

UNIVERSIDAD DE LAS PALMAS DE GRAN CANARIA

**ESCUELA DE INGENIERÍA DE
TELECOMUNICACIÓN Y ELECTRÓNICA**



PROYECTO FIN DE CARRERA

*Procesado de datos SAR del satélite Sentinel-1 para el
estudio de zonas costeras*

TITULACIÓN: Ingeniero de Telecomunicación

TUTOR: Javier Marcello Ruiz

AUTOR: Aridane Díaz Santana

FECHA: Septiembre 2016

UNIVERSIDAD DE LAS PALMAS DE GRAN CANARIA

**ESCUELA DE INGENIERÍA DE
TELECOMUNICACIÓN Y ELECTRÓNICA**



PROYECTO FIN DE CARRERA

*Procesado de datos SAR del satélite Sentinel-1 para el
estudio de zonas costeras*

HOJA DE FIRMAS

Alumno:

Tutor:

Fdo. Aridane Díaz Santana

Fdo. D. Javier Marcello Ruiz

FECHA: Septiembre 2016

UNIVERSIDAD DE LAS PALMAS DE GRAN CANARIA

**ESCUELA DE INGENIERÍA DE
TELECOMUNICACIÓN Y ELECTRÓNICA**



PROYECTO FIN DE CARRERA

Procesado de datos SAR del satélite Sentinel-1 para el estudio de zonas costeras

Presidente:

Secretario:

Vocal:

Tutor:

Autor:

NOTA:

TITULACIÓN: Ingeniero de Telecomunicación

TUTOR: Javier Marcello Ruiz

AUTOR: Aridane Díaz Santana

FECHA: Septiembre 2016

Quiero dar las gracias a mi tutor, Javier Marcello, por su inestimable ayuda y sobre todo por su entusiasmo, sin los cuales no hubiera sido posible la realización de este proyecto.

A Juan Manuel López Sánchez, profesor de la Universidad de Alicante, que de forma totalmente desinteresada y altruista me ayudó a entender y ejecutar algunos de los procesados realizados con los datos SAR.

No me olvido de los amigos que han estado en el camino, haciendo que los malos momentos, no lo fueran tanto.

Y por supuesto a mi familia entera que ha estado día tras día ayudando a que poco a poco finalizara la carrera y el proyecto final. A ellos les debo la vida y la oportunidad que me han dado para poder estudiar. Muchísimas gracias.

ÍNDICE

Introducción	3
1.1. Introducción	3
1.2. Objetivos	6
1.3. Estructura de la memoria.....	9
Satélite de teledetección Sentinel-1	11
2.1. Teledetección SAR.....	11
2.1.1. Fundamentos de la teledetección radar	11
2.1.2. Geometría SAR	16
2.1.2.1. Distorsiones geométricas	19
2.1.3. Resolución de un sensor SAR	23
2.1.3.1. Resolución espacial de un sensor SAR	24
2.1.4. Polarimetría SAR.....	30
2.2. Plataforma Sentinel-1.....	35
2.2.1. Características generales y radiométricas del satélite Sentinel-1.....	37
2.2.2. Productos Sentinel-1	39
2.2.2.1. Modos de operación del sensor	39
2.2.2.2. Productos: Tipos y niveles de procesado	43
2.2.2.3. Políticas de modos de adquisición y escenarios de observación	48
2.2.3. Distribución de productos: Datahub de la ESA	51
2.3. Otros sensores SAR	54
2.3.1. Satélite TerraSAR-X	59
Pre-procesado de los datos de teledetección SAR	61
3.1. Introducción a las técnicas de pre-procesado.....	61
3.1.1. Coeficiente de <i>backscattering</i>	62
3.1.2. Calibración.....	65
3.1.3. Ruido radiométrico	69
3.1.3.1. Técnica Thermal Noise Removal	71
3.1.3.2. Ruido de <i>Speckle</i>	72
3.1.3.3. Otras fuentes de ruido	84
3.2. Correcciones geométricas	87
3.2.1. Técnicas <i>Split</i> y <i>Deburst</i>	89

3.2.2. Conversión de geometría <i>Slant Range</i> a <i>Ground Range</i>	92
3.2.2.1. Exportación de ficheros .kml para su visualización sobre la plataforma Google Earth®	94
Procesado para la generación de aplicaciones SAR	97
4.1. Introducción a las técnicas de procesado	97
4.2. Clasificación del terreno para obtención de cartografías terrestres	98
4.2.1. Clasificación polarimétrica	98
4.2.2. Procesado de la matriz de retrodispersión para algoritmos de clasificación	101
4.2.2.1. Representación visual de los coeficientes de la matriz S	105
4.2.2.2. Clasificación no supervisada <i>H/A/Alpha Classification</i>	109
4.2.2.3. Clasificación supervisada <i>Supervised Wishart Classification</i>	128
4.3. Detección de vertidos de petróleo en el mar	132
4.3.1. Problemática de los vertidos de hidrocarburos al mar	133
4.3.2. Estudio del océano con el SAR	136
4.3.3. Visualización de vertidos de petróleo en el mar en imágenes SAR	138
4.3.4. Caso de estudio: vertido del pesquero <i>Oleg Naydenov</i> en Canarias	141
4.3.5. Herramienta para la detección de vertidos en la plataforma SNAP	143
4.4. Detección de nieve y zonas inundadas	145
4.4.1. Hielo y nieve en imágenes SAR	145
4.4.1.1. Caso de estudio: temporal de nieve en Canarias, Febrero de 2016	146
4.4.2. Zonas inundadas en imágenes SAR	147
4.4.2.1. Caso de estudio: temporal de lluvia en el municipio grancanario de Telde, Octubre de 2015	148
4.4.3. Detector de cambios de imágenes SAR	149
Resultados del procesado de datos SAR	153
5.1. Descripción de herramientas software	153
5.1.1. SNAP 3.0	153
5.1.2. PolSARpro 5.0	155
5.1.3. Matlab® 2010	156
5.1.4. IDL® 8.4.1	157
5.1.5. Google Earth®	158
5.2. Procesado para la aplicación de clasificación	159

5.2.1. Productos a emplear y metodología de procesado	159
5.2.2. Pre-procesados.....	162
5.2.2.1. Visualización de bandas polarimétricas (composiciones RGB)	169
5.2.2.2. Conversión de los datos a formato PolSARpro desde SNAP	173
5.2.2.3. Filtrado de <i>Speckle</i> polarimétrico en PolSARpro.....	178
5.2.2.4. Visualización del producto del sensor TerraSAR-X.....	179
5.2.3. Clasificación no supervisada.....	182
5.2.3.1. Imágenes de entropía, alpha, anisotropía y combinaciones	182
5.2.3.2. Clasificación no supervisada H/ α y H/A/ α	192
5.2.4. Clasificación supervisada (<i>Supervised Wishart Classifier</i>).....	201
5.3. Procesado para la aplicación de detección de vertidos de petróleo en el mar	209
5.3.1. Productos a emplear y metodología de procesado	210
5.3.2. Pre-procesados.....	212
5.3.3. Visualización de manchas de vertido de petróleo en el mar	213
5.3.4. Procesado y resultados de la detección de vertidos de petróleo en el mar (<i>oil spill detection</i>)	217
5.4. Procesado para la aplicación de detección de nieve y zonas inundadas.....	220
5.4.1. Productos a emplear y metodología de procesado	221
5.4.2. Pre-procesados.....	226
5.4.3. Procesado y resultados para la detección de nieve	229
5.4.4. Procesado y resultados para la detección de zonas inundadas.....	234
Conclusiones	237
6.1. Revisión de objetivos.....	237
6.2. Revisión de resultados	240
6.3. Líneas futuras de trabajo.....	243
Bibliografía	245
Pliego de condiciones	261
7.1. Pliego de condiciones.....	263
7.1.1. Requisitos hardware.....	263
7.1.2. Requisitos software.....	264
7.1.3. Imágenes utilizadas	265

Presupuesto	267
8.1. Declaración jurada	269
8.2. Desglose del presupuesto	270
8.3. Honorarios tarifados por tiempo empleado	271
8.4. Amortización del inmovilizado material.....	272
8.4.1. Amortización del software	273
8.4.2. Amortización del hardware.....	274
8.5. Redacción del proyecto.....	274
8.6. Derechos de visado del COIT.....	275
8.7. Gastos de tramitación y envío.....	276
8.8. Aplicación de impuestos y presupuesto total	276
 Anexo	 277
9.1. Introducción	279
9.1.1. Descripción del contenido.....	279

MEMORIA

Capítulo 1: Introducción.

Capítulo 1

Introducción

1.1. Introducción

La teledetección es la técnica de adquisición de datos de la superficie terrestre desde sensores instalados en plataformas espaciales. La interacción electromagnética entre el terreno y el sensor, genera una serie de datos que son procesados posteriormente para obtener información interpretable de la Tierra [1].

Como muchos de los avances tecnológicos, aparte de prototipos en globos o aves, el nacimiento y uso de esta técnica se produce durante la primera Guerra Mundial. En este momento de la historia, aviones de reconocimiento volaban sobre las fuerzas enemigas para observar el movimiento de las tropas. Con el empleo de cámaras convencionales montadas en los aviones, se desarrollaron los precursores de los modernos sistemas de teledetección. Examinando las fotografías se podía observar la posición y la dotación de las fuerzas enemigas. Durante la Segunda Guerra Mundial, la técnica se desarrolló aún más. En los preparativos del Desembarco de Normandía se usaron fotografías aéreas para confeccionar el mapa de las condiciones de la costa para identificar los lugares de desembarco más adecuados. Midiendo las olas cercanas a la costa se pudo determinar la longitud de onda y así calcular las profundidades del agua. La década de los 60 presenció el desarrollo de la película sensible a distintas longitudes de onda, que podían utilizarse para representar cartográficamente aspectos como los distintos tipos de vegetación. Es

también en esta época cuando comienza a emplearse la tecnología radar con fines de monitoreo y teledetección.

Un sistema de sensor de radar emite la radiación que finalmente va a registrarse, por lo que se clasifica como sensor activo. Los sensores pasivos, en cambio, dependen de la recepción de la luz del sol reflejada o de emisiones térmicas de infrarrojos, como por ejemplo, los sensores multiespectrales. El funcionamiento del sensor radar consiste en enviar pulsos de energía hacia la superficie de la Tierra. Parte de la energía se refleja y regresa como si fuera un eco. La fuerza del eco devuelto dependerá de la rugosidad y del contenido de humedad de la superficie y del grado u orientación de la pendiente con relación al rayo del radar. La demora del eco revela la distancia a la superficie reflejada. Al emplear longitudes de onda largas (centímetros), se puede penetrar eficazmente en las nubes y la bruma y obtener imágenes también de noche. Esto constituye una considerable ventaja para los sensores de radar frente a los satélites pasivos, que quedan obstaculizados por las nubes y precisan de la luz del sol para obtener imágenes detalladas [2] [3].

En Junio de 1978, la NASA pone en órbita el SEASAT, primer satélite diseñado para observar los océanos terrestres con el primer SAR (Radar de Apertura Sintética) a bordo. Entre sus objetivos se encontraban obtener datos de los vientos marinos, temperaturas, altura de las olas, agua atmosférica, hielo y topografía oceánica [4]. Posteriormente, en las décadas de los 80 y 90 muchos sistemas espaciales radar, comerciales y de investigación, recolectaron grandes cantidades de imágenes de todo el planeta, demostrando la utilidad de los datos radar para variedad de aplicaciones en el monitoreo terrestre y marino de la superficie terrestre. En estos avances contribuyeron los lanzamientos del ERS-1 de la ESA en 1991, el J-ERS de Japón y el ERS-2 de la ESA, ambos en 1992, y el RADARSAT de Canadá en 1995 [5].

En la actualidad, la Comisión Europea en colaboración con la Agencia Espacial Europea (ESA), han creado el programa de observación de la Tierra más ambicioso de la historia: Copérnico. Mediante el desarrollo de cinco familias de misiones Sentinel, Copérnico forma un sistema unificado para distribuir una gran cantidad de información recogida desde el espacio a una larga serie de servicios temáticos. Estos servicios se enmarcan en seis

Procesado de datos SAR del satélite Sentinel-1 para el estudio de zonas costeras.

categorías: gestión del suelo, el medio marino, la atmósfera, respuesta en situaciones de emergencia, seguridad y cambio climático [6].

Así, la primera de estas misiones comenzó el 3 de Abril de 2014 con el lanzamiento del Sentinel-1 al espacio. Portando un avanzado SAR que es capaz de observar la superficie de la Tierra en cualquier condición meteorológica, de día o de noche. En situaciones de crisis, como inundaciones o terremotos, aportará mapas actualizados a los equipos de respuesta. Su radar monitorizará de forma rutinaria las vías marítimas, la distribución de las banquisas árticas y enviará datos sobre los vientos y las olas en alta mar. También será capaz de evaluar cómo cambian los usos del suelo o de detectar la subsidencia del terreno [7].

En este contexto, este proyecto se centra en utilizar y estudiar la tecnología ofrecida por la ESA mediante los datos recogidos por el satélite Sentinel-1, así como sus herramientas y software de procesamiento. Se abordará además, el estudio de las técnicas de clasificación siguiendo técnicas polarimétricas para obtener cartografías terrestres y marítimas de especial interés, así como detección de eventos marinos tales como vertidos de fuel.

A modo de ejemplo ilustrativo sobre el trabajo que se llevará a cabo en este proyecto, a continuación se adjuntan dos imágenes, una imagen previa a la clasificación y otra con la representación de las distintas clases temáticas una vez realizada la clasificación.

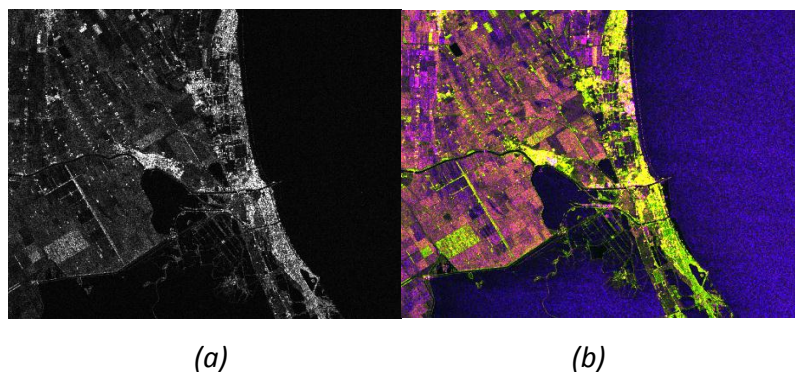


Figura 1.1. Ejemplo de clasificación: (a) Imagen tomada por el Sentinel-1 sobre la costa noreste de Italia (Porto Garibaldi) sin clasificar en Enero de 2015 y (b) imagen clasificada.

En la figura 1.2 podemos ver una imagen tomada por el satélite Sentinel-1 el 22 de Abril de 2015 al sur de la Isla de Gran Canaria, en la que se aprecia el vertido de fuel provocado por el hundimiento del pesquero ruso *Oleg Naydenov* días antes. La captura se realizó a las 07:02 am, demostrando la ventaja y utilidad del radar en condiciones de escasez lumínica.

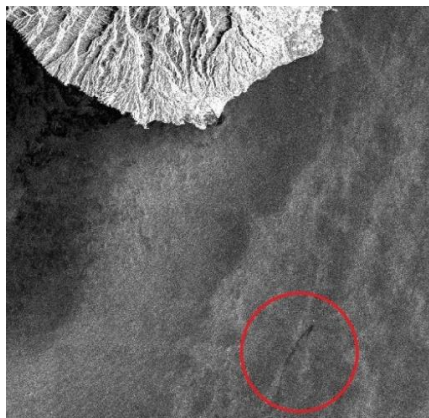


Figura 1.2. Mancha de fuel al sureste de Gran Canaria detectada por el Sentinel-1. Gracias a cambios de rugosidad en la superficie, la tecnología radar es capaz de diferenciar las zonas con fuel.

Actualmente, existen otras plataformas que proponen datos SAR de muy alta resolución (Terrasar-X, COSMO-SkyMed, etc.), aunque su coste es elevado. En este proyecto tendremos acceso a una imagen Terrasar-X cedida por el IOCAG para una de las zonas de estudio. Las imágenes que nos ofrece el Sentinel-1 si bien no disponen de tanta resolución como estas últimas plataformas, sí son gratuitas y su periodo de revisita sobre una misma zona es muy corto, motivo por el que, además de su tecnología SAR, se ha propuesto su estudio para diversas aplicaciones en este proyecto final de carrera.

1.2. Objetivos

El objetivo principal de este proyecto es el estudio de la tecnología SAR así como de los datos y paquetes software proporcionados por la ESA para la obtención de aplicaciones y productos de interés. El entendimiento y comprensión de las bases de la teledetección SAR será uno de los primeros y más importantes pasos a abordar en este trabajo. Una vez se ha estudiado esta tecnología, se llevará a cabo un estudio detallado del satélite Sentinel-1 y de sus productos. Estudiaremos además, el satélite TerraSAR-X, ya que disponemos de una imagen de alta resolución que usaremos en el proyecto. Nuestro

Procesado de datos SAR del satélite Sentinel-1 para el estudio de zonas costeras.

entorno de trabajo estará constituido por los programas informáticos gratuitos proporcionados por la ESA, el SNAP 3.0 (*The Sentinels Application Platform*) y el PolSARpro 5.0 (*The Polarimetric Educational Tool*). También contaremos con la herramienta *Matlab*[®] 2010 y con IDL[®] (versión 8.4.1). Las distintas funcionalidades de estos programas deben ser estudiadas y evaluadas para el correcto pre-procesado de los productos Sentinel-1. Además, se identificarán y estudiarán las herramientas y técnicas de interés que nos permitan obtener productos para diversas aplicaciones. Entre las aplicaciones SAR tendríamos el desarrollo de cartografías de un área terrestre costera (en nuestro caso Maspalomas, Gran Canaria), detección de manchas de fuel en el mar ocasionadas por el hundimiento del *Oleg Naydenov* al sur de la isla de Gran Canaria, detección de áreas nevadas en las cumbres de las islas de Gran Canaria y Tenerife durante la nevada de Febrero de 2016 y, por último, estimación de áreas inundadas durante la lluvia ocasionada por una intensa borrasca el 23 de Octubre de 2015 sobre la costa del municipio de Telde, Gran Canaria. Para todas estas aplicaciones se debe desarrollar una metodología robusta que nos permita obtener los mejores resultados posibles en cada caso.

A continuación, detallaremos cada uno de los objetivos específicos planteados al comienzo de este proyecto:

- ✓ Estudio detallado de la tecnología SAR. Se estudiarán sus bases teóricas de funcionamiento, sus ventajas y desventajas frente a sensores ópticos, las distorsiones geométricas y radiométricas en imágenes SAR, y por último, las diversas aplicaciones de estos datos en el campo de observación de La Tierra.
- ✓ Se llevará a cabo un breve estudio de la historia de las plataformas SAR espaciales más importantes y de los actuales y futuros satélites SAR que orbitarán el planeta.
- ✓ Debemos estudiar el satélite que vamos a emplear en este proyecto: Sentinel-1. Recopilaremos y estudiaremos la documentación necesaria para conocer los aspectos técnicos, el funcionamiento del satélite y, especialmente, los niveles de procesamiento y formato de los datos, ya que nos proporcionará las imágenes de estudio para este proyecto.
- ✓ Estudiaremos además las características de la plataforma espacial TerraSAR-X, pues usaremos una imagen SAR de alta resolución captada por este sensor para el área costera de Maspalomas, Gran Canaria.

Capítulo 1: Introducción.

- ✓ Estudiaremos los pre-procesados necesarios en las imágenes SAR para garantizar que los datos de la imagen se corresponden adecuadamente con la energía reflejada por la superficie terrestre. Para ello, estudiaremos el ruido radiométrico y los pre-procesados necesarios para su corrección. Así mismo, estudiaremos las técnicas de corrección geométrica, necesarias para la correcta representación gráfica de los datos.
- ✓ Tanto para las aplicaciones de interés como para la ejecución de las técnicas de pre-procesado, es necesario tener un conocimiento previo del software a emplear: el SNAP 3.0, el PolSARpro 5.0 de la ESA, el IDL® (versión 8.4.1) y el Matlab® 2007. Por este motivo se realizará un estudio de la metodología a seguir para ejecutar correctamente cada trabajo planteado sobre estas plataformas.
- ✓ Para la aplicación de clasificación y obtención de cartografías terrestres debemos hacer un estudio teórico sobre las técnicas de clasificación aplicables a las imágenes SAR, así como las medidas de calidad y evaluación de las mismas. Se estudiarán las bases y los conceptos fundamentales de los distintos procesados polarimétricos aplicables a imágenes SAR.
- ✓ Para la obtención de productos de clasificación finales, se definirán e identificarán con rigor cada una de las categorías que pretendemos discriminar en la imagen, teniendo en cuenta su propia variabilidad en la zona de estudio. En este caso, trataremos de diferenciar, el suelo desnudo (arena, tierra), el suelo construido (edificios, carreteras, estructuras artificiales), vegetación (arbustos y árboles) y agua (piscinas, embalses y el mar). Se estudiará de forma especial el clasificador *Supervised Wishart Classifier* disponible en el software PolSARpro 5.0.
- ✓ Para la obtención de productos de identificación de vertidos de fuel sobre el mar estudiaremos el estado del arte sobre las técnicas aplicables a imágenes SAR para este propósito. Identificaremos los procesados y herramientas adecuadas disponibles en los programas de la ESA, así como los pasos para la obtención de un producto de detección final.
- ✓ Para la detección de nieve sobre las cumbres de las islas se estudiarán las técnicas de detección de hielo sobre imágenes SAR. Identificaremos los procesados necesarios disponibles en el software de la ESA para el desarrollo de una metodología de obtención de productos finales de detección de nieve.

Procesado de datos SAR del satélite Sentinel-1 para el estudio de zonas costeras.

- ✓ Igualmente, para la aplicación de las imágenes SAR a la detección de zonas inundadas, se estudiarán los procesados aplicados a los datos para la obtención de detección de agua sobre áreas terrestres. Se identificarán los procesados y la metodología adecuada para la obtención de productos finales usando el software de la ESA.
- ✓ El objetivo final global será la identificación y la propuesta de los métodos para la obtención de los diversos productos finales de interés, a partir de las técnicas y fundamentos teóricos estudiados así como de los distintos resultados obtenidos.

1.3. Estructura de la memoria

Este proyecto se ha estructurado en seis capítulos, la bibliografía, el pliego de condiciones, el presupuesto y un anexo, que a continuación desglosaremos someramente:

El primer capítulo es en el que nos encontramos e incluye una breve introducción, los objetivos de este estudio y la estructura de la memoria.

El segundo cuenta con una explicación sobre los fundamentos de la teledetección radar y los sensores SAR. Se explican aquellos aspectos de fundamental importancia en este proyecto, como pueden ser la geometría y la polarimetría SAR. Se detallan además las características generales del satélite Sentinel-1 y del TerraSAR-X, así como sus productos SAR. Se incluye un breve estudio sobre las distintas plataformas espaciales SAR.

En el tercer capítulo se tratará el pre-procesado de los datos, es decir, explicaremos teóricamente las diferentes correcciones aplicables sobre las imágenes de estudio antes de realizar cualquier procesado para la obtención de productos de interés.

El cuarto capítulo presenta de forma teórica cada uno de los pasos a seguir, a excepción del pre-procesado explicado en el capítulo anterior, en los procesos de obtención de los productos finales de interés: clasificación y obtención de cartografías terrestres, detección de vertidos de fuel en el mar, detección de nieve y detección de zonas inundadas. Se estudiarán los conceptos teóricos fundamentales y el estado del arte en cada caso, así como la descripción de los procesados y técnicas a utilizar para cada aplicación.

Capítulo 1: Introducción.

En el quinto capítulo explicaremos la metodología a seguir para la obtención de los productos finales usando las funciones y herramientas de los programas empleados: SNAP 3.0, PolSARpro 5.0, IDL[®] (versión 8.4.1) y el Matlab[®] 2007. Se presentan aquí los resultados finales.

El sexto y último capítulo es el de conclusiones y líneas futuras de trabajo. En él analizaremos los objetivos iniciales y extraeremos conclusiones a partir de los resultados del capítulo anterior. Además, plantearemos diversas líneas futuras de trabajo dentro de este ámbito.

En la bibliografía se detallan los documentos e información utilizadas en este Proyecto Final de Carrera.

El pliego de condiciones enumera las herramientas software y hardware empleadas.

En el apartado de presupuesto se detalla el presupuesto necesario para la realización de este Proyecto Final de Carrera.

En cuanto al anexo, éste estará compuesto por la descripción de contenidos en el DVD-ROM que acompaña a esta memoria de Proyecto Final de Carrera.

Capítulo 2

Satélite de teledetección Sentinel-1

2.1. Teledetección SAR

En este apartado detallaremos los principales y más importantes fundamentos de la teledetección SAR, como la geometría y la polarimetría. Posteriormente, en el apartado 2.2 estudiaremos el satélite empleado en este proyecto, el Sentinel-1, describiendo sus principales características así como sus productos.

2.1.1. Fundamentos de la teledetección radar

La teledetección es un modo de obtener información acerca de objetos tomando y analizando datos sin que los instrumentos empleados para adquirirlos estén en contacto directo con los objetos [8].

En teledetección hay tres elementos esenciales: una fuente de energía, un objetivo o escena y un sensor [9]. Brevemente, explicaremos cada uno de estos elementos:

- **La fuente de energía** es la que “ilumina” el objetivo emitiendo una onda electromagnética.
- **El objetivo o escena** es la porción de la superficie terrestre observada por el satélite. Su dimensión varía, en función de la resolución del sensor, de unos pocos m^2 a algunos miles de km^2 .

- **El sensor** mide la energía reflejada por el objetivo. El sensor puede encontrarse en un satélite o en un avión, sobrevolando el objetivo a una altura de pocos centenas de metros hasta distancias de 36000 kilómetros en el caso de los satélites meteorológicos.

Como se ha mencionado, la teledetección es la medición de un objeto a distancia, sin necesidad de contacto físico con él. El sentido de la vista es un modo de teledetección. Cuando el ojo ve un objeto, registra la radiación electromagnética (la luz reflejada) de la superficie del objeto. La radiación contiene información sobre la superficie, y por este motivo vemos el color y la forma. Un escáner en un satélite también registra radiación electromagnética [10].

En teledetección, existen sensores pasivos y sensores activos. Los sensores pasivos, por ejemplo, son aquellos que captan la señal electromagnética que ha sido emitida por el Sol (la fuente de energía) y reflejada por la superficie terrestre (el objetivo o escena), de forma que el reflejo contiene la información intrínseca de los objetivos en la superficie [2]. Por el contrario, el radar está basado en una tecnología de sensor activo, de forma que el propio sensor es la fuente de energía que produce y envía la señal electromagnética que posteriormente, es reflejada por la superficie terrestre. A esta señal reflejada y detectada por el sensor, se le denomina *backscatter* y contiene la información del terreno. Las variaciones de intensidad del *backscatter* se producen por los diferentes objetivos detectados, por su forma, su orientación y sus propiedades físicas, como pueden ser la humedad o el tipo de material entre otros. También, con este sistema es posible saber la distancia a los objetivos calculando el tiempo de retardo entre las señales emitidas y refle-

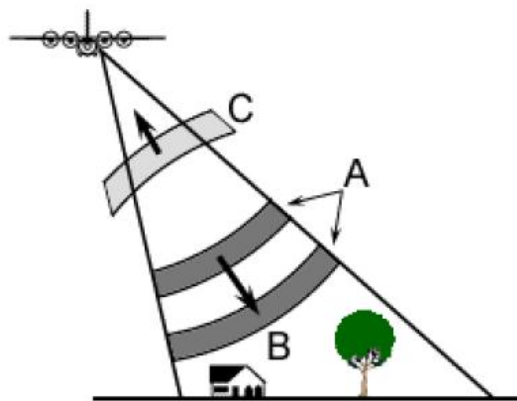


Figura 2.1. Un sensor radar emite su propia onda electromagnética cuyo reflejo es posteriormente captado por el mismo sensor.

jadas [11]. Cabe destacar que el acrónimo RADAR tiene el significado de "Radio Detection and Ranging", que en castellano se traduce como "Detección y medición (de distancias) por radio".

Otra de las principales y más importantes características del funcionamiento de la tecnología radar, es su frecuencia de operación. Mientras los sensores ópticos operan en las bandas de frecuencias del espectro visible para el ojo humano y sus proximidades [12], el radar centra su banda de operación en la banda de las microondas [3].

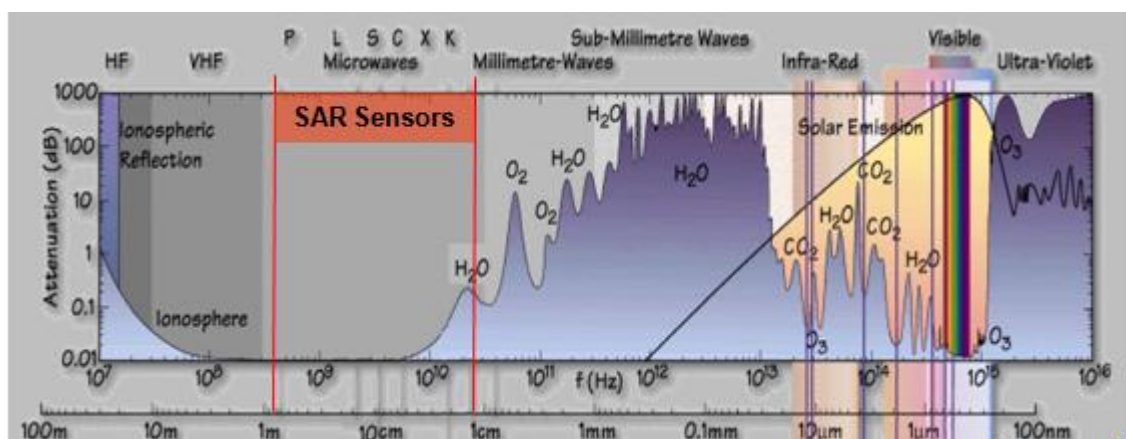


Figura 2.2. Atenuación producida por la atmósfera en el espectro electromagnético.

Como puede verse en la figura anterior, la capa atmosférica de la Tierra, compuesta por diversos gases, atenúa de forma considerable las radiaciones electromagnéticas que entran o salen de la superficie terrestre. Sin embargo, este fenómeno físico se ve mermado en la banda de las microondas, de forma que una onda electromagnética cuya frecuencia se encuentre en esa banda, será capaz de atravesar la atmósfera sin perder (prácticamente) energía en su trayectoria. La atenuación atmosférica en esta banda es casi nula. Esto convierte a la tecnología radar en una potente herramienta de medición de parámetros de la superficie terrestre ya que es totalmente independiente de la luz solar o de las condiciones meteorológicas que afecten un área de interés. Éstas son, sin duda alguna, las principales características que ofrece la tecnología radar y que ningún sensor óptico, por su propia naturaleza, es capaz de ofrecer.

En la imagen, observamos que sobre la banda de las microondas se encuentran las letras P, L, S, C, X y K. Estas letras son los nombres de las diferentes bandas en que se encuentra segmentado el espectro de las microondas. Su denominación proviene de la

Segunda Guerra Mundial, cuando éstas fueron utilizadas como medio de telecomunicaciones [5]. Al contrario que la región del espectro óptico, la banda de las microondas es mucho mayor y comprende un rango de frecuencias que va desde los 300 Mhz hasta los 300 GHz, lo que, hablando en términos de longitudes de onda, comprende desde 1 metro a 1 milímetro. Cabe indicar, que esta banda es en la actualidad ampliamente utilizada en telecomunicaciones, como por ejemplo las comunicaciones vía satélite, precisamente por la débil atenuación que sufren las señales cuando son enviadas a la atmósfera terrestre [14]. Este hecho tiene consecuencias en la teledetección SAR, pues, como veremos en el capítulo 3, estas señales radio, pueden convertirse (aunque rara vez) en ruido interferente en la imagen final detectada.

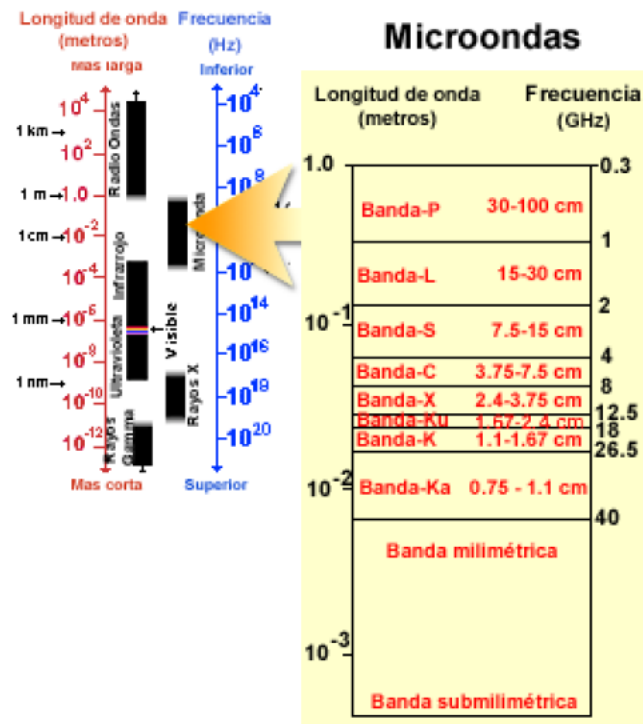


Figura 2.3. Detalle de las diferentes bandas dentro de la banda de las microondas.

En tecnología radar, las diferentes bandas de las microondas han sido ampliamente utilizadas con distintos sensores experimentales y de investigación. Como cabe esperar, cada banda muestra diferentes propiedades a la hora de interpretar información de la superficie terrestre. Si en el espectro óptico asistimos a diferentes "firmas espectrales" de un mismo material para distintas frecuencias [15], lo mismo ocurre en la tecnología SAR. Esto se traduce en la existencia de un gran campo de investigación en el uso de sensores SAR multifrecuencia o multibanda, como el AirSAR de la NASA. En la figura 2.4 podemos observar una misma área agrícola detectada en la banda C (arriba) y en la banda L (abajo).

Procesado de datos SAR del satélite Sentinel-1 para el estudio de zonas costeras.

Como puede observarse, existen diferencias significativas en el nivel de brillo de los diferentes campos entre las dos imágenes [5]. Esto es debido a la distinta capacidad de penetración de las dos diferentes ondas electromagnéticas en los materiales y estructuras que podemos encontrar en la superficie terrestre.

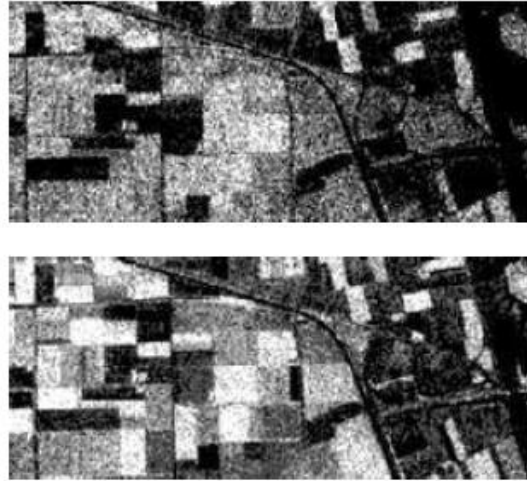


Figura 2.4. Imágenes SAR de una misma área usando diferentes bandas del espectro de las microondas.

En general, la penetración de la señal a través de superficies irregulares y de gran volumen como los bosques, es mayor cuanto mayor es la longitud de onda. A lo largo de los cuarenta años de tecnología SAR se ha podido comprobar la utilidad específica de cada banda para la teledetección. Así, las bandas más usadas para penetración a través de las hojas de los bosques, imágenes del subsuelo y estimaciones de la biomasa serían las bandas P y L. Para agricultura, océanos, hielo o hundimientos del terreno, las bandas L, C, S y X. Para el monitoreo de nieve, las bandas X y Ku, y para imágenes de alta resolución, las bandas X y Ka. Las bandas más usadas en los satélites SAR son la L, C y X [16]. En este trabajo hemos optado por estudiar el satélite Sentinel-1, que como veremos en el apartado 2.2.1 se trata de un satélite SAR monobanda que opera en la banda C.

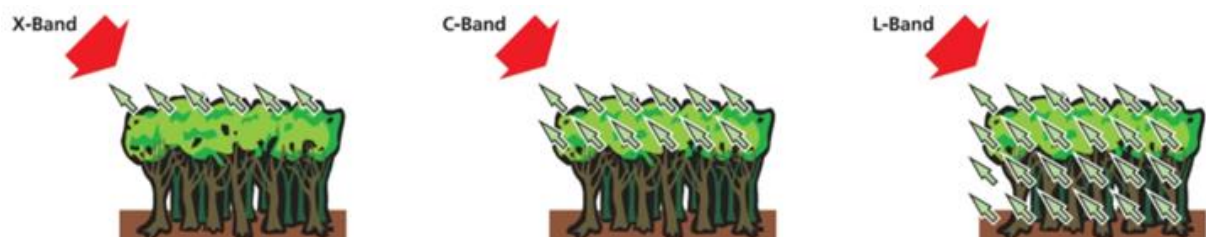


Figura 2.5. Capacidad de penetración de las ondas electromagnéticas dependiendo de la frecuencia de operación.

A modo de ejemplo, recientemente un grupo de investigadores europeos y africanos han detectado con tecnología SAR antiguos ríos en la costa del desierto del Sáhara, en Mauritania. Gracias a la capacidad de penetración de la banda L (23,5 cm), el satélite PaISAR de la Agencia de Exploración Japonesa JAXA es capaz de adentrarse en el subsuelo que se encuentra debajo de la gruesa capa de arena del gran desierto africano. Estos datos son de vital importancia en la comprensión y entendimiento de las diferentes etapas climatológicas que ha sufrido nuestro planeta a lo largo de su vida [17]

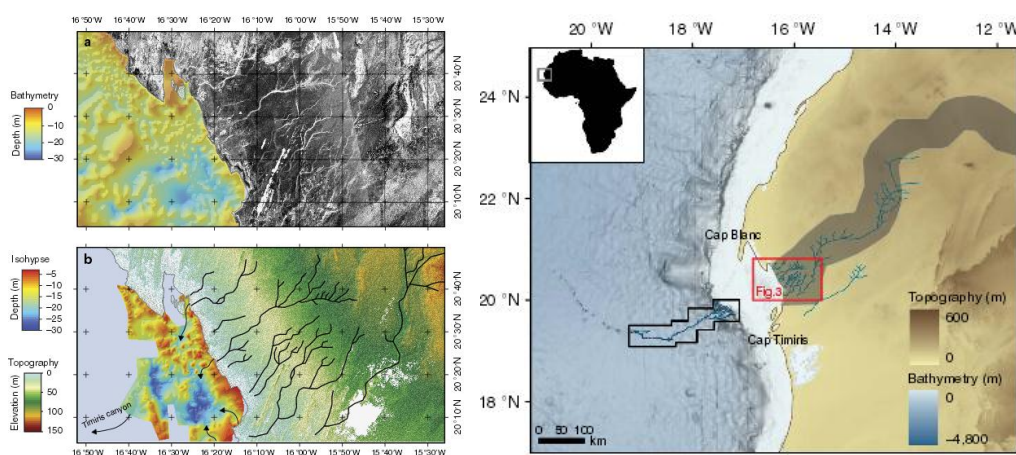


Figura 2.6. Imágenes del satélite PaISAR para la detección de antiguos ríos bajo la arena del Sáhara.

Con estas propiedades, la tecnología SAR se ha convertido en los últimos años en un importante campo de investigación dentro de la teledetección. Esto ha dado lugar a multitud de aplicaciones en la observación de La Tierra, como el monitoreo de campos agrícolas y de bosques, aplicaciones en geología, hidrología, en clasificación del terreno y desarrollo de cartografías, así como teledetección de nieve en la superficie terrestre, detección de manchas de fuel, viento, olas y teledetección de hielo e icebergs en los océanos

2.1.2. Geometría SAR

Como se ha descrito, un sensor SAR es un instrumento de medición activo que produce imágenes de alta resolución procedentes de la reflectividad de la tierra en la banda de las microondas. Basándonos en esta definición debemos entender, que un sensor SAR pertenece a un subconjunto de sensores dentro de los sensores radar. De esta forma, existen diversos tipos de sensores radar para diferentes aplicaciones. Así, tenemos por ejemplo los *Radares de detección y búsqueda*, que se usan para la detección y

Procesado de datos SAR del satélite Sentinel-1 para el estudio de zonas costeras.

seguimiento de aeronaves, misiles y barcos. Los *Radars Marinos*, que se usan para la navegación en el mar, los *Radars Meteorológicos* para el seguimiento de precipitaciones en la atmósfera, y los denominados, en la nomenclatura anglosajona, *Side-Looking Radars*, que son usados en teledetección para producir imágenes de estudio de la superficie terrestre. El término *Side-Looking Radar* hace referencia a la orientación de la antena (sensor) con respecto a la plataforma, teniendo que ésta se encuentra orientada hacia uno de los lados de la misma. Los radares de búsqueda, marinos y meteorológicos no pueden ser montados en una plataforma de desplazamiento, pues su operación no está basada en el movimiento de la plataforma radar con respecto al objetivo. Por otro lado, los *Side-Looking Radars* como el SAR, sí están basados en este principio, dependiendo de un movimiento relativo entre la plataforma y el objetivo. Todo esto da lugar a una geometría de adquisición de imágenes propia de los sensores SAR [18].

En la geometría de adquisición de datos SAR, un radar transmite una onda electromagnética y recibe ondas reflejadas (*backscattering*) de cualquier objeto que se encuentre en el camino. Como hemos indicado, las interacciones entre las señales transmitidas y los objetos dependen de la humedad, la biomasa, la rugosidad de la superficie, las propiedades físicas del material y de la configuración geométrica. En la figura 2.7 podemos observar la geometría típica de adquisición de datos de una plataforma (*side-looking radar*) SAR que sobrevuela el caso idealizado de un terreno plano a una altura H . Tenemos que identificar aquí pues, las bases y ejes espaciales de esta geometría. Para empezar, la dirección en que se mueve la plataforma se denomina comúnmente *azimuth* o *along track*, mientras que la dirección perpendicular al desplazamiento se conoce como *range* o *across-track*. Cabe indicar que a esta dirección también se le denomina *Line-Of-Sight* (LOS) ya que constituye el eje de visión del SAR. El *nadir* es el punto de la superficie terrestre que se encuentra justo debajo de la plataforma y éste sigue la trayectoria de la misma sobre La Tierra, lo que denominamos el *ground track*. El eje *slant range* es el eje propio de adquisición de datos de la tecnología SAR, en este eje se envían y detectan los pulsos radar. La distancia real entre la antena y la superficie terrestre detectada se mide en este eje y en la imagen se denomina R . De esta forma se dice, que las imágenes SAR están referenciadas sobre el plano *slant range*, por lo que en las etapas finales de procesamiento SAR, siempre será necesario proyectar las imágenes sobre la superficie real del terreno, el *ground range*. El área detectada está com-

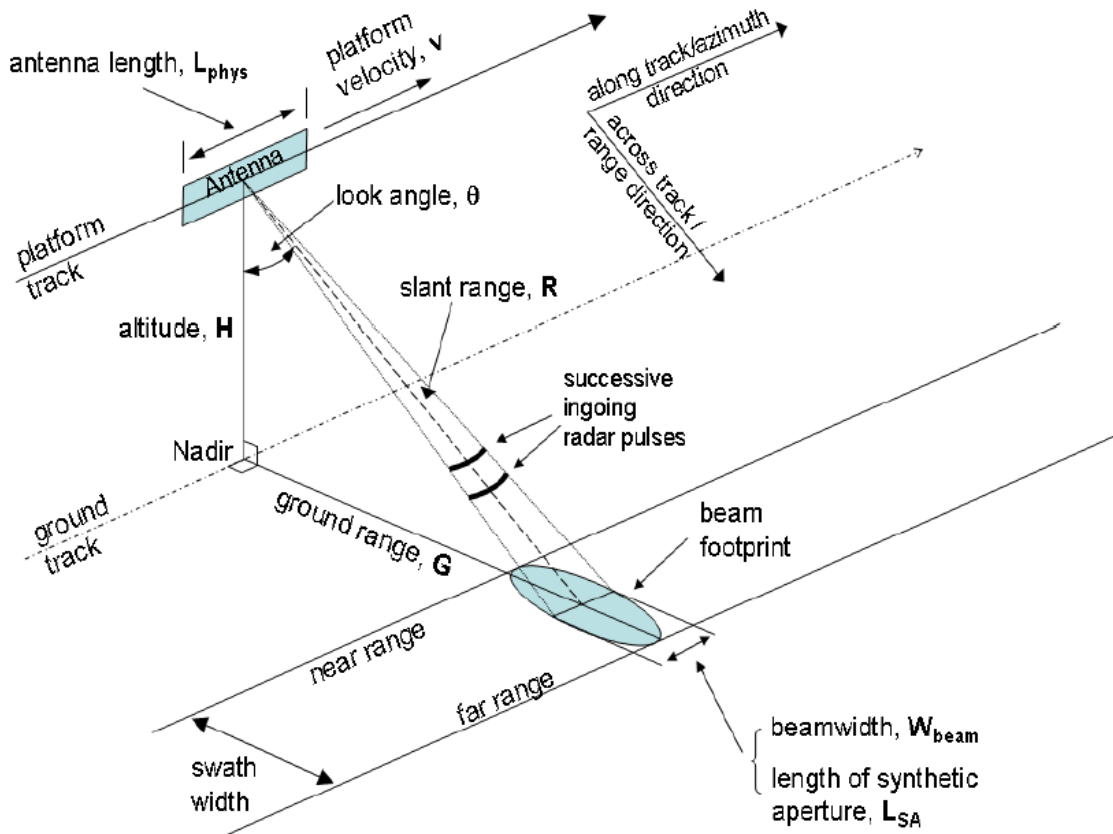


Figura 2.7. Descripción de la geometría SAR.

prendida por el punto detectado más cercano al *nadir* en el *ground range*, al que se le denomina *near range*, y el más alejado, el *far range*, así como los puntos en el *azimuth* en que el sensor comienza y termina de tomar datos. En esta geometría, el radar emite una serie de pulsos electromagnéticos hacia La Tierra a lo largo del *slant range* mediante su antena lateral a medida que la plataforma se desplaza a una velocidad v en la dirección de *azimuth*. Por definición, el ángulo de incidencia, es aquel que está comprendido entre la onda incidente y la perpendicular a la superficie terrestre. Como la visión es lateral, el ángulo de incidencia no será el mismo para el *near range* que para el *far range*. Si observamos la figura 2.8 podemos entender como el ángulo de incidencia (ángulo A) varía a lo largo del *ground range*. De esta forma, cuanto más nos alejamos hacia el *far range* mayor será este ángulo. El ángulo de visión (ángulo B) es el ángulo comprendido entre la onda incidente y la perpendicular de la plataforma sobre la superficie. La distancia D , es la distancia real sobre el terreno (en el *ground range*) mientras que la trayectoria C constituye el *slant range distance*, la misma distancia R de la figura anterior.

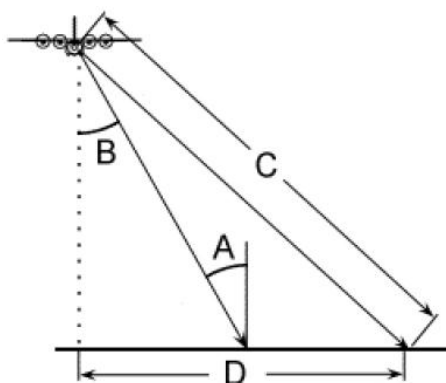


Figura 2.8. Descripción gráfica del ángulo incidente.

