05.07.98 Derrames de crudo frente a Barcelona y penacho de aguas procedentes del Río Llobregat



Figura 2.3.9. Estrecho de Gibraltar. Imagen SAR de RADARSAT de 21 de enero de 1998 a las 18:19 UTC. Típico vertido por un petrolero donde también se aprecia su estela.

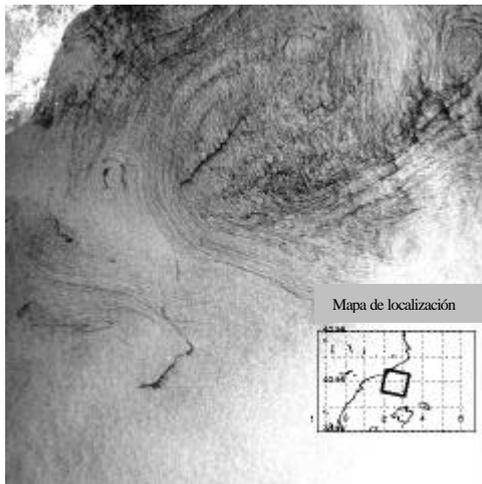


Figura 2.3.10. Imagen SAR de ERS-2 de 24 de agosto de 1997 a las 10:30 UTC de una combinación de estructuras naturales de tipo vórtice y de vertidos cerca de Barcelona.

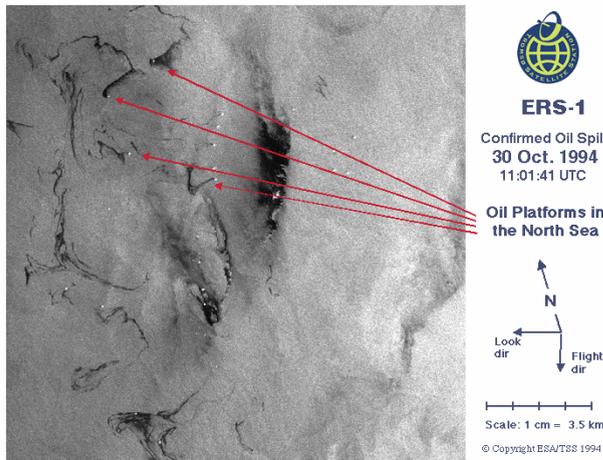


Figura 2.3.11. Mar del Norte. Derrames de crudo procedentes de plataformas. Copyright ESA/TSS, 1994.

Figura 2.3.12. Imagen SAR de ERS-2 de 11.12.98. Penacho de aguas residuales, Río Llobregat, Barcelona.

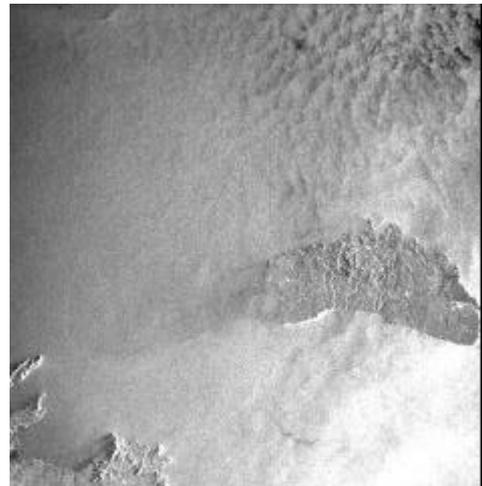
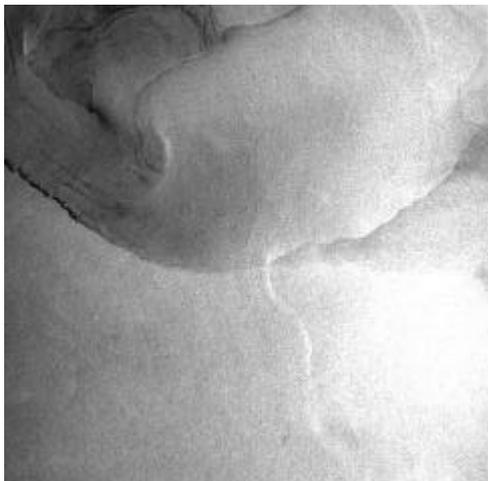


Figura 2.3.13. Dos imágenes del SAR de ERS-2. Izquierda: un frente atmosférico al Norte de Menorca del 15.10.98. Derecha: células de la lluvia cerca de Menorca del 12.02.98.