2.1.2.1. Distorsiones geométricas

El plano *slant range* en el que están tomadas las imágenes SAR, trae consigo importantes consecuencias a tener en cuenta a la hora de procesar y estudiar las imágenes. Estas consecuencias consisten en distorsiones y deformaciones de la superficie real del terreno. Las distorsiones toman lugar siempre en la dirección perpendicular a la trayectoria de vuelo, ya que son derivadas de la propia geometría de visión lateral (*side-looking*). No olvidemos que el SAR mide distancias a objetivos en el *slant-range* en lugar de las verdaderas distancias en el plano horizontal de la superficie. Esto ocasiona una escala de distorsión a lo largo del *slant-range* que es dependiente del ángulo de incidencia, de forma que entre el *near range* y el *far range* la escala de la imagen resultante cambia gradualmente. En la figura 2.9 podemos observar como dos distancias equivalentes A1 y B1 en el plano horizontal, representan distancias diferentes en el plano *slant-range*. Se cumple, por trigonometría, que los objetivos cercanos al *near range* aparecerán siempre comprimidos con respecto al *far range*. En la figura 2.10 queda a la vista el efecto de esta

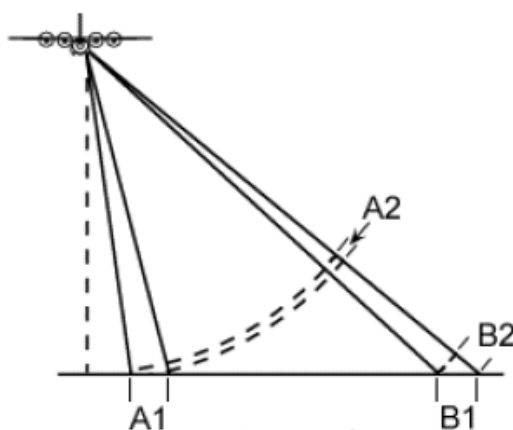


Figura 2.9. Distorsión y variación de escala en el *slant-range*.

variación de escala sobre una imagen SAR. En la imagen superior (no post-procesada y en plano *slant-range*) podemos observar como la parte izquierda (*near range*) se encuentra comprimida con respecto a la misma área de la imagen inferior (post-procesada, plano *ground range*) [5]. Sin embargo, mediante trigonometría y remuestreo este problema es fácilmente solventado en las técnicas de post-procesado como veremos en el apartado 3.2.2. del capítulo 3.

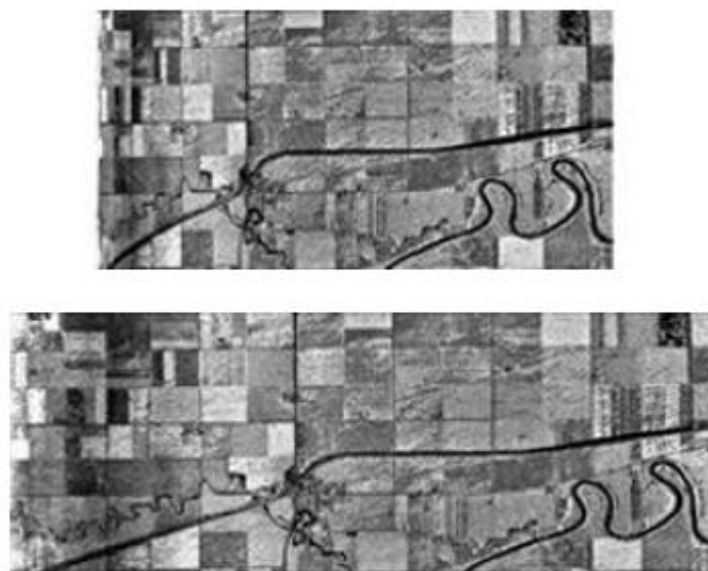


Figura 2.10. Distorsión y variación de escala en una imagen SAR.

Desafortunadamente, ésta no es la única distorsión geométrica que sufren las imágenes SAR. Como hemos indicado, debido a la geometría de visión, las imágenes vendrán acompañadas, además, de lo que se conoce como el conjunto de efectos de desplazamiento del relieve (*relief displacement*) que serán: escorzo (*foreshortening*), inversión del terreno (*layover*) y sombras (*shadows*). Este conjunto de efectos aparece en mayor o menor medida en todas aquellas imágenes SAR tomadas sobre superficies que no sean planas, como por ejemplo, regiones montañosas. Todas ellas son distorsiones que no podremos solventar, puesto que se trata de pérdidas de la información real del terreno debidas a la geometría del sistema. Dado que la mayor parte de la bibliografía denomina a estos efectos geométricos en nomenclatura anglosajona, aquí los enumeraremos y explicaremos de igual forma:

- **Foreshortening:** Ocurre cuando la onda radar alcanza la base de un objeto, estructura o superficie que está inclinada con respecto a la superficie terrestre de

forma que el ángulo de incidencia disminuye drásticamente. En la figura 2.11, de nuevo, como el radar mide en el plano *slant-range*, la pendiente AB aparece comprimida y la longitud de la pendiente será representada de forma incorrecta en A'B'. Este efecto ocurrirá en mayor o menor medida dependiendo de la inclinación de la pendiente en relación al ángulo de incidencia de la onda radar. El máximo *foreshortening* se producirá cuando la onda radar sea perpendicular a la inclinación de la pendiente, de forma que la base, la pendiente y la cima son representadas simultáneamente en el mismo punto del *slant-range*. La pendiente CD es erróneamente representada en el *slant range* en el punto C'D', de forma que todo el *backscatter* devuelto por la pendiente es localizado en este punto del *slant range*, lo que producirá una intensa zona de brillo, por acumulación de *backscatter*.

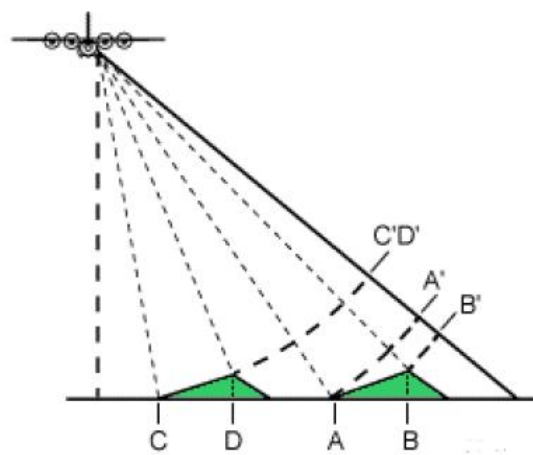


Figura 2.11. Efecto foreshortening en la geometría SAR.

Este efecto se produce de forma constante sobre superficies montañosas e irregulares, como pueden ser los numerosos barrancos de la orografía canaria. En la figura 2.12 podemos observar el efecto del *foreshortening* a lo largo de los barrancos y montes en el sur de la isla de Gran Canaria. Es deducible que el SAR ha tomado la imagen de izquierda a derecha, con su antena apuntando a esta última dirección, pues todas las montañas aparecen con altos niveles de brillo en sus vertientes laterales de la izquierda. En las vertientes laterales de la derecha se producen sombras debido al efecto *shadows*, explicado a continuación.

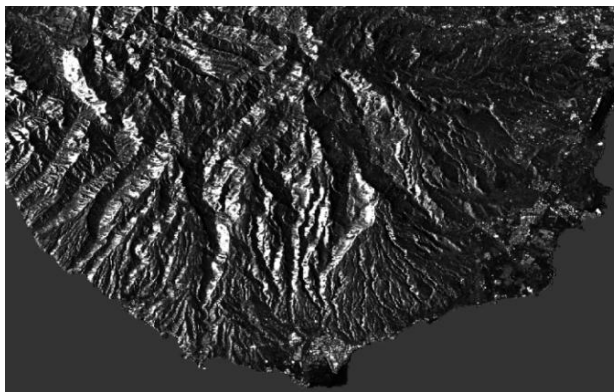


Figura 2.12. Imagen SAR de la mitad sur de Gran Canaria (Sentinel-1, 19/10/2015).

- **Layover:** Ocurre cuando la onda radar alcanza la cima de un objeto, estructura o superficie alta antes de que alcance la base de éste. De esta forma, la señal devuelta por la cima se recibe antes que la señal de la base. Como consecuencia, la cima del objeto es desplazada hacia el radar de su verdadera posición sobre la superficie terrestre y aparece "antes" que la base del objeto. En la figura 2.13 podemos ver como el segmento AB es representado erróneamente como B'A', sufriendo así, una inversión de la geografía real del terreno. En las imágenes SAR, este efecto es muy similar al *foreshortening* y son casi indistinguibles. Al igual que ocurre con éste último, el *layover* es más intenso para pequeños ángulos de incidencia, como ocurre en el *near range* o en terrenos montañosos.

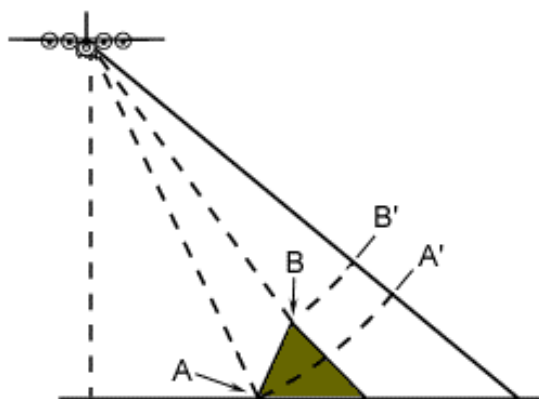


Figura 2.13. Efecto layover en la geometría SAR.

Shadows: Tanto el efecto de *foreshortening* como el *layover* producen sombras en la imagen radar. Las sombras aparecen cuando la onda radar no es capaz de iluminar la totalidad de la superficie terrestre. Estas sombras se producen en la dirección que va desde el *near range* hacia el *far range* (dirección de propagación

de la señal transmitida), justo después de objetos, superficies o estructuras elevadas con superficies inclinadas. Como el radar no es capaz de alcanzar la superficie que se encuentra detrás de las superficies con pendientes elevadas, las regiones en sombra aparecen oscuras en la imagen debido a que no se recibe energía de vuelta (*backscatter*) de estas zonas. Cuando más nos alejamos hacia el *far range*, más aumenta el ángulo de incidencia y por tanto, más aumentarán las sombras. En la figura 2.14 podemos ver como se forman las sombras en esta geometría y cuál es el aspecto de las mismas en una imagen SAR. Cabe destacar que las áreas en sombra tendrán valores de *backscatter* muy bajos y se considerarán nulos de información [5][19].

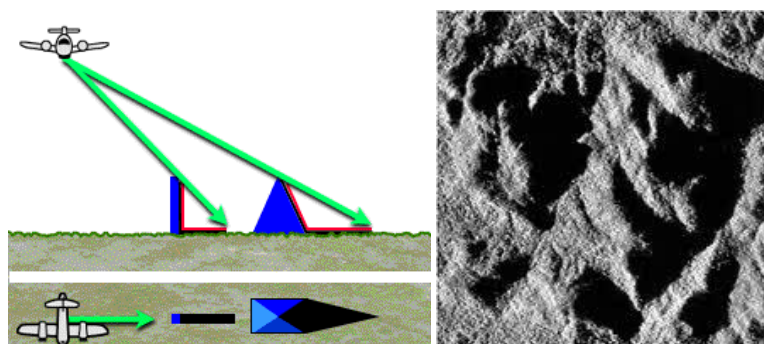


Figura 2.14. Efecto shadows en la geometría SAR.

2.1.3. Resolución de un sensor SAR

La radiación reflejada por la superficie terrestre en los procesos de teledetección supone un fenómeno continuo en cuatro dimensiones (longitud de onda, radiancia, espacio y tiempo). El sensor SAR debe muestrear este continuo discretizándolo [20]. El modo en que esta discretización se lleva a cabo define los cuatro tipos de resolución con los que se trabaja en teledetección y a su vez en SAR:

- **Resolución espectral:** Indica el número y la anchura de las bandas espectrales que puede discriminar el sensor, es decir, en las que el sensor puede captar radiación electromagnética. En principio, cuantas más bandas incluya un sensor mejor, ya que cada banda constituye una variable para caracterizar la superficie captada. En nuestro caso, trabajaremos en banda C, a la frecuencia central de 5,405 GHz dado que el Sentinel-1 opera de forma exclusiva en esta banda. Sin embargo, como mencionamos con anterioridad en el apartado 2.1.1, existen

plataformas SAR multibanda como el AirSAR de la NASA, que opera en las bandas P, L y C [21].

- **Resolución radiométrica:** Indica la sensibilidad del sensor, es decir, la capacidad de discriminar entre pequeñas variaciones en la radiación captada. Suele expresarse mediante el número de bits necesarios que se precisan para almacenar cada píxel. Por ejemplo, si un sensor utiliza 8 bits, esto significa que es capaz de diferenciar $2^8 = 256$ niveles de energía (Niveles Digitales, ND) que pueden ser captados. Cuanto mayor sea la precisión radiométrica, mayor será el número de detalles que podrán captarse en la imagen.
- **Resolución temporal:** Indica el intervalo de tiempo entre cada imagen obtenida por la plataforma espacial o aerotransportada en la misma zona. Es de media hora o quince minutos en el caso de los satélites geoestacionarios y variable en el caso de los satélites heliosíncronos de órbita baja.
- **Resolución espacial:** Es el tamaño del terreno real captado por cada píxel, es decir, la resolución designa al objeto más pequeño que puede ser distinguido sobre una imagen. Para mayor comprensión de este concepto en la tecnología SAR es necesaria la lectura del apartado 2.1.3.1.

2.1.3.1. Resolución espacial de un sensor SAR

A diferencia de los sistemas ópticos, la resolución espacial de un sensor radar depende de la longitud de onda utilizada así como de efectos geométricos. De entre los sensores radar, podemos distinguir los sensores de apertura real (RAR) y los de apertura sintética (SAR). Esto da lugar a una resolución espacial propia de estos sistemas y que además distingue entre resolución en el eje de *azimuth* y en el eje *slant range*.

Un radar de apertura real (RAR) tiene una resolución en el *slant range* determinada por la longitud del pulso radar, por lo que, para alcanzar una alta resolución, el pulso debe ser lo más corto posible según la ecuación 2.1, donde T es la duración del pulso.

$$BW_T = \frac{1}{T} \quad (\text{Ec. 2.1})$$

Como la longitud del pulso en el espacio es el producto de la duración del pulso por la velocidad de la luz c , la resolución en el eje *range* δ_r es:

$$\delta_r = \frac{c T}{2} \quad (\text{Ec. 2.2})$$

donde el factor 2 viene derivado del doble trayecto de la onda radar desde la emisión de la antena hasta la vuelta desde la superficie detectada. Gráficamente podemos visualizarlo en la figura 2.15 dónde dos objetivos separados en el *ground range* serán distinguibles si su separación es mayor que la mitad de la longitud del pulso. Por ejemplo, los objetos 1 y 2 no serán separables, mientras que los objetos 3 y 4 sí [5][22].

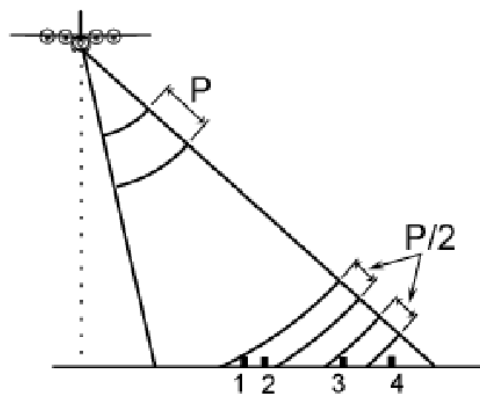


Figura 2.15. Resolución en el slant range.

Hay que entender en este punto, que en ocasiones, la inclinación de la superficie del terreno provoca que objetos separados una cierta distancia en el *ground range* resulten equidistantes en el slant range, por lo que en este caso, independientemente de la longitud de pulso utilizada, los objetos serán indistinguibles. Se trata de la distorsión *foreshortening*, explicada en el apartado 2.1.2.1.

En la práctica, los pulsos radar no se pueden hacer tan pequeños como queremos por limitaciones de energía y el cumplimiento de una relación señal a ruido (SNR) aceptable. Para solventar este problema, se utilizan formas de onda que proporcionan un mayor ancho de banda que un pulso cuadrado de la misma duración. Los sistemas modernos *side-looking-radar*, como el SAR, envían pulsos modulados en frecuencia de gran ancho de banda, los llamados *Frequency Modulated (FM) "chirps"*, que pueden ser "comprimidos" en impulsos de corta duración durante el procesado SAR con filtros adaptables. En la práctica, estos filtros consisten en convolucionar la señal recibida con una réplica del pulso transmitido. A esta técnica se le conoce como *pulse compression* o *range focusing*. Es importante destacar aquí el carácter constante de la resolución en el

slant range independiente del *ground range*. Sin embargo, cuando la imagen es proyectada en las coordenadas *ground range*, la resolución varía dependiendo del ángulo de incidencia. De esta forma, para una resolución *slant range* constante, la resolución en el eje *ground range* disminuirá con el incremento del *range* (distancia al sensor sobre la superficie). Por trigonometría, la conversión queda $G = R \text{ sen } (\Theta)$, dónde Θ es el ángulo de incidencia [18].

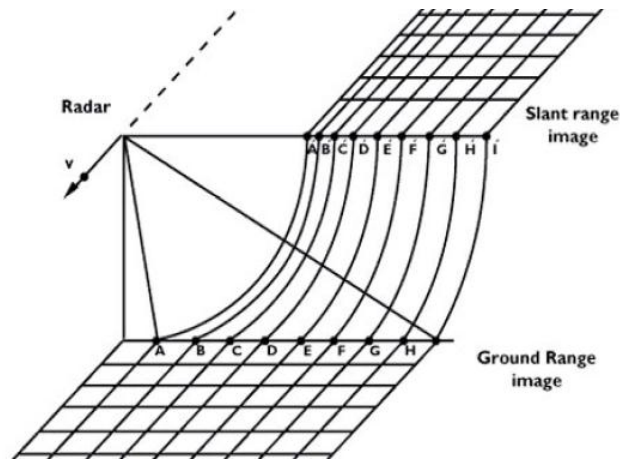


Figura 2.16. Resolución variable en el *ground range* al proyectar el *slant range*.

La resolución en el eje de *azimuth* viene fijada por el límite de difracción y la longitud de la antena en dicho eje. Una antena de mayor longitud física produce un haz más estrecho y debido ello, una mayor resolución en el eje de *azimuth*. Este hecho puede observarse en la figura 2.17. La resolución δ_{az} es igual al ancho del haz sobre la superficie, y éste viene dado por el producto de la distancia al objetivo y la resolución angular del límite de difracción de la antena, según la ecuación 2.3[18][23].

$$\delta_{az} = W_{haz} = R \frac{\lambda}{L_{ant}} \quad (\text{Ec. 2.3})$$

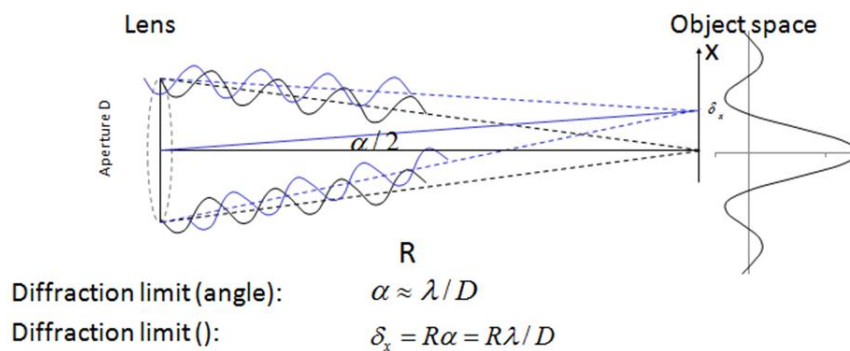


Figura 2.17. Resolución en el eje de azimuth.

Procesado de datos SAR del satélite Sentinel-1 para el estudio de zonas costeras.

Como ejemplos prácticos e ilustrativos, de acuerdo con la ecuación 2.3, para un sistema radar de longitud de onda 2 cm, con una antena de 60 cm de longitud y a una distancia de 1000 km sobre el objetivo, tendríamos una resolución de: $1000 \text{ km} * 2 \text{ cm}/60\text{cm} = 33 \text{ km}$. Lo mismo ocurriría con el sistema visual humano a una distancia de 1000 km, si visualizamos la longitud de onda de los 500 nm (tonos verdes) y consideramos el ancho de nuestra pupila de 5 mm, teniendo que: $1000\text{km} * 500\text{nm}/5\text{mm} = 100 \text{ m}$. De esta ecuación podemos deducir que la resolución es directamente dependiente de la distancia R al objetivo, cuanta menor distancia, más resolución. En el caso de sensores aerotransportados la distancia R es mucho menor que para los sensores espaciales, lo que contribuye a una resolución en *azimuth* aceptable. El aumento de la longitud física de la antena para la mejora de la resolución no resulta viable ni tampoco práctico, por lo que para conseguir una alta resolución, se emplea la denominada técnica de apertura sintética (*aperture synthesis*) durante el procesado SAR. En esta técnica, la longitud de la antena de apertura sintética L_{as} está limitada por la cantidad de tiempo que el objetivo se encuentra dentro del haz de ondas de la antena sobre la superficie terrestre. De esta forma, la longitud de la antena de apertura sintética es aproximadamente igual al ancho del haz, que está determinado a su vez por la longitud física de la antena:

$$L_{as} = R \frac{\lambda}{L_{fís}} \quad (\text{Ec. 2.4})$$

Una explicación a esta ecuación la encontramos en la figura 2.18, dónde podemos observar cómo, a medida que el sensor radar sobrevuela el objetivo, éste emite continuos pulsos a la frecuencia de repetición de pulsos (*Pulse Repetition Frequency, PRF*). Cada pulso es emitido desde una posición diferente a lo largo de la trayectoria de vuelo. El eco de cada pulso transmitido contiene la suma coherente del *backscattering* de todos los *scatterers* (objetos o estructuras reflejados) dentro del haz de la onda radar. Debido al movimiento del radar, las contribuciones de los diferentes *scatterers* individuales tienen un desplazamiento Doppler que depende de su localización en el eje de *azimuth* dentro del haz de ondas (todos tienen desplazamiento Doppler nulo cuando se encuentran justo en el centro del haz). En otras palabras, el tren de ondas reflejadas contiene la información de fase de todos los *scatterers* en la escena ya que éstos son iluminados a diferentes posiciones a lo largo de la trayectoria. El sistema SAR debe ser capaz de utilizar este registro de fases para crear una antena de apertura sintética de gran longitud que mejora,

drásticamente, la resolución de cualquier sistema RAR. Esto se consigue mediante procesado con filtros adaptables en la denominada técnica *azimuth focusing* [18][22].

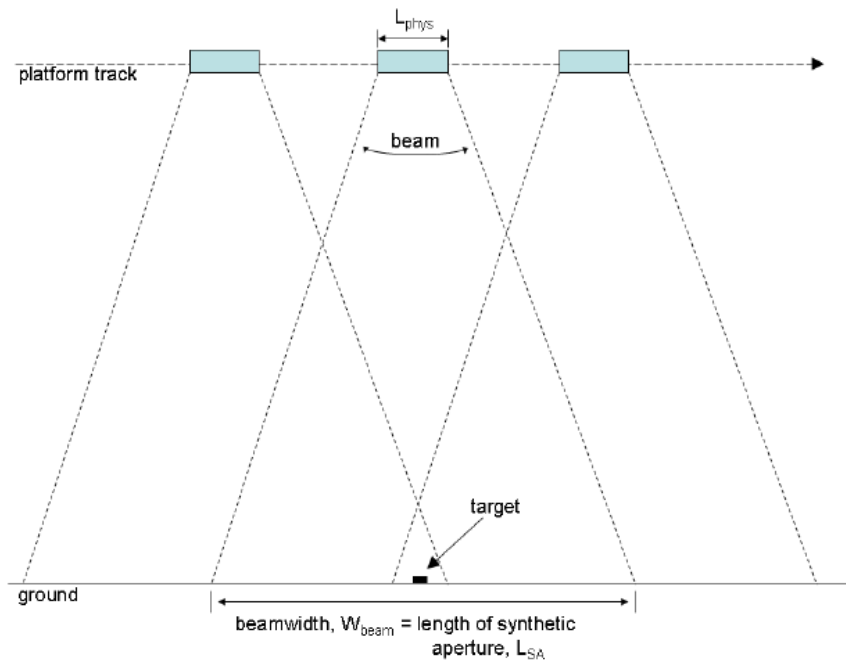


Figura 2.18. Como el radar se mueve a lo largo de su trayectoria captando la superficie desde distintas posiciones, la apertura sintética es mucho mayor que la longitud física de la antena.

Para una antena física de longitud $L_{fís}$ el ancho del haz en la superficie terrestre está dado por la ecuación 2.3. El diagrama de radiación de la antena física está formado por los desplazamientos de fase de acuerdo a las diferencias en la longitud de los caminos de vuelta entre los elementos de la antena y la superficie captada. Sin embargo, el diagrama de radiación de la antena efectiva de una antena sintética está formado por la diferencia del doble camino entre la antena y la superficie, por lo que el ancho de haz efectivo es dividido por dos y la resolución en *azimuth* de un SAR totalmente enfocado está dado por la ecuación 2.5.

$$\delta_{az, SAR} = R \frac{\lambda}{2 * L_{as}} \approx \frac{L_{fís}}{2} \quad (\text{Ec. 2.5})$$

Es importante destacar que la resolución en *azimuth* de un sensor SAR no depende de la distancia entre el sensor y el objetivo o de la longitud de onda empleada, pero sí de la longitud física de la antena, como se puede comprobar en la anterior ecuación. Una antena menor producirá un haz mayor y por lo tanto una mayor apertura sintética y así,

Procesado de datos SAR del satélite Sentinel-1 para el estudio de zonas costeras.

mayor resolución de *azimuth*. El límite se encontrará en el PRF usado, que deberá ser lo suficientemente alto para la resolución deseada.

Por último, los datos adquiridos por el sensor radar aún sin enfocar, son denominados comúnmente como datos RAW, y éstos aún no tienen la apariencia de la imagen final. Como se explicó en los párrafos anteriores, son sometidos a las técnicas *range* y *azimuth focusing* para la obtención de las imágenes en el *slant range*. En la figura 2.19 podemos observar de forma somera el procesado SAR para el enfoque de los datos captados [16].

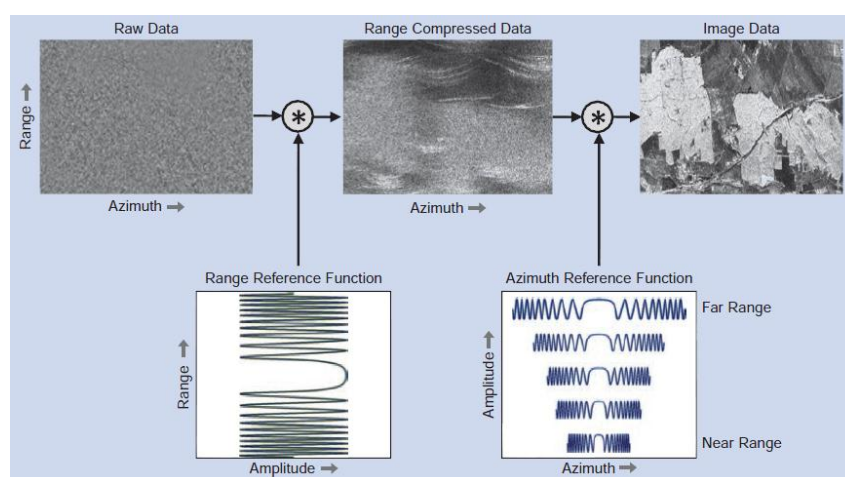


Figura 2.19. Proceso de enfoque de los datos RAW.

Así mismo, debemos diferenciar aquí entre **resolución espacial y tamaño del píxel**. La **resolución espacial** se define como la distancia mínima a la cual un radar es capaz de discriminar dos *scatterers* vecinos que tienen respuestas de aproximadamente la misma intensidad. El **tamaño del píxel** hace referencia a la precisión con que ha sido muestreada la imagen de reflectividad. En la figura 2.20 podemos observar la diferencia entre la resolución espacial y el tamaño del píxel. En imágenes SAR correctamente muestreadas

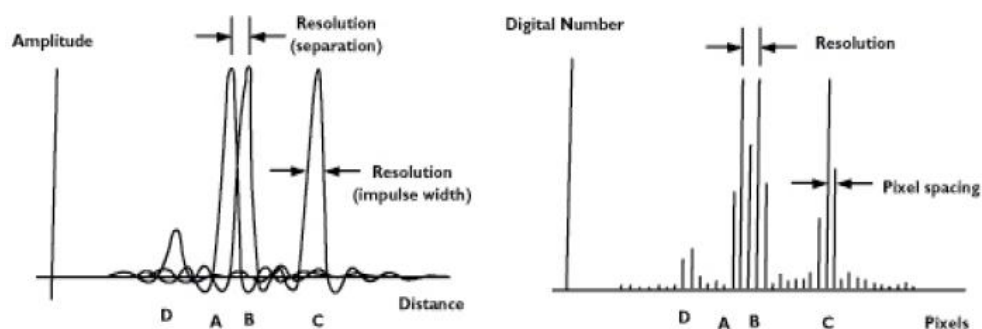


Figura 2.20. Resolución espacial y tamaño de píxel.

el tamaño del píxel siempre será menor o igual a la resolución proporcionada por el sensor. Por contrapartida, esto implicará que los píxeles adyacentes se encuentran ligeramente correlados unos con otros. Como veremos en la sección 2.2.2, los productos radar siempre vendrán especificados en términos de resolución de tamaño de píxel, y en algunos casos además, contaremos con las especificaciones de resolución espacial [18].

Como conclusión, la implementación del radar de apertura sintética SAR, ha supuesto un hito importante en el desarrollo de los sensores de imagen radar. Ha permitido, desde 1978 con el lanzamiento del Seasat, el continuo desarrollo de mejores y más precisos instrumentos de alta resolución espacial. En los últimos años, varias plataformas espaciales SAR operan ofreciendo imágenes del orden de 1 metro de resolución. Como ejemplo, en la figura 2.21 se pueden observar las imágenes de las pirámides de Guiza en Egipto, tomadas a mediados de los 90 por el Radarsat-1 (banda C) a una resolución de 20m. y la misma área captada en la actualidad por el TerraSAR-X (banda X) a una resolución de 1 metro [16].

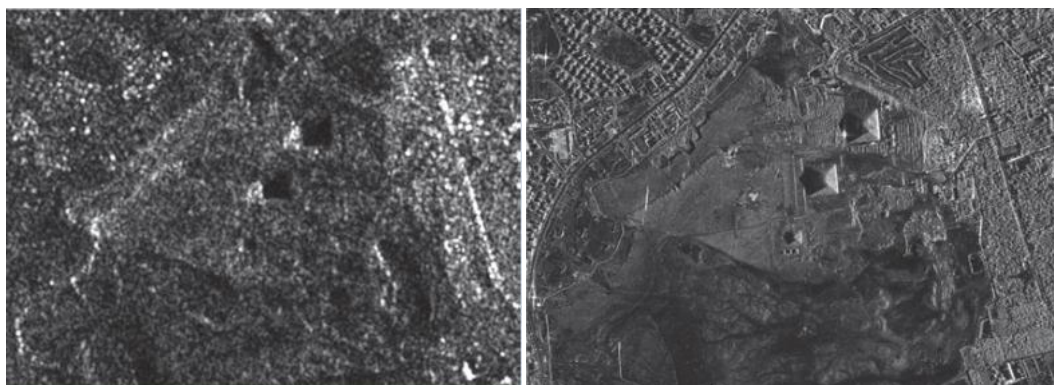


Figura 2.21. Imágenes SAR de las pirámides de Guiza, Egipto. A la izquierda, Radarsat-1 (banda C), captada de izquierda a derecha, 20m. A la derecha, TerraSAR-X (banda X), captada de derecha a izquierda, 1m.

2.1.4. Polarimetría SAR

La polarimetría SAR es una técnica extensamente utilizada para la extracción de información cualitativa y cuantitativa de parámetros físicos de las superficies terrestres detectadas en las imágenes. Sus fundamentos se encuentran en el estado de polarización de las ondas electromagnéticas [13].

Cuando trabajamos con una señal electromagnética, debemos recordar que la polarización de la misma es una de sus características más importantes. En un frente de ondas electromagnéticas plano, la polarización hace referencia a la dirección del vector de campo eléctrico en el plano perpendicular a la dirección de propagación de la onda. Mientras que la longitud del vector campo eléctrico representa su amplitud, y la tasa de rotación del mismo representa la frecuencia, la polarización representa la orientación y forma del patrón trazado por la punta de este vector.

La forma de onda del campo eléctrico de una onda electromagnética puede ser predecible cuando la onda está polarizada, aleatorio cuando no lo está, o una combinación de ambos. El grado de polarización describe la relación de la energía polarizada del total de energía de una onda. Un ejemplo de una onda totalmente polarizada sería un seno monocromático con frecuencia y amplitud constantes [24].

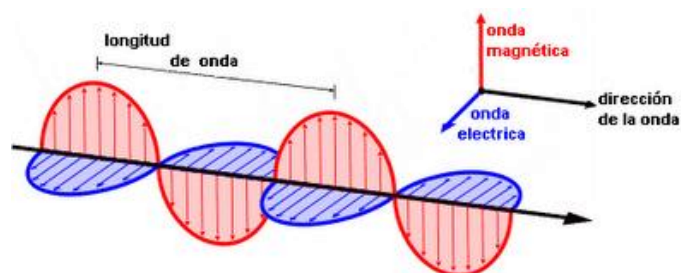


Figura 2.22. Onda electromagnética con campos eléctrico y magnético ortogonales.

En el ámbito que nos ocupa, muchos sensores radar están diseñados para transmitir ondas microondas que pueden ser polarizadas tanto verticalmente (V) como horizontalmente (H), como aparece en la figura 2.23. Esto se consigue a través del uso de antenas ortogonales polarizadas linealmente. De esta forma, una onda transmitida con cualquiera de las polarizaciones tendrá como reflejo de la superficie detectada, un abanico de polarizaciones en el *backscatter* debido a los cambios introducidos por los materiales y estructuras detectadas. El análisis de las combinaciones polarimétricas de las ondas transmitidas y recibidas constituye la ciencia de la polarimetría radar [5].

Para crear una onda con una polarización arbitraria es necesario disponer de señales con componentes en las dos polarizaciones ortogonales. La base más común en la polarización SAR son la lineal horizontal (H) y la lineal vertical (V). La polarización circular sólo es usada en algunas aplicaciones, como por ejemplo en sistemas meteorológicos. En

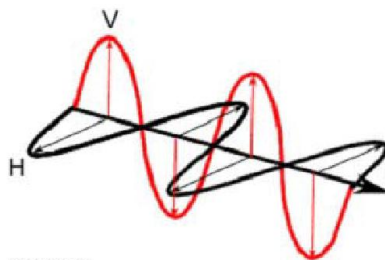


Figura 2.23. Onda electromagnética polarizada verticalmente (V).

los sistemas SAR más simples, la antena está configurada para usar la misma polarización en transmisión y en recepción. Este tipo tradicional de radares no permiten determinar la naturaleza completa del vector de la señal reflejada (*scattered*), ya que existe una pérdida de información relativa al objetivo detectado o éste es completamente perdido si la señal reflejada es ortogonal al sentido de polarización de la recepción. En los sistemas más complejos, normalmente la antena está diseñada para transmitir y recibir ondas de más de una polarización, lo cual facilita la caracterización completa del *scatterer*. Se usa un conmutador para dirigir la energía a las diferentes partes de la antena en secuencias, de forma que las ondas de diferentes polarizaciones puedan ser transmitidas de forma separada. En cuanto a la recepción, la antena debe ser capaz de recibir las diferentes componentes de polarización al mismo tiempo, ya que el reflejo contendrá cambios de polarización con respecto a la onda incidente. Como hemos dicho, estos cambios en el estado de la polarización dependerán de las características propias de los objetos (*scatterers*) y constituyen la información a estudiar [17] [19].

Normalmente, para denominar la capacidad polarimétrica de un sensor SAR se utilizan dos letras que indican la polarización de la transmisión y la recepción del sistema. De este modo, se usan las letras H horizontal, y V vertical, para indicar los canales de polarización:

- ✓ HH: Transmisión lineal horizontal y recepción lineal horizontal.
- ✓ HV: Transmisión lineal horizontal y recepción lineal vertical.
- ✓ VH: Transmisión lineal vertical y recepción lineal horizontal.
- ✓ VV: Transmisión lineal vertical y recepción lineal vertical.

A las combinaciones que utilizan la misma polarización en transmisión y en recepción se les denomina "*like-polarized*" y a aquellas en las que la transmisión y la

recepción son ortogonales "cross-polarized". De acuerdo con la complejidad del nivel de polarización, el sistema SAR puede ser clasificado como:

- Polarización simple (*Single-polarized*): Sólo se transmite y se recibe en una polarización: HH o VV o HV o VH.
- Doble polarización (*Dual-polarized*): Se transmite una onda polarizada horizontal o verticalmente y se mide en ambas polarizaciones en recepción: HH y HV, VV y VH, o HH y VV.
- Polarización total (*Full-polarized* o *Quad-polarized*): Se alterna la transmisión de polarización en H y V y se recibe en ambas H y V: HH, HV, VH y VV.

En la figura 2.24 se puede apreciar el esquema de transmisión y recepción de un sistema *full-polarized*.

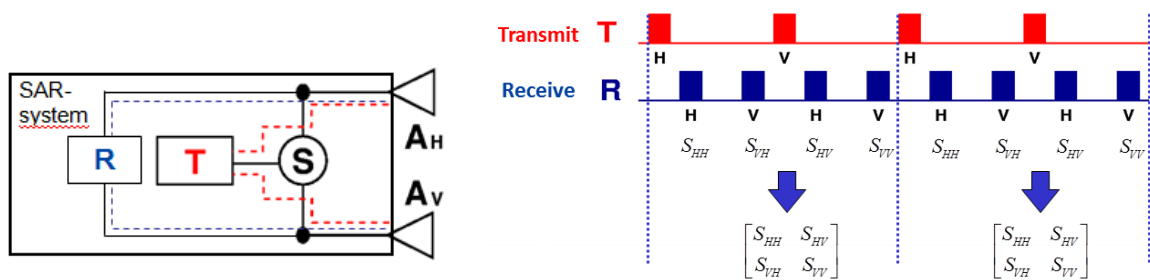


Figura 2.24. Esquema del sistema de transmisión y recepción de polarimetría SAR (*full-polarized*).

De la figura 2.25 podemos observar también la obtención de la matriz de *backscattering* (*Scattering matrix*), característica de la tecnología SAR. Esta matriz consiste en la agrupación de las cuatro polarizaciones posibles, por cada píxel de la imagen. En los sistemas *full-polarized* tendremos la matriz completa con la información de amplitud y fase [22].

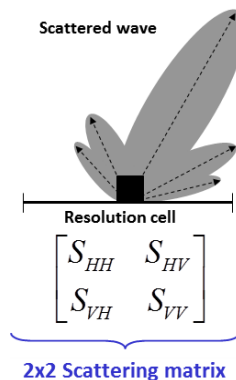


Figura 2.25. Matriz completa de *backscatter* por cada píxel de la imagen.

Además de esto, cabe indicar aquí la existencia de dos tipos de sensores SAR en base a las antenas transmisoras y receptoras: los monoestáticos y los biestáticos. En el caso de los sensores monoestáticos tendremos que la misma antena es usada tanto para transmitir como para recibir la señal SAR. Sin embargo, en un sensor biestático contamos con dos antenas localizadas en puntos diferentes de la plataforma o en distintas plataformas, de forma que una es la encargada de enviar la señal y la otra de recibirla. La consecuencia de esta particularidad es que en el caso de los monoestáticos, las polarizaciones VH y HV serán las mismas por reciprocidad teniendo entonces que $VH = HV$. En el caso de los sensores biestáticos, las polarizaciones VH y HV no serán las mismas puesto que la diferencia de posición de las antenas provoca que las señales recibidas sean diferentes, teniendo finalmente que $VH \neq HV$. En la figura 2.26 podemos observar la diferencia entre la forma de adquisición de datos de cada caso. La mayor parte de los sensores SAR son monoestáticos, y por ello, aún siendo *full-polarized*, no poseen la capacidad de obtener los cuatro parámetros de la matriz de *backscatter* [25]. En el caso de sensores aerotransportados, el caso biestático se consigue con el propio desplazamiento (controlado) de la nave como el AirSAR de la NASA [26] En el caso de sensores espaciales, el satélite TerraSAR-X trabajando junto al TanDEM-X, es capaz de conseguir la técnica biestática ya que operan en la misma órbita con cierto desfase, obteniendo así, la matriz de *backscatter* completa [27]. Tanto este concepto, como la matriz de *backscatter* serán estudiados a mayor profundidad en el capítulo 4 de esta memoria dada su elevada importancia en los posteriores análisis y procesados de las imágenes SAR.

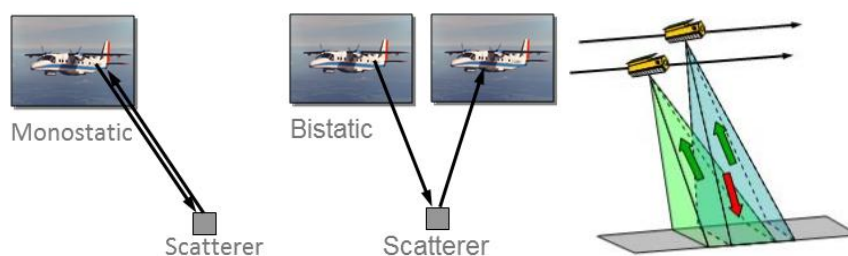


Figura 2.26. Caso monoestático aéreo, biestático aéreo y biestático espacial.

En la figura 2.27 podemos observar una misma área detectada con las cuatro polarizaciones. La imagen pertenece a la bahía de San Francisco en Estados Unidos, captada por el sensor AirSAR (banda L) de la NASA. Se pueden apreciar las diferencias de

Procesado de datos SAR del satélite Sentinel-1 para el estudio de zonas costeras.

backscatter en las tres polarizaciones principales VV, HH y HV. Si bien las diferencias entre HV y VH no son tan visibles, las imágenes son radiométricamente diferentes [19].

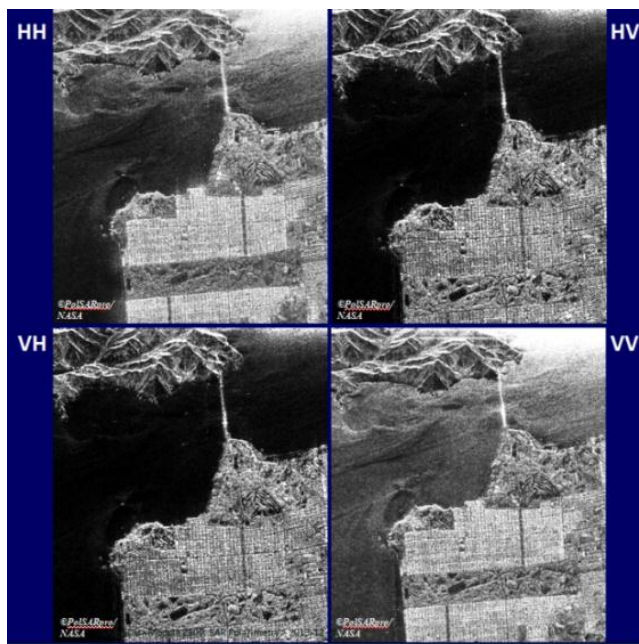


Figura 2.27. Imágenes SAR realizadas por el sensor AirSAR (banda L) con las cuatro polarizaciones, de la bahía de San Francisco, USA.

A la hora de procesar una imagen SAR, tendremos más información cuantas más polarizaciones tengamos, por este motivo, los sistemas *full-polarized* son los que más información obtienen por imagen. Si además de ser *full-polarized*, el sistema es biestático, multibanda y de alta resolución, estaremos ante el sensor SAR que idealmente obtendrá más información de la imagen detectada. Sin embargo, debido a costes y al todavía incipiente desarrollo de esta tecnología, no es posible contar con todas estas características y la mayoría de los sensores SAR son aún *dual-polarized* y monoestáticos. En los próximos años se prevén lanzamientos de sensores de alta tecnología que proveerán imágenes de altísima resolución, multibanda y con las cuatro polarizaciones [16].

2.2. Plataforma Sentinel-1

La Comisión Europea y la Agencia Espacial Europea (ESA) han creado el programa de observación de La Tierra Copérnico. El programa está diseñado para proporcionar información precisa, actualizada y de fácil acceso para mejorar la gestión del medio ambiente, comprender y mitigar los efectos del cambio climático y garantizar la seguridad

ciudadana. La ESA es la responsable de coordinar la distribución de los datos recogidos por los satélites, mientras que la Agencia Europea del Medio Ambiente (EEA) se encarga de la información recopilada por sensores en tierra o aerotransportados. La Comisión Europea está a cargo de la iniciativa en nombre de la Unión Europea, definiendo los requisitos y gestionando los diferentes servicios [6].



La temática de los servicios contempla la observación y extracción de datos de las áreas de: tierra, mar, atmósfera, cambio climático, situaciones de emergencia y seguridad. Los usuarios principales de estos servicios serán las autoridades públicas que necesiten información para el desarrollo de leyes y políticas medioambientales y para la toma de decisiones en casos de emergencia, como los desastres naturales o una crisis humanitaria.

De esta forma, la ESA ha desarrollado una nueva familia de misiones espaciales llamadas Sentinel, específicamente para cubrir las necesidades operativas del programa Copérnico. Cada misión Sentinel está compuesta por dos satélites para cumplir con los requisitos de revisita y cobertura, proporcionando grandes cantidades de datos de información de la Tierra. Las misiones portan una gran variedad de tecnologías como el radar y sensores de imagen multiespectrales para monitoreo y vigilancia de tierra, océanos y atmósfera.

En este proyecto abarcamos el estudio de la primera de estas familias: la plataforma Sentinel-1. Está formada por una constelación de dos satélites que comparten la misma órbita polar y que operan día y noche gracias al sensor SAR que llevan incorporado. El primer satélite Sentinel-1, el Sentinel-1A, fue lanzado al espacio en un cohete Soyuz desde el puerto espacial europeo de la Guayana Francesa el 3 de Abril de 2014. Así mismo, su hermano gemelo, el Sentinel-1B, fue lanzado el 25 de Abril del año 2016 [28].

La plataforma proporciona datos de gran utilidad en múltiples servicios como:

- ✓ Monitoreo de las extensiones de hielo en el Ártico.

Procesado de datos SAR del satélite Sentinel-1 para el estudio de zonas costeras.

- ✓ Mapeo de los bloques de hielo en el mar.
- ✓ Vigilancia del medio marino, incluyendo la vigilancia de vertidos de fuel y/o aceite.
- ✓ Detección de embarcaciones para seguridad marítima.
- ✓ Monitoreo de la superficie terrestre para riesgos de terremotos.
- ✓ Vigilancia de bosques, agua, agricultura y manejo del suelo.
- ✓ Monitoreo del cambio climático.
- ✓ Mapeo para ayuda humanitaria en situaciones de crisis [29].

2.2.1. Características generales y radiométricas del satélite Sentinel-1

Al igual que sus predecesores ERS-1, ERS-2 y el ENVISAT de la ESA, así como el RADARSAT-1 y RADARSAT-2 de la CSA (Agencia Espacial Canadiense), los satélites Sentinel-1 llevan consigo un sensor SAR que opera en la banda C. A diferencia de las anteriores misiones, Sentinel-1 mejora las capacidades de revisita, cobertura geográfica, resolución, precisión, y una mayor rapidez en la disseminación de los datos.



Figura 2.28. Imagen del Sentinel-1.

Los satélites están fabricados por un consorcio liderado por *Alenia Space* (Italia) como el principal fabricante, mientras que *Astrium* (Alemania) es el responsable del radar de apertura sintética (SAR). Cada satélite está equipado con dos arrays de placas solares capaces de generar 5900 W de potencia. Para almacenar la energía dispone de una batería con capacidad para 324 Ah. Para la adquisición de datos, cuenta con una unidad de almacenamiento con capacidad de 1.4 Tbits (memoria de estado sólido). La descarga de datos a las estaciones en Tierra se realiza mediante un transmisor de canal dual en la banda X a una tasa de transmisión de 260 Mbit/s por canal. Para las comunicaciones de telemetría y telecomandos se usa la banda S. Los satélites se comparten una órbita polar (desfasados 180°) heliosíncrona a 693 km de altitud con una inclinación de 98,18°. La

posición en órbita de los satélites está fijada por un "tubo orbital" de 100 metros de diámetro del que nunca deben salir. El ciclo de repetición en el Ecuador es de doce días por satélite, con 175 órbitas por ciclo, y 98,68 minutos de duración por órbita. Con los dos satélites operando, el periodo de revisita se reduce a la mitad, seis días. En la tabla 2.1 se encuentran enumeradas éstas y otras características generales de la plataforma [30].

Lifetime	7 years (consumables for 12 years)
Orbit	Near-polar Sun-synchronous orbit at 693 km altitude; 12-day repeat cycle; 175 orbits per cycle
Mean local solar time	18:00 at ascending node
Orbital period	98.6 min
Maximum eclipse duration	19 min
Attitude stabilisation	3-axis stabilised
Attitude accuracy	0.01° (each axis)
Instrument	Right looking with respect to the flight direction
Steering	Zero Doppler yaw steering and roll steering (-0.8° to +0.8°)
Attitude profile	Geocentric and geodetic
Orbit knowledge	10 m (each axis, 3 σ) using GPS
Operative autonomy	96 h
Launch mass	2300 kg (including 130 kg mono-propellant fuel)
Dimensions (stowed)	3900 × 2600 × 2500 mm
Solar array average power	5900 W (end-of-life)
Battery capacity	324 Ah
Satellite availability	0.998
S-band TT&C data rates	64 kbit/s telecommand; 128 kbit/s – 2 Mbit/s telemetry (programmable)
X-band downlink data rate	2 × 260 Mbit/s
Launcher	Soyuz from Kourou

Tabla 2.1. Características generales de la plataforma Sentinel-1.

El sensor C-SAR que lleva a bordo está compuesto por una antena de 12.3 m de largo por 0.821 m de ancho. La frecuencia central de funcionamiento es 5.405 GHz con un ancho de banda de 100 MHz. El sensor es capaz de trabajar con doble polarización HH+HV o VV+VH. El PRF es programable y se encuentra entre las frecuencias de 1 y 3 KHz. La precisión radiométrica es de 16 bits. En la figura 2.29 podemos observar parte de la antena SAR. En la tabla 2.2 se resumen las características más importantes del sensor.

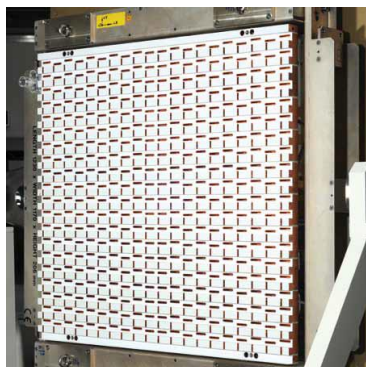


Figura 2.29. Parte del sensor SAR del Sentinel-1. Se observan pares H-V de guías de onda.

Parameter	Value
Centre frequency	5.405 GHz
Bandwidth	0 ... 100 MHz (programmable)
Polarisation	Selectable between HH+HV and VV+VH
Antenna size	12.3 × 0.821 m
RF peak power (sum of all TRFM, at TRM o/p)	4368 W
Pulse width	5-100 µs (programmable)
Transmit duty cycle	
Max	12%
Strip map	8.5%
Interferometric Wide-swath	9%
Extra Wide-swath	5%
Wave	0.8%
Receiver noise figure at module input	3.2 dB
Pulse repetition frequency	1000-3000 Hz (programmable)
ADC sampling frequency	300 MHz (real sampling) (digital down-sampling after A/D conversion)
Sampling	16 bits
Data compression	Selectable according to FDBAQ
Instrument operation	Up to 25 min per orbit continuously in any of the imaging modes and for the rest of the orbit in Wave mode
Instrument mass	945 kg
DC power	3870 W (Interferometric Wide-swath mode, single or dual polarisation)

Tabla 2.2. Características generales del sensor C-SAR.

2.2.2. Productos Sentinel-1

En este apartado describiremos los principales modos de operación del sensor SAR de la plataforma Sentinel-1 así como los diferentes productos finales disponibles.

2.2.2.1. Modos de operación del sensor

Existen cuatro modos de operación del sensor SAR del Sentinel-1 [29][30]:

- ✓ *Stripmap* (SM)
- ✓ *Interferometric Wide Swath* (IW)
- ✓ *Extra-Wide swath* (EW)
- ✓ *Wave* (WV)

Los modos de operación que usaremos en este proyecto son *Stripmap* e *Interferometric Wide Swath*. A continuación se describen sus características y se mencionan y explican someramente los modos *Extra-Wide swath* y *Wave*.

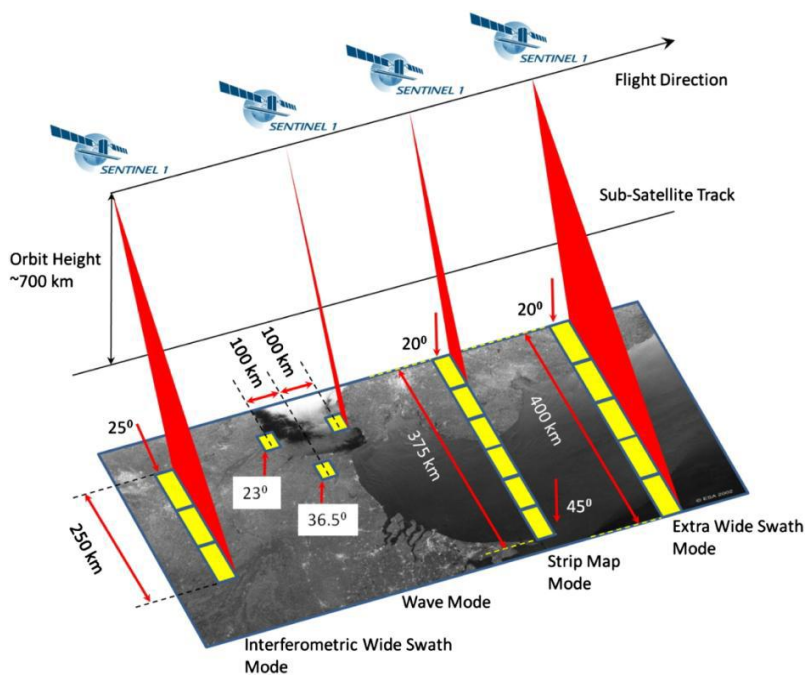


Figura 2.30. Modos de adquisición del sensor SAR del Sentinel-1.

Stripmap (SM)

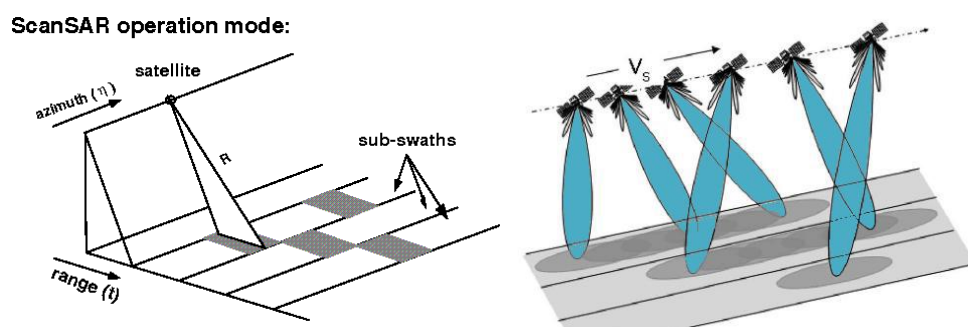
El modo de adquisición *Stripmap* adquiere datos con una extensión de 80 km a una resolución espacial de 5 metros. Consta de seis adquisiciones solapadas, cada una a diferentes ángulos de incidencia, que cubren una extensión de 375 km en el eje *range*. Las imágenes SM mantienen la calidad de imagen a lo largo del *along-track* y poseen un ángulo de incidencia prácticamente constante. Se trata del modo de operación de mayor resolución del sensor. Ver la toma de datos en la figura 2.30. El resumen de características del modo *Stripmap* se encuentra en la tabla 2.3.

Characteristic	Value
Swath width	80 km
Incidence angle range	18.3° - 46.8°
Elevation beams	6
Azimuth and range looks	Single
Polarisation options	Dual HH+HV, VV+VH Single HH, VV
Maximum Noise Equivalent Sigma Zero (NESZ)	-22 dB
Radiometric stability	0.5 dB (3σ)
Radiometric accuracy	1 dB (3σ)
Phase error	5°

Tabla 2.3. Características del modo de adquisición *Stripmap*.

Interferometric Wide Swath (IW)

El modo de adquisición *Interferometric Wide Swath (IW)* es el modo de operación principal y el utilizado por defecto sobre tierra, ya que cumple con la mayor parte de los requisitos para los servicios anteriormente mencionados. Adquiere datos cubriendo extensiones de 250 km a una resolución espacial de 5 por 20 metros (*range* por *azimuth*). Realiza la captura de tres sub-extensiones (*sub-swaths*) usando la técnica *Terrain Observation with Progressive Scans SAR (TOPSAR)*. Con esta técnica, además de direccionar el haz en el eje *range* como en la técnica ScanSAR, el haz es electrónicamente dirigido de atrás hacia adelante en la dirección de *azimuth* para cada ráfaga (*burst*) evitando ondulaciones (*scalloping*) y dando como resultado una imagen de calidad homogénea a lo largo de toda la extensión. La técnica TOPSAR está pensada para reemplazar el modo ScanSAR convencional, alcanzando la misma cobertura y resolución que ScanSAR, pero con una casi uniforme relación señal a ruido (*Signal to Noise Ratio*, SNR). En las figuras 2.31 y 2.32 podemos observar gráficamente las técnicas ScanSAR y TOPSAR [29][31][32].



Figuras 2.31 y 2.32. Técnicas ScanSAR (izquierda) y TOPSAR (derecha).

Cada sub-extensión (*sub-swath*) está compuesta por una serie de ráfagas (*bursts*), donde cada ráfaga ha sido procesada como una imagen SLC por separado. Las imágenes de ráfagas (complejas y enfocadas) se incluyen en orden de *azimuth* dentro de cada sub-extensión (*sub-swath*) con un relleno negro en medio para la demarcación de las ráfagas. La superficie captada por ráfagas adyacentes está solapada lo suficiente como para disponer de una cobertura continua de la superficie. Las imágenes de todas las ráfagas en todas las sub-extensiones, son remuestreadas a una rejilla de tamaño de pixel común en *range* y *azimuth*. En el capítulo 3 explicaremos los pre-procesados de *deburst* y *split* para la

creación de la imagen final. En la figura 2.33 podemos observar un ejemplo de producto con las tres sub-extensiones (*sub-swaths*) y las diferentes ráfagas.

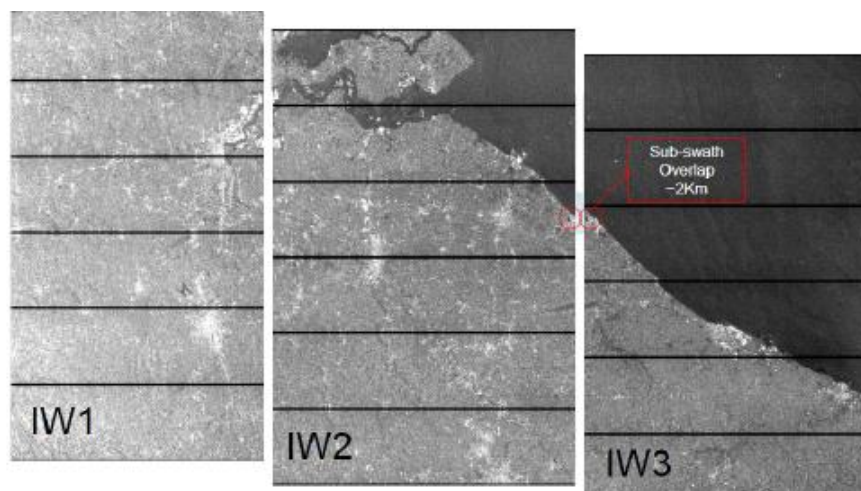


Figura 2.33. Producto con modo de adquisición IW. Tres sub-extensiones y ráfagas.

El resumen de características del modo *Interferometric Wide Swath* se encuentra en la tabla 2.4.

Characteristic	Value
Swath width	250 km
Incidence angle range	29.1° - 48.0°
Sub-swaths	3
Azimuth steering angle	± 0.6°
Azimuth and range looks	Single
Polarisation options	Dual HH+HV, VV+VH Single HH, VV
Maximum Noise Equivalent Sigma Zero (NESZ)	-22 dB
Radiometric stability	0.5 dB (3σ)
Radiometric accuracy	1 dB (3σ)
Phase error	5°

Tabla 2.4. Características del modo de adquisición *Interferometric Wide Swath*.

Extra Wide Swath (EW)

Similar al modo de adquisición IW. También emplea la técnica TOPSAR para adquirir datos a través de un área mucho mayor usando cinco sub-extensiones. De este modo, EW adquiere datos sobre una superficie de 400 km a una resolución espacial de 20 por 40 metros (*range* por *azimuth*). En este proyecto no se emplean datos de este modo de adquisición.

Wave (WV)

El modo *Wave* consiste en varias viñetas, con polarización exclusiva VV o HH, en la que cada viñeta es procesada como una imagen separada. Los productos WV pueden contener cualquier número de viñetas. Cada viñeta es almacenada dentro del producto como una imagen independiente. Las viñetas cubren una extensión de 20 por 20 km, a una resolución espacial de 5 metros, cada 100 km a lo largo de la órbita, tomando datos en dos ángulos de incidencia diferentes de forma alternada. Las viñetas en el mismo ángulo de incidencia están separadas por 200 km a lo largo del eje de *azimuth*. El ángulo de incidencia se conmuta entre el *near range* y el *far range* (23° y $36,5^\circ$). En la figura 2.34 podemos observar detalladamente el procedimiento de adquisición WV. Este modo en la polarización VV es el que se utiliza por defecto sobre los océanos. Los datos tienen el mismo *bitrate* que el modo SM, sin embargo, debido al menor tamaño de las viñetas, a una única polarización, y a la captura en intervalos de 100 kilómetros, el volumen de datos es mucho menor. En este proyecto no se emplean datos de este modo de adquisición.

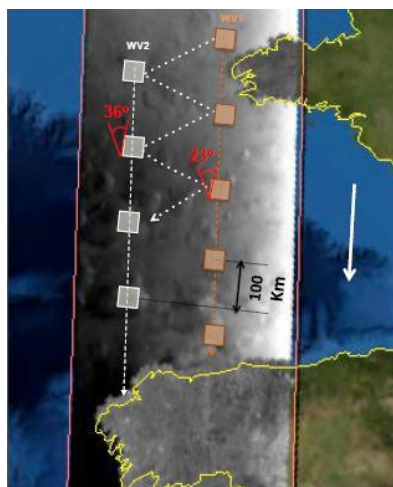


Figura 2.34. Proceso de adquisición de datos en el modo WV.

2.2.2.2. Productos: Tipos y niveles de procesado

Los datos adquiridos por la plataforma Sentinel-1 en los distintos modos de operación del sensor son distribuidos en tres niveles de procesamiento diferentes [33]:

- Level-0: Datos RAW.
- Level-1: SLC (*Single Look Complex*) y GRD (*Ground Range Detected*)

- Level-2: Datos de océanos (*Ocean products*, OCN)

Todos los productos están diseñados en base al modo de adquisición con el que se tomaron los datos. En el caso del producto GRD, la resolución variará con el modo de adquisición. Así mismo, los productos son procesados directamente desde el producto de nivel 0 (Level-0 product). A excepción del modo WV, cada modo puede generar potencialmente productos Level-1 SLC, Level-1 GRD y Level-2 *Ocean Products*. El modo WV sólo se distribuye como Level-2 *Ocean*. En la figura 2.35 tenemos un esquema de los productos que se pueden obtener partiendo de los diferentes modos de adquisición.

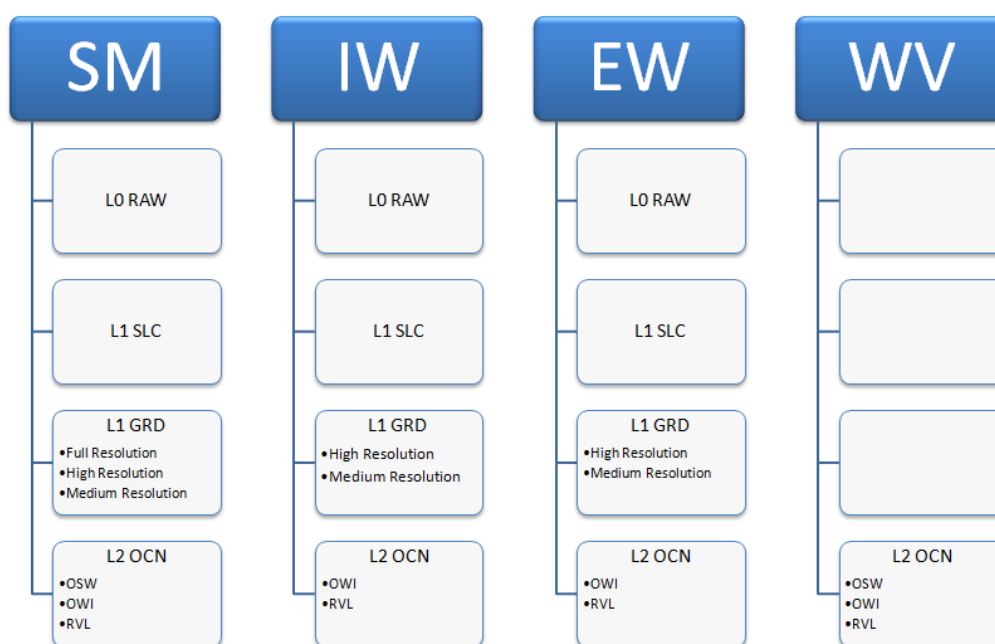


Figura 2.35. Productos posibles a partir de los modos de operación del sensor.

Level-0

Los productos de nivel 0 consisten en datos RAW SAR comprimidos y desenfocados. Este nivel es la base desde la que se producen los productos de niveles superiores. Para el uso de los datos, es necesario realizar un pre-procesado de descompresión y enfoque de los datos, como se mencionó en la sección 2.1.3.1. En este proyecto no trabajaremos con este nivel de productos.

Level-1

Los datos enfocados del nivel 1 son generalmente los productos disponibles para la mayoría de usuarios. Se incluye un vector de calibración como anotación en el producto permitiendo una conversión simple de valores de intensidad de imagen a valores sigma o gamma referentes a cero. Estos productos pueden ser *Single Look Complex* (SLC) o *Ground Range Detected* (GRD). En este proyecto trabajaremos únicamente con estos productos, ya sea con adquisición SM o IW.

Level-1 Single Look Complex (SLC)

Consisten en datos SAR enfocados, georeferenciados usando datos de la órbita y altitud del satélite. La imagen se encuentra en la geometría *slant-range*. Los productos se encuentran en orientación de zero-Doppler, donde cada fila de píxeles representa puntos a lo largo de la línea perpendicular al recorrido del satélite. Los datos de muestreo son complejos (16 bits reales y 16 bits imaginarios), conservando así la información de fase. La resolución dependerá del modo de adquisición y del ángulo de incidencia.

Los productos SLC Stripmap contienen una imagen por cada *swath* y por cada banda de polarización. En la tabla 2.5 tenemos la tabla de características para productos SLC Stripmap, donde se detalla la variación de resolución con el ángulo de incidencia. El modo IW, con tres *swaths*, tiene tres imágenes para polarización simple, y seis para doble polarización. En la tabla 2.6 tenemos la tabla de características para productos SLC IW.

Product ID	SM_SLC					
Product Type	Stripmap, Slant-Range, Single Look, Complex					
Main Product Characteristics						
Pixel Value	Complex					
Coordinate System	Slant Range					
Bits Per Pixel	16 I and 16 Q					
Polarisation Options	Single (HH or VV) or Dual (HH+HV or VV+VH)					
Beam ID	S1	S2	S3	S4	S5	S6
Ground Range Coverage [km]	80.1					
Slant Range Resolution [m]	1.7	2	2.5	3	3.3	3.6
Azimuth Resolution [m]	4.3	4.9	3.6	4.8	3.9	4.9
Slant Range Pixel Spacing [m]	1.5	1.8	2.2	2.6	2.9	3.1
Azimuth Pixel Spacing [m]	3.6	4.2	3.5	4.1	3.6	4.1
Incidence angle [°]	22.3	25.6	31.2	36.4	41	43.8
Equivalent Number of Looks (ENL)	1					

Tabla 2.5. Características del producto SLC Stripmap.

Product ID	IW_SLC		
Product Type	Interferometric Wide Swath, Slant-Range, Single Look, Complex		
Main Product Characteristics			
Pixel Value	Complex		
Coordinate System	Slant Range		
Bits Per Pixel	16 I and 16 Q		
Polarisation Options	Single (HH or VV) or Dual (HH+HV or VV+VH)		
Beam ID	IW1	IW2	IW3
Ground Range Coverage [km]	251.8		
Slant Range Resolution [m]	2.7	3.1	3.5
Azimuth Resolution [m]	22.5	22.7	22.6
Slant Range Pixel Spacing [m]	2.3	2.3	2.3
Azimuth Pixel Spacing [m]	14.1	14.1	14.1
Incidence angle [°]	32.9	38.3	43.1
Equivalent Number of Looks (ENL)	1		

Tabla 2.6. Características del producto SLC *Interferometric Wide Swath*.

Level-1 Ground Range Detected (GRD)

Consisten en datos SAR enfocados que han sido detectados, promediados (técnicas de *multilook* que explicaremos en el capítulo 3), y proyectados al *ground range* usando un modelo de la Tierra elipsoidal como el WGS84. La proyección elipsoidal de los productos GRD es corregida usando la altura del terreno que se encuentra dentro de las anotaciones generales del producto. Los valores de los píxeles representan la magnitud del coeficiente de *backscatter*, perdiendo la información de fase. Además de estas correcciones, a los productos GRD se les aplica la técnica de *Thermal Noise Removal*, un filtrado de *Speckle* (técnicas explicadas en el capítulo 3) para mejorar la calidad de la imagen detectada. A los datos adquiridos en modo IW o EW habrá que pre-procesarlos siguiendo las técnicas de *deburst* y *split* para formar una única y continua imagen en el *ground range*, por cada canal de polarización.

Los productos Level-1 GRD pueden tener tres resoluciones diferentes dependiendo de la cantidad de *multilooks* realizados sobre la imagen:

- ✓ *Full Resolution* (FR): Sólo en modo SM.
- ✓ *High Resolution* (HR): En modos SM, IW y EW.
- ✓ *Medium Resolution* (MR): En modos SM, IW, EW y WV.

En las tablas 2.7 a 2.11 se encuentran las características de los productos *Ground Range Detected* para los modos de adquisición SM e IW. Notar que la resolución en este

Procesado de datos SAR del satélite Sentinel-1 para el estudio de zonas costeras.

producto corresponde al valor medio, sobre todas las sub-extensiones a medio *range* y a una altura orbital media.

Product ID	SM_GRD_FR					
Product Type	Stripmap, Ground Range, Multi-look, Detected, Full Resolution					
Main Product Characteristics						
Pixel Value	Magnitude Detected					
Coordinate System	Ground Range					
Bits Per Pixel	16					
Polarisation Options	Single (HH or VV) or Dual (HH+HV or VV+VH)					
Beam ID	S1	S2	S3	S4	S5	S6
Ground Range Coverage [km]	80.1					
Ground Range Resolution [m]	8.1	8.4	8.8	9	9.2	9.2
Azimuth Resolution [m]	8.1	8.7	8.8	8.9	8.9	9.1
Ground Range Pixel Spacing [m]	4					
Azimuth Pixel Spacing [m]	4					
Incidence angle [°]	22.3	25.6	31.2	36.4	41	43.8
Equivalent Number of Looks (ENL)	3.5	3.5	3.7	3.5	3.7	3.5

Tabla 2.7. Características del producto GRD *StripMap Full Resolution*.

Product ID	SM_GRD_HR					
Product Type	Stripmap, Ground Range, Multi-look, Detected, High Resolution					
Main Product Characteristics						
Pixel Value	Magnitude Detected					
Coordinate System	Ground Range					
Bits Per Pixel	16					
Polarisation Options	Single (HH or VV) or Dual (HH+HV or VV+VH)					
Beam ID	S1	S2	S3	S4	S5	S6
Ground Range Coverage [km]	80.1					
Ground Range Resolution [m]	21.4	22.2	23.1	23.7	24.2	24.4
Azimuth Resolution [m]	21.3	23	23.2	23.6	23.4	24.1
Ground Range Pixel Spacing [m]	10					
Azimuth Pixel Spacing [m]	10					
Incidence angle [°]	22.3	25.6	31.2	36.4	41	43.8
Equivalent Number of Looks (ENL)	26.8	26.3	29.7	26.8	29.7	26.8

Tabla 2.8. Características del producto GRD *Stripmap High Resolution*.

Product ID	SM_GRD_MR					
Product Type	Stripmap, Ground Range, Multi-look, Detected, Medium Resolution					
Main Product Characteristics						
Pixel Value	Magnitude Detected					
Coordinate System	Ground Range					
Bits Per Pixel	16					
Polarisation Options	Single (HH or VV) or Dual (HH+HV or VV+VH)					
Beam ID	S1	S2	S3	S4	S5	S6
Ground Range Coverage [km]	80.1					
Ground Range Resolution [m]	78	80.7	84.1	86.4	87.9	88.7
Azimuth Resolution [m]	77.3	83.8	84.4	85.7	85.1	87.5
Ground Range Pixel Spacing [m]	40					
Azimuth Pixel Spacing [m]	40					
Incidence angle [°]	22.3	25.6	31.2	36.4	41	43.8
Equivalent Number of Looks (ENL)	358.3	350.5	398.4	358.3	398.4	358.3

Tabla 2.9. Características del producto GRD *Stripmap Medium Resolution*.

Product ID	IW_GRD_HR		
Product Type	Interferometric Wide Swath, Ground-Range, Multi-Look, Detected, High Resolution		
Main Product Characteristics			
Pixel Value	Magnitude Detected		
Coordinate System	Ground Range		
Bits Per Pixel	16		
Polarisation Options	Single (HH or VV) or Dual(HH+HV or VV+VH)		
Beam ID	IW1	IW2	IW3
Ground Range Coverage [km]	251.8		
Ground Range Resolution [m]	20.4	20.3	20.5
Azimuth Resolution [m]	22.5	22.6	22.6
Ground Range Pixel Spacing [m]	10		
Azimuth Pixel Spacing [m]	10		
Incidence angle [°]	32.9	38.3	43.1
Equivalent Number of Looks (ENL)	4.4	4.4	4.3
Radiometric Resolution	1.7	1.7	1.7

Tabla 2.10. Características del producto GRD *Interferometric Wide Swath, High Resolution*.

Product ID	IW_GRD_MR		
Product Type	Interferometric Wide Swath, Ground-Range, Multi-Look, Detected, Medium Resolution		
Main Product Characteristics			
Pixel Value	Magnitude Detected		
Coordinate System	Ground Range		
Bits Per Pixel	16		
Polarisation Options	Single (HH or VV) or Dual(HH+HV or VV+VH)		
Beam ID	IW1	IW2	IW3
Ground Range Coverage [km]	251.8		
Ground Range Resolution [m]	87.9	87.8	88.7
Azimuth Resolution [m]	90.2	90.6	90.3
Ground Range Pixel Spacing [m]	40		
Azimuth Pixel Spacing [m]	40		
Incidence angle [°]	32.9	38.3	43.1
Equivalent Number of Looks (ENL)	83.9	81.2	80.5

Tabla 2.11. Características del producto GRD *Interferometric Wide Swath, Medium Resolution*.

2.2.2.3. Políticas de modos de adquisición y escenarios de observación

El escenario de observación de la plataforma Sentinel-1 sigue un plan predefinido que optimiza sus recursos técnicos. El escenario planificado tiene como objetivo cumplir los requisitos de observación que necesita el programa Copérnico. Así mismo, como objetivo secundario, se incluyen las necesidades de la comunidad de usuarios internacionales de datos SAR, continuando con las misiones ERS/ENVISAT, considerando a la comunidad científica y a las actividades internacionales de cooperación. La elaboración del plan de observación debe solventar *a priori* los conflictos que puedan ocurrir entre usuarios, como por ejemplo, diferentes modos de operación SAR, o diferentes esquemas de polarización sobre una misma área geográfica. De acuerdo al plan desarrollado, la misión Sentinel-1 debe garantizar observaciones que completen las dos siguientes categorías de servicios:

- ✓ Monitoreo de servicios relativos a océanos, mares y hielo marino: Estos servicios requieren datos en tiempo cercano a real, típicamente en menos de 3 horas, y en algunos casos, en menos de 10 minutos. La mayor parte de este tipo de aplicaciones o servicios requieren observaciones sistemáticas y frecuentes.
- ✓ Servicios y aplicaciones sobre tierra: Cubren una gran variedad de temáticas. Generalmente no requieren datos en tiempo casi real, y pocos de ellos requieren datos en menos de 3 horas desde el momento de la detección. Estos datos son registrados a bordo de la plataforma y descargados posteriormente en la red de estaciones en la Tierra, siendo disponibles en un tiempo siempre menor a 24 horas.

Partiendo de estos objetivos, la estrategia consiste en conseguir un uso óptimo del ciclo de trabajo SAR (25 minutos por órbita), teniendo en cuenta las limitaciones técnicas, como la energía disponible, la capacidad de almacenamiento de datos, el máximo tiempo de descarga de datos por órbita, etc. De esta forma, los esquemas de polarización se definen en base a los servicios y a los recursos disponibles. El modo *Wave* (WV) queda establecido como modo predefinido para los océanos por su bajo bitrate. Los modos IW y EW son los modos establecidos sobre tierra, mares y áreas polares. Sobre tierra, el esquema de polarización para cada área geográfica será siempre el mismo de forma sistemática, garantizando datos de idénticas características para servicios o aplicaciones que requieran estudios de datos a lo largo del tiempo. El modo SM, se usará en casos excepcionales, en situaciones de emergencia o en aplicaciones críticas que requieran de una mayor precisión e información del área geográfica.

En su página web, la ESA publica de forma rutinaria el escenario de observación para cada ciclo (12 días) del satélite, con lo que cualquier usuario puede saber qué tipo de productos y qué modos de operación o esquemas de polarización realizará la plataforma Sentinel-1 sobre un área geográfica específica. En la figura 2.36 podemos observar el escenario de observación para el ciclo número 76, que corresponde con los días transcurridos entre el 9 y 21 de Abril de 2016 [34].

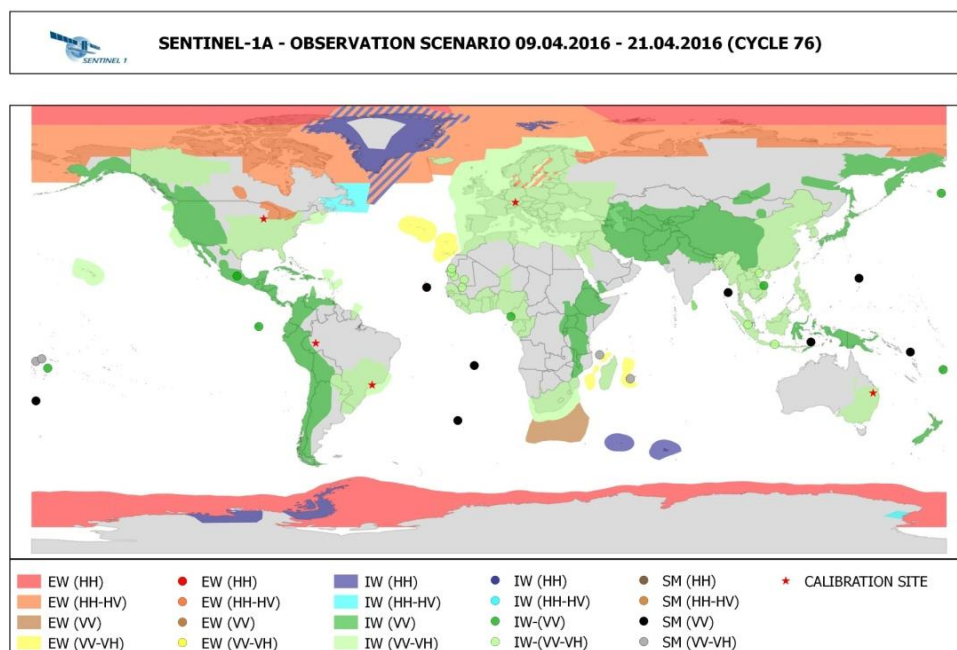


Figura 2.36. Plan de observación de escenarios, ciclo 76: 09/04/2016 - 21/04/2016.

Como puede observarse en la figura anterior, todos los productos realizados sobre Canarias (nuestra área geográfica de interés) tienen como modo de operación el IW y el esquema de polarización VV-VH. Como hemos explicado, aunque IW no es el modo de operación más preciso y de mayor resolución, en este proyecto se da la obligación de utilizarlo puesto que no existen, de momento, productos con modo *Stripmap* sobre nuestra zona de interés. Sin embargo, para comprobar la eficacia y los resultados de los diferentes procesados llevados a cabo en los posteriores capítulos, seleccionaremos un área costera en cualquier lugar del planeta que haya sido captado en modo *Stripmap* en doble polarización. Esto nos servirá como referencia para posteriores (posibles) productos de alta resolución sobre Canarias. Cabe indicar que además de este mapa de observación de escenarios, la ESA publica también periódicamente una serie de archivos .kml que pueden ser abiertos en la aplicación Google Earth® de Google®. Estos archivos contienen de manera gráfica y más detallada los pases que se realizarán sobre el planeta, así como las horas de los pases, tipo de productos, etc. Se puede incluso deslizar una barra de tiempos que muestra los pases sucesivos realizados. En la figura 2.37 podemos ver un ejemplo. En color rojo tenemos los pases en modo IW y en verde los realizados en modo EW. Además de esto y por último, en la figura 2.38 podemos observar una aplicación online dispuesta por la ESA para el seguimiento y posicionamiento en tiempo real de varios satélites, entre ellos, el Sentinel-1 A [35] [36].

Procesado de datos SAR del satélite Sentinel-1 para el estudio de zonas costeras.

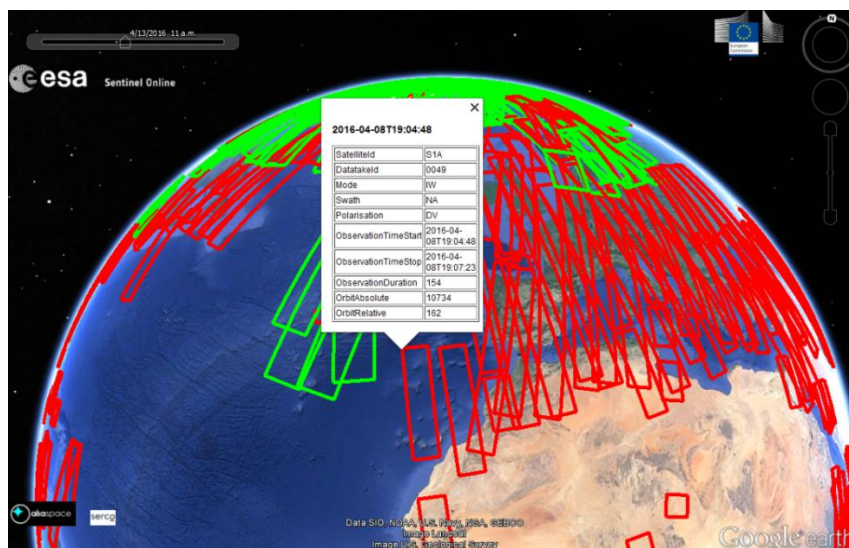


Figura 2.37. Plan de observación de escenarios, Google Earth®, del 6/04/2016 a 13/04/2016.



Figura 2.38. Aplicación online de la ESA para seguimiento y posicionamiento de los satélites Sentinel.
En la imagen, posición del satélite Sentinel-1A a fecha de 07/04/2016 18:40:00 UTC.

2.2.3. Distribución de productos: Datahub de la ESA

Cumpliendo con los objetivos y espíritu del programa Copérnico, la ESA ha creado un portal web desde el que de manera fácil, rápida y sencilla se tiene acceso a la base de datos de todos los productos creados por las diferentes plataformas Sentinel. Cualquier usuario, incluyendo el público general, científicos y usuarios comerciales, pueden acceder al mismo mediante registro previo en la página web. Los datos son publicados en un margen de una a tres horas desde la adquisición para situaciones de emergencia y en un periodo no superior a 24 horas para el resto de datos.

Esta base de datos, operativa desde Diciembre de 2014, registra a fecha de 8 de Abril de 2016 más de medio millón de productos diferentes pertenecientes a las misiones Sentinel-1 y Sentinel-2. En un solo día se descargan mundialmente unos 8000 productos y se publican otros 1700 [37]. En la figura 2.39 podemos ver el portal de entrada a la base de datos, *Scientific Data Hub*.

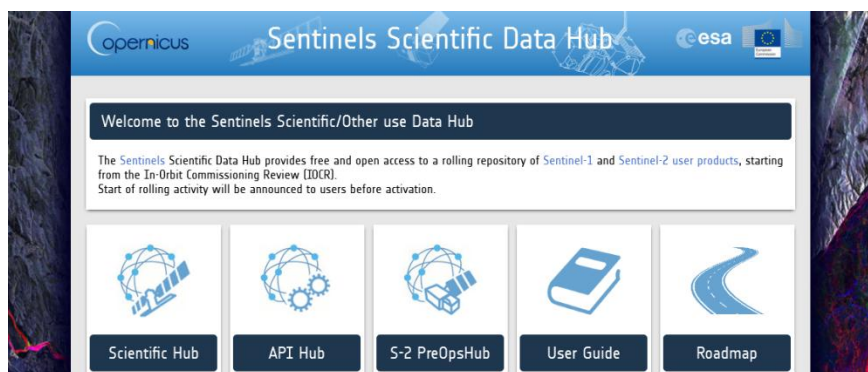


Figura 2.39. Portal de entrada a la base de datos de misiones Sentinel de la ESA, *Scientific Data Hub*.

Una vez nos hemos registrado y hemos accedido a la base de datos, la web dispone de un mapa global de la Tierra para la ubicación de productos así como de herramientas inteligentes de búsqueda. Podemos, por ejemplo, localizar un área geográfica y buscar los productos que más nos interesen para fechas determinadas o elegir la misión Sentinel más apropiada para nuestro estudio o aplicación. En la figura 2.40 se puede ver el buscador de productos una vez hemos accedido a la base de datos.

En cuanto a los productos que buscamos, podemos ver una imagen previa en falso color para verificar el área que queremos así como la traza de la imagen sobre el mapa geográfico. La descarga se realiza mediante el propio navegador web en forma de paquete-

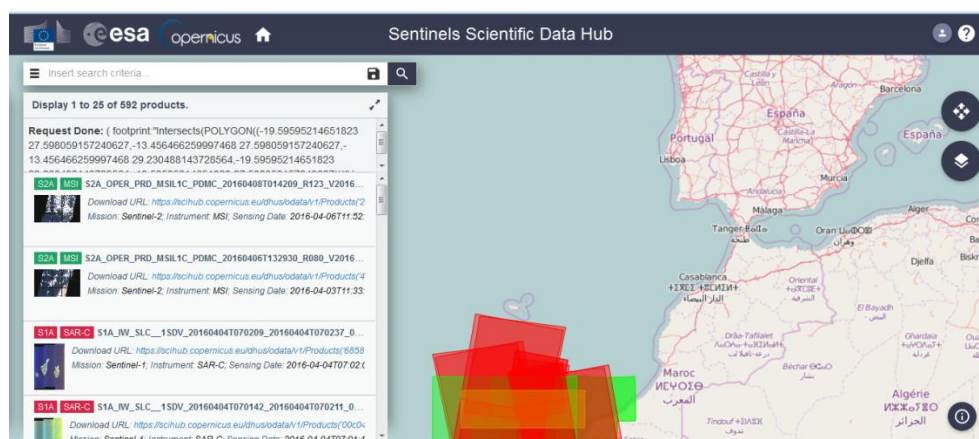


Figura 2.40. Buscador de productos de la base de datos, *Scientific Data Hub*.

tes .zip. El peso de estos paquetes puede oscilar desde 1 ó 2 hasta los 7 gigabytes para los productos SLC. El contenido para cualquiera de los productos y modos de adquisición explicados anteriormente en el apartado 2.2.2. siguen una estructura en común, un formato denominado por la ESA como *SENTINEL-SAFE Format (Sentinel Standard Archive Format for Europe)*. Esta estructura está formada por varias carpetas según se muestra en la figura 2.41, que contiene un archivo de descripción (metadatos) en formato XML, subcarpetas con los datos de imágenes en formato GeoTIFF, datos de calibración, anotaciones, vista previa y archivos de ayuda.

Las anotaciones contienen metadatos que describen las propiedades y características de los datos medidos y cómo fueron generados. De este modo, para cada banda de datos, existe un data set de anotaciones que contiene la descripción de sus principales características, así como el estado de la plataforma durante la adquisición, la polarización y localización geográfica. Las anotaciones de calibración contienen la información necesaria para la correcta calibración de los productos. La carpeta de vista previa (*quicklook*) contiene una versión a muy baja resolución del área geográfica contenida en el producto. Para los productos con polarización simple, la representación es en escala de grises, mientras que en los de doble polarización se realiza un falso color con las diferentes bandas (polarizaciones) [38].

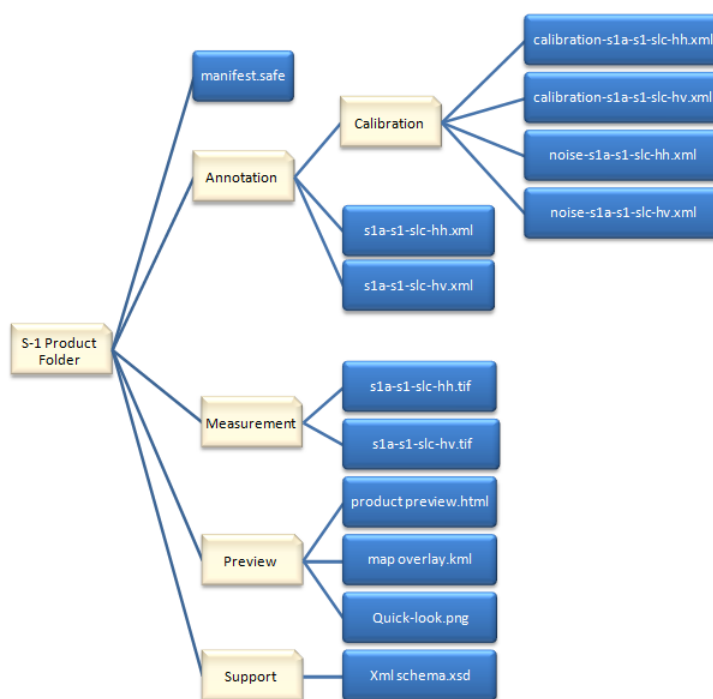


Figura 2.41. Estructura de carpetas y datos de un producto Sentinel-1.

El paquete .zip es nombrado con una nomenclatura propia para su fácil y sistemática identificación [39]. En la figura 2.42 se detallan cada uno de los códigos que aparecerán en el nombre de archivo del paquete .zip.

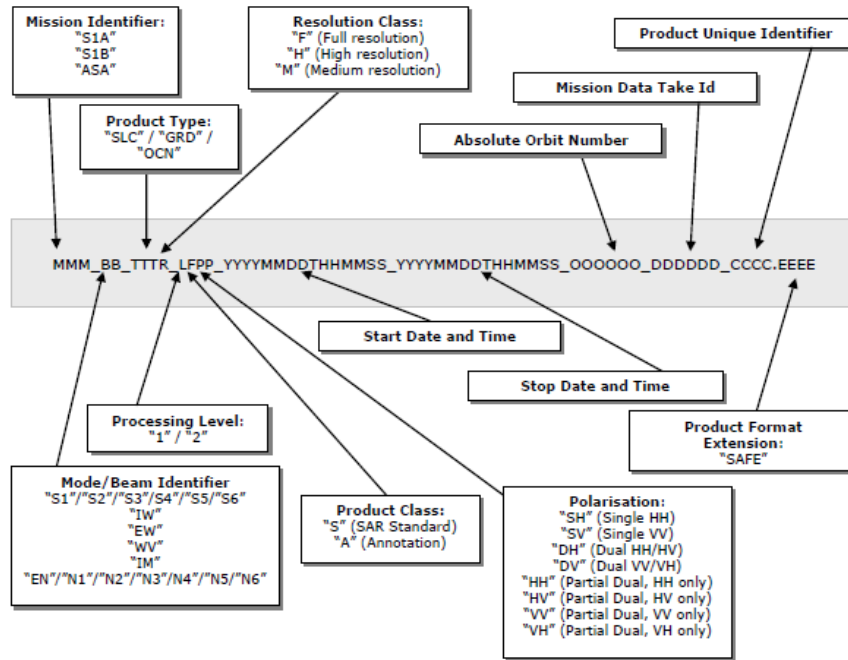


Figura 2.42. Nomenclatura del nombre de archivo de un paquete .zip de productos Sentinel.

Un ejemplo ilustrativo lo tendríamos en el siguiente nombre de un paquete de datos .zip correspondiente a un producto SLC IW sobre las Islas Canarias de fecha 04/04/2016:

S1A_IW_SLC__1SDV_20160404T070209_20160404T070237_010668_00FE5D_CCA6

Como podemos comprobar, el producto pertenece al satélite Sentinel-1A. El sensor captó las imágenes en modo IW y el producto es SLC y tienen polarización DV (VV-VH). El inicio de la toma de datos fue el 04/04/2016 a las 07:02:09UTC, finalizando el mismo día a las 07:02:37UTC. El número absoluto de órbita es el 10668 y el identificador del producto es el CCA6.

2.3. Otros sensores SAR

Desde 1978, con el lanzamiento del satélite SAR Seasat, las imágenes radar se han establecido como herramientas altamente útiles e indispensables en el campo de la teledetección y observación de La Tierra. Desde ese momento, y hasta nuestros días,

Procesado de datos SAR del satélite Sentinel-1 para el estudio de zonas costeras.

numerosos sensores embarcados en satélites espaciales han sido lanzados para proporcionar más y más datos de la superficie terrestre. Este primer sensor SAR, diseñado y fabricado por la NASA, operaba en la banda L (23,5 cm de longitud de onda) con un ancho de haz de 100 km y una resolución de 25x25 m a una única polarización HH. Aunque su vida operativa duró apenas unos 105 días debido a un fallo general en el sistema eléctrico, fue el primer satélite que demostró la potencialidad de la tecnología SAR. Así se abrió la puerta a los actuales satélites SAR que orbitan la Tierra en nuestros días, comenzando en la década de los 80 con los satélites SIR-A y SIR-B. Por este motivo, para detallar el contexto histórico y tecnológico de esta tecnología, enumeramos de forma muy resumida en este apartado, algunos de estos satélites de teledetección[19] [40].

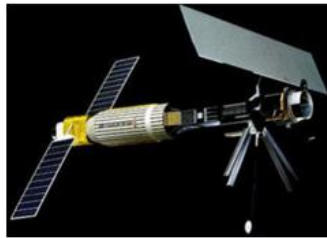


Figura 2.43. Satélite Seasat.