Según nuestra experiencia de monitorización de superficie marina mediante las imágenes del SAR, los derrames de petróleo procedentes de los petroleros se encuentran en alta mar en su fase de transformación y de degradación en general (Figura 2.3.8), pero, a veces se puede captar en su fase inicial, hecho que se muestra en la figura 2.3.9 donde se ve perfectamente cómo el buque delincuente (los puntos brillantes en la punta de estela oscura de aguas contaminadas) está vertiendo aguas de lastre (probablemente) en alta mar en su ruta. Ahora bien, con este ejemplo tenemos que hacer notar una de las particularidades de la detección de los blancos en movimiento mediante imágenes del SAR que tiene una considerable importancia a la hora de analizar la imagen. El dispositivo SAR fue diseñado para la detección de los objetos medioambientales prácticamente fijos en general o con la velocidad de su desplazamiento muy baja, por lo menos tal condición corresponde a los blancos puntuales. Debido a las particularidades tecnológicas de la obtención de la imagen del SAR, los objetos puntuales en movimiento (aún de la forma rugosa y que tienen muchos ángulos en su estructura física) como son los buques, trenes, etc., aparecen en la imagen como los puntos o estrellas brillantes al lado de la trayectoria real de su camino. En el caso de los trenes, ellos se encuentran al lado de los rieles y en el caso de los buques – al lado de su estela).

Se puede notar que las estelas habituales que dejan los buques en alta mar normalmente también se detectan mediante imágenes del SAR como las estelas blancas (al contrario de las estelas oscuras asociadas con las aguas de lastre) debido al cambio de la rugosidad de la superficie marina respecto al resto de la imagen. La hélice del buque produce ciertas perturbaciones en la superficie del mar y la espuma, bolsas del aire y las pequeñas olas forman una superficie rugosa a pequeña escala que puede durar unas decenas de minutos, el hecho mejora la retroreflectancia de la estela.

La imagen de la figura 2.3.10 muestra una combinación de los derrames de aguas contaminadas procedentes de un buque sobre el fondo dinámico de aguas marinas (se observan numerosas estelas naturales envueltas en un movimiento vortical). Según las dimensiones longitudinales de la imagen que son 100 por 100 kilómetros aproximadamente, las distancias entre las estelas naturales son de unas cuantas centenas de metros, entonces podemos suponer que la mayoría de estas estelas se formaron bajo un proceso natural como la circulación en las células de Langmuir. Un derrame artificial que se encuentra en el centro de la imagen tiene una forma de estela dirigida perpendicularmente al giro del resto del fondo, lo que quiere decir que esta estela de aguas contaminadas es relativamente reciente porque está poco transformada aún mediante movimientos dinámicos de la superficie del mar. El otro derrame en la parte baja de la imagen ya está transformado considerablemente mediante procesos dinámicos marinos.

En la imagen del SAR de la figura 2.3.11 se ven varios derrames de crudo procedentes de las plataformas petrolíferas en el Mar del Norte, que ya forman parte del movimiento dinámico de la zona.

La imagen de la figura 2.3.12 muestra un penacho de aguas contaminadas que contienen los productos oleosos y tensioactivos procedente del Río Llobregat (Barcelona). Se observa claramente el lecho del río entre las estructuras urbanas, la dársena del Puerto de Barcelona y los muelles y las tendencias dinámicas de la transformación del penacho.

En una de las imágenes de la figura 2.3.13 (dimensiones 100x100Km de ambas) se ve cómo se propaga un frente atmosférico sobre una superficie marina, en la otra se observan típicas células de la lluvia. Es necesario subrayar que en las imágenes del SAR solamente se observan “los reflejos” de los fenómenos meteorológicos sobre la superficie del mar. El cambio de la rugosidad de la superficie acuática mediante la propagación de frentes atmosféricos (que dividen diferentes masas de aire), los ciclones, las lluvias y células de convección, etc., se refleja en las imágenes del SAR de tal manera que nos permite

distinguir distintos fenómenos atmosféricos característicos, como, por ejemplo, nos muestra la imagen de la figura 2.3.14 donde un tifón tropical produce su imagen virtual en la superficie marina.

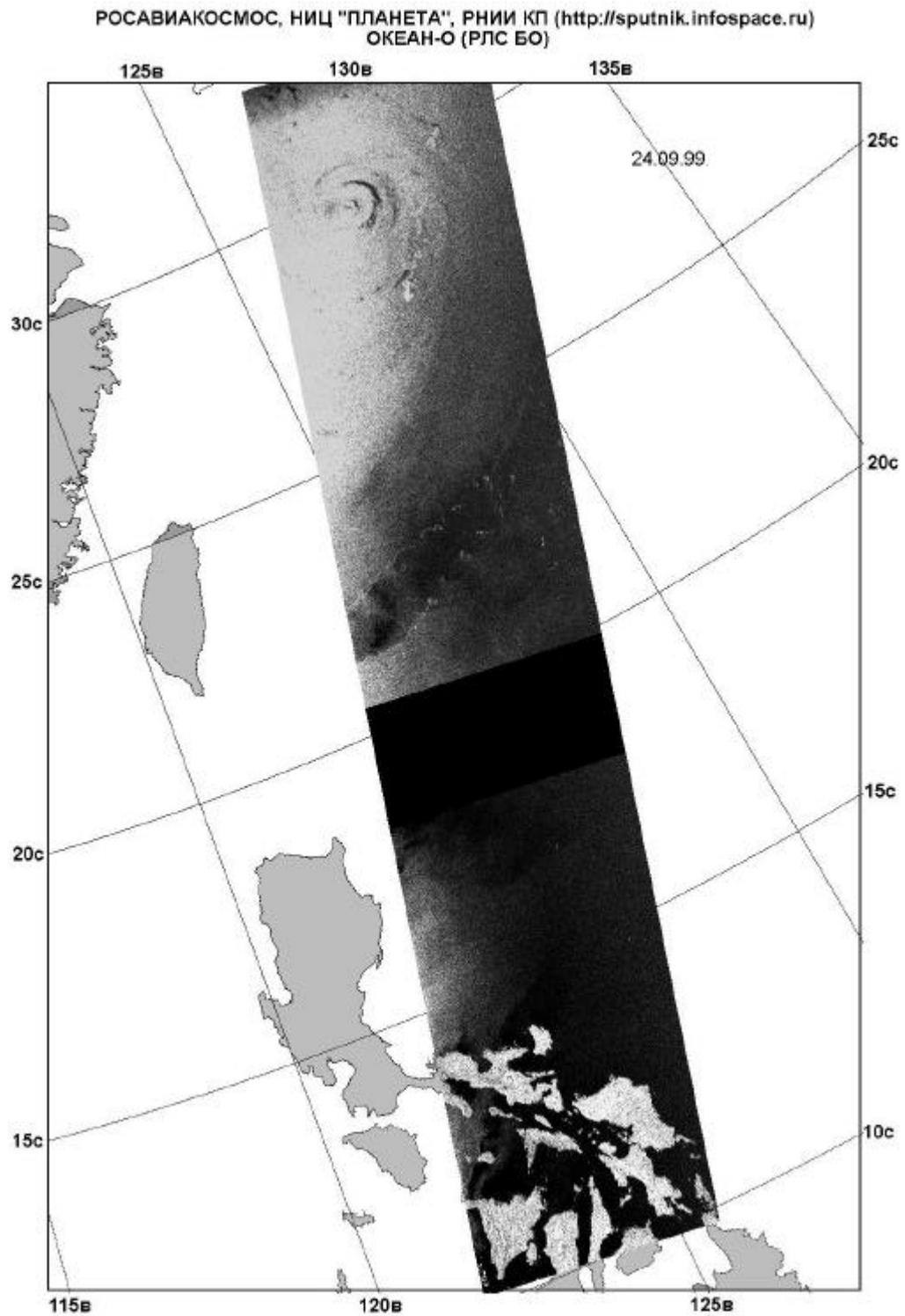


Figura 2.3.14. Imagen del SAR del satélite ОКЕАН-О (Rusia) de un tifón en el Mar de la China Oriental del 24.09.99.