Los satélites SIR-A y SIR-B (*Spaceborne Imaging Radar A y B*) fueron lanzados al espacio por la NASA en 1981 y 1984, respectivamente. Operaban en la banda L, su ancho de haz era de 20x40 km (*range x azimuth*) a una resolución de como máximo, 16x30 m y con una única polarización HH [41] [42]. Posteriormente, de la mano de la ESA llegarían los satélites ERS-1 en 1992 y ERS-2 (*European Remote Sensing Satellite 1 y 2*) en 1995. Compartían la misma órbita y contaban con sensores SAR que operaban en banda C a una frecuencia de 5,3 GHz con polarización VV. El ancho máximo del haz alcanzaba los 100 km y la resolución máxima era de unos 26x6 m. El fin de sus operaciones llegó los días 10 de Marzo de 2000 para el ERS-1, y el 5 de Septiembre de 2011 para el ERS-2 [43].



Figura 2.44. Satélite ERS 1/2.

En 1995 hacía aparición también el satélite de la Agencia Espacial Canadiense, (Canadian Space Agency, CSA), RADARSAT-1. Operaba en banda C a una frecuencia de 5,3 GHz con una única polarización HH. El ancho de la escena podía variar entre 50-100 km. La máxima resolución era de 8 m y el periodo de revisita global era de 24 días. La misión finalizó el 29 de Marzo de 2013 [44].

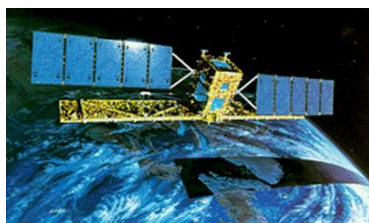


Figura 2.45. Satélite RADARSAT-1.

A la entrada del nuevo milenio, en Marzo de 2002, la ESA lanzó al espacio el satélite Envisat como sucesor de los satélites ERS 1/2. Operaba en la banda C a 5,33 GHz y era capaz de obtener imágenes con las cuatro polarizaciones. La resolución máxima alcanzaba los 30x30 m. El ancho de escena mayor era de 400 km. La misión finalizó el 8 de Abril de 2012 tras un fallo inesperado del satélite [45]. Más tarde, en Enero de 2006, la Agencia Japonesa de Exploración Aeroespacial, JAXA, ponía en órbita su satélite ALOS-PALSAR (*Advanced Land Observation Satellite- Phased Array type L-band SAR*). Operaba en banda L a una frecuencia de 1,27 GHz con las cuatro polarizaciones posibles. La resolución máxima era de 7 m y el ancho de escena mayor era de unos 350 km. Su vida útil se extendió hasta el 12 de Mayo de 2011 [46]. En Diciembre de 2007 llegaría la continuación de la misión RADARSAT canadiense con el satélite RADARSAT-2. Operando a la misma frecuencia que su antecesor, las mejoras incluían, además de las cuatro polarizaciones, una mayor resolución, de 1x3 m. Aunque su vida útil era de 7 años, en el momento de la redacción de este proyecto seguía operativo [47]. De la misma época que el RADARSAT-2, tenemos los satélites TerraSAR-X y TanDEM-X, que se detallarán por separado, en el apartado 2.3.1.

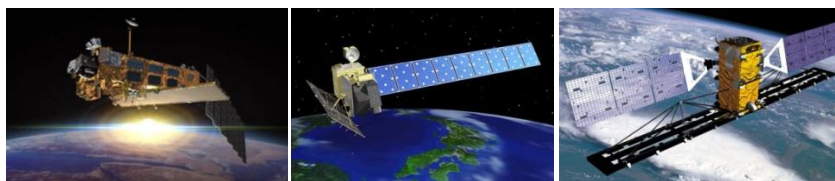


Figura 2.46. De izquierda a derecha, satélites Envisat, ALOS y RADARSAT-2.

Procesado de datos SAR del satélite Sentinel-1 para el estudio de zonas costeras.

Entre los más nuevos y modernos sistemas SAR tendríamos los satélites Cosmo-SkyMed, Risat-1, ALOS-2, SAOCOM 1/2 y el satélite PAZ. El satélite CosmoSkyMed es una constelación de cuatro satélites de la Agencia Espacial Italiana (*Agenzia Spaziale Italiana*, ASI). El primero de ellos, COSMO-1, fue lanzado el 8 de Junio de 2007, siendo completado por el último, COSMO-4, el 5 de Noviembre de 2010. Siguen activos en la actualidad operando en banda X y proporcionando imágenes de hasta 1 m de resolución y escenarios de hasta 200 km. Cabe mencionar que el sistema se diseñó para que cada satélite capturará 450 imágenes (de diferentes modos de operación) por día [48]. Dos años más tarde, el 26 de Abril de 2012, la Organización de Investigación Espacial India (*Indian Space Research Organisation*, ISRO) lanzó al espacio su satélite Risat-1. Fue diseñado como complemento a las misiones de observación óptica de la organización. Operando en banda C y con múltiples polarizaciones, es capaz de proporcionar imágenes de resolución entre 1 y 50 m y escenarios que varían desde los 10 hasta los 225 km. Su esperanza de vida es de 5 años [49]. El 24 de Mayo de 2014, la Agencia Japonesa de Exploración Aeroespacial continuaba con su misión ALOS poniendo en órbita el ALOS-2. Éste continua usando la banda L para la generación de imágenes SAR. Las mejoras incluían una mayor resolución, variando desde 1 a 100 m y escenarios desde 25 a 490 km, contando además, con las cuatro polarizaciones. Su periodo de revisita queda fijado en 14 días [50]. Por último, SAOCOM es una futura misión SAR de la Agencia Espacial Argentina (*Argentine Space Agency*, CONAE) en colaboración con la Agencia Espacial Italiana. Estará formada por dos satélites, SAOCOM 1A y SAOCOM 1B, que operarán en banda L a la frecuencia de 1,27 GHz. Sus lanzamientos están previstos para Octubre de 2017 y de 2018, respectivamente. Se espera una vida útil de 5 años para ambos. Ambos satélites compartirán la misma órbita teniendo un periodo de 14 días, que dividido por los dos, da lugar a los 7 días del periodo de revisita. Obtendrán imágenes en modo multipolarimétrico y la resolución variará desde los 10 a los 100 m [51].



Figura 2.47. De izquierda a derecha, satélites Cosmo-SkyMed, Risat-1, ALOS-2 y SAOCOM 1/2.

Por último, el satélite PAZ ha sido diseñado por el Programa Nacional de Observación de la Tierra por Satélite (PNOTS) y los Ministerios de Defensa e Industria, Comercio y Turismo españoles, y fabricado por HisdeSAT. Dispone de un sensor SAR que opera en banda X. Sus aplicaciones son muy diversas: vigilancia de la superficie terrestre, cartografía de alta resolución, control fronterizo, soporte táctico en misiones en el extranjero, gestión de crisis y riesgos, evaluación de catástrofes naturales, control medioambiental, vigilancia del entorno marítimo, etc. Será capaz de ofrecer unas 100 imágenes diarias, cubriendo un área de 300.000 km². Dada su órbita cuasi-polar ligeramente inclinada, el satélite PAZ cubrirá todo el globo con un tiempo medio de revisita de 24 horas. El radar está desarrollado de manera que sea muy flexible, con capacidad para operar en un gran número de configuraciones que permitirán escoger las prestaciones de la imagen. El tamaño del escenario podrá variar entre los 100x100 y los 5x5 km, y la resolución entre los 15 y 1 m. Aunque la fase de diseño y fabricación ha finalizado, la fecha de lanzamiento aún no ha sido publicada. Se espera una vida útil de 5 años y medio [52].



Figura 2.48. Satélite de observación terrestre español PAZ.

En este contexto, para la zona de estudio propuesta en este proyecto contaremos con productos SLC IW del Sentinel-1, como hemos visto en los apartados 2.2.2.1. y 2.2.2.2.3. Desafortunadamente, estos productos no disponen de toda la resolución disponible por el satélite como ya se ha explicado. Como se detalló en los párrafos anteriores, en el mercado existen numerosas plataformas alternativas (privadas y por lo tanto de pago) que ofrecen datos SAR de altísima resolución, aunque no está en los objetivos de este proyecto la utilización de estas otras plataformas. Sin embargo, para la posterior comparación de datos, el IOCAG dispone de una imagen de alta resolución de la zona de estudio, las Islas Canarias, captada por el satélite TerraSAR-X. Es por este motivo que en el siguiente subapartado se explican de forma somera y breve, las principales características de este sensor SAR.

2.3.1. Satélite TerraSAR-X

El satélite TerraSAR-X forma parte de una constelación de dos satélites SAR que operan en la banda X. El primero de ellos, el TerraSAR-X, fue lanzado al espacio en Junio de 2007, mientras que su hermano gemelo, el TanDEM-X, fue lanzado en Junio de 2010. Se construyeron dentro del marco de colaboración público-privada entre el Centro Aeroespacial Alemán (DLR) y EADS Astrium. Su vida útil era en un principio de 5 años, sin embargo, en Mayo de 2014, tras 7 años de funcionamiento del primer satélite, se verificó el buen estado de salud de ambas plataformas, por lo que la esperanza de vida útil se extendió hasta el año 2018. Ambos satélites operan compartiendo la misma órbita, distanciados apenas unos centenares de metros. Trabajando en equipo son capaces de conseguir mediante técnicas interferométricas modelos digitales de elevación del terreno de altísima precisión y resolución.

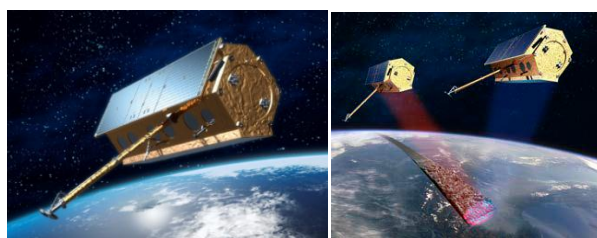


Figura 2.49. TerraSAR-X (izquierda). TerraSAR-X y TanDEM-X realizando tomas de datos (derecha).

Ambos satélites son idénticos en características, modos de operación y diseño de fabricación. En la tabla 2.12 se resumen sus características técnicas generales.

Operational life	5 years, for both satellites (TerraSAR-X and TanDEM-X), an extended lifetime of that least another 5 years (beyond 2018) is expected by the operator DLR (Status: April 2014).
Orbit	Sun-synchronous repeat orbit
Repeat period	11 days
Equatorial crossing time (GMT)	18:00 hrs ascending pass ($\pm 0.25h$) 06:00 hrs descending pass ($\pm 0.25h$)
Inclination	97.44°
Altitude at the equator	514 km (319.8 miles)
Antenna type	Active Phases Array Antenna, electronically separable
Antenna size	4.78 m x 0.7 m (15.7 feet x 2.3 feet)
Centre Frequency	9.65 GHz (X band)
Chirp bandwidth	150 MHz / 300 MHz
Nominal acquisition direction	Right side
Polarisation	Single, dual - depending on imaging mode quadruple is available as advanced polarisation mode for dedicated acquisition campaigns

Tabla 2.12. Características técnicas generales de los satélites TerraSAR-X y TanDEM-X.

En cuanto a los modos de operación del satélite, las polarizaciones y resoluciones disponibles, tenemos la figura 2.50 y la tabla 2.13 donde quedan detalladas las características de cada modo de operación [53] [54].

Imaging Mode	Standard Scene Size ^a [km]	Maximum Acquisition Length [km]	Slant Range Resolution ^b [m]	Azimuth Resolution ^b [m] ^c	Polarisation	Full Performance Range [°]
Staring SpotLight (ST)	4 x 3.7 ^d	3.7	0.6	0.24	Single (VV or HH)	20° to 45°
HighRes SpotLight 300 MHz (HS300)	10 x 5 ^e	5	0.6	1.1	Single (VV or HH)	20° to 55°
HighRes SpotLight (HS)	10 x 5	5	1.2	1.1	Single (VV or HH)	20° to 55°
SpotLight (SL)	10 x 10	10	1.2	1.7	Dual (HH & VV)	20° to 55°
StripMap (SM)	30 x 50 single pol	1,650	1.2	3.3	Single (VV or HH)	20° to 45°
	15 x 50 dual pol		1.2	6.6	Dual (HH & VV, HH & HV, or VV and VH)	
ScanSAR (SC)	100 x 150	1,650	1.2 (at 150 MHz)	18.5	Single (VV or HH)	20° to 45°
Wide ScanSAR (WS)	270 x 200 ^e	1,500	Depending on range bandwidth 1.7 - 3.3	40	Single (VV, HH, HV or VH)	15.6° to 49°

Tabla 2.13. Características de los distintos modos de operación del sensor SAR TerraSAR-X.

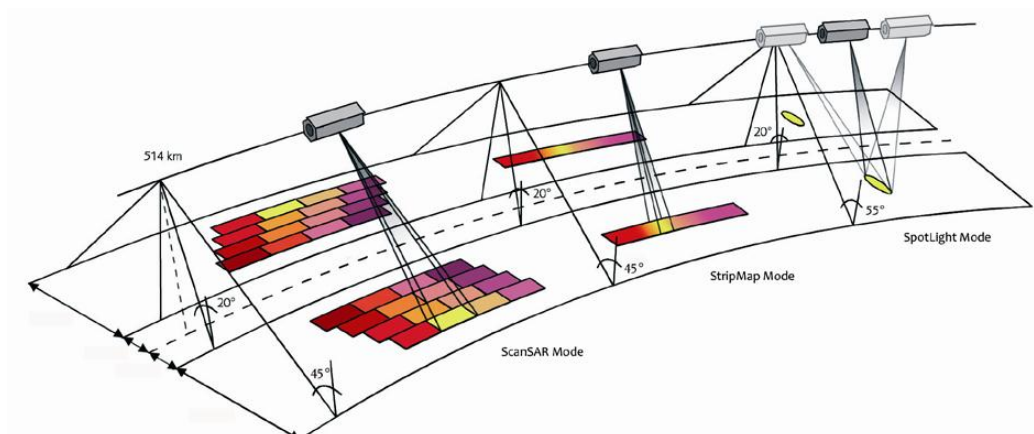


Figura 2.50. Modos de adquisición del sensor SAR TerraSAR.

Capítulo 3

Pre-procesado de los datos de teledetección SAR

3.1. Introducción a las técnicas de pre-procesado

La etapa de pre-procesado constituye una de los pasos más importantes en el tratamiento de datos SAR. Esta etapa tiene como objetivo corregir, o en su defecto compensar, los posibles errores producidos en las imágenes durante su adquisición. Los errores se pueden clasificar de forma genérica como: errores geométricos y radiométricos. Como se ha descrito en el capítulo 2, las imágenes SAR están sujetas a varios errores de naturaleza geométrica. Además de éstos, en este capítulo introducimos los errores de naturaleza radiométrica, que afectan a los valores de energía captados por el sensor, y por lo tanto, a la imagen final.

A modo de resumen, el capítulo detalla los conceptos de coeficiente de *backscattering* (coeficiente de retrodispersión) y de calibración de las imágenes, así como el ruido de *Speckle* y las técnicas disponibles para su mejora. Se incluyen los pre-procesados habituales en las correcciones geométricas de los productos Sentinel-1 usados en el proyecto.

3.1.1. Coeficiente de *backscattering*

Como se ha descrito en el capítulo anterior, los *side-looking radars* forman imágenes de datos de naturaleza compleja sobre la superficie de interés. Si conocemos los parámetros del sensor radar que hemos usado, podremos a su vez deducir la intensidad del *backscatter* a partir la energía recibida en la señal reflejada.

Si un objeto reflector/dispersor (en literatura anglosajona, un *scatterer*) predomina en la señal reflejada y a su vez captada por una celda de resolución (un píxel), a este tipo de *scatterer* se le denomina *point scatterer* o *point-like scatterer* (un objeto reflector/dispersor puntual). Un ejemplo de *point-scatterer* artificial sería un reflector de tres esquinas, también denominado como triedro, cuya respuesta, si es conocida, es esencial en el proceso de calibración de las imágenes radar. En la práctica, el retorno de la señal radar captado por un píxel consiste en la combinación del *backscatter* de varios objetos reflectores y dispersores de la energía transmitida. Este tipo de *scattering* es conocido como *scattering* distribuido. En la figura 3.1 podemos observar celdas con *point-like scatterers* y *scatterers* distribuidos. La señal reflejada por un *point-like scatterer* es muy estable en amplitud, variando sólo ante cambios de la longitud de onda o del ángulo de incidencia. Este no es el caso de los *scatterers* distribuidos, donde las respuestas de múltiples objetos individuales interfieren unas con otras. Consecuentemente, la respuesta radar de *scatterers* distribuidos es una variable aleatoria con una cierta distribución de probabilidad. La reflectividad medida en la respuesta radar debe ser entendida como una muestra de esta distribución.



Figura 3.1. *Point-like scatterers* (izquierda) y *scatterers* distribuidos (derecha).

La ecuación radar describe la relación entre la energía transmitida, la energía recibida y la energía reflejada por el objeto iluminado. En el caso de un único pulso monoestático, la energía recibida por la antena debido al *backscattering* de un objeto puntual a una distancia R está dada por la ecuación 3.1., donde P_R y P_T son la energía recibida y transmitida, G_{ant} es la ganancia de la antena radar y σ es la sección transversal (*Radar Cross Section, RCS*) de la superficie iluminada por el radar [18] [55] [56].

$$P_R = P_T \left(\frac{G \text{ant}^2 \lambda^2}{(4\pi)^3 R^4} \right) \sigma \quad (\text{Ec. 3.1})$$

La sección transversal de la superficie iluminada por el radar, σ , tiene unidades de superficie (m^2) y describe la intensidad del *backscattering* radar desde un reflector puntual en la ecuación 3.1. Por razones históricas, la σ es normalizada de forma que describe el área proyectada de una esfera metálica (un reflector isotrópico) que, sustituyendo al objeto iluminado, reflejaría la misma cantidad de energía de vuelta hacia el sensor radar. En cualquier caso, cabe notar que el área expresada por la σ hace referencia de forma vagamente aproximada al tamaño del reflector en el mundo real, ya que la σ depende estrechamente de la directividad del reflejo causado por la forma del objeto. En general, además de esto, la σ depende de la constante dieléctrica del objeto, su orientación con respecto al sensor y la longitud de onda empleada. En la figura 3.2 se puede observar el cálculo de la σ de una esfera y de un triedro. Como ejemplo, en la banda X, la σ de un ser humano es del orden de 1 m^2 , mientras que la σ de un triedro reflector con caras laterales de 1 m tiene en su punto de intersección un valor σ de 4500 m^2 .

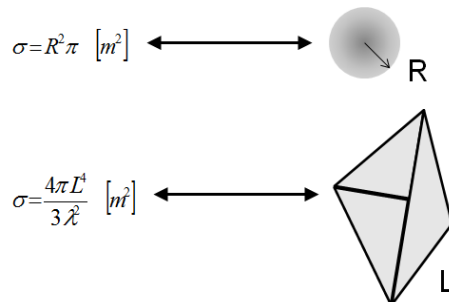


Figura 3.2. Superficies iluminadas por el radar. Arriba, sección transversal de un círculo. Abajo, sección transversal de un triedro.

La ecuación 3.1 puede ser usada con *scatterers* distribuidos integrando la energía de *backscatter* sobre el área total iluminada A_{ilum} , tal como aparece en la ecuación 3.2.

$$P_R = P_T \int_{A_{\text{ilum}}} \left(\frac{G \text{ant}^2 \lambda^2}{(4\pi)^3 R^4} \right) \sigma^0 dA \quad (\text{Ec. 3.2})$$

En esta última ecuación, σ^0 es el coeficiente de *backscattering* y describe la cantidad de energía reflejada comparada con la energía incidente en la escena para *scatterers* distribuidos. Es adimensional porque ha sido normalizada por la superficie del

área iluminada. La normalización se realiza usando el ángulo incidente θ_i en la ecuación 3.3.

$$\sigma^0 = \frac{\beta^0}{\text{sen}\theta_i} \quad (\text{Ec. 3.3})$$

En esta última ecuación, β^0 es el brillo estimado y obtenido por el radar en la geometría *slant-range*, independiente del ángulo incidente y de la topografía local [18] [57]. Describe la relación existente entre la energía recibida por el sensor y la energía que sería reflejada por un reflector isotrópico. Si la topografía local del terreno es conocida, el ángulo local incidente $\theta_{i,\text{local}}$ debería usarse en la ecuación 3.3. para normalizar correctamente la energía reflejada. En la literatura, se recomienda el uso exclusivo de σ^0 en los sistemas radar correctamente calibrados. Además, el coeficiente de *backscattering* suele estar expresado en decibelios, como indica la ecuación 3.4.

$$\sigma_{\text{dB}}^0 = 10 \log_{10}(\sigma^0) \quad (\text{Ec. 3.4})$$

Debido a la normalización de la sección transversal del área iluminada σ , y la unidad logarítmica del coeficiente de *backscattering* σ^0 , sus posibles valores describen fácilmente la directividad del *scattering* de la siguiente forma: 0 dB corresponde a un reflector isotrópico, valores positivos a reflectores que concentran y focalizan su energía hacia el radar, mientras que por el contrario valores negativos serán aquellos reflectores que dirigen la energía reflejada en direcciones que se encuentran fuera del área captada por el sensor. En la figura 3.3, a modo de ejemplo, se describe gráficamente la orientación del *backscattering* en función de la superficie iluminada. En la tabla 3.1 tenemos los valores típicos del coeficiente de *backscattering* para diferentes objetos iluminados por el sensor [58].



Figura 3.3. Ilustración sobre la orientación del *backscattering* en función de la superficie iluminada. A la izquierda, reflejo orientado de vuelta hacia el sensor. En la derecha, reflejo orientado alejándose del sensor.

Niveles del coeficiente de <i>backscattering</i>	Escenario Típico
Muy alto (por encima de los -5 dB)	Estructuras y objetos fabricados por el hombre (escenarios urbanos). Montañas y pendientes del terreno orientadas a favor del sensor radar. Superficies altamente rugosas.
Alto (de -10 dB a 0 dB)	Superficies rugosas. Vegetación densa (bosques).
Moderado (de -20 dB a -10 dB)	Niveles medios de vegetación. Cultivos agrícolas. Superficies moderadamente rugosas.
Bajo (por debajo de -20 dB)	Superficies planas. Agua en calma. Carreteras. Terrenos con bajos niveles de humedad (arena).

Tabla 3.1. Niveles del coeficiente de *backscattering* para escenarios típicos [58] .

3.1.2. Calibración

La calibración es el proceso que garantiza que el sistema radar y sus datos sean tan consistentes y precisos como sea posible. Antes de realizar cualquier tipo de análisis, la mayor parte de las imágenes radar requieren ser sometidas a una calibración previa. La calibración relativa corrige las variaciones conocidas en la antena radar y en la respuesta de sus sistemas. Este tipo de calibración asegura que podamos realizar repetidas tomas de datos sobre la misma área en distintos momentos de forma que sean relativamente comparables. Sin embargo, si deseamos medidas cuantitativas precisas que representen la energía real captada desde varios objetos o superficies con el objetivo de realizar medidas comparativas, necesitaremos realizar una calibración absoluta.

La calibración absoluta es un proceso mucho más complicado que la calibración relativa. En esta calibración se intenta relacionar la magnitud de la señal registrada con la cantidad real de energía reflejada desde cada celda de resolución. Para conseguirlo se requieren medidas detalladas de las propiedades del sistema radar así como medidas cuantitativas de las propiedades reflectantes de objetos específicos. Estas últimas medidas se obtienen usando dispersómetros en tierra. Se pueden usar también dispositivos transpondedores que, emplazados previamente en el lugar de la toma de datos, reciben la señal radar, la amplifican y transmiten de vuelta una señal de intensidad conocida hacia el

sensor radar. En la figura 3.4 se pueden observar algunos de estos dispositivos en tierra. Sabiendo la intensidad real de la señal de retorno en la imagen, las respuestas de otras superficies pueden ser referenciadas a ésta [5].



Figura 3.4. Reflectores de calibración en tierra para sensores SAR [58].

Cabe decir que aunque las imágenes SAR no calibradas son suficientes para su uso cualitativo, las imágenes calibradas son esenciales para aplicaciones en las que se requiere un tratamiento cuantitativo de los datos.

En el caso de los productos Sentinel, toda la información necesaria para la calibración de las imágenes está incluida dentro de las subcarpetas de los mismos como se indicó en el apartado 2.2.3. La información incluye vectores de calibración a modo de anotaciones permitiendo la conversión de valores de intensidad de imagen a valores del coeficiente de *backscattering* σ^0 . Concretamente, los productos Level-1 disponen de cuatro tablas de calibración (*Look Up Tables*, LUTs) para producir σ^0 , β^0 , γ^0 o el valor digital DN. Las LUTs aplican una corrección sobre el eje *range* e incluyen datos obtenidos y medidos por las estaciones terrenas para la calibración absoluta. Las cuatro tablas quedan definidas de la siguiente manera:

- A_β : Para transformar la reflectividad radar en β^0 , donde el área de normalización está ajustada con la geometría *slant-range*.
- A_σ : Para transformar la reflectividad radar en el coeficiente de *backscattering* σ^0 , donde el área de normalización está ajustada con el plano *ground range*.
- A_γ : Para transformar la reflectividad radar en gamma γ^0 , donde el área de normalización está ajustada con el plano perpendicular al *slant range*.

Procesado de datos SAR del satélite Sentinel-1 para el estudio de zonas costeras.

- A_{dn} : Para revertir el escalado final del píxel. Los productos finales están codificados en 16 bits enteros (con signo para SLC y sin signo para GRD). Estos productos finales están generados desde el mismo código interno en el SLC en valores reales (*float data*). Para el uso óptimo del limitado rango dinámico de los datos discretos, el SLC original es escalado. A_{dn} define la escala desde el SLC original al producto final. El uso de la constante K de calibración para todos los productos finales está asegurado teniendo en cuenta el escalado final según se muestra en las siguientes ecuaciones.

El modelo de la Tierra usado en las anotaciones de calibración es la elipsoide corregida por la altura media de forma que el factor de normalización del área se puede simplificar por:

- $\sin(\alpha)$ en el caso de σ^0 .
- $\tan(\alpha)$ en el caso de γ^0 .

donde α es el ángulo local incidente en el modelo de La Tierra usado [59] [60].

La definición del coeficiente de *backscattering* σ^0 sigue la ecuación 3.5.

$$\sigma^0 = \frac{DN^2}{Adn^2 K} \cdot \frac{1}{Geap^2} \cdot \left(\frac{R}{Rref}\right)^3 \cdot \text{sen}(\alpha) \quad (\text{Ec. 3.5})$$

donde:

- $\frac{1}{Geap^2}$ es la corrección del patrón de elevación de la antena (EAP).
- $\left(\frac{R}{Rref}\right)^3$ es la corrección de las pérdidas de dispersión en el eje *range* (RSL).
- Adn es el escalado del producto final desde el SLC original al SLC o GRD finales.
- α es el ángulo local incidente.

En el caso del Sentinel-1, las correcciones EAP y RSL son realizadas por defecto en las estaciones terrenas de forma que los productos Level-1 y Level-2 ya las incluyen. La ecuación 3.5 queda entonces simplificada en la ecuación 3.6.

$$\sigma^0 = \frac{DN^2}{Adn^2K} \cdot \text{sen}(\alpha) \quad (\text{Ec. 3.6})$$

Consecuentemente, las tablas de corrección quedan definidas numéricamente como:

$$A_\sigma = \sqrt{\frac{Adn^2 \cdot K}{\text{sen}(\alpha)}} \quad (\text{Ec. 3.7})$$

$$A_\beta = \sqrt{Adn^2 \cdot K} \quad (\text{Ec. 3.8})$$

$$A_\gamma = \sqrt{\frac{Adn^2 \cdot K}{\text{tan}(\alpha)}} \quad (\text{Ec. 3.9})$$

Como puede deducirse de las anteriores ecuaciones, las LUTs contienen esencialmente el factor de normalización del área y la constante de calibración K . Éstas varían lentamente en el eje *range*. Es por este motivo que los vectores de las tablas de calibración contienen el eje *range* submuestreado, de forma que las LUTs pueden ser interpoladas para cada píxel sin ningún riesgo de ruido de interpolación.

A partir de aquí, es posible calibrar los datos mediante el uso inmediato de las tablas de calibración según las siguientes ecuaciones:

$$\sigma^0 = \frac{DN^2}{A\sigma^2} \quad (\text{Ec. 3.10})$$

$$\beta^0 = \frac{DN^2}{A\beta^2} \quad (\text{Ec. 3.11})$$

$$\gamma^0 = \frac{DN^2}{A\gamma} \quad (\text{Ec. 3.12})$$

donde DN es el valor digital de cada píxel, que para los casos de:

- ✓ GRD: Es la amplitud del píxel tomada directamente de los datos de medida.
- ✓ SLC: Es la amplitud del píxel definida por la raíz cuadrada de $(I^2 + Q^2)$ donde I y Q son las partes reales e imaginarias de los datos de medida.

Procesado de datos SAR del satélite Sentinel-1 para el estudio de zonas costeras.

Las LUTs contienen los datos de los distintos coeficientes en valores naturales. Es posible transformarlos en dB mediante el logaritmo decimal [60]:

$$\sigma_{dB}^0 = 10 \log_{10} \sigma^0 \quad (\text{Ec. 3.13})$$

3.1.3. Ruido radiométrico

El ruido en una imagen es debido a varias irregularidades o errores que ocurren en la respuesta del sensor a la señal recibida o debido al sistema de transmisión/recepción y al registrador/grabador [5]. Pueden tener naturaleza geométrica o naturaleza radiométrica como se indicó al comienzo del capítulo. Los errores radiométricos son corregidos, en parte, aplicando los datos de calibración detallados en el anterior apartado. Además de esto, se deben aplicar técnicas de eliminación del ruido térmico del sistema (*Thermal Noise Removal*), así como filtrado del ruido de *Speckle*, que detallaremos en el apartado 3.1.3.2. Por último en el apartado 3.1.3.3. veremos otras fuentes de ruido radiométrico que no podremos corregir.

Para una mayor comprensión del ruido radiométrico, antes de adentrarnos en los apartados mencionados, se recogen aquí las definiciones de ruido equivalente a sigma cero (NESZ), precisión, estabilidad y resolución radiométricas.

Si recordamos las especificaciones radiométricas del Sentinel-1 del apartado 2.2.2.1., vemos que el NESZ (Noise-equivalent sigma zero), ruido equivalente del sistema a sigma cero, es de -22 dB y éste engloba todas las fuentes de ruido del sistema incluyendo el ruido térmico y el ruido de cuantificación. Esta es la medida de cuán sensible es nuestro sensor SAR, describiendo la potencia de ruido aditivo del sistema en términos de potencia (promedio) equivalente en el dominio de la imagen que resultaría de un reflector distribuido idealizado con la reflectividad especificada.

La precisión y estabilidad radiométricas están especificadas para todos los modos de operación Sentinel entre los valores de 1dB (3σ) y 0.5 dB(3σ), respectivamente. La especificación 3σ está basada en el intervalo de confianza de una distribución normal gaussiana, y hace referencia a la probabilidad de que el instrumento, en sus medidas,

exceda el intervalo especificado. La estabilidad radiométrica es la desviación típica de la diferencia entre el coeficiente σ medido y el nominal, en una serie de medidas temporales sobre un reflector puntual. En otras palabras, si la σ de un mismo objeto ha sido medida varias veces, su desviación típica vendrá dada por la estabilidad radiométrica. Esto también se aplica a objetos distribuidos, asumiendo que los objetos no cambian y que tenemos suficientes muestras (píxeles) para realizar las medidas con gran precisión. La resolución radiométrica de un objeto puntual es la diferencia media entre el coeficiente σ medido y el nominal de una serie temporal de medidas sobre el objeto. Este valor nos proporciona la precisión con la que la σ puede ser medida.

$$\frac{\sigma_{st}}{I_0} = \frac{1 + \frac{1}{SNR}}{\sqrt{L}} \quad (\text{Ec. 3.14})$$

donde:

- ✓ σ_{st} es la desviación típica de la intensidad de la imagen en energía lineal.
- ✓ I_0 es la media de la intensidad de la imagen en energía lineal.
- ✓ SNR es la relación señal a ruido.
- ✓ L es número efectivo de observaciones (*looks*) y es igual a $(\text{media de intensidad})^2/\text{varianza}$.

Como ejemplo ilustrativo, en la figura 3.5 tenemos una gráfica de la resolución radiométrica de productos Sentinel-1 y Envisat usando la ecuación 3.14. El análisis se ha realizado para variaciones del coeficiente de *backscattering* desde -26 dB hasta 0 dB en los diferentes modos de operación del sensor. Para poder comparar, se incluye la resolución radiométrica de un producto ASAR *Wide Swath* del satélite Envisat. Es evidente que el modo de operación IW del Sentinel-1 combina gran cobertura espacial con una alta capacidad de resolución radiométrica [30].

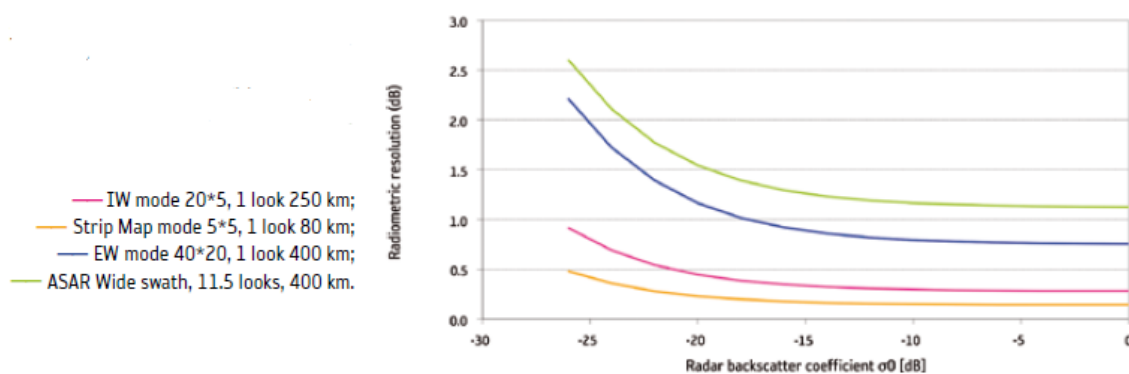


Figura 3.5. Resolución radiométrica en función del coeficiente de *backscattering* radar para diferentes modos de operación Sentinel-1 y ASAR *Wide swath* del Envisat [30].

3.1.3.1. Técnica Thermal Noise Removal

Para obtener valores radiométricos precisos de las medidas obtenidas, los productos Sentinel (Level-1) disponen de anotaciones en las que podemos encontrar el ruido introducido por la temperatura de ruido de la antena y los sistemas electrónicos. Al igual que ocurría con las tablas de calibración (LUTs), es posible añadir o quitar este ruido introducido por el propio sistema. En los productos GRD esta técnica está siempre aplicada por defecto, aunque es posible revertir el proceso y añadir la temperatura de ruido. En los productos SLC que usaremos para las técnicas de procesamiento polarimétricas no la usaremos puesto que a la salida del proceso obtenemos valores de intensidad y no valores reales (modulo y fase). Los valores de intensidad son debidos a que las tablas de ruido no contienen información sobre el ruido de fase, pues éste es aleatorio, por ello se trabaja con intensidades. Es importante tener en cuenta que esta corrección hace referencia al ruido del sistema, y está pensada para mejorar los datos sobre tierra, pues sobre el mar los valores de reflexión son muy bajos y nos encontramos ante el suelo de ruido (*noise floor*). En cualquier caso, la corrección será más apreciable desde el punto de visto cuantitativo que cualitativo, como puede observarse en la figura 3.6.

En el apartado de calibración se explicó cómo se obtenían las distintas tablas de calibración. En este caso, hay que aclarar que las tablas de ruido deben ser escaladas a la correspondiente tabla de calibración (σ^0 , β^0 , γ^0 ó DN) según la ecuación 3.15. [39].

$$noise(i) = \frac{\eta_i}{A_i} \quad (\text{Ec. 3.15})$$

donde, dependiendo de la tabla de ruido (LUT) seleccionada para calibrar la imagen:

- ✓ $noise(i)$ es vector de ruido calibrado para σ^0_i , β^0_i , γ^0_i ó el valor original DN_i.
- ✓ η_i es la tabla de ruido (LUT) (i)
- ✓ A_i es $A_\sigma(i)$, $A_\beta(i)$, $A_\gamma(i)$ ó $A_{DN}(i)$

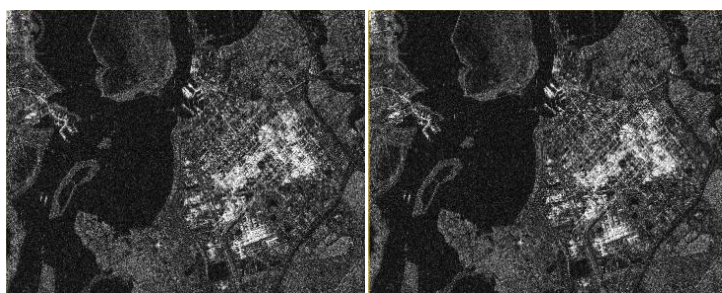


Figura 3.6. Producto Stripmap sobre un área costera urbana (Houston, USA). La imagen de la derecha ha sido calibrada aunque no se le ha sustraído el ruido. A la derecha, imagen calibrada y sin ruido.

3.1.3.2. Ruido de *Speckle*

Todas las imágenes SAR tienen un cierto grado de lo que se denomina ruido de "*Speckle*". Este ruido tiene su origen en el carácter aleatorio de la reflectividad observada, causada por la interferencia de numerosos objetos reflectores (*scatterers*) dentro de una misma celda de resolución. En general, sólo los píxeles en los que se encuentra un fuerte reflector angular no exhiben ruido de *Speckle*. El ruido de *Speckle* aparece superpuesto a los datos de la imagen como una textura de píxeles muy brillantes o muy oscuros en zonas que realmente son homogéneas, algo así como un efecto de "granos de sal y pimienta". Para entenderlo, imaginemos un campo de césped aproximadamente homogéneo. En este caso, la imagen resultante debería ser una imagen de reflectividad igualmente homogénea, sin embargo, debido al efecto de *Speckle*, la imagen aparecerá con puntos blancos y puntos negros superpuestos. Este ejemplo puede observarse en la figura 3.7 [5].

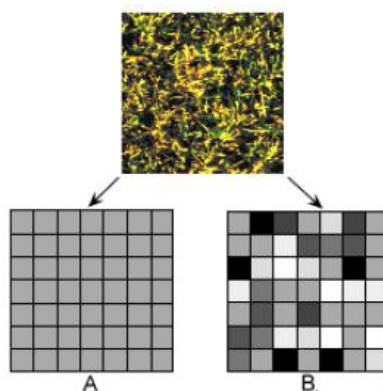


Figura 3.7. Ruido de *Speckle* sobre un campo de césped. En A imagen homogénea ideal. En B imagen real obtenida con el ruido de *Speckle*.

Este fenómeno ruidoso degrada el resultado de las tareas de procesado de interés como la clasificación de distintos materiales, estructuras o en general distintos objetivos a conseguir sobre la imagen a tratar. Como se describe al inicio de este apartado, el origen del ruido de *Speckle* se encuentra en la presencia de *scatterers* individuales dentro de un mismo píxel. La suma coherente de sus amplitudes y de sus fases produce fuertes fluctuaciones en el *backscattering* del píxel en cuestión. De esta forma, la interferencia local constructiva o destructiva aparece en la imagen como una textura superpuesta de moteado brillante u oscuro, respectivamente. Como consecuencia, la intensidad y la fase de la imagen final no serán deterministas, aunque sí seguirán una distribución exponencial

y uniforme, respectivamente [61]. En la figura 3.8 se describe gráficamente este proceso ruidoso [16].

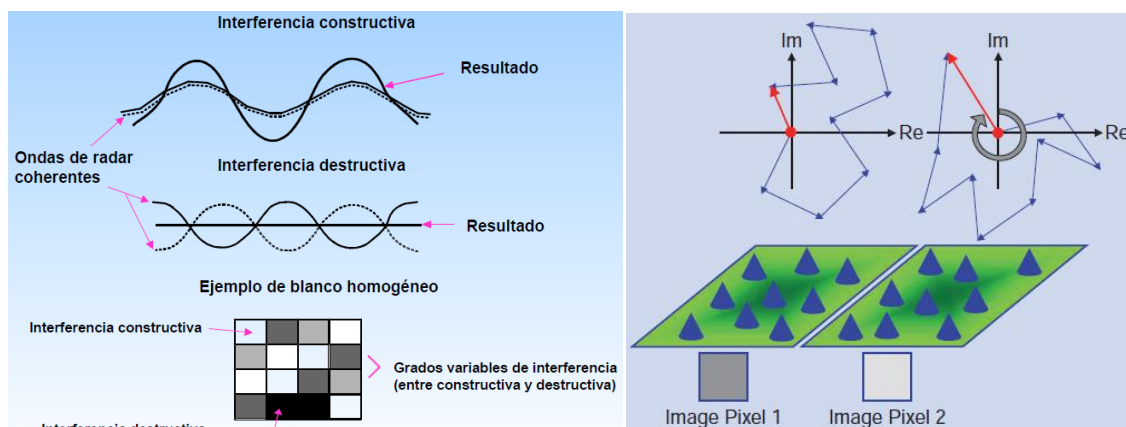


Figura 3.8. Ruido de *Speckle*. En la imagen de la izquierda podemos observar el proceso de interferencias locales. A la derecha tenemos los retardos y reflexiones producidos por varios *scatterers* dentro de un mismo píxel.

Este efecto no ocurre en sistemas de captación de imagen no coherentes, como por ejemplo, cámaras fotográficas. En estos dispositivos las señales de los elementos individuales de la escena no interfieren, y de esta forma, la señal captada es procesada añadiendo y sumando las señales de cada elemento en forma de energía captada por longitud de onda. En sistemas de imágenes coherentes, como el SAR, las reflexiones individuales de los *scatterers* interfieren unas con otras y la señal de cada píxel es el vector suma de las contribuciones de todos los elementos que se encuentran dentro de cada celda. En otras palabras, el efecto *Speckle* en sistemas coherentes está causado por la interferencia de los reflejos coherentes de los elementos individuales de la escena.

Los *scatterers* distribuidos pueden ser modelados por un largo número de *scatterers* "elementales" discretos e independientes, y el reflejo total para cada píxel se puede calcular como el vector suma de sus contribuciones siguiendo la ecuación 3.16.

$$Ae^{j\phi} = \sum_{k=1}^N A_k e^{j\phi_k} \quad (\text{Ec. 3.16})$$

donde la sumatoria se realiza sobre N *scatterers* "elementales", cada uno de los cuales contribuye al total del *backscatter* complejo con amplitud A_k y fase ϕ_k . Las fases y amplitudes de los *scatterers* elementales no se pueden observar directamente porque su tamaño es mucho más pequeño que la resolución del radar. Solamente su vector suma

$Ae^{j\phi}$ puede ser observado. La fase del reflejo radar de un *scatterer* individual depende de su distancia R_k hacia el radar así como de su estructura interna, siguiendo la ecuación 3.17.

$$\phi_k = \frac{4\pi}{\lambda} R_k + \phi_k^{\text{scatt}} \quad (\text{Ec. 3.17})$$

donde ϕ_k^{scatt} es el cambio de fase debido a la estructura interna del *scatterer*. Para *scatterers* naturales distribuidos se puede asumir que las posiciones de los *scatterers* independientes dentro de un píxel son aleatorias, lo que implica que sus fases ϕ_k se encuentren aleatoriamente distribuidas en el intervalo $[0, 2\pi)$. Sólo con objetos como por ejemplo rejillas o vallas podemos asumir no tener posiciones aleatorias. De las ecuaciones 3.16 y 3.17 tenemos que la reflectividad radar compleja observable $Ae^{j\phi}$ varía de un píxel a otro incluso sobre áreas que son estadísticamente homogéneas. Por contrapartida, cabe notar aquí que, aunque el efecto *Speckle* es aleatorio y aparece como ruido, es determinista y representa una característica real de la escena en el sentido de que, repetidas e idénticas (misma geometría) observaciones radar de la escena detectarán el mismo patrón *Speckle* [18].

Como aclaración, aunque en la literatura se le referencia como ruido, el efecto *Speckle* no se puede reducir incrementando la potencia de la señal de transmisión, ya que éste tiene carácter multiplicativo, es decir, su variación aumenta a mayor intensidad de energía. Por lo tanto, no podemos mejorar la relación señal a ruido incrementando la potencia de la señal [16]. Sin embargo, podemos mitigar el efecto *Speckle* de múltiples formas. Una de ellas es mediante la conocida técnica de *multi-looking*, o en castellano, multi-observaciones. Otra forma sería incrementar la resolución del sensor, ya que para sistemas de muy alta resolución, el número de *scatterers* individuales por píxel se reduce drásticamente. Otra herramienta sería la utilización de filtros de procesamiento de imagen que nos ayuden a separar el ruido *Speckle* de nuestra imagen de interés sin perder demasiada resolución espacial y/o radiométrica. En este proyecto abordaremos el ruido de *Speckle* de esta última forma haciendo uso de las herramientas disponibles en el software de la ESA.

La técnica de *multi-looking* consiste básicamente en realizar un promediado no coherente de la intensidad de la imagen. El proceso consiste en dividir el haz radar en

Procesado de datos SAR del satélite Sentinel-1 para el estudio de zonas costeras.

varios (como por ejemplo, cinco) haces más estrechos (por ejemplo, de 1 a 5). Cada uno de estos haces proporciona una "observación" independiente de la escena iluminada. En todos ellos existirá el efecto *Speckle*, pero mediante la suma y promediado de todos juntos en la imagen final, la intensidad del ruido de *Speckle* disminuye. En la figura 3.9 se puede observar una representación ilustrativa de esta técnica.

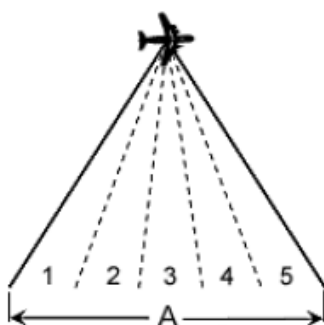


Figura 3.9. Técnica *Multi-look*.

Hay que tener en cuenta que precisamente, las llamadas imágenes SAR *single-look* (como por ejemplo los productos Sentinel SLC, *Single-Look-Complex*) utilizan toda la apertura sintética disponible para conseguir la más alta resolución de *azimuth* realizable por el sistema SAR. Estas imágenes tienen una alta resolución pero, debido al efecto *Speckle*, la reflectividad radar medida en estas imágenes contiene ruido y su precisión y resolución radiométrica están degradadas. De esta forma, la técnica *multi-looking* consigue mejorar la resolución radiométrica a costa de la resolución espacial. La suposición subyacente es que las observaciones separadas captan la misma reflectividad σ , lo cual no es siempre cierto en la práctica. Otra forma de realizar esta técnica consiste en realizar un promediado espacial no coherente de una imagen *single-look* SAR ya captada. Aquí la suposición pertinente es que la reflectividad radar es constante sobre los píxeles que rodean al píxel de interés, lo cual tampoco es siempre cierto en la práctica. Ambas aproximaciones son estadísticamente equivalentes y producen una imagen SAR de N observaciones (N -looks) con una resolución espacial reducida y una resolución radiométrica mayor [18]. Aunque esta herramienta de pre-procesado se encuentra disponible en el software de la ESA, los resultados obtenidos así como las recomendaciones en la literatura de la bibliografía, nos llevan a que la mejor solución sea la de filtros de imagen. Estos últimos ofrecen mejores resultados en términos de resolución espacial. Como ejemplo ilustrativo, en la figura 3.10 tenemos la reducción del

efecto *Speckle* sobre una imagen SAR utilizando distintos niveles de multi-observaciones [16].

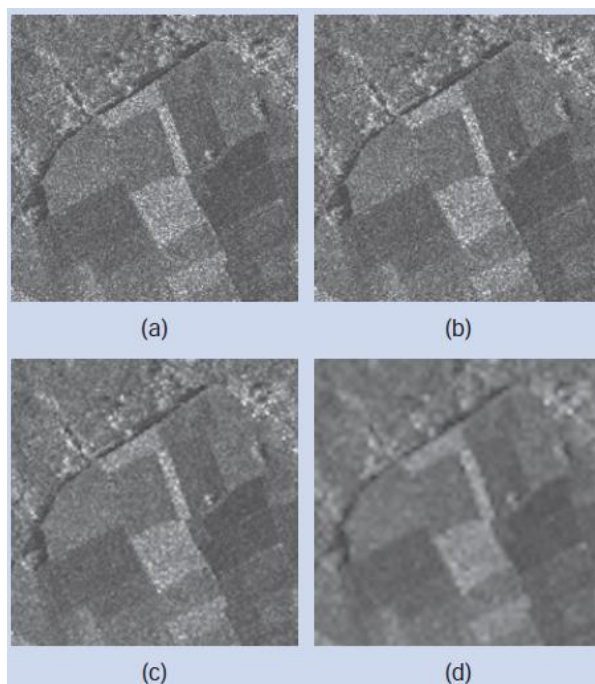


Figura 3.10. Técnica *Multi-look* para reducción de *Speckle*. En la imagen (a) tenemos la escena original. En (b) se aplica un *multi-look 2x2* (*range* y *azimuth*). En (c) un *multi-look 4x4*. Por último en (d) un *multi-look 8x8*. Como puede observarse, la resolución espacial disminuye a mayor nivel de *multi-look*.

En el caso de los filtros de procesamiento de imagen la metodología consiste en el movimiento de una pequeña ventana de unos pocos píxeles de dimensión (como por ejemplo, 3x3 ó 5x5) sobre cada píxel de la imagen, aplicando un cálculo matemático usando los valores de los píxeles dentro de esa ventana (como por ejemplo, calcular la media), reemplazando así el valor del píxel central con el resultado. La ventana se mueve tanto en filas como en columnas a lo largo de la imagen al paso de un píxel por cálculo, hasta que la totalidad de la imagen haya sido cubierta. Por ejemplo, mediante el cálculo de la media de una pequeña ventana sobre cada píxel, conseguimos un efecto de suavizado y así el efecto de *Speckle* sobre la imagen queda reducido. En la figura 3.11 tenemos, como ejemplo, el resultado de aplicar uno de estos filtros sobre las imágenes SAR [5].

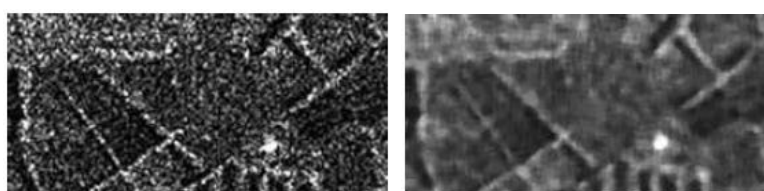


Figura 3.11. Técnica de filtros de imagen.

Existe una gran variedad de filtros de imagen aplicables sobre las imágenes SAR. En la figura 3.12 se representan de forma ilustrativa algunos filtros básicos y sencillos.

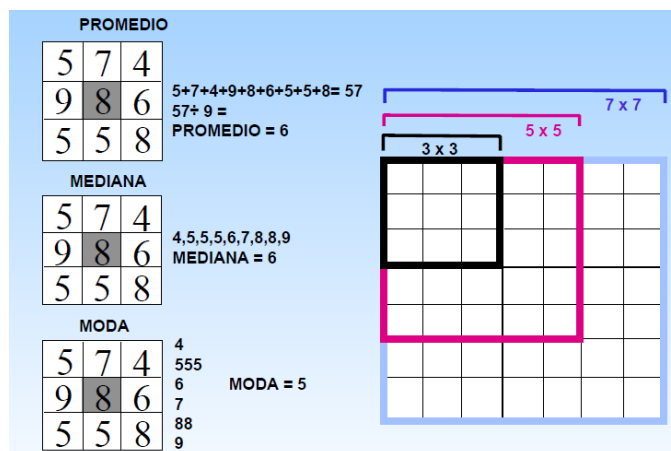


Figura 3.12. Varios ejemplos de filtros de imagen.

En este contexto, durante más de veinte años el filtrado de *Speckle* de imágenes SAR ha sido una de las áreas de investigación más activas dentro de este campo. Las primeras propuestas a la solución del problema en imágenes digitales estaban basadas en el análisis de Fourier. En estas técnicas, las imágenes eran transformadas al dominio 2-D discreto de Fourier, a las que luego se les aplicaba un filtro paso bajo para finalmente, aplicarles la transformada de Fourier inversa. Estas técnicas reducían el efecto *Speckle*, pero también degradaban las imágenes, pues tanto los bordes afilados, las áreas brillantes y los bordes de los objetos y estructuras contienen componentes en alta frecuencia. La resultante pérdida de resolución era indeseable para la interpretación de imágenes. Por este motivo, el filtro ideal debe suavizar "adaptativamente" el ruido, reteniendo los bordes y las estructuras afiladas así como la nitidez general de la imagen. Este tipo de filtros sólo se puede conseguir (principalmente) con técnicas en el dominio espacial y no en la frecuencia [19].

El filtro descrito anteriormente sobre la realización de promediados es el denominado filtro de *Boxcar* [19]. Este filtro tiene las siguientes ventajas: es sencillo de aplicar, efectivo para la reducción de *Speckle* en áreas homogéneas y además, preserva los valores medios. Sin embargo, la mayor deficiencia del filtro de *Boxcar* es la degradación de la resolución espacial debido a la indiscriminación a la hora de realizar los cálculos de las ventanas sobre áreas no homogéneas. Por lo tanto, este filtro no es adaptativo, y éste es su mayor defecto. Desde el punto de vista del procesamiento de imagen, el filtro de *Boxcar*

difuminará los bordes y distorsionará los puntos brillantes así como las estructuras lineales que aparezcan en la imagen, como por ejemplo, carreteras y edificios. Por ello, se han creado algoritmos de procesado de imagen mucho más sofisticados (adaptativos). Aquí explicaremos de forma muy somera los filtros que aplicaremos sobre las imágenes de interés en este proyecto, que en este caso serán los filtros *Refined Lee* para imágenes simples e imágenes polarimétricas.

En la bibliografía estudiada [19] se explica como el ruido de *Speckle* para una imagen SAR simple queda bien aproximado por una distribución estadística de *Rayleigh* y para el caso polarimétrico, por una distribución compleja de *Wishart (Complex Wishart Distribution)*. Los fundamentos de estas aproximaciones se basan en la observación de que el ruido de *Speckle* tiene carácter multiplicativo, en el sentido de que la relación de su desviación típica con respecto a su media es siempre constante. Una interpretación visual de este hecho es imaginar que el ruido de *Speckle* es alto para fuertes (brillantes) niveles de *backscattering*, y es proporcionalmente bajo en débiles (oscuros) niveles de *backscattering*. El mismo hecho quedó descrito en los párrafos anteriores cuando se explicó que a mayor potencia de señal, mayor ruido de *Speckle* en el *backscattering*. Los filtros escogidos para la etapa de pre-procesado toman ventaja de este hecho para filtrar el ruido siguiendo las siguientes premisas:

- ✓ En imágenes SAR simples: Reducir el ruido de *Speckle* sin sacrificar la información y la resolución de la imagen. En las ventanas de filtrado, los píxeles no homogéneos vecinos deben ser adaptativamente seleccionados o evaluados (pesados) de distinta forma en los cálculos para evitar la difuminación de bordes y la degradación de la calidad y nitidez de la imagen final.
- ✓ En imágenes SAR polarimétricas: Además de la resolución se debe preservar la firma polarimétrica. Se debe evitar también introducir efectos de *cross-talk* (perturbación de canales polarimétricos unos con otros) entre las distintas polarizaciones.

De entre los filtros espaciales propuestos, en 1980 Lee desarrolló el concepto de usar la media y varianza locales para filtrar el ruido de las imágenes [62]. Desde entonces, se han propuesto muchísimos filtros basados en este esquema, como por ejemplo el filtro de Durand [63], el filtro de Kuan [64], el filtro de Frost [65], el filtro de sigma [66] y muchas

Procesado de datos SAR del satélite Sentinel-1 para el estudio de zonas costeras.

otras técnicas. Con el avance y desarrollo de la tecnología SAR, los últimos sistemas de adquisición con sus modos de operación de alta resolución y con varias polarizaciones han ocasionado que las imágenes actuales puedan contar con millones de píxeles en sus dimensiones. Aún con los veloces equipos informáticos digitales, se necesitan algoritmos simples y eficientes para la reducción del efecto de *Speckle* en este tipo de imágenes. Recientemente Lee y otros [67] propusieron un filtro de sigma mejorado que es computacional y eficientemente efectivo para la reducción de *Speckle*. Uno de estos últimos filtros fue el *Refined Lee Filter*, que se basa en la aplicación del filtro local *Minimum Mean Square Error* (MMSE) [19]. El principal defecto de este último filtro es que el ruido de *Speckle* vecino a bordes intensos no es filtrado adecuadamente. El filtro *Refined Lee* [68] se diseñó para compensar este problema.

En el caso de imágenes SAR simples, para filtrar el ruido vecino a bordes en la imagen, el filtro *Refined Lee* detecta previamente la dirección de éstos, para posteriormente, con una ventana alineada a los mismos, realizar el filtrado *Minimum Mean Square*. La idea principal de esta técnica de filtrado consiste en seleccionar píxeles vecinos que tengan características de *scattering* similares al píxel central, para aplicar el filtrado. Un algoritmo simple y computacionalmente eficiente que preserve la nitidez de los bordes podría consistir en usar una ventana no cuadrada para hacerla coincidir con la dirección de los bordes. La primera versión de este filtro se desarrolló en la década de los 80 cuando los ordenadores eran lentos y las memorias eran muy caras. El filtro operaba con una ventana de 7x7 píxeles para una mayor eficiencia computacional y un mejor uso del espacio de memoria de trabajo. Actualmente, este filtro podría trabajar con ventanas de 9x9 o incluso mayores para una mejor reducción del efecto *Speckle*. En este proyecto emplearemos una ventana de 11x11.

En la figura 3.13 tenemos las ventanas posibles para realizar el filtrado. De las ocho, sólo una será escogida para filtrar el píxel central en función de la detección de bordes previa. Los píxeles blancos indican los valores que sí se usarán para el cálculo del filtrado. De esta forma, la ventana no cuadrada seleccionada contendrá píxeles de propiedades radiométricas similares a las del píxel central, proporcionando un mejor filtrado del ruido. Si la ventana fuese cuadrada, como en el anterior filtro de *Boxcar*, ésta podría contener píxeles de distintas propiedades radiométricas (como por ejemplo, zonas homogéneas mezcladas con bordes), lo que degradaría la nitidez de la imagen.

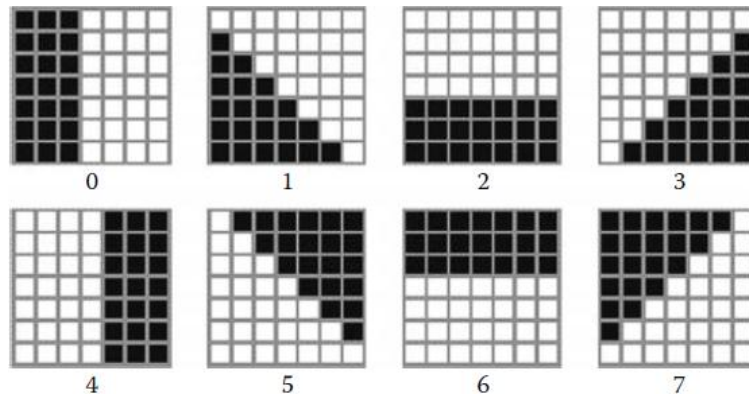


Figura 3.13. Posibles ventanas no cuadradas para el filtrado del píxel central. La selección de una u otra dependerá de la detección de bordes previa.

Para obtener la ventana óptima, primero debemos calcular la dirección de los bordes en esa zona de la imagen. Como ejemplo, tomaremos una ventana de 7x7 píxeles. Esta ventana tenemos que dividirla en nueve subventanas de 3x3. En cada una de estas subventanas calculamos la media tal como se indica en la figura 3.14. Como aclaración, en la figura sólo se muestran dos de las nueve posibles subventanas. El uso de subventanas de 3x3 para calcular la media, reduce el efecto del ruido en la precisión de la detección de dirección de bordes. Así mismo, el uso de estas pequeñas ventanas dentro de la ventana de 7x7 mejora la evaluación de los píxeles cercanos al píxel central. Cuando trabajamos con ventanas de 9x9 o mayores, se utilizan subventanas de 3x3 no solapadas. La dirección de bordes o líneas es detectada mediante una serie de máscaras de bordes usando los cálculos de la media de las subventanas. Las cuatro máscaras de bordes se encuentran en la parte superior de la figura 3.14. Como ejemplo, en la figura 3.14, el valor de la media de la subventana m_{22} es más cercano al valor de la subventana m_{31} que al de m_{13} , por este motivo se ha seleccionado la ventana 7x7 número 5 para el filtrado de *Speckle*.

$$\begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \\ -1 & -1 & 0 \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & -1 \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & -1 \\ 0 & -1 & -1 \end{bmatrix}$$

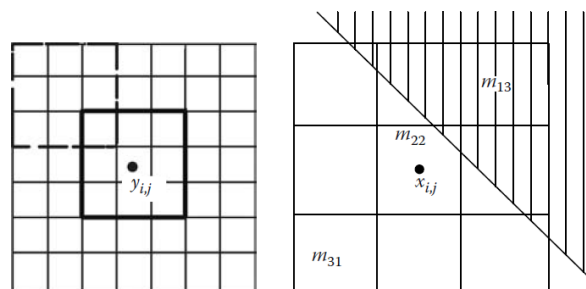


Figura 3.14. Cálculo de la media de las subventanas para la detección de la dirección de bordes. A la izquierda abajo, subventanas dentro de la ventana mayor. A la derecha, selección de la ventana con dirección de bordes adecuada. En la parte superior, máscaras de bordes.

La detección de la dirección de bordes se basa en el uso de las cuatro máscaras y los valores de las submedias. El proceso consiste en aplicar sucesivamente las cuatro máscaras a la ventana de 7x7 y comparar las submedias con el valor de la submedia central. La máscara decide que submedias se comparan. Por ejemplo, la primera máscara compara los valores de las submedias laterales con el valor de la submedia central. Si por ejemplo, las submedias a la izquierda están más cercanas de la submedia central que las submedias de la derecha, eso significará que existe un borde en la derecha de la imagen, por lo que de las dos posibles ventanas de bordes verticales (ventanas 0 y 4 en la figura 3.13), la ventana adecuada será la número 4. Así, a la máscara 1 le corresponden las ventanas 0 y 4, a la 2 las ventanas 1 y 5, a la 3 las ventanas 2 y 6, y por último, a la 4, las ventanas 3 y 7 [19].

En el caso de imágenes multipolarimétricas, numerosos filtros han sido creados y diseñados para corregir el ruido de *Speckle*. Todos ellos hacen uso de los datos contenidos en las diferentes polarizaciones (canales) de la misma imagen SAR. Los diferentes cálculos y algoritmos matemáticos se desarrollan sobre la matriz de covarianza polarimétrica. En el apartado 2.1.4. se introdujo la matriz de *backscattering* (*scattering matrix*), siendo ésta la matriz que contiene los datos de la imagen SAR para todas las polarizaciones en amplitud y fase. De la matriz de *backscattering* se puede obtener la matriz de covarianza polarimétrica como se muestra en las ecuaciones 3.18 y 3.19. Con esta última matriz, Novak y Burl desarrollaron el filtro *Polarimetric Whitening Filter* (PWF) [69], que combinando óptimamente los elementos diagonales, producían una única imagen SAR con efecto de *Speckle* reducido. Lee y otros propusieron un algoritmo para obtener imágenes de |HH|, |VV| y |HV|, usando un modelo de ruido multiplicativo y minimizando el error cuadrático medio [70].

$$S = \begin{bmatrix} S_{xx} & S_{xy} \\ S_{yx} & S_{yy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{HH} & S_{HV} \\ S_{VH} & S_{VV} \end{bmatrix} \quad (\text{Ec. 3.18})$$

$$C_3 = \begin{bmatrix} \langle |S_{XX}|^2 \rangle & \sqrt{2} \langle |S_{XX}S_{XY}^*|^2 \rangle & \langle |S_{XX}S_{YY}^*|^2 \rangle \\ \sqrt{2} \langle |S_{XY}S_{XX}^*|^2 \rangle & 2 \langle |S_{XY}|^2 \rangle & \sqrt{2} \langle |S_{XY}S_{YY}^*|^2 \rangle \\ \langle |S_{YY}S_{XX}^*|^2 \rangle & \sqrt{2} \langle |S_{YY}S_{XY}^*|^2 \rangle & \langle |S_{YY}|^2 \rangle \end{bmatrix} \quad (\text{Ec. 3.19})$$

En estos algoritmos, los términos fuera de la diagonal no son filtrados, aunque se utilizan las correlaciones estadísticas entre las polarizaciones HH, HV y VV. Teóricamente, después de aplicar estos filtros, las imágenes HH, HV y VV están totalmente correladas. En principio, las correlaciones estadísticas entre canales son datos polarimétricos importantes que deben conservarse. Estos filtros pueden introducir interferencias *cross-talk*, por lo que las propiedades polarimétricas de cada canal pueden verse afectadas. Para evitar todo ello, Lee desarrolló un algoritmo que filtraba la matriz de covarianza de forma similar al proceso de multiobservaciones (como el filtro de *Boxcar*) mediante el promedio ponderado de las matrices de covarianza de los píxeles vecinos, pero sin los defectos del filtro de *Boxcar* en la degradación de la resolución espacial [71].

De esta forma, para imágenes polarimétricas usaremos el filtro *Refined Lee* polarimétrico [71]. Este filtro consiste en un algoritmo que al igual que el filtro *Refined Lee* simple, utiliza ventanas no cuadradas alineadas a los bordes o líneas que aparecen en la imagen, para aplicar el filtro MMSE. La ventana de bordes se determina usando la imagen de *Span*. Esta imagen es un promedio de las intensidades HH, VH+HV, y VV, que consecuentemente, tiene un nivel de ruido de *Speckle* menor que HH, HV y VV individualmente. El cálculo de *Span* (o energía total) queda expresado en la ecuación 3.20. Se usa el *Span* en lugar de una de las polarizaciones ya que HH, HV y VV podrían tener datos de *backscattering* muy diferentes. Las diferentes respuestas de objetos para cada canal de polarización aparecerán sobre la imagen de *Span* y de esta forma, la detección de bordes será correcta. Una vez la ventana de bordes ha sido seleccionada, los píxeles dentro de ésta son usados para el cálculo de la media de cada elemento de la matriz de covarianza polarimétrica independientemente. De esta forma, se conservan los datos polarimétricos sobre áreas homogéneas y se evitan los efectos de *cross-talk* sobre los distintos canales.

$$Span = |S_{HH}|^2 + 2|S_{HV}|^2 + |S_{VV}|^2 \quad (\text{Ec. 3.20})$$

En el presente proyecto, para el filtrado de imágenes multipolarimétricas se ha optado por el filtro *Refined Lee* polarimétrico, dada su eficacia a la hora de filtrar el ruido de *Speckle* y de preservar la información y nitidez de las imágenes. En las figuras 3.15 a 3.18 se han realizado diferentes filtrados sobre una misma imagen de polarimetría dual para comprobar la reducción del ruido atendiendo a las diferentes técnicas. La imagen SAR

Procesado de datos SAR del satélite Sentinel-1 para el estudio de zonas costeras.

ha sido obtenida de un producto SLC Stripmap del Sentinel-1A con polarización dual HH+HV captada sobre el área costera de Houston, USA, el 24 de Febrero de 2015.

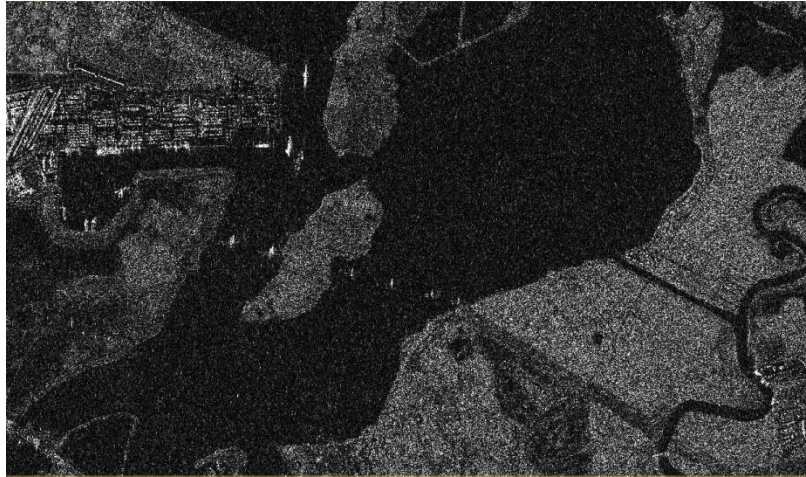


Figura 3.15. Imagen SAR original calibrada, canal HV.



Figura 3.16. Imagen SAR calibrada y filtrada con Refined Lee simple, canal HV.



Figura 3.17. Imagen SAR calibrada y filtrada con Refined Lee polarimétrico, canal HV. Ventana de 7x7.

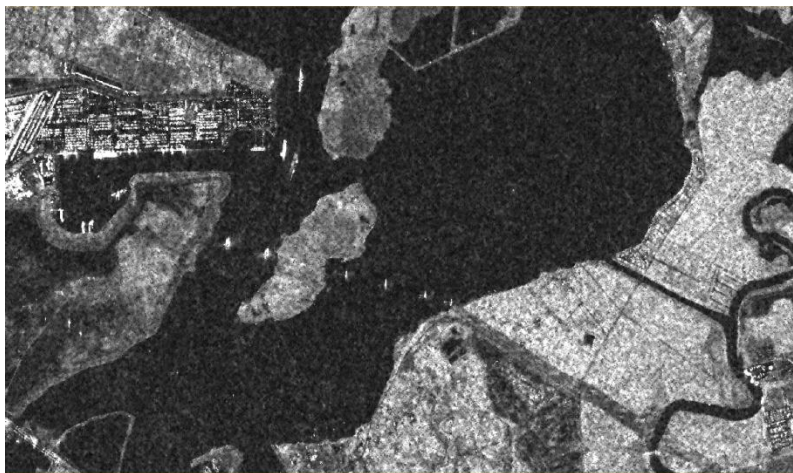


Figura 3.18. Imagen SAR calibrada y filtrada con Refined Lee polarimétrico, canal HV. Ventana de 11x11.

Como se puede observar en las imágenes, la mejora de la nitidez es notoria entre el filtrado *Refined Lee* simple y el polarimétrico. Esta mejora es aún mayor para el último caso, con la ventana de 11x11, donde las estructuras y bordes de la imagen se mantienen, mientras que el ruido es prácticamente eliminado.

3.1.3.3. Otras fuentes de ruido

En este apartado, a modo de resumen, se ha pretendido nombrar y describir dos fuentes de ruido adicionales a las que se han explicado y que en ningún caso son corregibles.

En el primer caso, hablamos del ruido ocasionado por las reflexiones de gran intensidad de la señal SAR en estructuras metálicas de formas angulares. Es el caso de cualquier triedro metálico. Esta reflexión de energía suele aparecer en algunos barcos, algunos edificios o en grandes antenas. En la imagen, el *backscattering* de la zona donde se encuentra este objeto es saturado de energía de forma que son indistinguibles los objetos a su alrededor debido a la dispersión de la misma en varias direcciones. Como ejemplo, este efecto puede observarse en el puerto marítimo de Las Palmas de Gran Canaria, o en el Centro Espacial de Canarias (Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial, INTA) en Maspalomas, Gran Canaria, en las figuras 3.19, 3.20 y 3.21. Hay que aclarar que la respuesta en el *backscattering* no es la misma para todas las polarizaciones. Este fenómeno se observa siempre sobre polarizaciones *like-polarized* (VV o HH) y es parte de la “firma polarimétrica” de los objetos o estructuras en cuestión. En el capítulo 4, la

Procesado de datos SAR del satélite Sentinel-1 para el estudio de zonas costeras.

respuesta de distintos materiales, superficies y estructuras a la señal SAR en distintas polarizaciones, se tratará con mayor profundidad para el entendimiento y comprensión de las bases de los procesados en la obtención de productos de clasificación.



Figura 3.19. Las imágenes superiores corresponden a un producto SLC IW del Sentinel-1A del sur de Gran Canaria (fecha de la imágenes, 05/09/2015). El producto ha sido calibrado, se le ha aplicado el filtrado de *Speckle* y ha sido ortorectificado. Arriba a la izquierda, canal VV. A la derecha, canal VH. Se observa el reflejo de las antenas del Centro Espacial de Canarias en el canal VV, mientras que en el canal VH, el nivel de *backscattering* es similar al de la zona que lo rodea. Abajo, imagen óptica de GRAFCAN disponible en Google Earth® (fecha de la imagen 03/04/2015).

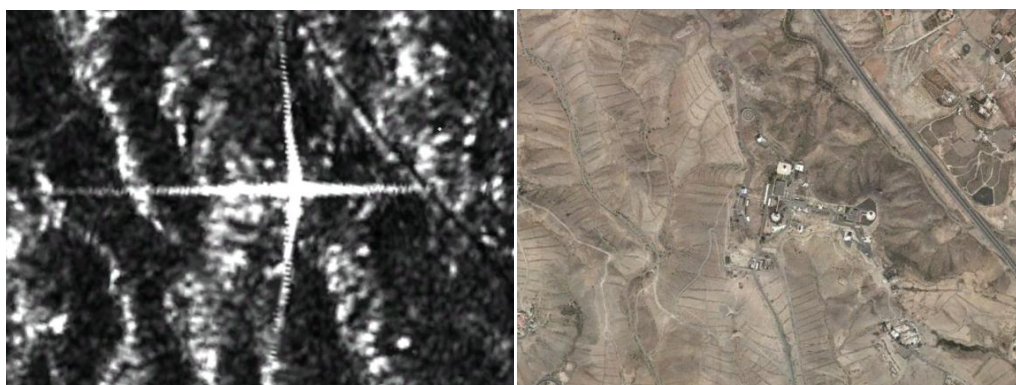


Figura 3.20. A la izquierda, detalle ampliado de la zona del Centro Espacial de Canarias, INTA, en la imagen SAR para el canal VV. A la derecha, detalle ampliado de la misma zona en la imagen óptica de GRAFCAN disponible en Google Earth®.

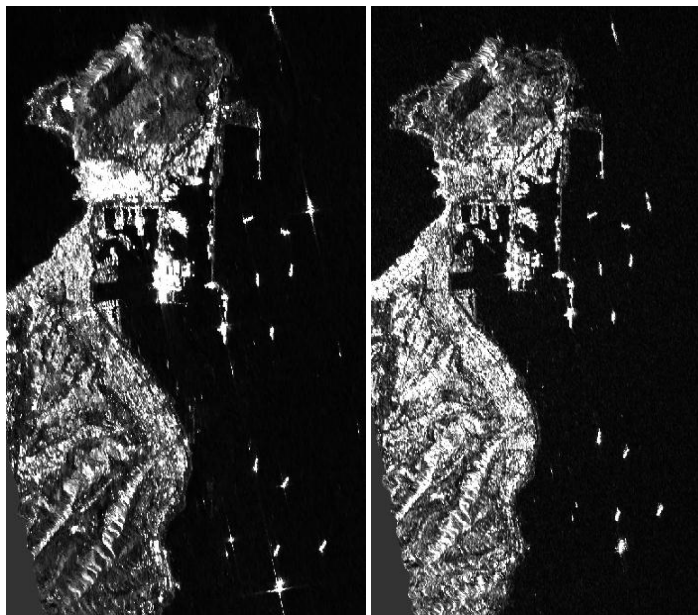


Figura 3.21. Las imágenes corresponden a un producto SLC IW del sensor Sentinel-1A sobre el puerto marítimo de Las Palmas de Gran Canaria (fecha de las imágenes, 05/09/2015). El producto ha sido calibrado, se le ha aplicado el filtrado de *Speckle* y ha sido ortorectificado. A la izquierda, canal VV, y a la derecha, canal VH. En las imágenes se aprecia como algunos barcos producen un gran *backscattering* en el canal VV mientras que no ocurre lo mismo para el canal VH.

Otro de los artefactos que podrían aparecer en las imágenes SAR serían las interferencias de radio (*Radio Frequency Interference*, RFI) producidas por señales cuyas posibles frecuencias se encuentran en la banda del sensor SAR. Estas interferencias se solapan a la señal de *backscattering* produciendo alteraciones en la imagen. Las alteraciones suelen tener formas de líneas anchas brillantes y borrosas a lo largo de las imágenes. Aunque su incidencia sobre la captura de datos no afecta a la totalidad de la imagen, y su frecuencia de aparición es de un 1%, resulta interesante observar algunas de estas imágenes [58]. En la figura 3.22 podemos observar interferencias de radio al sur de la ciudad de Copenhague, en Dinamarca. Se trata de una imagen obtenida de un producto EW GRDM del Sentinel-1A, el día 21 de Enero de 2016.



Figura 3.22. Radio interferencias (RFIs) al sur de la ciudad de Copenhague. Producto EW GRDM Sentinel-1A (fecha de la imagen, 21/01/2016).

3.2. Correcciones geométricas

Una vez se han explicado las distorsiones radiométricas y los pre-procesados para corregirlas, es necesario entender y conocer también los pre-procesados a realizar para solventar las distorsiones geométricas. Como se explicó en el apartado 2.1.2., el sistema de geometría SAR está sujeto a varias distorsiones espaciales. Las variaciones topográficas en la superficie de la tierra y la inclinación del satélite afectan drásticamente a la apariencia de la imagen. Como se detalló, las distorsiones *layover*, *foreshortening* y *shadows*, son incorregibles. No obstante, el principal interés en la corrección geométrica de imágenes SAR se encuentra en la proyección de las imágenes desde la propia geometría SAR, en el plano *slant range*, al plano topográfico real, el *ground range*. Esta transformación de imágenes es necesaria en nuestros productos finales, pues representan la superficie y el aspecto real del terreno.

Para ello, los productos Sentinel-1 disponen de información de georeferencia. Las filas y columnas de la imagen contienen los denominados *Ground Control Points* (GCPs), que pueden ser convertidos a sus correspondientes coordenadas de longitud y latitud sobre el terreno real. El proceso consiste en determinar las ecuaciones de transformación adecuadas que se aplican a las filas y a las columnas de la imagen para "mapearlas" en el plano de coordenadas geográficas. Esto se consigue identificando los GCPs en la imagen y utilizando la información de georeferencia. Cabe aclarar que La información de georeferencia incluye por lo general un modelo digital de elevación del terreno (DEM), que hace posible convertir adecuadamente las imágenes desde el plano *slant range* a *ground range*. Por ejemplo, en la figura 3.23 los GCPs A1, A2, A3 y A4 son "mapeados" a sus coordenadas geográficas reales, B1, B2, B3 y B4, dando lugar a una transformación espacial de la imagen.

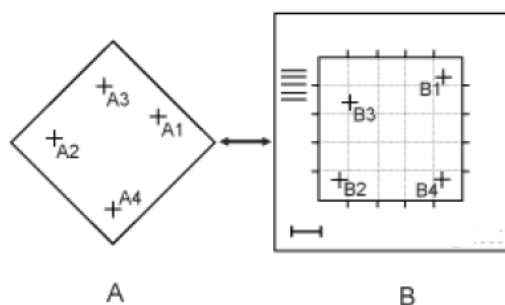


Figura 3.23. Transformación espacial de GCPs en coordenadas geográficas.

Estas transformaciones espaciales implican remuestrear la imagen original para determinar los valores de los píxeles de las nuevas coordenadas. Existen muchísimas técnicas de remuestreo espacial, aunque como ejemplos, aquí veremos las tres técnicas más básicas y conocidas: técnica del vecino más próximo (*nearest neighbour*), interpolación bilineal (*bilinear interpolation*) y convolución cúbica (*cubic convolution*).

La técnica del vecino más próximo utiliza los valores digitales de los píxeles de la imagen original más cercanos a la localización del nuevo píxel en la imagen ortorectificada. Este es un método simple y que no altera los valores originales, pero sin embargo, los valores de algunos píxeles podrían ser duplicados mientras que otros se podrían perder. También, la imagen resultante de este método tiende a tener un aspecto de bloques de píxeles homogéneos discontinuos. Por otro lado, la interpolación bilineal toma el promedio ponderado de los cuatro píxeles de la imagen original más cercanos a la localización del nuevo píxel. El proceso de promediado altera los valores originales de los píxeles y crea nuevos valores digitales en la imagen de salida. Este método no es recomendable si se van a realizar posteriores procesados de análisis de datos, como por ejemplo procesados de clasificación, dado que la información original se pierde. Si éste es el caso, este procesado de remuestreo se realiza siempre posteriormente a las tareas de análisis o de clasificación. El método de la convolución cúbica va más allá y utiliza los dieciséis píxeles de la imagen original que rodean al píxel de la nueva localización para el cálculo del promedio ponderado. Como el método de la interpolación bilineal, este método produce nuevos valores en los píxeles de salida. Sin embargo, estos dos métodos producen imágenes que poseen una apariencia nítida evitando la apariencia de bloques del método del vecino más próximo. En la figura 3.24 podemos observar una descripción gráfica de las tres técnicas [5].

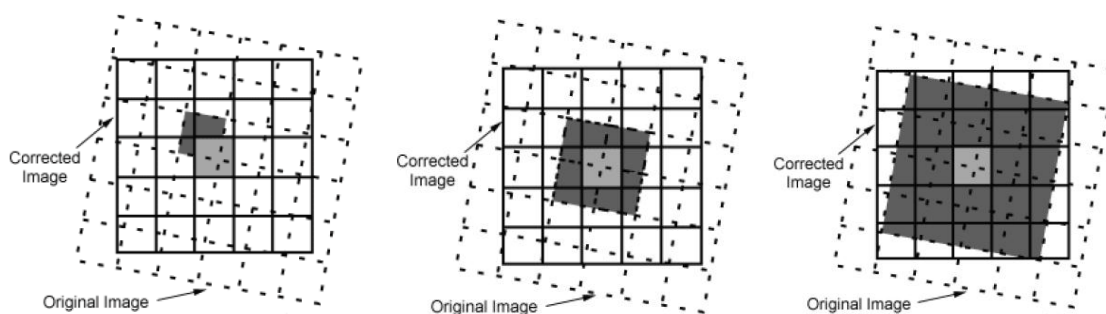


Figura 3.24. Técnicas de remuestreo espacial. A la izquierda vecino más próximo. En el centro, interpolación bilineal. A la derecha, convolución cúbica.

3.2.1. Técnicas *Split* y *Deburst*

Como se indicó en el apartado 2.2.2.1., los productos IW y EW del Sentinel-1 necesitan de pre-procesados específicos para su posterior manipulación. Si recordamos sus características, éstos estaban formados por varios *swaths* que a su vez estaban formados por varias ráfagas (*bursts*) de la señal SAR. El aspecto de un producto SLC IW sobre las Islas Canarias puede observarse en la figura 3.25. Arriba tenemos el primer *swath*, que corresponde a una pequeña parte de Gran Canaria y la mayor parte de la isla de Tenerife así como el espacio oceánico entre ambas islas. El segundo *swath* está tomado sobre la isla de Gran Canaria. En el último y tercer *swath* aparece la punta de Morro Jable en la isla de Fuerteventura. Cabe destacar la inversión del sentido de la imagen debido a la naturaleza de adquisición de las imágenes SAR. Este producto fue adquirido el día 8 de Febrero de 2016, en un pase del satélite con sentido ascendente y el sensor apuntando a su izquierda. El pase completo puede apreciarse en la figura 3.26.

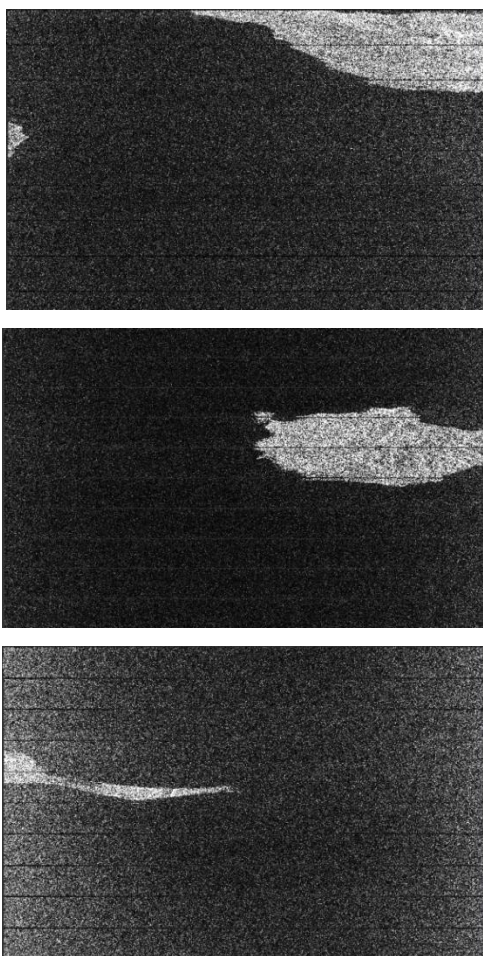


Figura 3.25. Imágenes (*swaths*) dentro del producto Sentinel-1 IW SLC sobre las Islas Canarias (fecha, 08/02/2016).



Figura 3.26. Pase completo del Sentinel-1A para el producto IW SLC sobre las Islas Canarias del día 08/02/2016.

La figura 3.26 se puede obtener de los datos del producto Sentinel-1 usando la herramienta SNAP. Además de esto, en la figura 3.27 tenemos el denominado "*quicklook*", una vista previa del pase completo que también se encuentra dentro del producto y que podemos visualizar dentro de la herramienta SNAP.

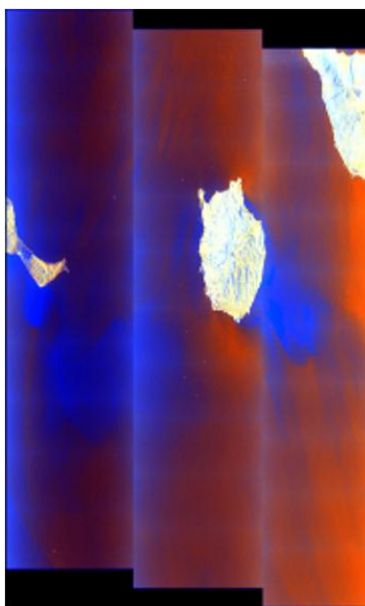


Figura 3.27. Vista previa (*quicklook*) del pase completo del Sentinel-1A para el producto IW SLC sobre las Islas Canarias del día 08/02/2016.

Una vez hemos visualizado el producto completo, nuestro interés se centrará en recortar aquella zona terrestre objetivo de nuestro estudio o aplicación. Para ello, se deberán aplicar las técnicas de *Split* y posteriormente *Deburst*. La técnica de *Split* consiste en seleccionar el *swath* que queremos, indicando el número de ráfagas (*bursts*) a incluir, dado que cada *swath* contiene unas 10 ráfagas. Además de esto se deben indicar las bandas de polarización que queremos incluir. En nuestro caso, estaríamos interesados en

Procesado de datos SAR del satélite Sentinel-1 para el estudio de zonas costeras.

el *swath* que contiene la isla de Gran Canaria, de forma que el aspecto de la imagen después de aplicar la técnica de *Split* sería el que se muestra en la figura 3.28.

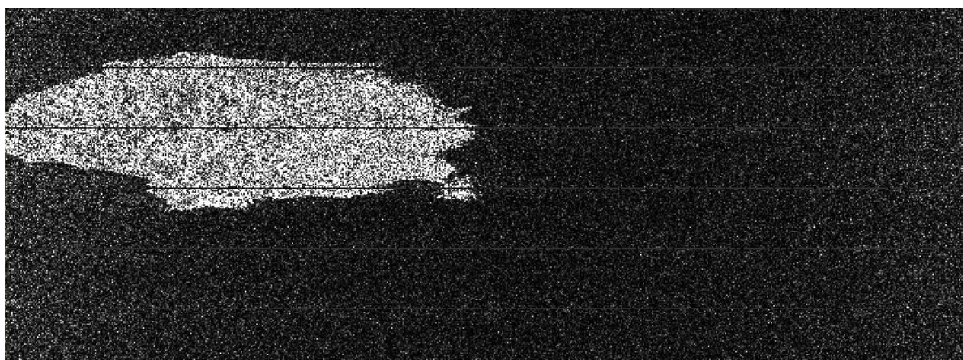


Figura 3.28. Imagen pre-procesada con la funcionalidad *Split* de la isla de Gran Canaria. Aún se aprecian aquí las franjas negras que delimitan las distintas ráfagas del *swath*.

Una vez hemos obtenido nuestro subproducto con uno de los *swaths*, el siguiente paso será aplicar la técnica de *Deburst*. La técnica consiste en eliminar las franjas negras que delimitan las diferentes ráfagas del sensor SAR. Cabe recordar que las ráfagas están solapadas justo lo suficiente para que en el proceso de *Deburst* se produzca como resultado una imagen continua y sin solapes. En la figura 3.29 se puede observar la imagen 3.28 después de aplicarle la técnica de *Deburst*.

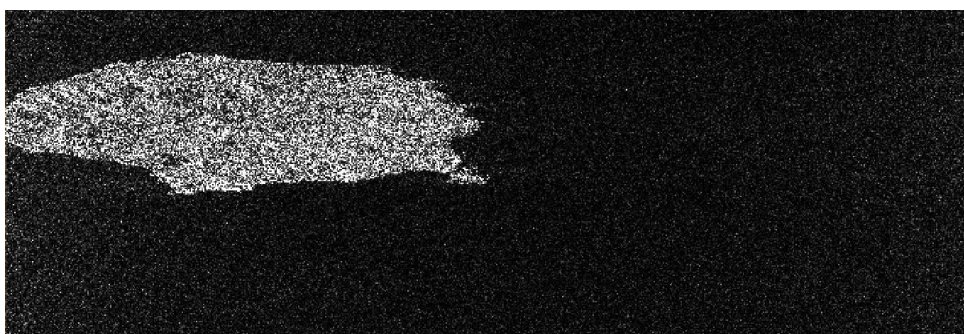


Figura 3.29. Subproducto de salida con la isla de Gran Canaria sin las franjas negras de la delimitación de ráfagas (*bursts*).

Como puede verse en la figura 3.29, el resultado final es la imagen de la isla de Gran Canaria sin las líneas negras que delimitaban las distintas ráfagas. Para ahorrar memoria de trabajo en el ordenador, y para mayor comodidad a la hora de trabajar, el software nos permite también "recortar" el área de interés a través de la herramienta

"Subset". De esta forma, en la figura 3.30 tenemos el área aproximada que engloba la isla de Gran Canaria ya recortada.

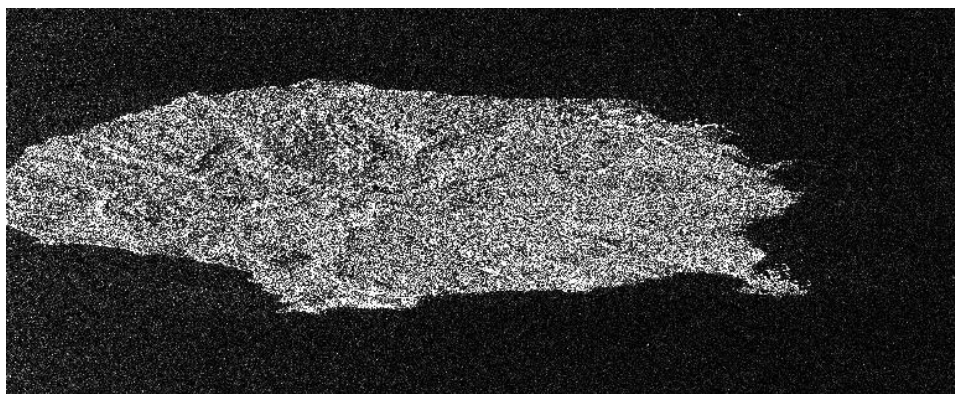


Figura 3.30. Imagen final recortada.

Los pasos siguientes a estos pre-procesados consistirán en realizar la calibración del producto así como la ejecución de los filtrados para la reducción del ruido de *Speckle* tal como se detalló en los apartados 3.1.2. y 3.1.3.2. Una vez realizados estos pasos, es en este punto donde tendremos nuestras imágenes preparadas para la ejecución de los distintos procesados o aplicaciones de interés.

3.2.2. Conversión de geometría *Slant Range* a *Ground Range*

Una vez hemos realizado los distintos procesados para las aplicaciones de interés debemos hacer un cambio de geometría en la representación de los datos para una correcta visualización de las imágenes. Como se explicó al comienzo del apartado 3.2, esta operación es siempre la última a realizar dado que existe una pérdida de información en el proceso de conversión, y además forma parte de lo que sería realmente la etapa de post-procesado. El objetivo de esta conversión será siempre conseguir una correcta representación de las imágenes de los productos de interés ya tratados y procesados.

La técnica para llevar a cabo esta conversión se llama *Terrain Correction*. Esta técnica tratará de compensar las distorsiones geométricas presentes en la imagen debido a la geometría de adquisición SAR, para la obtención de una representación de la imagen lo más cercana posible al mundo real. Como puede verse en la figura 3.31, las distorsiones de las imágenes SAR hacen que el punto B con elevación h sobre la elipsoide sea mapeado erróneamente a la posición B' en la imagen SAR, ya que su posición real es B''. Para realizar

la corrección se ejecuta un algoritmo de ortorectificación que hace uso de la técnicas de remuestreo teniendo en cuenta la información de georeferencia usando un modelo elipsoidal de la Tierra, y contando además, con un modelo digital de elevación DEM [59].

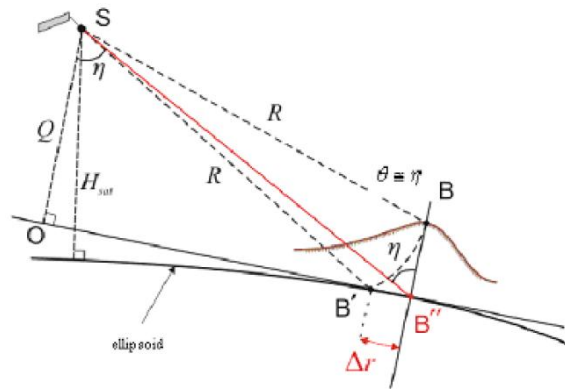


Figura 3.31. Distorsiones geométricas de imágenes SAR en el sistema de adquisición.

Concretamente, el operador de *Terrain Correction* implementa el método de *Range Doppler Orthorectification* [72] para geocodificar las imágenes SAR desde la geometría *Slant Range* a *Ground Range*. Usa la información disponible en los metadatos del producto sobre el vector de estado de órbita, las anotaciones de tiempos radar, los parámetros de conversión de geometría *slant* a *ground range*, junto a datos de un DEM para obtener la información exacta de geolocalización. De entre los DEMs soportados se encuentran todos aquellos que utilizan coordenadas geográficas ($P_{latitud}$, $P_{longitud}$, P_{altura}) referidos a la elipsoide global geodésica WGS84 (*World Geodetic System 1984*) [73]. Esta elipsoide consiste en un sistema de coordenadas geográficas mundial que permite localizar cualquier punto de la Tierra, siendo el sistema GPS una de las aplicaciones más conocidas basadas en esta elipsoide. De esta forma, en la conversión se hará uso del modelo digital de elevación STRM3sec proporcionado de forma gratuita por la Misión de Topografía *Shuttle Radar (Shuttle Radar Topography Mission)* de la NASA [74]. Todos estos datos son descargados automáticamente por la plataforma SNAP [59]. En cuanto al tamaño del píxel para el procesamiento de remuestreo, los metadatos contenidos en el producto nos indican, por defecto, el tamaño de píxel óptimo para la conversión. Sin embargo, el usuario puede modificar este parámetro a conveniencia, introduciendo el tamaño del píxel en unidades métricas o en grados. Si el parámetro es modificado en la unidad métrica, la otra es calculada automáticamente y viceversa siguiendo los siguientes cálculos:

$$\text{Tamaño píxel (}^\circ\text{)} = \text{Tamaño píxel (m)} / \text{Radio Ecuatorial de la Tierra} * (180/\pi) \quad (\text{Ec. 3.21})$$

$$\text{Tamaño píxel (m)} = \text{Tamaño píxel (}^\circ\text{)} / \text{Radio Polar de la Tierra} * (\pi/180) \quad (\text{Ec. 3.22})$$

donde el Radio Ecuatorial de la Tierra es de 6.378.137 metros y el Radio Polar de la Tierra es de 6.356.752,31 metros [59].