En la figura 2.3.15 se muestra una de las primeras imágenes del nuevo satélite ENVISAT de la ESA adquirida mediante dispositivo ASAR donde se ve claramente los campos de hielo suelto o icebergs procedentes de la costa cubierta de hielo.

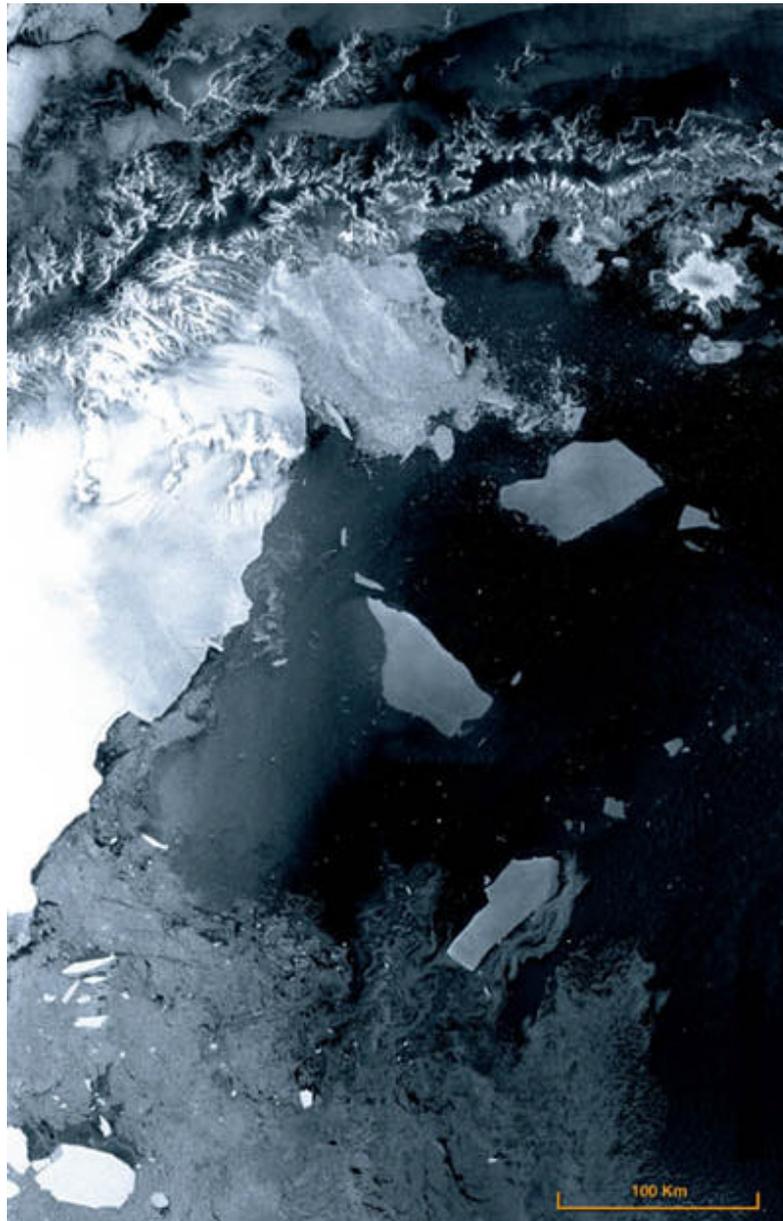


Figura 2.3.15. Una zona marina cerca de la costa de Antártica Imagen del ASAR del satélite ENVISAT. Marzo de 2002. Fuente: ESA.

[Regresar al Índice](#)

[Seguir](#)