Partiendo de la imagen de la isla de Gran Canaria en la figura 3.31 que obtuvimos al final del apartado 3.2.1., se muestra un ejemplo de la imagen ortorectificada y en el plano de coordenadas, en la figura 3.32.

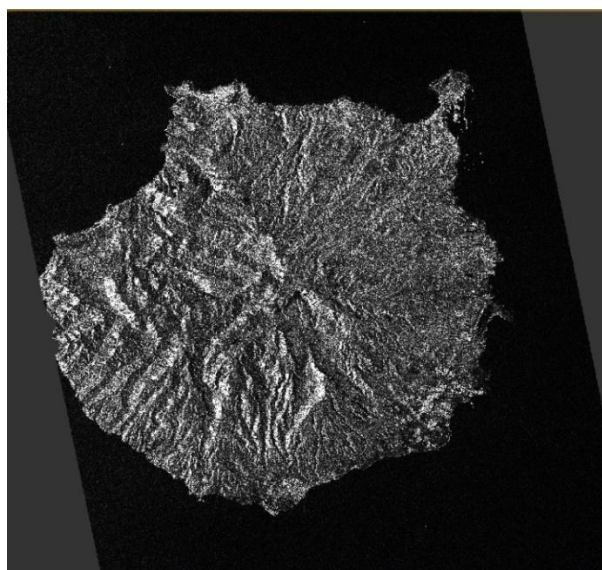


Figura 3.32. Imagen final ortorectificada.

3.2.2.1. Exportación de ficheros .kml para su visualización sobre la plataforma Google Earth®

La plataforma Google Earth®, propiedad de la compañía Google®, es un programa informático gratuito que muestra imágenes en tres dimensiones de alta resolución de la Tierra. Puede ser utilizado como atlas, enciclopedia o como simulador de vuelo mundial. El mapa de Google Earth® está compuesto por una superposición de imágenes obtenidas por satélites, fotografías aéreas, información geográfica proveniente de modelos de datos SIG de todo el mundo y modelos digitales creados por ordenador. Las versiones más recientes incorporan información local detallada de lugares de interés, fotografías, visitas virtuales que incluyen hasta la Luna y al planeta Marte [75].

Procesado de datos SAR del satélite Sentinel-1 para el estudio de zonas costeras.

En nuestro interés, Google Earth® soporta datos geospaciales tridimensionales mediante los archivos *Keyhole Markup Language* o ".kml". Un archivo .kml es una gramática XML y un formato de archivo para la creación de modelos y el almacenamiento de funciones geográficas como puntos, líneas, imágenes, polígonos y modelos que se mostrarán en Google Earth®, Google Maps® y otras aplicaciones. Se pueden utilizar archivos KML para compartir lugares e información con otros usuarios de estas aplicaciones. Google Earth® procesa los archivos KML de una manera similar a como los navegadores web procesan los archivos HTML y XML. Al igual que los archivos HTML, los KML cuentan con una estructura basada en etiquetas con nombres y atributos utilizados para poder visualizarlos. Por lo tanto, Google Earth® actúa como un navegador de archivos KML [76]. La herramienta SNAP 3.0 nos permite exportar las imágenes que tenemos georeferenciadas a Google Earth® en formato KMZ. Un fichero .kmz es la versión comprimida de los archivos .kml, por lo que Google Earth® descomprime el archivo y lo superpone a su mapa global. De esta forma podemos disponer de una herramienta de visualización en tres dimensiones de nuestras imágenes y que, además, nos permite visualizar en un sólo clic la banda óptica de Google Earth® o nuestra banda radar ya procesada. En las figuras 3.33 a 3.35 podemos visualizar los resultados para la imagen de la isla de Gran Canaria ortorectificada en el apartado 3.2.2.



Figura 3.33. Imagen óptica de Google Earth® de las Islas Canarias, con la banda SAR sobre la isla de Gran Canaria.



Figura 3.34. Vista ampliada en la banda óptica del sur de la isla de Gran Canaria en tres dimensiones.

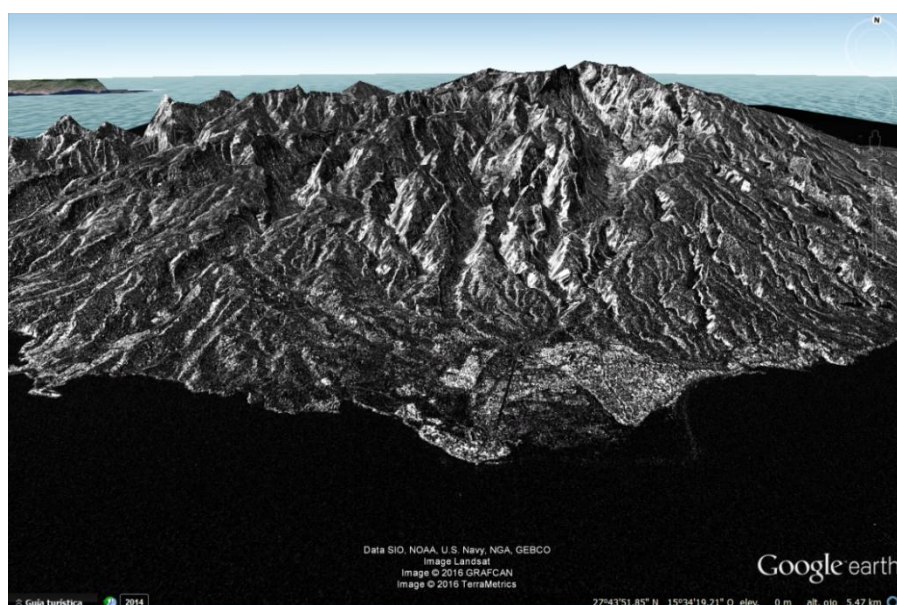


Figura 3.35. Vista ampliada en la banda SAR del sur de la isla de Gran Canaria en tres dimensiones.

La exportación a Google Earth[®] nos da como resultado un fichero .kmz. Con este archivo, en Google Earth[®] podremos quitar o poner la banda, añadir la leyenda con los valores radiométricos e inclinar la imagen para visualizarla en tres dimensiones. Por ejemplo, comparando la figura 3.34 con la 3.35 podemos observar los efectos de distorsión geométrica de *layover*, *foreshortening* y *shadows* en la imagen SAR, ya que esta zona del sur de la isla de Gran Canaria está compuesta por numerosos barrancos, montañas y laderas.

Capítulo 4

Procesado para la generación de aplicaciones SAR

4.1. Introducción a las técnicas de procesado

En los capítulos anteriores se han abordado los fundamentos de la tecnología SAR, sus bases de funcionamiento y sus distintas propiedades para aplicaciones de teledetección. Así mismo, se han estudiado las características de nuestro satélite SAR Sentinel-1, así como de sus productos. Por último, hemos realizado un estudio de los pre-procesados necesarios que estos datos necesitan para su posterior procesado y generación de aplicaciones de interés. En este punto, con el objetivo de entender y visualizar el potencial de los datos SAR y debido a la alta y gratuita disponibilidad de productos Sentinel-1, al inicio del proyecto fueron fijadas una serie de aplicaciones de interés a estudiar. Por un lado, una de las aplicaciones consiste en el estudio de técnicas de clasificación del terreno para la obtención de cartografías terrestres. Otra de las aplicaciones quedó fijada en el estudio de la capacidad de los datos SAR para la detección de vertidos de petróleo en el mar. Se incluyó también el estudio de la detección de nieve en las cumbres de las islas de Tenerife y Gran Canaria durante la nevada de Febrero de 2016. Por último, se propuso el estudio de la detección de zonas inundadas durante la

lluvia ocurrida en el municipio de Telde (Gran Canaria) durante la tormenta del 23 de Octubre de 2015.

En este capítulo se estudian los fundamentos teóricos para poder abordar y comprender estas aplicaciones con datos SAR. De esta forma, en los próximos apartados se detallarán los conceptos teóricos y las técnicas empleadas para la consecución de los objetivos específicos de cada aplicación.

4.2. Clasificación del terreno para obtención de cartografías terrestres

Para alcanzar los objetivos de la aplicación de clasificación del terreno se necesita conocer y manejar los conceptos y algoritmos que nos proporcionan cartografías de la superficie terrestre, teniendo como punto de partida las imágenes SAR. Para llevar a cabo estos objetivos se ha optado por la utilización de los datos polarimétricos SAR. El uso de la polarimetría es la técnica habitual en esta tecnología para fines de clasificación. En este apartado estudiaremos los fundamentos de esta técnica así como sus propiedades y limitaciones. Se abordará brevemente, y de forma somera, el estudio matemático asociado a la naturaleza de los datos SAR y de los procesados de clasificación. Finalmente, de entre las herramientas disponibles en el software PolSARpro 5.0, se explican aquí los fundamentos del algoritmo de clasificación no supervisado "*H/A/Alpha Classification*" y del algoritmo de clasificación supervisado "*Supervised Wishart Classification*". En el capítulo 5 serán presentados los resultados de dichos métodos.

4.2.1. Clasificación polarimétrica

Como se explicó anteriormente en el apartado 2.1.4., las técnicas de clasificación polarimétricas se basan en el aprovechamiento de la información disponible en las distintas bandas polarimétricas captadas por el sensor SAR. Estas bandas tienen su origen en el estado de polarización de la onda radar. Dependiendo de la forma en la que se envía o se recibe la señal tendremos las distintas combinaciones posibles. Si recordamos la matriz de *backscattering* en la figura 4.1 (o en castellano, matriz de retrodispersión), tenemos que ésta recoge la información de las cuatro polarizaciones posibles en cada

Procesado de datos SAR del satélite Sentinel-1 para el estudio de zonas costeras.

píxel. Cabe notar aquí que por cada polarización contamos con la información de amplitud y de fase. Esto supone 4 polarizaciones x 2 parámetros = 8 parámetros, para el caso de polarización *Quad Polarized*. Esta información es analizada y sometida a varios algoritmos que, por distintas vías, tratan de discernir diferentes materiales en la superficie terrestre, atendiendo a los valores recogidos en dichos parámetros.

$$\underbrace{\begin{bmatrix} S_{HH} & S_{HV} \\ S_{VH} & S_{VV} \end{bmatrix}}_{\text{2x2 Scattering matrix}}$$

Figura 4.1. Matriz de retrodispersión.

De este modo y bajo esta filosofía, desde los años 80 y hasta nuestros días, han sido publicados numerosos algoritmos y técnicas de procesado que se nutren de esta información para la generación de imágenes SAR clasificadas. Teniendo en cuenta la naturaleza de los datos (matrices de números complejos) estos algoritmos utilizan la descripción matemática de la correlación de la polarización de la onda enviada con la recibida, así como de la potencia y la fase de las mismas. Como resultado se obtienen datos de la superficie o material que generan la respuesta de datos SAR. Las propiedades de la superficie terrestre se suelen dividir en propiedades geométricas, debido a la forma y orientación, y por otro lado, en propiedades intrínsecas, debido a los materiales que componen la superficie u objeto en cuestión. En cuanto a la forma se suele diferenciar si la superficie es volumétrica (como un bosque), si es una superficie plana (como una carretera o agua en calma), o si es un dihedro reflector (como los edificios, puentes y ciudades). En cuanto a los materiales, la respuesta está afectada sobre todo por la cantidad de humedad presente en la superficie así como por la constante dieléctrica del mismo. La constante dieléctrica de los materiales es una medida de sus propiedades eléctricas. Consta de dos partes, permisividad y conductividad, ambas altamente dependientes del contenido de humedad del material considerado. En la banda de las microondas, la mayoría de los materiales naturales tienen una constante dieléctrica de entre 3 y 8 en condiciones secas. El agua tiene una constante dieléctrica de aproximadamente 80, es decir, al menos diez veces superior que las superficies secas. Como resultado, un cambio en el contenido de humedad provoca generalmente un cambio significativo en las propiedades dieléctricas de los materiales naturales y por lo tanto, en la respuesta hacia la onda radar [77].

Como anotación, cabe indicar aquí que la respuesta radar a superficies "planas" es estrechamente dependiente al grado de rugosidad que presente dicha superficie, del ángulo de incidencia y de la relación con la longitud de onda empleada, que en nuestro caso en banda C, está en torno a los 5 cm. Así, en la figura 4.2 tenemos distintos tipos de reflexiones dependiendo de la rugosidad de la superficie. Este concepto será rescatado en el apartado 4.3. para la aplicación de detección de vertidos de petróleo en el mar, puesto que supone uno de los conceptos clave para la detección de las manchas.

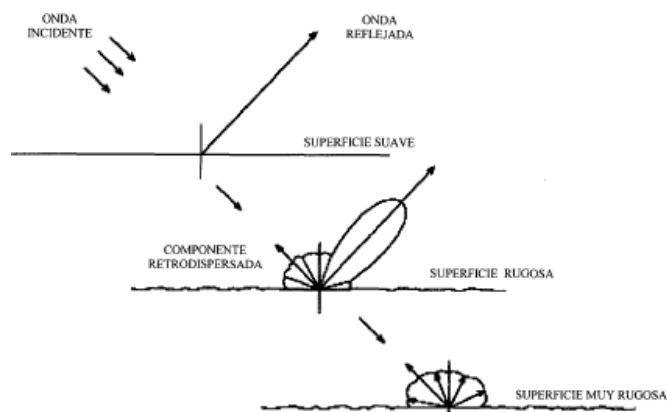


Figura 4.2. Reflexión en función de la rugosidad de la superficie.

Con estas propiedades, la clasificación polarimétrica resulta de interés en aplicaciones de vigilancia y monitoreo de la superficie terrestre. Una de las múltiples aplicaciones posibles sería el control del estado de campos agrícolas durante las distintas estaciones, como muestran las imágenes de la figura 4.3.

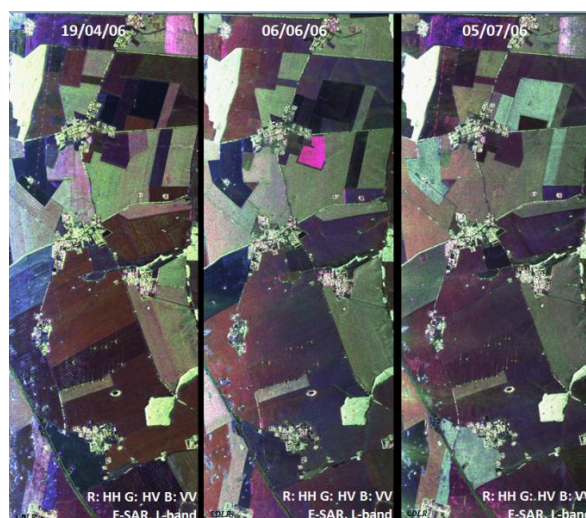


Figura 4.3. Campo agrícola en Berlín, Alemania, en distintas épocas del año. Imagen SAR del sensor aerotransportado E-SAR. Composición en RGB con las distintas bandas [58].

Procesado de datos SAR del satélite Sentinel-1 para el estudio de zonas costeras.

Estas imágenes, tomadas sobre campos agrícolas de Berlín con un sensor SAR aerotransportado (E-SAR), consisten en composiciones RGB de las distintas bandas polarimétricas (toma de datos *Quad Polarization*) [58]. El resultado evidencia la potencialidad de los datos para fines de clasificación. Tanto el tamaño del cultivo en cuestión (debido a las distintas fechas de toma de datos) como la cantidad de humedad del terreno producen variaciones en las distintas polarizaciones SAR.

4.2.2. Procesado de la matriz de retrodispersión para algoritmos de clasificación

Como se ha indicado, los procesados que se llevarán a cabo hacen uso de la matriz de retrodispersión S (matriz de *backscattering*) para realizar los diferentes algoritmos de clasificación. Como se indicó en el apartado 2.2, si bien el caso ideal para los algoritmos polarimétricos es el de la polarización total, es decir, *Quad Polarized*, en el caso del satélite Sentinel-1, sólo dispondremos del modo *Dual Polarized*. Esto significa que de las cuatro polarizaciones posibles en datos SAR, sólo dispondremos de dos de ellas: $VV + VH$ ó $HH + HV$. Esta limitación supone una gran desventaja a la hora de realizar procesados de clasificación dado que nuestra matriz S no cuenta con las cuatro polarizaciones, sino que sólo cuenta con un par. Además, hay que recordar que de los 8 parámetros que teníamos en el caso *Quad Polarized*, hemos pasado a 4, dos fases y dos amplitudes. En este sentido, cabe decir que la mayor parte de algoritmos publicados para fines de clasificación con datos SAR, han sido diseñados para el uso de las cuatro polarizaciones, si bien existen variantes para el caso de doble polarización. Sin embargo, y como es lógico, la menor cantidad de parámetros disponibles provoca que los resultados de clasificación sean mucho más pobres que en el caso de polarización total. También cabe nombrar la existencia de algoritmos de clasificación multipolarización y multibanda, aunque éstos no serán nombrados en este proyecto dado que no se dispone de datos multibanda.

Para entender, de forma somera, las bases matemáticas de los procesados, debemos retroceder a la formación de la matriz de retrodispersión S . Como se explicó en la sección 2.1.4. partimos de una señal electromagnética, nuestra señal radar. Las señales electromagnéticas se componen de dos campos perpendiculares entre sí y a la dirección de propagación de la onda, los campos eléctrico y magnético. Las polarizaciones vertical y horizontal lineal hacen referencia a la dirección de oscilación del campo eléctrico y la

forma en la que éste varía. Sin embargo, la polarización lineal es tan sólo una de las posibles configuraciones del campo eléctrico. Otra posible configuración sería la polarización circular, que se puede ver en la figura 4.4. En esta configuración, el campo eléctrico rota sobre el eje de propagación 360° por cada ciclo de onda. Las amplitudes de las componentes x e y del vector campo eléctrico son iguales pero la fase entre ellas es diferente. La dirección de oscilación rota en el tiempo conforme el campo eléctrico se propaga con amplitud constante. Cuando un observador mira a la fuente, el vector de campo eléctrico aparece rotando en sentido horario, a esta configuración se le llama polarización circular con sentido a derechas. Si el vector de campo eléctrico aparece rotando en sentido antihorario, a la configuración se le denomina polarización circular a izquierdas.

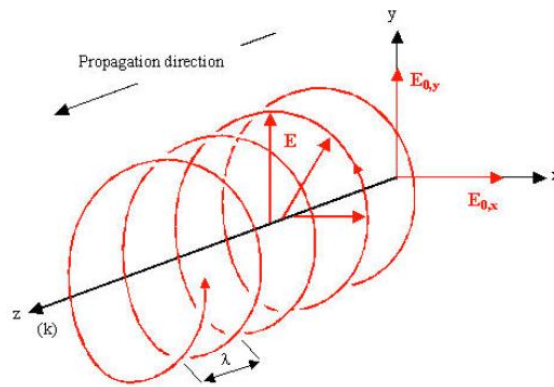


Figura 4.4. Onda electromagnética con polarización circular.

Otra posible configuración es la elíptica. La configuración de polarización elíptica consiste en dos componentes de campo eléctrico perpendiculares entre sí de amplitud y fase desiguales [78]. La traza de una polarización elíptica así como la de la polarización circular, rota tanto hacia la izquierda como hacia la derecha, dependiendo de la diferencia de fases. En la figura 4.5 podemos observar una configuración de onda con polarización elíptica. Ésta puede ser expresada en término de dos parámetros angulares: el ángulo de orientación Ψ ($0 \leq \Psi \leq \pi$) y el ángulo de excentricidad o elipticidad χ ($-\pi/4 < \chi \leq \pi/4$). El ángulo Ψ es el ángulo comprendido entre el eje x y el mayor de los ejes de la elipse, mientras que el ángulo χ describe el grado con el cual la elipse es ovalada. El ángulo χ está dado por la ecuación 4.1, donde a es la longitud del semieje mayor de la elipse y b es la longitud del semieje menor, como se observa en la figura 4.5.

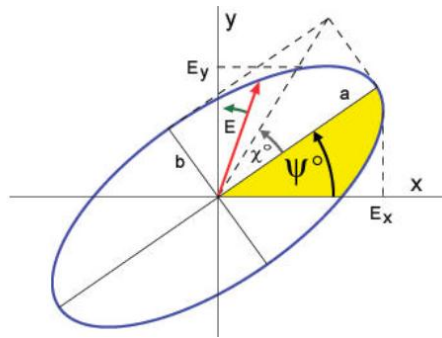


Figura 4.5. Onda electromagnética con polarización elíptica.

$$\chi = \arctan (b/a) \quad (\text{Ec. 4.1})$$

Las polarizaciones circular y lineal no son más que casos particulares de la configuración de polarización elíptica. Si los ejes mayores y menores de la elipse son iguales, es decir $a = b$, entonces $\chi = -\pi/4, \pi/4$, y la polarización elíptica se convierte en polarización circular. Cuando $b = 0$, entonces $\chi = 0$ y la traza del extremo del vector de campo eléctrico dibuja una línea recta y la polarización elíptica se convierte en polarización lineal con orientación 45° , tal como se muestra en la figura 4.6.

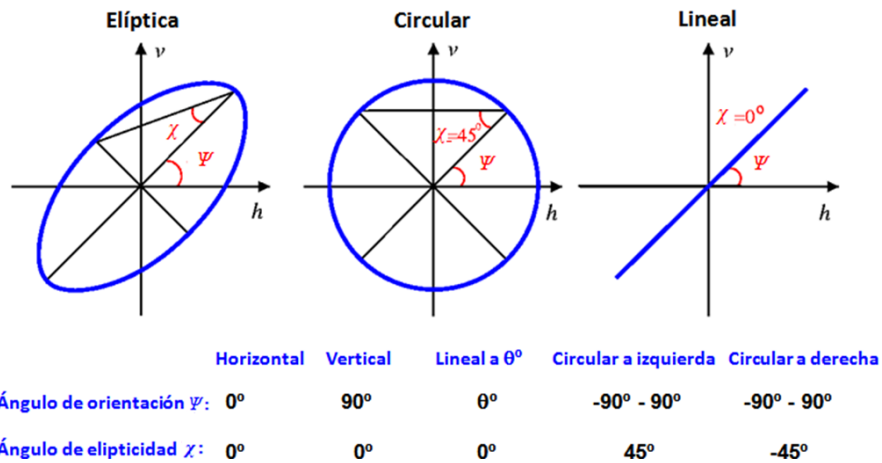


Figura 4.6. Configuraciones de polarización en función de los parámetros angulares χ y Ψ .

La representación del plano del campo eléctrico de una onda monocromática en la forma del vector de Jones, describe el estado de polarización de la onda usando el mínimo de información [19]. Un vector de campo eléctrico en una base ortogonal (x, y, z) , localizado en el plano perpendicular a la dirección de propagación a través de z puede ser representado en el tiempo según la ecuación 4.2.

$$\vec{E}(z, t) = \begin{bmatrix} E_{0x} \cos(\omega t - kz + \partial_x) \\ E_{0y} \cos(\omega t - kz + \partial_y) \end{bmatrix} = \text{Re} \left\{ \begin{bmatrix} E_{0x} e^{j\partial_x} \\ E_{0y} e^{j\partial_y} \end{bmatrix} e^{-jkz} e^{j\omega t} \right\} = \text{Re} \{ \underline{\vec{E}}(z) e^{j\omega t} \} \quad (\text{Ec. 4.2})$$

Para el caso monocromático se puede obviar la dependencia con el tiempo. El vector de Jones $\underline{\vec{E}}$ queda entonces definido como el vector de campo eléctrico complejo $\underline{\vec{E}}(z)$ en la ecuación 4.3.

$$\underline{\vec{E}}(z) \Big|_{z=0} = \underline{\vec{E}}(0) = \begin{bmatrix} E_{0x} e^{j\partial_x} \\ E_{0y} e^{j\partial_y} \end{bmatrix} \quad (\text{Ec. 4.3})$$

El vector de Jones describe de forma completa la amplitud y la fase de las componentes ortogonales complejas (en las direcciones x e y) de un campo eléctrico. Así mismo, un vector de Jones puede ser formulado como un vector complejo de dos dimensiones en función de las características de polarización elíptica como se indica en la ecuación 4.4, donde α es un término de fase absoluto [19].

$$\underline{\vec{E}} = A e^{+j\alpha} \begin{bmatrix} \cos\Psi \cos\chi - j \text{sen}\Psi \text{sen}\chi \\ \text{sen}\Psi \cos\chi + j \cos\Psi \text{sen}\chi \end{bmatrix} = A e^{+j\alpha} \begin{bmatrix} \cos\Psi - \text{sen}\Psi \\ \text{sen}\Psi \cos\Psi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\chi \\ \text{sen}\chi \end{bmatrix} \quad (\text{Ec. 4.4})$$

La Tabla 4.1 muestra la relación del vector de Jones y los parámetros angulares de la polarización elíptica para varias configuraciones de polarización.

Estado de polarización	Vector de Jones unitario $\hat{u}_{(x,y)}$	Ángulo de orientación Ψ	Ángulo de elipticidad χ
Polarización lineal horizontal (H) (dirección x)	$\hat{u}_H = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$	0	0
Polarización lineal vertical (V) (dirección y)	$\hat{u}_V = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$	$\frac{\pi}{2}$	0
Polarización circular a derecha	$\hat{u}_D = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ -j \end{bmatrix}$	$\left[-\frac{\pi}{2} \quad \dots \quad \frac{\pi}{2} \right]$	$-\frac{\pi}{4}$
Polarización circular a izquierda	$\hat{u}_I = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ j \end{bmatrix}$	$\left[-\frac{\pi}{2} \quad \dots \quad \frac{\pi}{2} \right]$	$\frac{\pi}{4}$

Tabla 4.1. Vectores unitarios de Jones y sus correspondientes parámetros de polarización elíptica para varias configuraciones de polarización.

Dados los vectores de Jones de las ondas incidentes y reflejadas $\underline{\vec{E}}_i$ (*incident wave*) y $\underline{\vec{E}}_s$ (*scattered wave*) respectivamente, el proceso de dispersión de energía en el objetivo

se puede representar en términos de estos vectores tal como indica la ecuación 4.5 [19], donde k es el número de ondas y S es la matriz compleja 2x2 de retrodispersión o matriz de Sinclair. El término e^{-jkr}/r tiene en cuenta los efectos de propagación tanto en amplitud como en fase. En el caso de las cuatro polarizaciones, se dispone de un set de cuatro imágenes complejas.

$$\vec{E}_S = \frac{e^{-jkr}}{r} S \vec{E}_S \quad (\text{Ec. 4.5})$$

$$S = \begin{bmatrix} S_{HH} & S_{HV} \\ S_{VH} & S_{VV} \end{bmatrix} \quad (\text{Ec. 4.6})$$

Para el caso de doble polarización la matriz S queda definida sólo por dos coeficientes. Si la polarización dual es VV+VH, la matriz S queda definida por la ecuación 4.8, mientras que si la polarización es HH+HV, la matriz S queda definida por la ecuación 4.9. Tener en cuenta que $S_{VH} = S_{HV}$, dado que el sistema es monoestático.

$$S = \begin{bmatrix} S_{HH} & S_{HV} \\ S_{VH} & S_{VV} \end{bmatrix} = [E_{SH} \quad E_{SV}] \quad (\text{Ec. 4.7})$$

$$E_{SH} = \begin{bmatrix} S_{HH} & S_{HV} \\ S_{VH} & S_{VV} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{HH} \\ S_{VH} \end{bmatrix} \quad (\text{Ec. 4.8})$$

$$E_{SV} = \begin{bmatrix} S_{HH} & S_{HV} \\ S_{VH} & S_{VV} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{HV} \\ S_{VV} \end{bmatrix} \quad (\text{Ec. 4.9})$$

De esta forma, estudiando la matriz S podemos analizar las variaciones que sufren los vectores de Jones del campo eléctrico incidente y reflejado, diferenciando así distintos grados de despolarización, orientación o de intensidad entre los campos eléctricos, fruto de la interacción de la señal radar con las características de la superficie terrestre. Cabe recordar que en los sistemas monoestáticos, $S_{HV} = S_{VH}$, por lo que la matriz S es simétrica. Las ecuaciones 4.5, 4.6, 4.7, 4.8 y 4.9 son válidas sólo en una zona de campo lejano donde los campos incidentes y reflejados se consideran como un frente de ondas plano [19].

4.2.2.1. Representación visual de los coeficientes de la matriz S

Una de las formas de visualizar las imágenes SAR es, obviamente, ver cada canal con su respectiva intensidad. Sin embargo, una forma más interesante de visualizarlas es

componiendo la imagen de *Span*, que ya se mencionó en la sección 3.1.3.2. cuando fueron tratados los distintos filtros de *Speckle*. Se trata de una composición de la imagen que describe la energía total reflejada por los distintos reflectores y dispersores en la imagen. Es por esto que en esta representación se consideran todos los canales captados por el sensor, es decir, todos los elementos de la matriz *S*, de forma que en una única imagen tenemos todos los objetos que aparecen en las distintas polarizaciones por separado. La ecuación 4.10 es la expresión de la representación *Span*. La principal propiedad de esta representación es que es polariméricamente invariable, es decir, no depende de la base de polarización empleada en las ondas electromagnéticas. En la figura 4.7 se pueden observar los canales HH, HV y VV (intensidades) y la composición *Span* (abajo).

$$Span(S) = |S_{HH}|^2 + |S_{HV}|^2 + |S_{VH}|^2 + |S_{VV}|^2 = |S_{HH}|^2 + 2|S_{HV}|^2 + |S_{VV}|^2 \quad (Ec. 4.10)$$

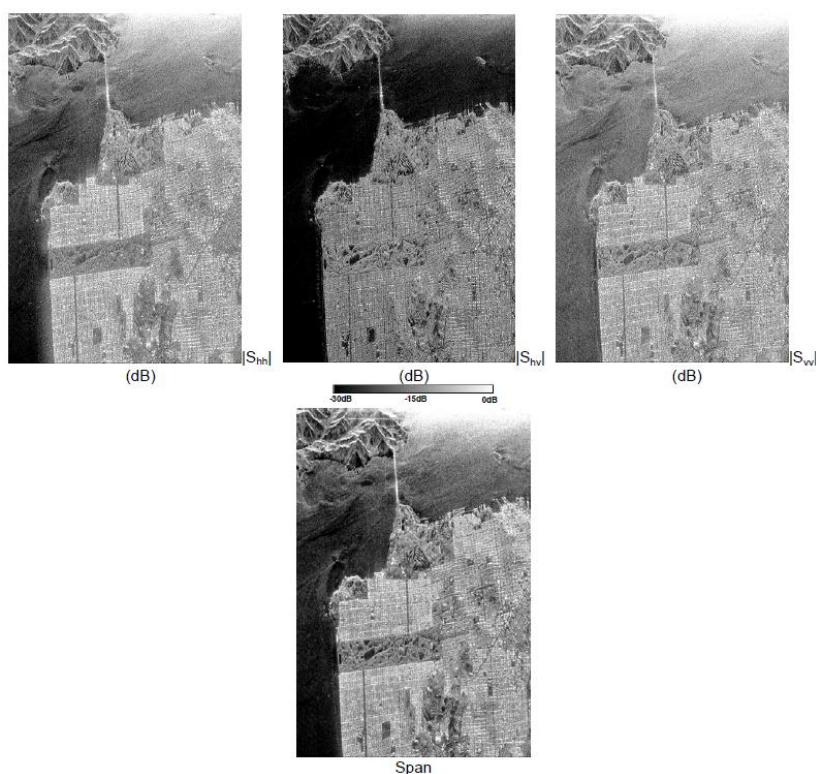


Figura 4.7. Imágenes SAR realizadas por el sensor AirSAR (banda L) con las tres polarizaciones, de la bahía de San Francisco, USA. Abajo, imagen *Span* [19].

Otras representaciones hacen uso del espacio de color RGB para visualizar *a priori* y de forma meramente intuitiva las características del área captada haciendo uso de los diferentes canales como parámetros. Como es sabido, el espacio de color RGB es un

modelo aditivo de color en el cual la luz de los colores rojo, verde y azul es combinada para formar cualquier otro color del espectro óptico, tal como muestra la figura 4.8 [79].

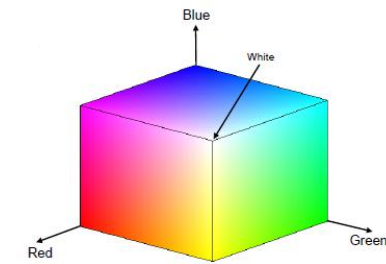


Figura 4.8. Espacio de color RGB.

Una posible configuración (y la más simple) de los canales RGB es la que se mostró en la figura 4.3, teniendo el canal R=HH, G= HV, B=VV. De esta forma se pueden apreciar las intensidades relativas de las polarizaciones en una sola imagen. Una de las configuraciones de representación RGB más conocidas y usadas en imágenes SAR es la representación de base *Pauli*. La base *Pauli* descompone la matriz *S* polarimétrica en 4 parámetros, tal como se describe en las ecuaciones 4.11 a 4.14. En el caso monoestático, los parámetros se reducen a $[S_a]$, $[S_b]$ y $[S_c]$.

$$[S_a] = 1 / \sqrt{2} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{Ec.4.11})$$

$$[S_b] = 1 / \sqrt{2} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \quad (\text{Ec.4.12})$$

$$[S_c] = 1 / \sqrt{2} \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{Ec.4.13})$$

$$[S_d] = 1 / \sqrt{2} \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{Ec.4.14})$$

De esta forma, dada una matriz *S*, ésta puede ser expresada como indica la ecuación 4.15.

$$S = \begin{bmatrix} S_{HH} & S_{HV} \\ S_{VH} & S_{VV} \end{bmatrix} = \alpha [S_a] + \beta [S_b] + \gamma [S_c] \quad (\text{Ec. 4.15})$$

donde:

$$\alpha = \frac{S_{HH} + S_{VV}}{\sqrt{2}} \quad (\text{Ec. 4.16})$$

$$\beta = \frac{S_{HH} - S_{VV}}{\sqrt{2}} \quad (\text{Ec. 4.17})$$

$$\gamma = \frac{2S_{HV}}{\sqrt{2}} \quad (\text{Ec. 4.18})$$

Así, la composición RGB se realiza adjudicando a $|\alpha|^2$ el canal rojo, a $|\beta|^2$ el canal azul y a $|\gamma|^2$ el canal verde. De esta forma $|\alpha|^2$ determina (en todos los casos, de forma aproximada) la energía dispersada por objetivos caracterizados por simple o doble rebote como los dihedros, $|\beta|^2$ representa la energía dispersada por superficies aproximadamente planas que reflejan la energía de forma ortogonal a la onda incidente, y por último, $|\gamma|^2$ la energía dispersada por dihedros que reflejan la onda incidente varias veces de forma ortogonal a la onda incidente, como superficies volumétricas. En la figura 4.9 se puede observar esta configuración de representación para los datos L-SAR del sensor AirSAR de la bahía de San Francisco.

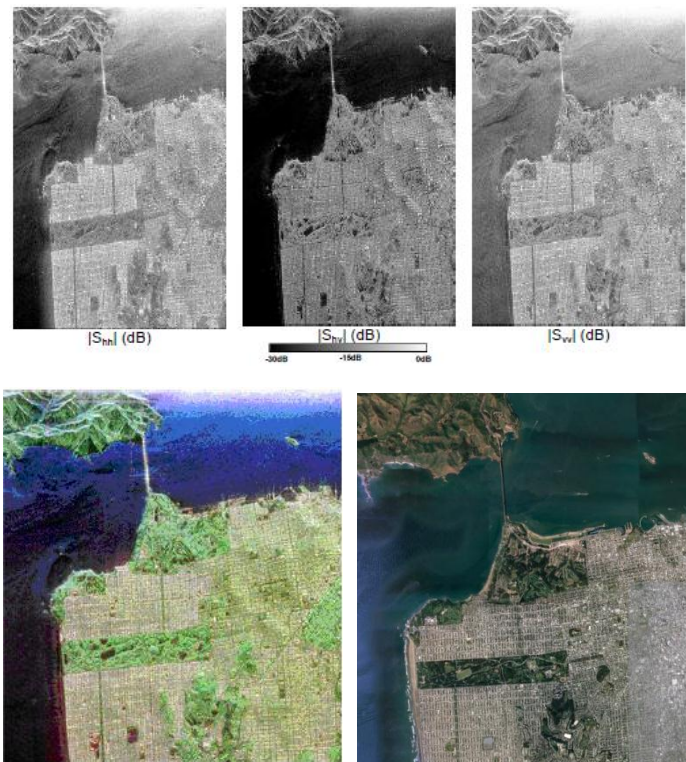


Figura 4.9. Imágenes SAR realizadas por el sensor AirSAR (banda L) con las tres polarizaciones, de la bahía de San Francisco, USA. Abajo a la izquierda, imagen en base de color *Pauli* [19]. Abajo a la derecha, imagen óptica disponible en Google Earth © para la misma zona.

En nuestro caso, para datos *Dual Polarized*, no podremos realizar una representación en base *Pauli*, aunque sin embargo, el software SNAP nos permite realizar

Procesado de datos SAR del satélite Sentinel-1 para el estudio de zonas costeras.

una serie de representaciones en RGB para previsualizar, como ya se ha explicado, de forma intuitiva, la intensidad de los distintos canales. Una de ellas es la relación de intensidad de los canales *Dual Pol (Dual Pol Ratio Intensity)*, que se puede realizar con la combinación VV + VH o HH + HV. En el caso de VV + VH el canal rojo es seleccionado para la intensidad de la polarización VV, el color verde para la intensidad de la polarización VH, y por último, el color azul para el *ratio* de la intensidad de la polarización VV con la polarización VH. Otra representación es la *Dual Pol Multiple Intensity*, que es igual que la anterior con la diferencia de que al canal azul se le adjudica el producto de las intensidades de las polarizaciones VV y VH. Por último, en la representación *Dual Pol Difference Intensity*, el canal rojo es seleccionado para la intensidad de la polarización VH, el canal verde para la intensidad de la polarización VV y el canal azul para el módulo de la diferencia de intensidades de las polarizaciones VV-VH. Estas representaciones se muestran como resultados de las áreas de clasificación seleccionadas en las figuras 5.29 y 5.31 del capítulo 5 (apartado 5.2.2.1.).

4.2.2.2. Clasificación no supervisada *H/A/Alpha Classification*

Por definición, las técnicas de clasificación polarimétricas consisten en algoritmos que usan discriminadores para análisis, interpretación y segmentación de datos SAR [80]. Estas técnicas permiten la extracción de la información de los procesos de dispersión que envuelve un objetivo o superficie específicos. Existen dos tipos de clasificación polarimétrica, fundamentadas en cómo se realiza la descomposición de parámetros. Una es la descomposición coherente, basada en la descomposición de la matriz de retrodispersión, mientras que la otra, es la descomposición incoherente, basada en la descomposición de las matrices de coherencia o de covarianza. La clasificación *H/A/Alpha* es una descomposición incoherente que analiza los parámetros de energía de la matriz de coherencia generada por la matriz de retrodispersión.

En esta línea, en 1997 Cloude y Pottier propusieron un método de clasificación polarimétrica basado en el parámetro de entropía y el ángulo medio α [81]. Este método está basado en la hipótesis de que las características de la dispersión polarimétrica pueden ser representadas en un espacio bidimensional creado entre la entropía y el promediado del ángulo de dispersión α mediante el análisis de los autovalores de las matrices hermitianas. La descomposición H- α no está basada en la

hipótesis de una distribución estadística subyacente particular y, por lo tanto, es libre de las limitaciones físicas impuestas por modelos multivariados. De entre sus bondades, este método tiene la propiedad de cubrir por completo el espacio de distribución de los mecanismos de retrodispersión.

Generalmente, en la mayoría de aplicaciones radar para fines geocientíficos, los dispersores se encuentran dentro de un ambiente dinámico, por lo que están afectados por las variaciones espaciales y/o temporales. Estos dispersores, llamados dispersores parciales o dispersores distribuidos, no pueden ser completamente descritos mediante la matriz de retrodispersión S [19]. El concepto de matriz de coherencia (*coherency matrix*) fue introducido para avanzar el análisis de los dispersores parciales en el dominio complejo [81]. De este modo, para una matriz recíproca, en el caso de retrodispersión monoestático, la propiedad de reciprocidad hace que la matriz de *Sinclair* sea simétrica, por lo que $S_{HV} = S_{VH}$ y, la matriz polarimétrica de coherencia de cuatro dimensiones $[T_4]$ se reduce a una matriz de tres dimensiones $[T_3]$. La matriz de coherencia de 3×3 está formada por el producto resultante del vector de dispersión de Pauli k , tal como indican las ecuaciones 4.19 y 4.20, donde los índices 1, 2 y 3 hacen referencia a los coeficientes del vector de Pauli k . Observando la ecuación 4.20 tenemos que la matriz de coherencia polarimétrica $[T_3]$ tiene las propiedades de ser hermitiana y semidefinida positiva. Una matriz hermitiana es una matriz cuadrada de elementos complejos con la característica de ser igual a su traspuesta conjugada, es decir, el elemento de la i -ésima fila y j -ésima columna es igual al conjugado del elemento en la j -ésima fila e i -ésima columna para todos los índices i y j . Así mismo, una matriz semidefinida positiva es aquella matriz cuyos autovalores son positivos [82].

$$k = \frac{1}{\sqrt{2}} [S_{HH} + S_{VV}, S_{HH} - S_{VV}, 2S_{HV}]^T \quad (\text{Ec. 4.19})$$

$$[T_3] = \langle k \times k^{*T} \rangle = \left\langle \begin{bmatrix} |k_1|^2 & k_1 k_2^* & k_1 k_3^* \\ k_2 k_1^* & |k_2|^2 & k_2 k_3^* \\ k_3 k_1^* & k_3 k_2^* & |k_3|^2 \end{bmatrix} \right\rangle =$$

$$= \frac{1}{2} \begin{bmatrix} \langle |S_{HH} + S_{VV}|^2 \rangle & \langle (S_{HH} + S_{VV})(S_{HH} - S_{VV})^* \rangle & 2\langle (S_{HH} + S_{VV})S_{HV}^* \rangle \\ \langle (S_{HH} - S_{VV})(S_{HH} + S_{VV})^* \rangle & \langle |S_{HH} - S_{VV}|^2 \rangle & 2\langle (S_{HH} - S_{VV})S_{HV}^* \rangle \\ 2\langle S_{HV}(S_{HH} + S_{VV})^* \rangle & 2\langle S_{HV}(S_{HH} - S_{VV})^* \rangle & 4\langle |S_{HV}|^2 \rangle \end{bmatrix}$$

(Ec. 4.20)

Para el caso *Quad Pol*, una vez obtenida la matriz de coherencia se deben extraer los parámetros de entropía y de ángulo alpha descomponiendo la matriz en sus autovalores y autovectores. El proceso de descomposición queda descrito en la ecuación 4.21. La matriz $[\Sigma_3]$ (3x3) real de la ecuación 4.22 contiene los autovalores de $\langle [T_3] \rangle$: donde $\infty > \lambda_1 > \lambda_2 > \lambda_3 > 0$. La matriz unitaria $[U_3]$ (3x3) de la ecuación 4.23 contiene los autovectores u_i para $i=1,2,3$ de $\langle [T_3] \rangle$.

$$[T_3] = [U_3][\Sigma_3][U_3]^{-1} \quad (\text{Ec. 4.21})$$

$$[\Sigma_3] = \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_2 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_3 \end{bmatrix} \quad (\text{Ec. 4.22})$$

$$[U_3] = [u_1 \ u_2 \ u_3] \quad (\text{Ec. 4.23})$$

Los autovectores u_i para $i= 1, 2, 3$ de $[T_3]$ se describen en la ecuación 4.24:

$$u_i = [\cos \alpha_i \ \text{sen} \alpha_i \cos \beta_i e^{i\delta_i} \ \text{sen} \alpha_i \text{sen} \beta_i e^{i\nu_i}]^T \quad (\text{Ec. 4.24})$$

Considerando las ecuaciones 4.22 y 4.23, la descomposición de $\langle [T_3] \rangle$ en la ecuación 4.21 se puede reescribir como la ecuación 4.25, donde el símbolo *T representa el complejo conjugado traspuesto. Como muestra la ecuación 4.25, la matriz de rango 3 $\langle [T_3] \rangle$ puede ser descompuesta como una combinación de tres matrices de coherencia de rango 1 en la ecuación 4.26, que se puede relacionar con los mecanismos de dispersión dados en la ecuación 4.24.

$$\langle [T_3] \rangle = \sum_{j=1}^3 \lambda_j u_j u_j^{*T} \quad (\text{Ec. 4.25})$$

$$[T_3]_i = u_i u_i^{*T} \quad (\text{Ec. 4.26})$$

A los autovalores de la ecuación 4.22 y a los autovectores de la ecuación 4.23 se les consideran parámetros primarios de la autodescomposición de $\langle [T_3] \rangle$. Con el objetivo de simplificar el análisis de la información de parámetros físicos contenida en esta autodescomposición, se definen tres parámetros secundarios, como función de los autovalores y autovectores de $\langle [T_3] \rangle$: la entropía, la anisotropía y el promedio del ángulo

alpha. Dichos parámetros quedan descritos en las ecuaciones 4.27, 4.29 y 4.30, donde p_i , también llamado la probabilidad del autovalor λ_i , representa la importancia relativa de este autovalor respecto al total de energía retrodispersada de acuerdo a la ecuación 4.28:

$$H = - \sum_{i=1}^3 p_i \log_3 (p_i) \quad p_i = \frac{\lambda_i}{\sum_{k=1}^3 \lambda_k} \quad 0 \leq H \leq 1 \quad (\text{Ec. 4.27})$$

$$\text{Span} (S) = |S_{HH}|^2 + 2 |S_{HV}|^2 + |S_{VV}|^2 = \sum_{k=1}^3 \lambda_k \quad (\text{Ec. 4.28})$$

$$A = \frac{\lambda_2 - \lambda_3}{\lambda_2 + \lambda_3} \quad 0 \leq A \leq 1 \quad (\text{Ec. 4.29})$$

$$\underline{\alpha} = \sum_{i=1}^3 p_i \alpha_i \quad 0 \leq \underline{\alpha} \leq \pi/2 \quad (\text{Ec. 4.30})$$

con $\alpha_i = \cos^{-1}(|e_i|)$ y siendo e_i el primer elemento del autovector u_i

El estudio de los autovectores dados en la ecuación 4.24 se basa principalmente en la interpretación del promedio del ángulo alpha, ya que sus posibles valores pueden ser fácilmente relacionados con los parámetros físicos existentes detrás del proceso de retrodispersión de la señal radar. Los valores más importantes de este parámetro son:

- Si $\underline{\alpha} = 0$: En este caso, el proceso de retrodispersión corresponde a un rebote simple producido por una superficie rugosa.
- Si $\underline{\alpha} = \pi/4$: El proceso de retrodispersión corresponde a un objetivo volumétrico.
- Si $\underline{\alpha} = \pi/2$: El proceso de retrodispersión es debido a objetos que producen un doble o más rebotes de la señal radar.

La segunda parte en la interpretación de la autodescomposición se realiza mediante el estudio de los autovalores. A un autovalor dado le corresponde la energía retrodispersada asociada al autovector correspondiente. Consecuentemente, el valor del autovalor describe la importancia del correspondiente autovector o mecanismo de retrodispersión. El conjunto de mecanismos de retrodispersión se estudia mediante la entropía H y la anisotropía A. La entropía determina el grado de aleatoriedad del proceso de retrodispersión, el cual puede ser también interpretado como el grado de desorden estadístico. Los valores más importantes de este parámetro son:

- Si $H = 0$: La matriz de coherencia $\langle [T_3] \rangle$ tiene rango 1 y el proceso de retrodispersión corresponde a un objeto puro:

$$\lambda_1 = \text{SPAN} \quad \lambda_2 = 0 \quad \lambda_3 = 0$$

- Si $H = 1$: En esta situación, la matriz de coherencia $\langle [T_3] \rangle$ presenta rango 3, esto significa que el proceso de retrodispersión es debido a la combinación de varios objetos diferentes equitativamente ponderados. Consecuentemente, $\langle [T_3] \rangle$ corresponde a la respuesta de un objeto distribuido.

$$\lambda_1 = \text{SPAN}/3 \quad \lambda_2 = \text{SPAN}/3 \quad \lambda_3 = \text{SPAN}/3$$

- Si $0 < H < 1$: En este caso, el mecanismo de retrodispersión dado por $\langle [T_3] \rangle$ resulta de la combinación de tres objetivos puros dados por u_i para $i = 1, 2, 3$, pero ponderados por el autovalor correspondiente.

La anisotropía (Ec. 4.29) es un parámetro complementario a la entropía y mide la importancia relativa del segundo y tercer autovalores de la autodescomposición. Desde un punto de vista práctico, la anisotropía se puede emplear como un parámetro discriminante sólo cuando $H > 0,7$. La razón de esto es que para valores bajos de entropía, el segundo y tercer autovalores están muy afectados por el ruido, por lo que la anisotropía es también muy ruidosa. En la figura 4.10 se presentan los valores entropía y anisotropía para cuatro configuraciones diferentes de los autovalores. En la figura se puede observar claramente la forma en la que la entropía discrimina dos configuraciones que tienen el mismo valor de anisotropía. Así mismo, en la figura 4.11 se pueden observar las imágenes de entropía (H), anisotropía (A) y ángulo promedio α correspondientes a las imágenes SAR realizadas por el sensor AirSAR (banda L) de la bahía de San Francisco, USA [83].

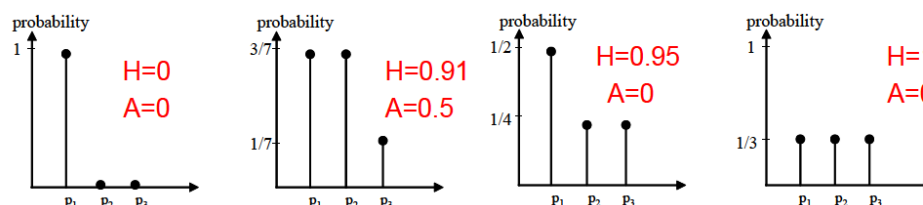


Figura 4.10. Probabilidades de entropía (H) y anisotropía (A) para cuatro configuraciones diferentes de los autovalores [83].

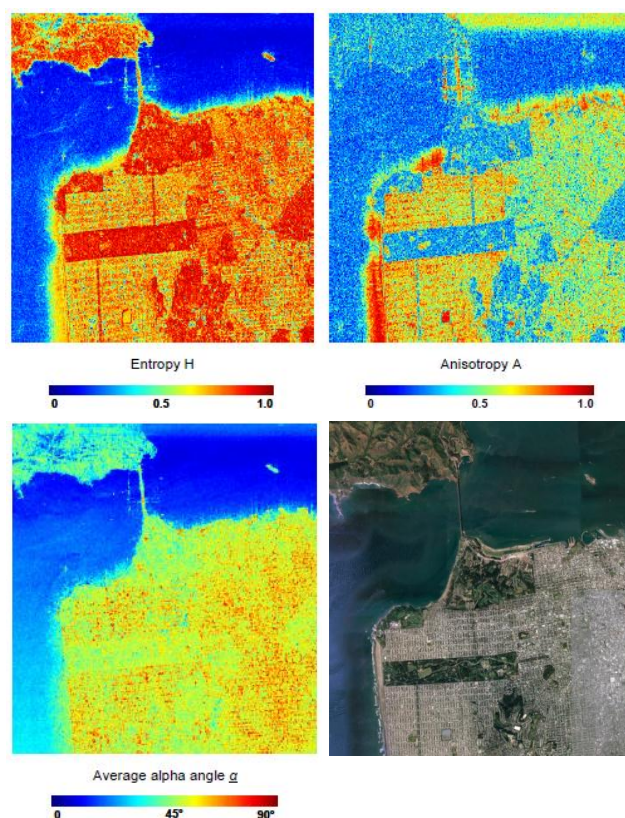


Figura 4.11. Entropía (H), anisotropía (A) y ángulo medio alpha (α) correspondientes a las imágenes SAR realizadas por el sensor AirSAR (banda L), de la bahía de San Francisco, USA [83]. Abajo a la derecha, imagen óptica disponible en Google Earth © para la misma zona.

En la figura 4.11, la imagen de entropía muestra que los valores más bajos de la misma se encuentran sobre la zona oceánica (zona de mar), esto se traduce en una retrodispersión producida por una superficie ligeramente rugosa. Los valores altos de entropía se encuentran sobre las zonas verdes de la ciudad, donde existe un alto desorden en el proceso de retrodispersión de la señal. A esta resolución, la zona urbana consiste en una mezcla de procesos de baja y alta entropía, los cuales son debidos a diferentes tipos de calles y edificios que se encuentran alineados o bien en la dirección de visión del SAR (*Line-Of-Sight*, LOS), o con cierto grado de desalineación. En la imagen de anisotropía, los valores bajos de la misma ocurren tanto sobre el océano como sobre zonas verdes. Esto es debido a que el segundo y tercer autovalores son iguales, y esto significa que pueden corresponder tanto a un retrodispersor dominante como a un tipo de retrodispersión aleatorio. Las zonas urbanas y costeras consisten en una mezcla de medios y altos valores de anisotropía (presencia de un segundo mecanismo de retrodispersión). En la imagen de α podemos observar que los valores bajos del mismo se encuentran sobre el océano, indicando un único tipo de retrodispersor dominante (superficie). Las zonas

Procesado de datos SAR del satélite Sentinel-1 para el estudio de zonas costeras.

urbanas y verdes contienen valores medios-altos ($45^\circ < \alpha < 90^\circ$) de α . Como vemos, aunque podemos identificar claramente varias clases basándonos solamente en la entropía, se puede extraer más información contando con α y la anisotropía. Por ejemplo, podemos distinguir entre la alta entropía de las zonas verdes y de las zonas urbanas (entropía de moderada a alta) dado que ésta última contiene retrodispersión propia de estructuras con forma de dihedros (de acuerdo a α) [84].

Lo más interesante de estos parámetros consiste en la construcción del espacio bidimensional H - α propuesto en el algoritmo de Cloude y Pottier [81]. En la figura 4.12 podemos observar el mismo. Como se indica gráficamente, el plano H - α está subdividido en 9 zonas que representan características propias de diferentes retrodispersores atendiendo a los valores de H y de α . La naturaleza del objeto o superficie que produce la retrodispersión captada en cada píxel puede ser, por lo tanto, identificada (y clasificada) al comparar sus valores de H y de α con distintos umbrales.

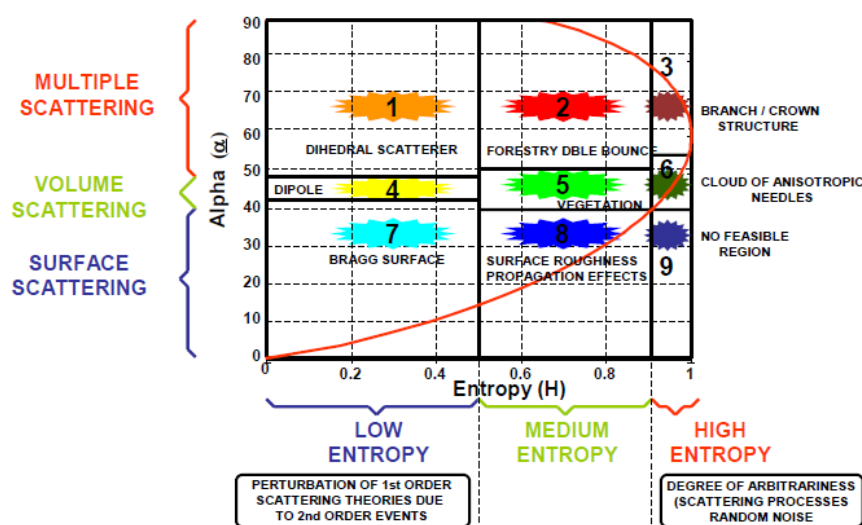


Figura 4.12. Plano H - α , distribución de zonas [85].

Los diferentes umbrales en el plano H - α discriminan entre retrodispersión de superficies (*surface scattering*), retrodispersión volumétrica (*volume scattering*) y retrodispersión múltiple (*multiple scattering*) para el eje α , y entre baja, media y alta entropía (H) a lo largo del eje de la misma. La retrodispersión de superficies es característica de campos de agricultura, suelos desnudos, superficies planas y agua en calma. La retrodispersión volumétrica aparece principalmente sobre áreas forestales y la retrodispersión múltiple es típica en áreas urbanas y edificios. Los valores bajos de entropía representan la facilidad para extraer información del mecanismo de

retrodispersión. Un valor alto de entropía indica la existencia de más de un mecanismo de retrodispersión de intensidad similar presente en el píxel. Por este motivo, cuanto más nos vamos a la derecha en el plano $H-\alpha$, más difícil es diferenciar entre distintos mecanismos en un mismo píxel [86]. La definición de cada zona del plano se encuentra recogida a continuación [84]:

- Zona 1 (*Dihedral scatterer*): Esta zona corresponde a procesos de retrodispersión con baja entropía y doble o más rebotes de señal radar, producidos por ejemplo por dihedros metálicos.
- Zona 2 (*Forestry double bounce*): En esta zona se encuentran los procesos de retrodispersión de dihedros con moderada entropía. Esto ocurre por ejemplo en los bosques, donde los mecanismos que producen dobles rebotes son afectados por efectos de multipropagación a través de las hojas y ramas de la vegetación. El efecto de las hojas y ramas se traduce en un incremento de la entropía. También se enmarcan aquí algunas zonas urbanas, donde la alta densidad de estructuras, edificios y objetos, puede producir este tipo de retrodispersión.
- Zona 3 (*Branch/Crown structure*): Este tipo de retrodispersión tiene lugar en bosques con alta densidad y desarrollo de la vida vegetal, es decir, entornos donde la cantidad de ramas (y sus tamaños) así como de hojas por unidad de superficie es muy elevada.
- Zona 4 (*Dipole*): En esta zona se encuentran los procesos de retrodispersión intensamente correlados, de forma que existe un gran desequilibrio entre las amplitudes VV y HH. Esto ocurre en áreas con vegetación en las que existe una alta correlación en la orientación de elementos retrodispersores anisotrópicos.
- Zona 5 (*Vegetation*): Igual que la zona anterior, pero en este caso, al aumentar la entropía, se reduce la correlación en la orientación de los retrodispersores.
- Zona 6 (*Cloud of anisotropic needles*): Esta retrodispersión está formada por nubes de elementos con bajas pérdidas, como las hojas de ciertos árboles en los bosques o ciertos tipos de vegetación con alta densidad de elementos aleatorios anisotrópicos.
- Zona 7 (*Bragg surface*): En esta región encontramos superficies como agua en calma, hielo en el mar así como superficies terrestres muy planas.

- Zona 8 (*Surface roughness propagation effects*): Esta zona refleja los cambios en la rugosidad de la superficie debido al incremento de entropía.
- Zona 9 (*Non feasible region*): Esta zona constituye una región no realizable en el espacio-bidimensional $H-\alpha$. Esto es debido a que no podemos distinguir retrodispersión de superficie cuando $H > 0,9$. Esta es una de las consecuencias directas del incremento de dificultad para clasificar distintos mecanismos de retrodispersión a medida que incrementa la entropía. Esta zona se incluye para remarcar la idea de que los altos valores de entropía limitan la capacidad de usar el comportamiento polarimétrico con fines de clasificación. De esta forma, la polarimetría radar es mucho más exitosa cuando es aplicada a problemas de baja entropía. Como ejemplo, en la figura 4.13 tenemos el plano $H-\alpha$ para la zona de San Francisco de las imágenes 4.7, 4.9 y 4.11.

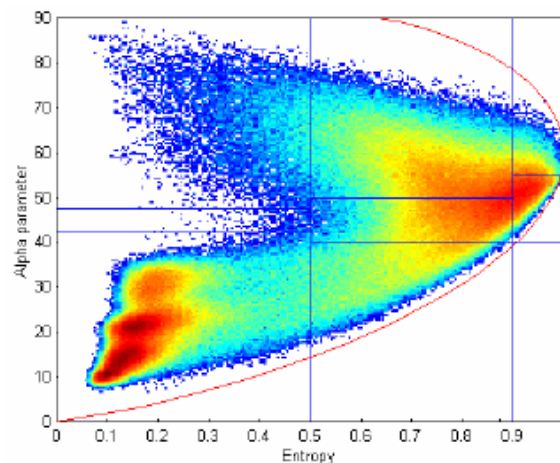


Figura 4.13. Plano $H-\alpha$ de la imagen SAR del sensor AirSAR (banda L), bahía de San Francisco, USA [83].

Con el objetivo de profundizar en el esquema de clasificación a partir de estos parámetros, y para mejorar la capacidad para distinguir diferentes tipos de procesos de retrodispersión, se propone el uso de combinaciones entre la información de entropía y anisotropía, tal y como se muestra en la figura 4.14. El análisis de las diferentes imágenes correspondientes a las distintas combinaciones entre entropía y anisotropía nos lleva a las siguientes observaciones [84]:

- La imagen $(1-H)(1-A)$ corresponde a la presencia de un único proceso de retrodispersión (bajos valores de entropía y anisotropía con $\lambda_2 \approx \lambda_3 \approx 0$).

- La imagen $H(1-A)$ corresponde un proceso de retrodispersión aleatorio donde existen varios procesos de retrodispersión con igual intensidad (altos valores de entropía y bajos valores de anisotropía con $\lambda_2 \approx \lambda_3 \approx \lambda_1$).
- La imagen HA se asocia a la presencia de dos mecanismos de retrodispersión con la misma intensidad (altos valores de entropía y de anisotropía con $\lambda_3 \approx 0$).
- La imagen $(1-H)A$ corresponde a la presencia de dos mecanismos de retrodispersión, siendo uno de los dos el dominante (valores bajos a medios de entropía y altos valores de anisotropía $\lambda_3 \approx 0$).

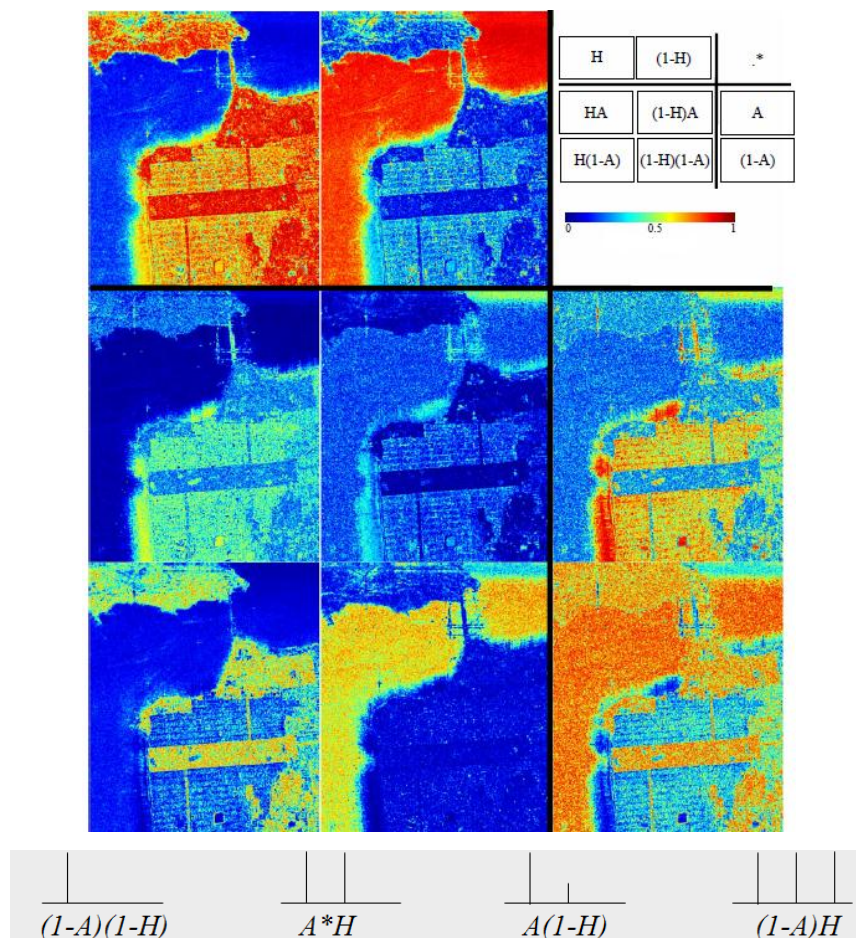


Figura 4.14. Distintas combinaciones de la información de entropía y anisotropía para la imagen SAR realizada por el sensor AirSAR (banda L), de la bahía de San Francisco, USA. Abajo, descripción gráfica de la intensidad y cantidad de procesos de retrodispersión en cada imagen [83].

Estas observaciones nos sirven para afirmar el hecho de que es posible discriminar nuevas clases mediante el análisis de la distribución de datos del área de San Francisco en el plano $H-\alpha$ extendiéndolo tridimensionalmente con los valores de anisotropía. De esta forma, lo que tenemos ahora es un espacio tridimensional con los ejes de $H-\alpha-A$ (espacio

Procesado de datos SAR del satélite Sentinel-1 para el estudio de zonas costeras.

$H/A/\underline{\alpha}$). En la figura 4.15 podemos observar el espacio $H/A/\underline{\alpha}$ para la zona de San Francisco [84]. Por ejemplo, en este nuevo espacio es posible darse cuenta de que en el área de "Bragg Surface" (zona 1 en el plano $H-\underline{\alpha}$) existe una segunda clase asociada al alto valor de anisotropía que corresponde a la presencia de un segundo mecanismo físico de retrodispersión que para nada es insignificante. Se pueden realizar observaciones idénticas para las zonas de "Vegetation" (zona 5 en el plano $H-\underline{\alpha}$) y "Forestry double bounce" (zona 2 en el plano $H-\underline{\alpha}$). Por ello, gracias a la distribución de datos sobre el tercer eje de anisotropía es posible mejorar la capacidad de discriminación entre diferentes tipos de procesos de retrodispersión con valores altos de entropía [84].

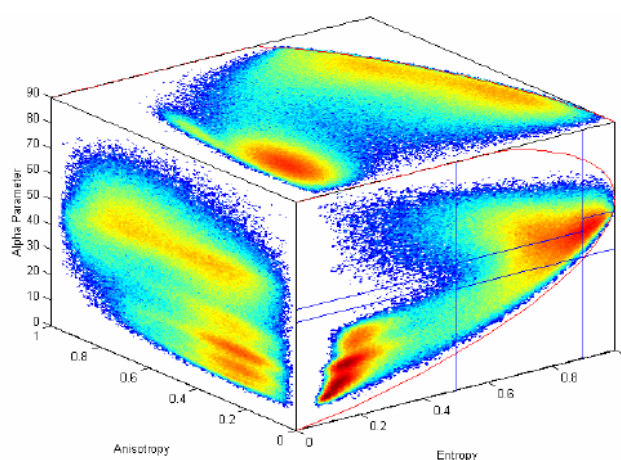


Figura 4.15. Distribución de los datos polarimétricos en el espacio $H/A/\underline{\alpha}$ para para la imagen SAR realizada por el sensor AirSAR (banda L), de la bahía de San Francisco, USA [83].

Hasta ahora se ha explicado el plano $H-\underline{\alpha}$ para el caso de polarización completa (*Quad Polarized*). Sin embargo, en este proyecto no se pueden utilizar los datos de que disponemos de la forma en la que aquí se ha expresado, pues sólo contamos con datos *Dual Polarized* (VV+VH y HH+HV). Aunque en líneas generales la idea central es la misma, el utilizar datos *Dual Polarized* implica que la descomposición de las matrices y los resultados finales obtenidos no sean exactamente los mismos. Como quedó descrito, esta técnica de clasificación de datos SAR fue diseñada y pensada para el caso *Quad Polarized* (tanto para el caso biestático como el monoestático) [81] aunque, sin embargo, posteriormente se propusieron extensiones del algoritmo que extraían los datos de las matrices de retrodispersión parciales (propias de los sensores SAR con doble o simple polarización) [87]. El funcionamiento es prácticamente idéntico salvo que, al contar con menos parámetros, la forma de proceder cambia ligeramente y los resultados (al tener

menos parámetros de entrada) tienen menor efectividad que en el caso de polarización completa. La forma de operar con estos datos empieza en el proceso de obtención de las matrices de coherencia.

En el caso de polarización dual *like-polarized*, es decir, VV + HH, cada píxel quedaría representado por una matriz de coherencia 2x2 [T₂] obtenida desde la matriz [T₃] tal y como se describe en la ecuación 4.31 [87]. Aunque no haremos uso de este tipo de datos, es interesante describir aquí la forma de obtener la matriz de coherencia puesto que para este caso sí que se puede partir del vector de *Pauli* de rango 2 (la única diferencia es que el tercer elemento no está disponible puesto que no contamos con el canal de polarización cruzada VH=HV).

$$[T_2] = \langle k \times k^{*T} \rangle = \left\langle \begin{bmatrix} |k_1|^2 & k_1 k_2^* \\ k_2 k_1^* & |k_2|^2 \end{bmatrix} \right\rangle = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} \langle |S_{HH} + S_{VV}|^2 \rangle & \langle (S_{HH} + S_{VV})(S_{HH} - S_{VV})^* \rangle \\ \langle (S_{HH} - S_{VV})(S_{HH} + S_{VV})^* \rangle & \langle |S_{HH} - S_{VV}|^2 \rangle \end{bmatrix} \quad (\text{Ec. 4.31})$$

En el caso de los datos Sentinel-1 sólo contamos con las polarizaciones VV+VH y HH+HV, por lo que no podemos conformar el vector base de *Pauli*, y por ende, no podemos obtener la matriz de coherencia. No obstante, en 2006 Shane Cloude describió la forma de lidiar con estos datos para obtener una "aproximación" a la matriz de coherencia, tal como se recoge en las ecuaciones 4.32 y 4.33 [87][88][89].

$$[J_H] = \begin{bmatrix} \langle S_{HH} S_{HH}^* \rangle & \langle S_{HH} S_{HV}^* \rangle \\ \langle S_{HV} S_{HH}^* \rangle & \langle S_{HV} S_{HV}^* \rangle \end{bmatrix} \quad (\text{Ec. 4.32})$$

$$[J_V] = \begin{bmatrix} \langle S_{VV} S_{VV}^* \rangle & \langle S_{VV} S_{VH}^* \rangle \\ \langle S_{VH} S_{VV}^* \rangle & \langle S_{VH} S_{VH}^* \rangle \end{bmatrix} \quad (\text{Ec. 4.33})$$

Si recordamos la matriz unitaria [U₃] (3x3) de la ecuación 4.23, comprobaremos que ésta estaba formada por los autovectores de la ecuación 4.24. Estos autovectores tenían tres elementos, pero sin embargo, para el caso de doble polarización sólo contamos con dos elementos, tal y como recoge la ecuación 4.34. De esta forma, la matriz unitaria [U₂] (2x2) se obtiene del autovector de la ecuación 4.34 (usando el principio de ortogonalidad para la segunda columna).

$$u_i = [\cos \alpha_i \quad \text{sen} \alpha_i \cos \beta_i e^{j\delta_i} \quad \text{sen} \alpha_i \text{sen} \beta_i e^{j\psi_i}]^T \quad (\text{Ec. 4.24})$$

$$u_i = [\cos \alpha_i \quad \text{sen} \alpha_i e^{j\delta_i}]^T \quad (\text{Ec. 4.34})$$

$$[U] = \begin{bmatrix} J_{xx} & J_{xy} \\ J_{xy}^* & J_{yy} \end{bmatrix} \rightarrow \begin{cases} [U_2] = \begin{bmatrix} \cos \alpha & -\text{sen} \alpha e^{-j\delta} \\ \text{sen} \alpha e^{j\delta} & \cos \alpha \end{bmatrix} \\ [D] = (\lambda_1 + \lambda_2) \begin{bmatrix} P_1 & 0 \\ 0 & P_2 \end{bmatrix} \end{cases} \quad (\text{Ec. 4.34})$$

La extracción de entropía y el promedio del ángulo alpha queda descrita en las ecuaciones 4.35 y 4.36. Con estos parámetros podemos formar el plano H- α para datos polarimétricos *Dual Polarized*, tal y como puede observarse en la figura 4.16.

$$\rightarrow \begin{cases} \overline{\alpha}_2 = P_1 \alpha + P_2 \left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right) = \alpha(P_1 - P_2) + P_2 \frac{\pi}{2} \\ H_2 = \sum_{i=1}^2 P_i \log_2 P_i \end{cases} \quad (\text{Ec. 4.35 y 4.36})$$

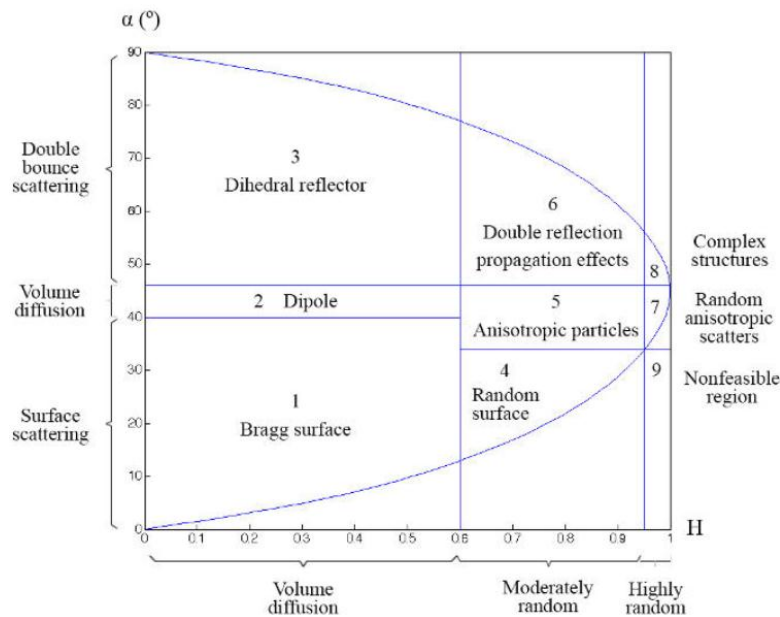


Figura 4.16. Plano H- α para datos polarimétricos *Dual Polarized*, distribución de zonas [87].

Observando la figura 4.16 podemos concluir que los umbrales de las diferentes zonas son diferentes a los del caso de las cuatro polarizaciones. Se hace evidente la simetría del gráfico en torno al valor de $\alpha = 45^\circ$. Estos límites son derivados de los valores que puede tomar la matriz unitaria $[U_2]$ (2x2) de la ecuación 4.34, que quedan recogidos en la ecuación 4.37.

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & m \end{bmatrix} 0 \leq m \leq 1 \rightarrow \overline{\alpha}_{min} = \frac{m\pi}{2(1+m)} \quad (\text{Ec. 4.37})$$

$$\begin{bmatrix} m & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} 0 \leq m \leq 1 \rightarrow \overline{\alpha}_{max} = \frac{\pi}{2(1+m)}$$

Los cambios más importantes en este espacio $H-\underline{\alpha}$ consisten en la menor efectividad de la clasificación de los distintos retrodispersores dado que carecemos de los dos canales cruzados (HH y VV). En su artículo, "*The dual polarisation entropy/alpha decomposition: A Palsar case study*", Shane Cloude recoge y describe matemáticamente cada uno de estos cambios para su total y completa interpretación [88]

Para realizar la clasificación no supervisada *H/A/Alpha Classification* se hace uso del plano $H-\underline{\alpha}$, donde, como hemos explicado, están representados todos los mecanismos aleatorios de retrodispersión. Si recordamos la figura 4.13 (plano $H-\underline{\alpha}$ de la imagen SAR de la bahía de San Francisco), se hace evidente la observación de la alta densidad de píxeles en las zonas 7 y 2,3,5 y 6 del plano. Estas zonas son las propias de difusión de volumen y de mecanismos de retrodispersión de doble rebote, con moderada a alta aleatoriedad. También se encuentra densidad media de datos para valores medios y altos de entropía en mecanismos de retrodispersión superficiales. Esto nos lleva a la conclusión de que se podría diseñar un esquema de clasificación no supervisado simple y básico utilizando los umbrales del plano como límites de clasificación. A cada zona del plano (las 8) le asignamos un color, y todos los píxeles que se encuentren dentro de esta zona pasarán a tener el color asignado a la zona, tal como se muestra en la figura 4.17.

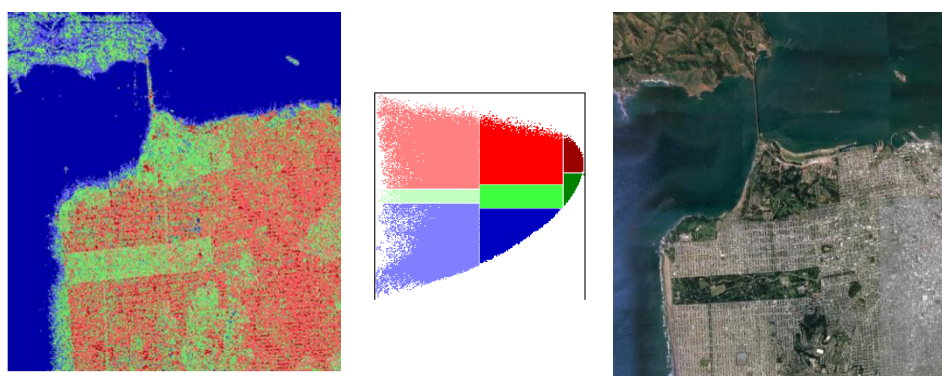


Figura 4.17. Clasificación de mecanismos de retrodispersión de forma no supervisada usando el plano $H-\underline{\alpha}$ la imagen SAR realizada por el sensor AirSAR (banda L), de la bahía de San Francisco, USA [83]. A la derecha, imagen óptica disponible en Google Earth © para la misma zona.

En la figura 4.17 puede observarse que esta clasificación permite identificar de forma macroscópica el tipo de mecanismo de retrodispersión en la escena. Las superficies oceánicas, los campos agrícolas y los suelos desnudos quedan caracterizados por los distintos grados de retrodispersión superficial (tonos azules). Los bosques se encuentran en zonas de retrodispersión volumétrica (tonos verdes) y, por último, las zonas urbanas quedan caracterizadas principalmente por las zonas de retrodispersión de múltiples rebotes (tonos rojos). Cabe notar que, en este ejemplo, este tipo de clasificación sobreestima las zonas de difusión volumétrica y múltiples rebotes en detrimento de las zonas de retrodispersión superficial. La particularidad del método reside en la estimación del tipo de mecanismo observado, a partir de una interpretación física de mecanismos de retrodispersión canónicos usando indicadores robustos. Sin embargo, este método tiene varias limitaciones:

- Los umbrales del plano $H-\underline{\alpha}$ son lineales y esto conlleva, de una forma casi aleatoria, la asignación de los píxeles a distintas (pero similares) clases. Un píxel que se encuentre justo en la frontera de decisión podría ser asignado a la clase errónea. Este efecto se intensifica en las zonas de entropía alta donde existe mucho ruido y/o en zonas de alta densidad de datos.
- Incluso con todos los canales polarimétricos, este tipo de clasificación no representa toda la información polarimétrica. El uso de otros indicadores como la anisotropía podría mejorar los resultados de clasificación de forma significativa.

Los procedimientos de clasificación basados en la matriz de coherencia permiten superar las limitaciones anteriormente citadas. Con este objetivo, J. S. Lee introdujo la clasificación del plano $H-\underline{\alpha}$ usando la distribución estadística compleja de Wishart [90]. Esta técnica usa el plano $H-\underline{\alpha}$ de una imagen SAR dada, como datos de entrada. A continuación el plano $H-\underline{\alpha}$ es segmentado (como en la figura 4.17) y sus zonas son usadas como regiones de entrenamiento para la clasificación basada en la distribución de Wishart. El método de clasificación hace uso de la función de densidad de probabilidad de Wishart, las regiones de entrenamiento y las matrices de coherencia. De esta forma, los resultados de clasificación mejoran con cada iteración del algoritmo. Los centros de los *clusters* de las matrices de coherencia $[T_m]$ son calculados para cada zona usando la ecuación 4.38, donde N_m es el número de píxeles pertenecientes (a priori) a la clase ω_m . La ecuación de la distribución de Wishart será presentada con mayor profundidad en el apartado 4.2.2.3.

$$[T_m] = \frac{1}{N_m} \sum_{k=1}^{k=N_m} \langle [T] \rangle_k \quad (\text{Ec. 4.38})$$

Cada píxel de la imagen es reclasificado aplicando el proceso de medida de distancias a los centros de los *clusters* (*clusters centers*). Las imágenes reclasificadas son usadas para actualizar las $[T_m]$ y repetir el proceso de clasificación aplicando el proceso de medida de distancias. El proceso de clasificación se detiene por un criterio determinado por el usuario, que puede ser el número de iteraciones, o bien el porcentaje de relación de píxeles entre clases dentro de un *cluster*. En el caso del algoritmo implementado en el PolSARpro, es posible fijar ambos parámetros, siendo el parámetro limitante el primero que se cumpla de los dos. En el ejemplo se ha usado un número máximo de iteraciones de 4. Para este número de iteraciones, por lo general la relación de píxeles propios de un *cluster* y del resto dentro del mismo es menor a un 10%. En la figura 4.18 podemos observar la clasificación no supervisada usando el plano $H-\alpha$ y la distribución estadística compleja de Wishart para la imagen SAR de la bahía de San Francisco [84].

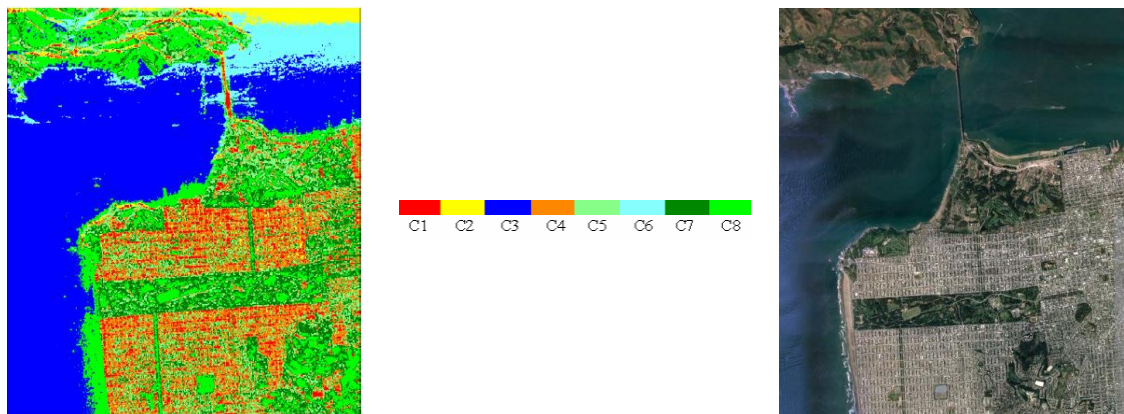


Figura 4.18. Clasificación de mecanismos de retrodispersión de forma no supervisada usando el plano $H-\alpha$ y la distribución estadística compleja de Wishart. Datos de la imagen SAR realizada por el sensor AirSAR (banda L), de la bahía de San Francisco, USA [83]. A la derecha, imagen óptica disponible en Google Earth © para la misma zona.

En la figura 4.18 se puede observar una mejora importante en la precisión de la clasificación de los distintos mecanismos de la escena. Hay que notar que este método modifica la decisión de los umbrales de forma adaptativa para ajustar mejor la distribución real de los distintos mecanismos. Hay que tener en cuenta que el algoritmo es estadísticamente óptimo en el sentido de que, maximiza la función de densidad de probabilidad de los píxeles de las matrices de coherencia. Sin embargo, la identificación directa del tipo de terreno partiendo del análisis de la imagen clasificada puede causar

cierta confusión debido al esquema de color [90]. De hecho, durante la clasificación, los centros de los *clusters* en el plano $H-\underline{\alpha}$ pueden verse desplazados de sus zonas, o varios *clusters* podrían incluso estar emplazados en la misma zona. Esto es debido al hecho de que los umbrales partían originalmente de límites arbitrarios (el plano $H-\underline{\alpha}$).

Con el objetivo de mejorar la capacidad de discriminación entre diferentes clases cuyos centros de sus *clusters* se encuentran en la misma zona, el clasificador de Wishart $H-\underline{\alpha}$ es extendido y complementado mediante el uso de la información de la anisotropía. El clasificador de Wishart $H/A/\underline{\alpha}$ consiste en comparar el valor de anisotropía para todos los píxeles con el valor $1/2$. Este método de comparación nos lleva a la definición de una proyección "equivalente" del espacio tridimensional $H/A/\underline{\alpha}$ en la extensión de dos planos $H-\underline{\alpha}$, como se muestra en la figura 4.19, donde se muestran los dos planos $H-\underline{\alpha}$ para la imagen SAR de la bahía de San Francisco. El esquema de color asociado a las primeras 8 clases se conserva y se introducen otras 8 nuevas clases.

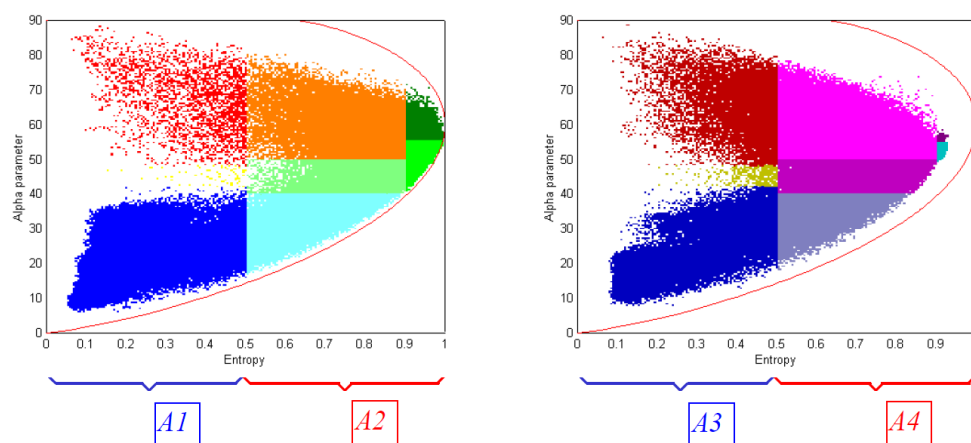


Figura 4.19. Planos $H-\underline{\alpha}$ para las 16 clases extraíbles usando la información de anisotropía en la clasificación inicial del plano $H-\underline{\alpha}$. El plano de la izquierda corresponde a valores de anisotropía menores a $1/2$, y el de la derecha a valores mayores. Clasificación realizada sobre la imagen SAR realizada por el sensor AirSAR (banda L), de la bahía de San Francisco, USA [83].

Del análisis de estos dos planos $H-\underline{\alpha}$ complementarios es posible definir cuatro áreas principales (A1 a A4), cada una de ellas aunando varias zonas que nos llevan a la siguiente interpretación:

- Área 1 (A1): Corresponde a las zonas donde ocurre un único mecanismo de retrodispersión. Es "equivalente" a la imagen $(1-H)(1-A)$.

- Área 2 (A2): Compuesto por las zonas donde ocurren múltiples mecanismos de retrodispersión. "Equivalente" a la imagen H(1-A).
- Área 3 (A3) y Área 4 (A4): Corresponden a las zonas donde ocurren dos mecanismos de retrodispersión. "Equivalentes" a las imágenes (1-H)A y HA, respectivamente.

La forma de introducir la información de anisotropía en el algoritmo de clasificación consiste en la implementación de dos clasificadores de Wishart combinados y sucesivos. El primero de los clasificadores es idéntico al descrito anteriormente. Una vez que el primer clasificador ha terminado, se realiza la comparación del valor de anisotropía para todos los píxeles, lo que lleva a la definición de 16 nuevas regiones de entrenamiento usadas para inicializar el segundo clasificador de Wishart.

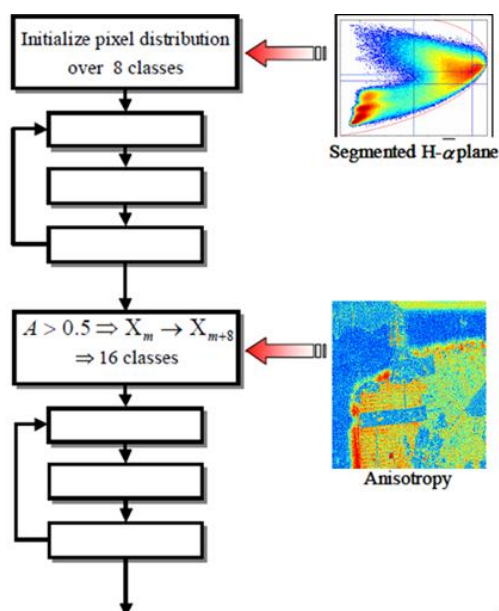


Figura 4.20. Esquema del algoritmo de clasificación de Wishart H/A/ $\underline{\alpha}$ [85].

El proceso completo de clasificación no supervisada de Wishart H/A/ $\underline{\alpha}$ queda resumido a continuación:

- 1) Realizar la descomposición de matrices para obtener los parámetros y el plano de H y $\underline{\alpha}$.
- 2) Ejecutar la primera clasificación inicial de la imagen con las 8 clases de espacio bidimensional H/ $\underline{\alpha}$.

Procesado de datos SAR del satélite Sentinel-1 para el estudio de zonas costeras.

- 3) Para cada clase, calcular el centro inicial de sus *clusters* $[Tm]^{(0)}$ (con $k =$ número de iteración y $m=1..8$).
- 4) Clasificar la imagen completa usando el proceso de medida de distancias.
- 5) Calcular $[Tm]^{(k+1)}$ para cada clase usando los píxeles clasificados del paso 4.
- 6) Se retorna al paso 4 en forma de bucle, hasta alcanzar el número de iteraciones impuesto por el usuario.
- 7) Realizar la descomposición de matrices para obtener el parámetro de anisotropía.
- 8) Ejecutar la segunda clasificación inicial de la imagen con las 16 clases en el espacio tridimensional proyectado de $H/A/\underline{\alpha}$.
- 9) Para cada clase, calcular el nuevo centro inicial de sus *clusters* $[Tm]^{(0)}$ (con $k =$ número de iteración y $m=1..16$).
- 10) Clasificar la imagen completa usando el proceso de medida de distancias.
- 11) Calcular $[Tm]^{(k+1)}$ para cada clase usando los píxeles clasificados del paso 10.
- 12) Se retorna al paso 10 en forma de bucle, hasta alcanzar el número de iteraciones impuesto por el usuario.

Para poder comparar con el anterior procesado en el que no contábamos con la información de anisotropía, se recoge en la figura 4.21 tanto la imagen de la clasificación no supervisada de Wishart usando el plano $H-\underline{\alpha}$, como la clasificación no supervisada de Wishart usando el espacio tridimensional $H-\underline{\alpha}-A$. El número de iteraciones en ambas clasificaciones es 4. El esquema de color de la primera clasificación (primera imagen a la izquierda) está constituido por los primeros 8 colores de la paleta de color que aparece en la parte inferior de la figura. La segunda imagen utiliza los 16 colores de la paleta de color. Si comparamos la imagen de la izquierda (clasificación $H-\underline{\alpha}$) con la imagen de la derecha (clasificación $H-\underline{\alpha}-A$), observaremos varias mejoras en la precisión de la clasificación y discriminación de diferentes clases. Los campos de hierba aparecen mucho más definidos y se diferencian muchos más detalles en las zonas urbanas e incluso en el océano. Algunas clases, indistinguibles en la clasificación basada en la entropía y en el promedio del ángulo α , son ahora claramente diferenciables con la introducción de la información de anisotropía. Para un mismo mecanismo de retrodispersión (misma H y $\underline{\alpha}$) es posible discriminar diferentes áreas, dado que la anisotropía incluye la interpretación de la presencia de varios tipos de mecanismos de retrodispersión. El análisis de los centros de los *clusters* en el espacio tridimensional $H-\underline{\alpha}-A$ proporciona una interpretación más precisa

de las diferentes clases de tipos de superficies detectadas. En conclusión la introducción de la información de anisotropía mejora la capacidad de discriminación entre diferentes clases cuyos *clusters* tienen su centro en la misma zona del plano $H-\underline{\alpha}$. Cabe mencionar aquí que el clasificador $H-\underline{\alpha}$ -A de Wishart clasifica píxeles de propiedades estadísticas similares, pero no proporciona ninguna información sobre la naturaleza de los mecanismos de retrodispersión asociados a cada *cluster*.

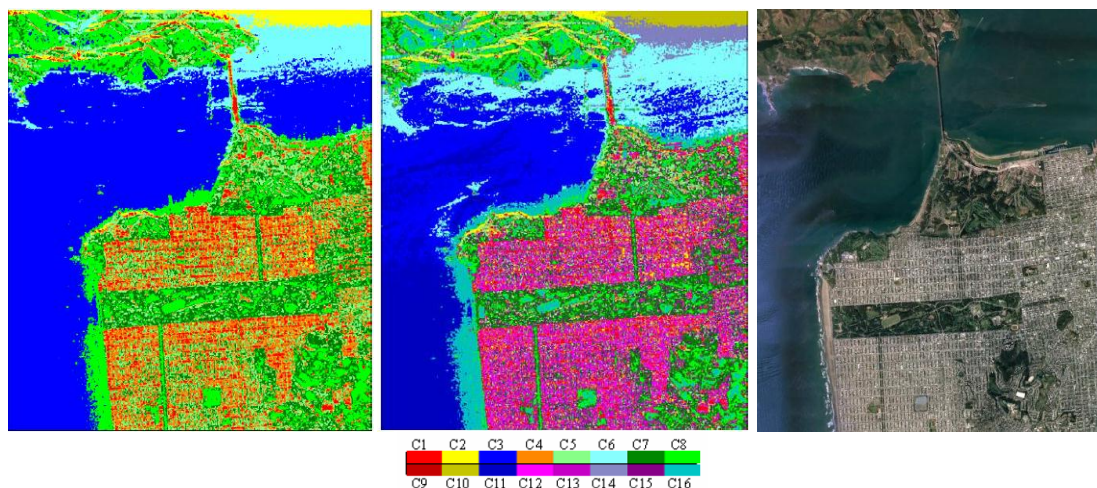


Figura 4.21. Clasificación de imágenes de forma no supervisada usando el plano $H-\underline{\alpha}$ y la distribución estadística compleja de Wishart (imagen a la izquierda) y usando el espacio tridimensional $H-\underline{\alpha}$ -A (imagen a la derecha). Abajo, paleta de color. Datos de la imagen SAR realizada por el sensor AirSAR (banda L), de la bahía de San Francisco, USA [83]. A la derecha, imagen óptica disponible en Google Earth © para la misma zona.

4.2.2.3. Clasificación supervisada *Supervised Wishart Classification*

La idea básica de toda clasificación supervisada consiste en que el usuario es quien decide y selecciona las áreas (*clusters*) iniciales de clasificación. Esto significa que previamente a la ejecución del algoritmo quedan definidas las distintas clases o categorías finales de la clasificación. Es por este motivo que a estas clases se les suele denominar "regiones de entrenamiento, o ROIs", puesto que son las clases y áreas con las que arranca el algoritmo. Las distintas áreas, seleccionadas arbitrariamente por el usuario, deben constituir un pequeño ejemplo claro de las distintas clases que se pretenden discriminar en la totalidad de la imagen. Por ejemplo, un esquema de clasificación para un área costera sería un área del mar que represente su clase, otra para la vegetación y otra para el suelo desnudo. Por este motivo, en esta etapa de la clasificación se debe ser muy

cuidadoso para escoger aquellas zonas de la imagen que mejor representen la naturaleza de su clase. Se deben evitar selecciones que contengan datos de otras clases, pues esto haría que el algoritmo de clasificación tuviese datos de partida pobremente aproximados a lo que se pretende identificar. En este tipo de técnicas existe también la posibilidad de elegir varias áreas para una misma clase, de forma que el conjunto de áreas representen una mejor aproximación de la clase en cuestión. Un ejemplo de esto último sería tratar de englobar toda la vegetación de una imagen dentro de una misma clase. En las imágenes SAR, los distintos tipos de vegetación (como por ejemplo, bosques, palmeras, césped...), por su forma, tamaño, y humedad, tienen propiedades retrodispersivas diferentes, lo que nos lleva a seleccionar varias áreas (de cada tipo de vegetación) si queremos que todas ellas queden englobadas dentro de la categoría de vegetación. Sin embargo, podríamos usar también esta información para de hecho, diferenciar entre los distintos tipos de vegetación, es decir, por ejemplo una clase para el bosque y otra para el césped. El resultado final de la clasificación consistirá en la misma imagen pero con un esquema de color que atiende a las distintas categorías creadas, es decir, cada píxel tendrá el color de la clase a la que corresponde según ha determinado el algoritmo. El número de colores posibles es equivalente al número de clases existentes. Así mismo, el número de clases a discriminar depende del usuario al inicio del algoritmo. Un ejemplo de asignación de clases y áreas puede ser el de la figura 4.22 para la imagen SAR de la bahía de San Francisco. En este ejemplo se han seleccionado tres clases con dos áreas cada una, que son: el mar, las zonas urbanas y las zonas de vegetación.

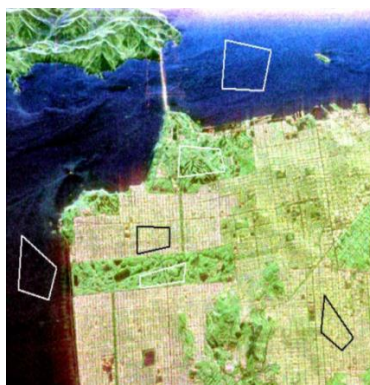


Figura 4.22. Clasificación de imágenes de forma supervisada. Selección de clases y áreas. Datos de la imagen SAR realizada por el sensor AirSAR (banda L), de la bahía de San Francisco, USA [83].

Cabe destacar aquí la selección de dos áreas de mar, pues en las dos, el mar muestra características retrodispersivas diferentes. La selección de áreas se realiza sobre

la imagen *Pauli*, o en su defecto, sobre la imagen de *SPAN* ya que, como se ha explicado en la sección 4.2.2.1., esta imagen contiene toda la información visual de los distintos canales polarimétricos.

Para obtener resultados, los algoritmos de clasificación se nutren de los distintos parámetros de información de que dispone cada píxel. Como se comentó en la sección de polarimetría en el apartado 2.1.4., el caso ideal consistiría en la disponibilidad de las cuatro polarizaciones y de varias bandas SAR. Esto nos llevaría a contar con grandes cantidades de información para cada píxel, lo que mejoraría los resultados de discriminación en los algoritmos. Sin embargo, en nuestro caso tan sólo contamos con las polarizaciones duales VV+VH o HH+HV en la banda C, por lo que no nos encontramos en el caso ideal. Aún así, existen algoritmos de clasificación que ofrecen buenos resultados para estos parámetros de entrada. En este caso, el PolSARpro proporciona un clasificador supervisado de *Wishart* similar al usado en la clasificación no supervisada del apartado 4.2.2.2. En este caso las regiones de entrenamiento son las áreas seleccionadas por el usuario en lugar de la clasificación inicial del plano H- α . De esta forma, se trabaja también con los datos de la matriz de coherencia polarimétrica de las imágenes SAR. El algoritmo es un clasificador de máxima verosimilitud (*maximum likelihood* o *ML*) basado en la distribución estadística compleja de Wishart, descrita en la ecuación 4.39.

$$P(\langle [T] \rangle / [T_m]) = \frac{L^L p |\langle [T] \rangle|^{L-p} e^{-L \text{Tr}([T_m]^{-1} \langle [T] \rangle)}}{\pi^{\frac{p(p-1)}{2}} \Gamma(L) \dots \Gamma(L-p+1) |[T_m]|^L} \quad (\text{Ec. 4.39})$$

Cada clase está caracterizada por su propia matriz de coherencia $[T_m]$, que es estimada usando las muestras de entrenamiento de la m -ésima clase: ω_m . De acuerdo al proceso de clasificación de máxima verosimilitud de Bayes [90], a la clase ω_m le es asignada una matriz promediada de coherencia $[T_m]$ si:

$$[T] \in [T_m] \text{ si } d_m([T]) < d_j([T]) \quad \forall j \neq m \quad (\text{Ec. 4.40})$$

$$\text{con } d_m([T]) = L \text{Tr}([T_m]^{-1} [T]) + L \ln(|[T_m]|) - \ln(P([T_m])) + K$$

Según la relación, si el número de promediados (L) aumenta, la probabilidad *a priori* $P([T_m])$ de la clase ω_m no juega un papel importante para la clasificación. Generalmente, se asume que sin un conocimiento previo, las diferentes $P([T_m])$ son iguales, y en este caso la

Procesado de datos SAR del satélite Sentinel-1 para el estudio de zonas costeras.

medida de las distancias no es una función del número de promediados (L). Normalmente, para implementar la clasificación, se estima la matriz de coherencia $[T_m]$ usando los píxeles entre las diferentes áreas de la clase m -ésima, y posteriormente, los datos son clasificados píxel a píxel. Para cada píxel, representado por la matriz promediada de coherencia $\langle [T] \rangle$, se calcula la distancia $d_m([T])$ a cada clase, y la clase asociada a la distancia mínima es asignada al píxel. Durante el proceso, cada matriz de coherencia de cada clase $[T_m]$ es iterativamente actualizada desde la estimación inicial. El algoritmo de este proceso iterativo, similar al método de *k-means* queda resumido en los siguientes pasos [84][90]:

- 1) Proporcionar una $[T_m]^{(0)}$ como una suposición inicial para cada clase ($k = 0$).
- 2) Clasificar la imagen completa usando el proceso de medida de distancias.
- 3) Calcular la $[T_m]^{(k+1)}$ para cada clase usando los píxeles clasificados del paso 2.
- 4) Se retorna al paso 2 en forma de bucle, hasta alcanza el número de iteraciones impuesto por el usuario.

Como se ha indicado en el paso 4, el proceso de clasificación se detiene por un criterio determinado por el usuario, que puede ser el número de iteraciones, o bien el porcentaje de relación de píxeles entre clases dentro de un *cluster*. Para esta clasificación, el algoritmo implementado en el PolSARpro nos permite seleccionar este último parámetro. En la figura 4.23 podemos observar el resultado de la clasificación supervisada para la zona de la bahía de San Francisco. De azul tenemos las zonas de mar, de verde las zonas de vegetación y, por último, de rojo, las zonas urbanas. Cabe destacar de la imagen, la clasificación de algunas zonas de agua (que en realidad son suelo desnudo o zonas de vegetación) en la zona terrestre superior. Esto es parte de un error, puesto que en esa zona de San Francisco no existen embalses o lagos, tal como se podría interpretar de la imagen clasificada las manchas azules entre zonas verdes y rojas. Además, se observa una franja roja en la parte superior derecha, implicando que toda la zona queda clasificada dentro de la categoría de zonas urbanas. Esto constituye parte de otro error puesto que en esa zona sólo existe el mar. El origen de este error se encuentra en las imágenes SAR de partida, pues si observamos la imagen *Pauli* o la imagen *SPAN* de las anteriores figuras 4.7 o 4.22 advertiremos que toda la zona está afectada por un intenso ruido en los canales VV y HH.

Por otro lado, el algoritmo implementado en la plataforma PolSARpro da como resultado la imagen clasificada y la matriz de confusión de clases. Esta matriz describe el grado de acierto, en porcentajes, de la clasificación final sobre las distintas regiones de entrenamiento iniciales. De esta forma, esta matriz sirve como medida de evaluación de la calidad de la clasificación para las distintas clases en la imagen. La matriz de confusión para la clasificación de la imagen SAR de la bahía de San Francisco se encuentra en la tabla 4.2. De los resultados de la tabla se desprende que los mayores problemas de clasificación se encuentran en la categoría de zonas urbanas, dado que el 24,61% de los píxeles del área de entrenamiento han sido clasificados como zona de vegetación. Así mismo, de la zona de vegetación, un 5,65% ha sido clasificado como zona urbana y un 0,68% como zona de mar.



Figura 4.23. Clasificación de imágenes de forma supervisada. Resultado final con las clases de mar (azul), zonas de vegetación (verde) y zonas urbanas (rojo). Datos de la imagen SAR realizada por el sensor AirSAR (banda L), de la bahía de San Francisco, USA [83]. A la derecha, imagen óptica disponible en Google Earth © para la misma zona.

	Mar	Zonas urbanas	Zonas de vegetación
Mar	99,96%	0,00%	0,04%
Zonas urbanas	0,00%	75,39%	24,61%
Zonas de vegetación	0,68%	5,65%	93,68%

Tabla 4.2. Matriz de confusión para las clases de la clasificación supervisada de Wishart. Datos de la imagen SAR realizada por el sensor AirSAR (banda L), de la bahía de San Francisco, USA.

4.3. Detección de vertidos de petróleo en el mar

Una variedad de características oceánicas puede ser vista por un sensor radar. Algunas de estas características apreciables en la imagen SAR son producidas puramente como reacción a las condiciones atmosféricas, mientras que otras son debidas a las

Procesado de datos SAR del satélite Sentinel-1 para el estudio de zonas costeras.

influencias oceánicas, como las debidas a la circulación, olas internas y películas naturales. Sin embargo, algunas son debidas a las actividades del hombre, como las manchas de petróleo, que son las que vamos a tratar en este apartado.

Hay varias ventajas de usar datos SAR de satélites para estudiar los mares. Un factor importante es la capacidad de trabajar en cualquier condición atmosférica como se ha visto en el apartado 2.1.1. Al mismo tiempo, los satélites tienen acceso a océanos que a menudo presentan un ambiente hostil, como cuando hay tormentas. Aunque los datos del satélite tienen una resolución espacial y temporal más baja que la conseguida con aviones y boyas, son relativamente más baratos porque ofrecen una cobertura más extensa que los instrumentos convencionales. Por este motivo, en este apartado de la memoria se tratarán los conceptos y aspectos más importantes para conocer la forma en la que un sensor SAR es capaz de detectar manchas de petróleo en el mar. Así mismo, se explicará la herramienta implementada en el software SNAP 3.0 para su detección automática.

4.3.1. Problemática de los vertidos de hidrocarburos al mar

Un estudio de la *National Academy of Sciences* de EEUU [91] reveló que cada año se vierten a los océanos aproximadamente unas tres millones de toneladas de petróleo. La procedencia de estos vertidos se calculó que era de:

- Vertidos desde instalaciones industriales a los ríos: 35%
- Residuos de petroleros y otros buques que limpian sus depósitos: 45%
- Causas naturales (yacimientos que afloran espontáneamente): 13%
- Accidentes de barcos: 5%
- Explotaciones petrolíferas marinas: 2%



Figura 4.24. En la imagen de la izquierda se observa un barco lavando ilegalmente sus tanques mientras que la imagen de la derecha muestra el vertido del accidente del petrolero *Prestige* [91].

De esta estadística se desprende que la inmensa mayoría de los vertidos de petróleo provienen de pequeñas acciones deliberadas, y por lo tanto evitables, como las de lavado de tanques y que pasan completamente desapercibidas a la opinión pública y a los medios de comunicación, y no de los accidentes de petroleros con más impacto.

El lavado de tanques de los petroleros es una de las prácticas más dañinas y que más contaminación de petróleo produce. Estos grandes buques hacen el lavado en los viajes de regreso, dejando grandes manchas de petróleo por todas las rutas marítimas que usan. La operación consiste en llenar de agua los tanques y evacuarla después. Esta agua lleva consigo las toneladas de restos de hidrocarburos que quedan alojadas en el tanque una vez vaciada la carga. En un barco de unas 100.000 toneladas, estos restos serían aproximadamente de unas 500 toneladas. En los últimos años, una legislación más exigente y un sistema de vigilancia y denuncias más eficientes, intentan reducir estas prácticas. En 1983 entró en vigor una normativa internacional limitando el vertido operacional de hidrocarburos desde barcos y estableciendo zonas especiales donde estos vertidos están totalmente prohibidos (como el caso del Mar Mediterráneo).

La forma en que un *oil spill* (mancha de aceite o petróleo) se extiende determina su efecto en el medioambiente. La mayoría de los aceites tienden a extenderse horizontalmente en una superficie suave y resbaladiza en la superficie del agua, llamada *slick*. Los factores que afectan la habilidad de un *oil spill* para extenderse incluyen la tensión superficial, la gravedad específica y la viscosidad [92].

- Tensión superficial: Mide la atracción entre las moléculas de la superficie de un líquido. Cuanto mayor es la tensión superficial del aceite, más probable será que la mancha permanezca en el lugar. Si es baja, el aceite se extenderá incluso sin ayuda del viento y de las corrientes del agua. Debido a que el aumento de temperatura puede reducir la tensión superficial, es más probable que se extienda el aceite en aguas cálidas que en aguas muy frías.
- Gravedad específica: Mide la densidad de una sustancia comparada con la densidad del agua. Ya que la mayoría de los aceites son más ligeros que el agua, permanecen en una capa lisa encima de ella. Sin embargo, la gravedad específica de un *oil spill* se puede incrementar si las sustancias ligeras que contiene se evaporan.

- Viscosidad: Mide la resistencia de un líquido a las corrientes. Cuanto mayor es la viscosidad de un aceite, mayor será su tendencia a permanecer en un mismo sitio.

El comportamiento del petróleo vertido al mar depende del origen del crudo, ya que puede ser de muchas formas según su grado de refino, desde fuel pesado hasta gasolina. También depende del ambiente donde es vertido: temperatura del aire y del agua, condiciones de viento y olas. Las principales características de las transformaciones del crudo son su dinamismo, especialmente en los primeros momentos, y la cercana interacción de los mecanismos físicos, químicos y biológicos de dispersión y degradación de los componentes del aceite hasta su completa desaparición como sustancias originales. En general, horas después de un vertido al mar se producen los siguientes procesos:

- 1) Propagación: El petróleo se extiende rápidamente sobre un área muy extensa, con espesores de sólo décimas de micrómetro. De esta forma se ha comprobado que tan sólo 1 m³ de petróleo puede llegar a formar, en hora y media, una mancha de 100 m de diámetro y 0,1 mm de espesor. Mientras la mancha se hace fina, se desintegra en fragmentos separados, formando manchas largas y estrechas con la misma orientación que el viento y que se extienden sobre áreas mayores y más distantes. Estas manchas son las denominadas *oil spills*.
- 2) Evaporación y fotooxidación: La propagación causa que las fracciones más volátiles del crudo, entre uno y dos tercios, desaparezcan rápidamente, quedando en el agua sólo las partes más pesadas. El petróleo evaporado es descompuesto por fotooxidación en la atmósfera.
- 3) Sedimentación: Otra parte se disuelve en el agua, siendo ésta la más peligrosa desde el punto de vista de la contaminación. Y otra pequeña parte de componentes pesados del petróleo se hunde y contamina lenta pero implacablemente los fondos marinos.
- 4) Emulsificación: La acción de las olas mezcla el agua con el crudo restante, formando una emulsión gelatinosa pesada y pegajosa, llamada "*mousse*", que se convierte en bolas de alquitrán densas, semisólidas, con aspecto asfáltico que quedan a la deriva y llegan lentamente a las playas (el alquitrán), donde se mezclan con los materiales arenosos costeros. Se ha calculado que en el centro del Atlántico hay unas 86.000 toneladas de este material, principalmente en el mar de Sargazos que tiene mucha capacidad para recoger este tipo de material porque las

algas, muy abundantes en esa zona, quedan enganchadas al alquitrán. Más cambios suceden bajo el impacto combinado de factores meteorológicos e hidrológicos y que dependen principalmente del poder y dirección del viento, olas y corrientes.



Figura 4.25. En la imagen de la izquierda se observan masas de alquitrán en suelo costero. En el centro, efectos de la marea negra en el ecosistema. A la derecha, agua con la denominada "*mousse*" [92].

4.3.2. Estudio del océano con el SAR

El radar puede usarse para estudiar ciertos aspectos del océano, incluyendo las olas internas, las corrientes oceánicas, los frentes, remolinos y estructuras relacionadas con la topografía del fondo. Después de emitir la onda radar, el instrumento recibe una señal retrodispersada que está influenciada por la altura de la ola, su longitud, y la velocidad y dirección del viento.

Las longitudes de olas del mar cortas (entre 1 y 30 cm) que resultan de los efectos de resonancia de Bragg, son detectadas por el sensor SAR. Estas olas se llaman capilares u olas de gravedad cortas, y el viento es su responsable. Las olas capilares más pequeñas de menos de 1 cm se crean por la tensión superficial, mientras que las mayores (1-1,5 m) son resultado de la tensión y gravedad de la Tierra. Ambas están influenciadas por el viento, las corrientes y las olas. Mientras las longitudes cortas de las olas son las que más contribuyen a la retrodispersión, las olas más largas también pueden detectarse, en parte porque pueden modificar a las olas más cortas. Esto es debido a que la dispersión de Bragg ocurre localmente en las caras de las olas largas, que son indirectamente visualizadas por su modulación hidrodinámica de la energía de las olas cortas. Véase el espectro de olas en el océano, en la figura 4.26 y la tabla 4.3 [93].

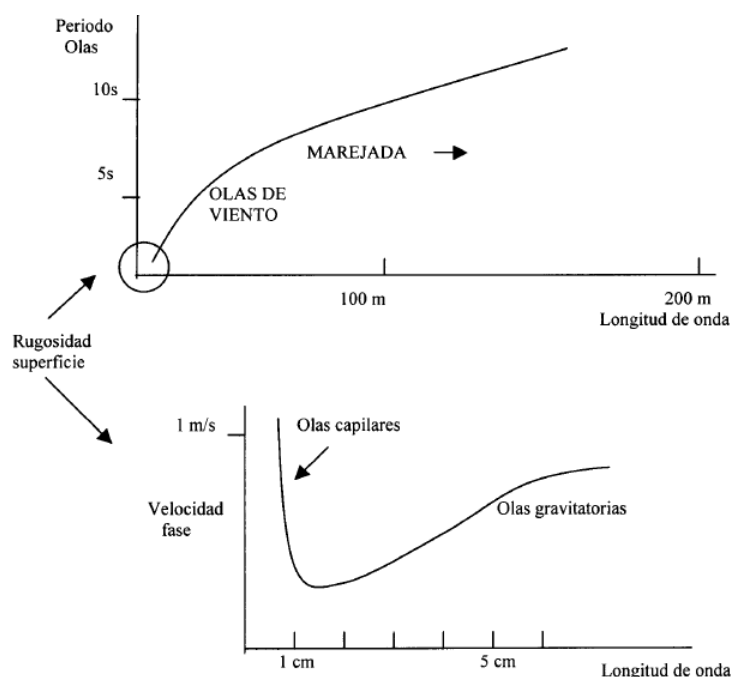


Figura 4.26. Espectro de olas en el océano [93].

	Olas capilares	Olas de viento	Olas de marejada
Longitud de onda	1-50 mm	5 cm - 100 m	100 - 500 m
Periodo	< 1 seg	1 - 10 seg	10 -20 seg
Altura típica	Pocos mm	5 mm -10 m	10 - 20 m
Distancia viajada	10 m	100 Km	1.000 Km
Tiempo de viaje	10 seg	1 hora	10 horas

Tabla 4.3. Tabla clasificatoria de tipos de olas [93].

La retrodispersión fuerte en la imagen radar se relaciona aproximadamente con los senos de las olas, mientras que la retrodispersión pequeña corresponde a los picos. Esto es debido a que las olas cortas no están distribuidas uniformemente sobre las olas largas. Cuando las pendientes de las olas largas están de cara al radar, hay más retrodispersión. Por lo tanto, una serie de olas de marejada paralelas viajando en la dirección de alcance (a o hacia el radar), aparecerían como líneas paralelas brillantes y oscuras. Los campos de olas viajando en la dirección de *azimuth* no afectan a la retrodispersión.

La señal retrodispersada depende también de los parámetros del radar. Las bandas X y C son sensibles a olas cortas en el rango de centímetros, mientras que la banda L es sensible al rango de decímetros. La polarización vertical produce más retrodispersión que la polarización horizontal, aunque esto es menor en mares encrespados. Además de esto,

el ángulo de incidencia del radar es el factor más importante. Los ángulos más pequeños proporcionan la información más útil del estado del mar y de la velocidad del viento. A medida que el ángulo aumenta, el resultado es dispersión difusa, que reduce la retrodispersión. Por el contrario, la detección de barcos es más fácil con ángulos mayores.

4.3.3. Visualización de vertidos de petróleo en el mar en imágenes SAR

Aunque la principal fuente de rugosidad superficial en el mar es el viento, y la variabilidad de esta rugosidad es principalmente una medida de la variabilidad del viento y del campo de ondas superficiales, las propiedades físico-químicas de la superficie del mar también afectan las respuestas de las ondas ante el viento. Los patrones de rugosidad superficial, por lo tanto, pueden deberse a la presencia de películas y derrames de petróleo, aceites o líquidos orgánicos, e incluso material vegetal flotante [94].

Las películas superficiales no están distribuidas aleatoriamente en la superficie del mar, sino que están organizadas en patrones coherentes, generalmente relacionados al campo de velocidades superficiales. Si existe una convergencia superficial, entonces el agua superficial se hunde, quedando el material flotante concentrado en la superficie, a lo largo de la convergencia y las películas se hacen cada vez más gruesas. De la misma forma, en las divergencias existe un debilitamiento de la presencia de películas o manchas.

Las olas de gravedad y de capilaridad son amortiguadas por la elasticidad dinámica de la superficie del agua, esto es, por los cambios en tensión superficial que ocurren cuando la superficie es estirada o comprimida. Esto tiene el efecto de extraer energía de aquellas olas que dependen parcial o totalmente de la tensión superficial para obtener la fuerza recuperadora necesaria para la propagación de la onda. Si existe una película superficial, la tensión superficial será mayor que en la ausencia de dicha película, y la compresión y estirado de la película debido a la presencia de olas provee la elasticidad dinámica que aumenta la amortiguación de la onda. Por lo tanto **las olas capilares y de gravedad son siempre amortiguadas por la presencia de películas superficiales, reduciéndose la retrodispersión de radar sobre esas áreas**. Estas películas o manchas aceitosas se muestran como áreas oscuras en las imágenes SAR. En la figura 4.27 se puede ver el vertido ocasionado por el petrolero *Prestige* frente a las costas de Galicia en Noviembre del año 2002. Cabe notar el claro contraste entre las áreas de aguas en calma

Procesado de datos SAR del satélite Sentinel-1 para el estudio de zonas costeras.

causadas por el efecto amortiguante del vertido de petróleo (áreas en negro) y la superficie rugosa marina que las rodea. En la imagen, se puede localizar el buque a unos 100 kms fuera de la costa, acompañado de otros barcos (identificados como pequeños puntos blancos a su alrededor). La gran mancha de fuel es claramente visible saliendo del barco afectado y dirigiéndose hacia la costa noroeste española [95].

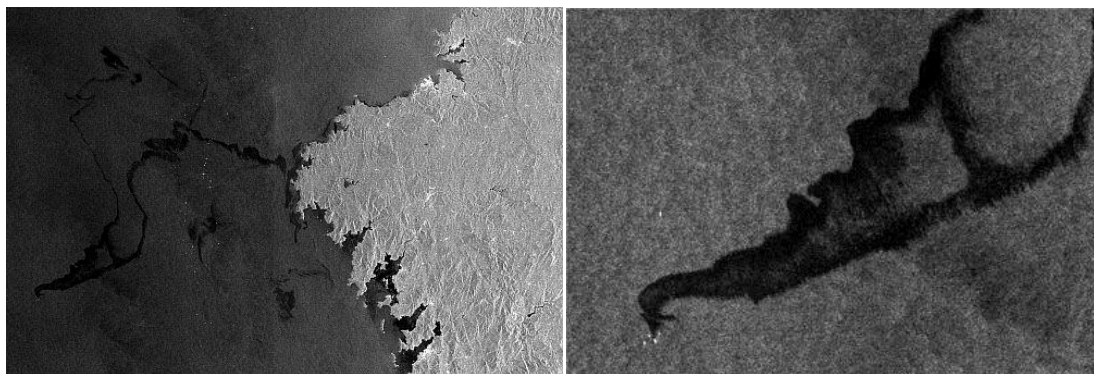


Figura 4.27. A la izquierda, vertido de petróleo del petrolero *Prestige* frente a las costas gallegas en Noviembre de 2002. A la derecha, imagen ampliada en la zona del hundimiento. Imagen del sensor ASAR del satélite ENVISAT (banda C) de la ESA. Imagen del 17 de Noviembre de 2002 [95].

Sin embargo, las manchas oscuras en la superficie del océano no siempre están originadas por películas de petróleo. Pueden estar originadas, por ejemplo, por películas naturales producidas por plancton o pescado, que también amortiguan fuertemente las olas superficiales; por vientos lentos que a menudo se encuentran a refugio de islas o de montañas costeras; por atenuaciones debidas a la lluvia; por líneas fractales oscuras a lo largo de los límites de las corrientes a baja velocidad del viento; y por zonas de agua fría, como las que se encuentran por ejemplo en áreas de afloramientos que cambian la estabilidad en la capa de contacto aire-mar y por ello la habilidad del viento de generar ondas marinas a pequeña escala. E incluso si son manchas de petróleo, pueden ser debidas a filtraciones naturales de crudo desde el fondo marino y no producidas por el hombre.

Las condiciones atmosféricas son determinantes para la visualización de películas superficiales. A velocidades de viento por debajo de 2-3 m/s, la superficie del mar está en calma, plana, y la retrodispersión es baja, por lo tanto aparecerá todo oscuro, imposibilitando la visualización de ninguna mancha. A velocidades altas del viento, mayores de 11 m/s, hay más retrodispersión especular, y las manchas de petróleo desaparecen de la superficie ya que están mojadas por las olas que rompen, imposibilitando también su detección. En la figura 4.28 pueden observarse las distintas

situaciones generales de la superficie del mar según las condiciones de viento, para la detección de petróleo con imágenes SAR [96].

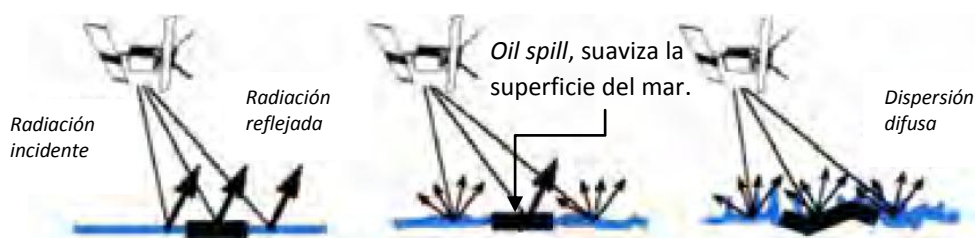


Figura 4.28. Esquema gráfico de la situación de la superficie del mar para la detección de petróleo con imágenes SAR.

En la imagen de la izquierda de la figura 4.28, la superficie del mar es aproximadamente lisa, ya que hay muy poco viento (< 2 m/s). La radiación incidente se refleja alejándose del sensor SAR. La imagen SAR resultante para esa zona tendrá tonos oscuros en general. En la imagen central, la superficie del mar tiene cierto grado de rugosidad dado que el viento tiene una velocidad mayor a 2 m/s pero menor a 11 m/s. En estas condiciones, el sensor SAR es perfectamente capaz de detectar la baja retrodispersión de la zona de la mancha, dado que el agua a su alrededor contiene pequeñas olas producidas por el viento. En la imagen de la derecha, la gran velocidad del viento ocasiona que exista una gran retrodispersión especular sobre la superficie del mar, dado que existe un gran nivel de rugosidad. Las zonas con petróleo son "sumergidas" continuamente por el agua salpicada de las olas que rompen a su alrededor. También, a esta velocidad del viento, las propias zonas con manchas, presentarán patrones rugosos similares a los del agua a su alrededor.

Cabe notar aquí que los rasgos de las manchas son más pronunciados para la banda C usada en el Sentinel-1 que en la banda-L, usada por ejemplo en el SEASAT SAR, debido a que las olas de Bragg están sobre los 5-7 cm, y son más fácilmente amortiguadas por las manchas superficiales que las de la banda L, que están sobre los 30 cm.

A modo de conclusiones, los siguientes epígrafes enmarcan las situaciones y conceptos que posibilitan la correcta interpretación y la capacidad para detectar manchas de petróleo a partir de imágenes SAR:

Procesado de datos SAR del satélite Sentinel-1 para el estudio de zonas costeras.

- Para la detección de manchas de petróleo en imágenes SAR, el mecanismo principal es el viento, las corrientes marinas son secundarias. La retrodispersión depende principalmente del grado de rugosidad de la superficie marina.
- Las olas en la superficie del mar están principalmente inducidas por efectos atmosféricos y balanceadas por la tensión superficial.
- Las películas aceitosas tienen gran viscosidad, lo que hace que la tensión superficial aumente. Las olas de gravedad son amortiguadas.
- La detección de manchas de petróleo es sólo posible cuando la velocidad del viento está entre 2-3 m/s y 10-11 m/s.
- No todas las manchas oscuras detectadas en una imagen SAR son debidas a manchas de petróleo, se pueden confundir con fenómenos atmosféricos, marinos o con filtraciones naturales.

4.3.4. Caso de estudio: vertido del pesquero *Oleg Naydenov* en Canarias

El 11 de Abril de 2015 se producía un incendio en la sala de máquinas del pesquero ruso *Oleg Naydenov*, anclado en el Puerto de La Luz y de Las Palmas de Gran Canaria. El incendio se había producido justo horas antes de salir a faenar, con los tanques cargados de combustible. A pesar de la ingente cantidad de agua arrojada sobre él, resultó imposible apagar el incendio. Ante el temor de que su incendio se propagara a otras naves y ante el riesgo de que se hundiera en el puerto, la autoridad marítima junto con el gobierno regional decidieron trasladarlo mar adentro. El barco fue alejado primero al sur de Fuerteventura, a unos 37 kilómetros de la punta de Jandía, y después fue remolcado progresivamente más cerca del sur de Gran Canaria. El martes 14 de Abril el buque ya no presentaba fuego en su cubierta, de su interior salía cada vez menos humo y se mantenía a flote, aunque notablemente escorado hacia una banda. Finalmente, a las 22:45 horas (hora local) del mismo día, el buque se hundía frente a las costas del sur de Gran Canaria a unos 27 kilómetros de distancia y a 2.400 metros de profundidad. En ese momento, el barco (de más de 100 metros de eslora) contenía 1.400 toneladas de fuel, 30 de diésel y 60 de aceite, una cantidad habitual para pesqueros de gran tamaño [97][98][99]. Días más tarde, el fuel de sus bodegas salía al exterior y alcanzaba las costas del sur de Gran Canaria. Véase las figuras 4.29 a 4.31.



Figura 4.29. A la izquierda, los bomberos intentan apagar el incendio del *Oleg Naydenov* en el Puerto de La Luz y de Las Palmas. A la derecha, el *Oleg Naydenov*, devorado por las llamas, es alejado de las cercanías del puerto [97] [98] [99].

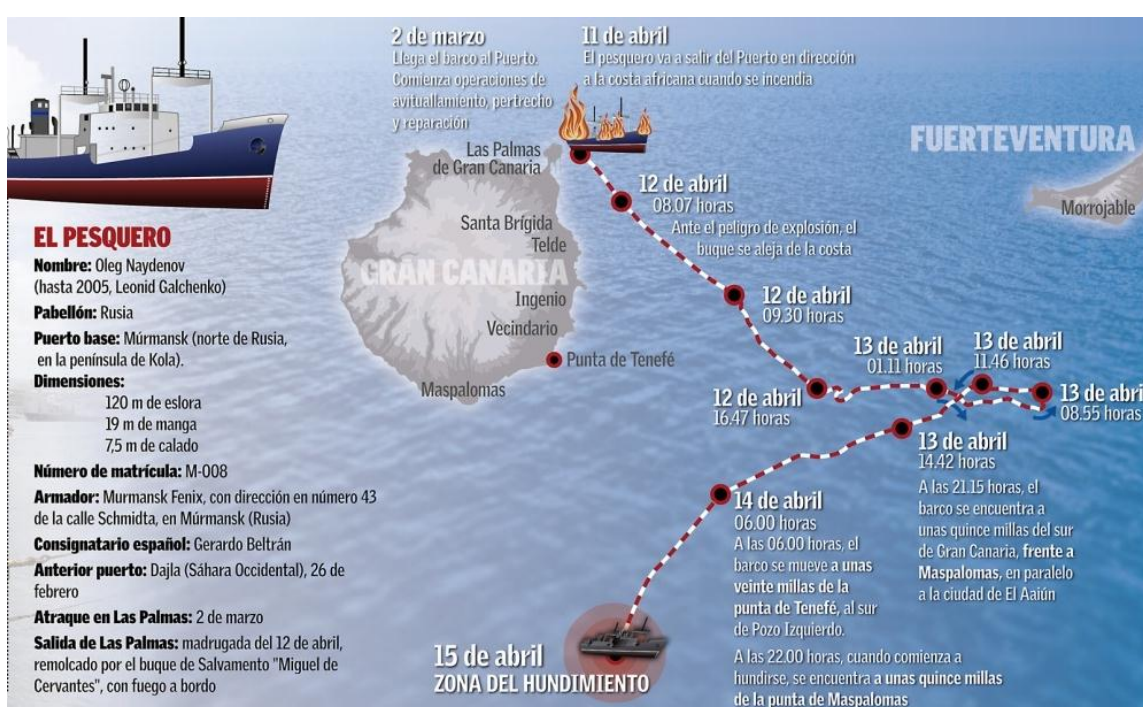


Figura 4.30. Gráfico espacio-temporal de sucesos, durante el desastre del *Oleg Naydenov* [99].

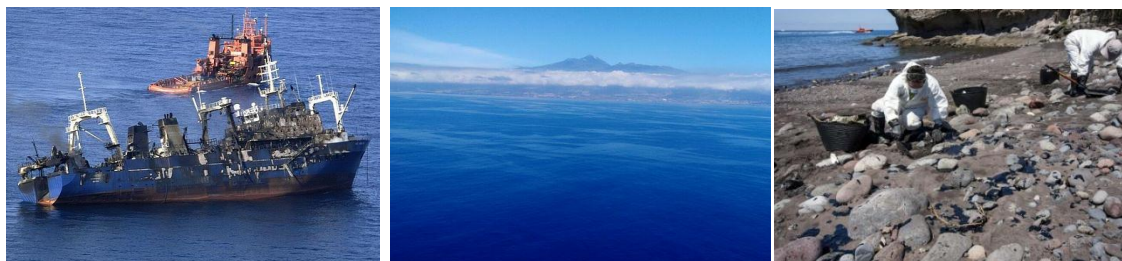


Figura 4.31. A la izquierda el *Oleg Naydenov* frente a las costas del sur de Gran Canaria el día de su hundimiento. En el centro, manchas de fuel en la superficie del mar al sur de Gran Canaria. A la derecha, operarios del cabildo insular limpian bolas de alquitrán en las playas de la costa sur de Gran Canaria [99][100].

Procesado de datos SAR del satélite Sentinel-1 para el estudio de zonas costeras.

Dada la disponibilidad de datos del satélite Sentinel-1A, se descargó y procesó un producto GRDH Sentinel-1A captado sobre las Islas Canarias el día 22 de Abril de 2015, días después del hundimiento. Para esta fecha, el alquitrán hacía aparición en las costas del sur de Gran Canaria [100]. El resultado del procesado no daba lugar a dudas, el vertido era visible y se podían conocer sus dimensiones y su orientación. Lo más interesante de la imagen era que demostraba claramente que el barco continuaba enviando fuel a la superficie para la fecha indicada. La imagen procesada se encuentra en la figura 4.32. Esta imagen fue publicada en varios medios de comunicación, probando, una vez más, la eficacia de la tecnología SAR para la detección y geolocalización de este tipo de desastres marinos [101].

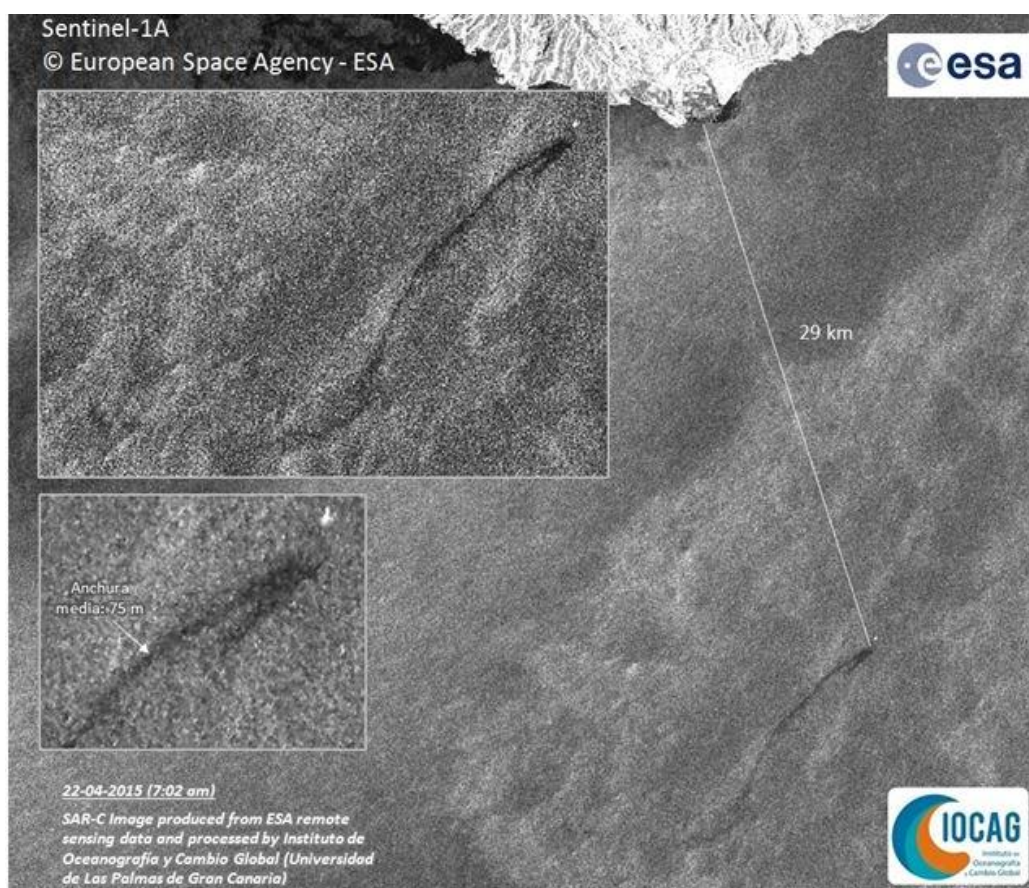


Figura 4.32. Imagen del Sentinel-1A (©ESA) procesada por el Instituto de Oceanografía y Cambio Global (IOCGAG, ULPGC) [101].

4.3.5. Herramienta para la detección de vertidos en la plataforma SNAP

La herramienta disponible en el software SNAP para la detección de vertidos de petróleo en el mar utiliza un algoritmo basado en técnicas de umbralizado [102]. Aunque

existen variedad de algoritmos, técnicas y estudios para la detección de los mismos en tecnología SAR (véase el Proyecto Final de Carrera: "Detección de vertidos de petróleo en el mar mediante imágenes SAR: Estudio de un sistema operacional y desarrollo de una herramienta software" [96]), en este proyecto se ha probado la herramienta disponible en la aplicación SNAP de la ESA. El algoritmo tiene como parámetros de entrada la imagen SAR (producto GRDH) ya calibrada y filtrada del ruido de *Speckle*. Por otro lado, el usuario puede configurar tres parámetros dentro del algoritmo: El tamaño de la ventana (*Background Window Size*), el factor de umbralizado K (dB) (*Threshold Shift*), y el tamaño mínimo de *cluster* (km^2) (*Minimum Cluster Size*). El algoritmo está basado en la filosofía del documento "*Algorithms for oil spill detection in Radarsat and ENVISAT SAR images*" [102]. El funcionamiento básico y resumido de la herramienta es el siguiente:

- 1) **Pre-procesado:** Una vez tenemos nuestra imagen calibrada y filtrada, se crea una máscara de tierra usando los datos DEM descargados por la aplicación (automáticamente) SNAP para la zona de estudio del producto. Esta máscara "desactiva" los píxeles de la zona de tierra de la imagen, de forma que la zona de estudio se limita a las zonas de mar.
- 2) **Algoritmo de umbralizado adaptativo:** Este algoritmo calcula el nivel medio de la intensidad de retrodispersión dentro de una ventana arbitraria. El umbral de detección de manchas se fija K decibelios por debajo de la media local de retrodispersión calculada. Los píxeles que se encuentren en la ventana, cuyo valor de intensidad sea menor al umbral fijado, son considerados como píxeles pertenecientes a una mancha. La ventana se desplaza por toda la imagen calculando las medias y aplicando el umbralizado.
- 3) **Discriminación:** Primero, los píxeles detectados contiguos son agrupados en un *cluster* individual. Posteriormente, los *clusters* con tamaños menores al tamaño mínimo de *cluster* (*Minimum Cluster Size*) son eliminados.
- 4) **Imagen de salida:** El algoritmo tiene como salida una máscara de bits (una imagen mapa de bits) a modo de banda separada, que indica las zonas donde se ha detectado vertido.

4.4. Detección de nieve y zonas inundadas

Dada la alta disponibilidad de datos SAR del satélite Sentinel-1 y sus diversas aplicaciones potenciales, en este apartado se ha pretendido procesar estos datos para la teledetección de algunos eventos meteorológicos sucedidos en el archipiélago canario durante la realización de este proyecto final de carrera. En concreto, en este punto se fijaron como objetivos la teledetección de fuertes lluvias y zonas inundadas durante la tormenta ocurrida en el municipio grancanario de Telde en Octubre de 2015, y también, la teledetección de la nieve caída sobre las cumbres de las islas de Tenerife y Gran Canaria durante el mes de Febrero de 2016. Trabajando en estrecha colaboración con la Universidad de Alicante y su Departamento de Física, Ingeniería de Sistemas y Teoría de la Señal, el Doctor Ingeniero de Telecomunicación, Juan Manuel López Sánchez, propuso un algoritmo de detección de cambios en imágenes SAR para la teledetección de nieve y/o zonas inundadas [110][111][112]. En este apartado se resumen de forma breve los procesados necesarios para la teledetección de los distintos objetivos así como los casos de estudio.

4.4.1. Hielo y nieve en imágenes SAR

La teledetección y monitoreo de nieve ha sido uno de los temas de investigación que ha visto su mayor avance en las últimas tres décadas. El monitoreo de la cantidad y la distribución de la nieve permite y ayuda al estudio de la climatología, mejora la previsión meteorológica, así como la predicción de inundaciones debidas al deshielo. La importancia de la teledetección de nieve y de sus parámetros, como la cantidad de agua equivalente a la nieve (*Snow Water Equivalent, SWE*), ha llevado a la comunidad científica a explorar las posibilidades de las técnicas de observación terrestre para la estimación cuantitativa de la nieve. La reciente disponibilidad de datos satélite SAR con capacidades polarimétricas ha abierto las puertas a este campo de investigación.

La retrodispersión de la señal SAR en las capas de nieve es el resultado de la contribución de diferentes mecanismos de retrodispersión: la superficie de tierra bajo la nieve, la capa de nieve (retrodispersión volumétrica), la interfaz aire-nieve, y las múltiples contribuciones de los dobles y triples rebotes entre la capa de nieve y el suelo desnudo.

Así mismo, la retrodispersión de la capa de nieve depende de sus características, que son: densidad (relacionada a la constante dieléctrica), el contenido de agua, la temperatura (relacionada al contenido de agua), y la estructura cristalina de partículas de hielo presentes en la capa de nieve. De esta forma, la nieve está compuesta de tres elementos: hielo, aire y agua. La variación del porcentaje de estos tres componentes, determina las características de la capa de nieve [103].

El análisis de las capas de nieve con imágenes SAR se realiza mediante un estudio de aproximaciones estadísticas. Como se explicó en el apartado 4.2.2.2. las matrices de covarianza y coherencia ofrecen información estadística del vector de retrodispersión de *Pauli*. Los elementos de este vector pueden ser interpretados físicamente de acuerdo al mecanismo de retrodispersión presente en la superficie de estudio.

En la banda C, la nieve produce bajos niveles de retrodispersión con respecto a la misma zona sin nieve. Esto se produce en cualquier configuración polarimétrica y es debido a la retrodispersión volumétrica de la nieve, que produce una dispersión isotrópica de energía, lo que hace que el sensor SAR capte menos energía a la vuelta [104]. De esta forma, se puede esperar que una imagen SAR presente mayores brillos en una zona sin nieve, que el mismo lugar cuando sí que hay nieve. Esto nos lleva a la conclusión de abordar la teledetección cualitativa de las capas de nieve mediante comparación de imágenes. Por este motivo, se ha optado por realizar tests sobre un algoritmo de *Wishart* de detección de cambios en imágenes SAR.

4.4.1.1. Caso de estudio: temporal de nieve en Canarias, Febrero de 2016

Durante los días transcurridos entre el 19 y el 22 de Febrero de 2016, una ola de frío polar produjo intensas nevadas en las cumbres de las Islas Canarias. La Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) informó de la previsión de caída de nieve para cotas superiores a 1800-2000 metros. Los cabildos de las islas de La Palma, Tenerife y Gran Canaria mantuvieron durante esos días la alerta de nivel amarillo por fenómenos meteorológicos adversos así como el corte y cierre de diversas carreteras como medidas de precaución. El resultado fue una gruesa capa de nieve que, en alguno puntos, alcanzó el metro de altura, aunque la mayor parte tenía un grosor de pocos centímetros [105]. En las figuras 4.33 y 4.34 se pueden observar imágenes de las nevadas sobre las islas de Gran Canaria y

Procesado de datos SAR del satélite Sentinel-1 para el estudio de zonas costeras.

Tenerife. En el capítulo 5 serán presentados los resultados del procesado de teledetección de nieve para este caso de estudio.



Figura 4.33. Imágenes de las cumbres de la isla de Gran Canaria posteriores a la nevada [106].

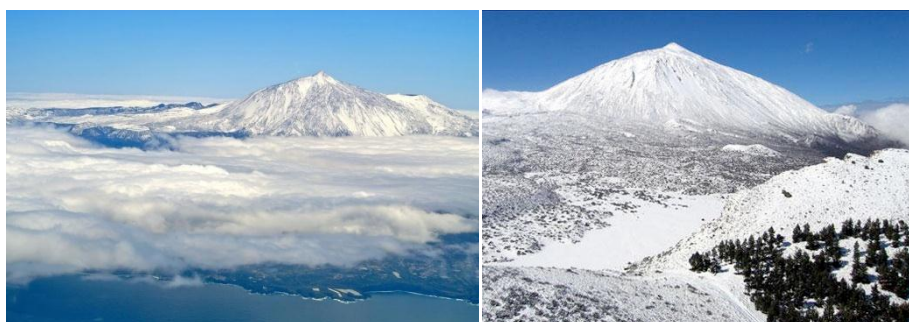


Figura 4.34. Imágenes de las cumbres de la isla de Tenerife posteriores a la nevada [107].

4.4.2. Zonas inundadas en imágenes SAR

Una de las mayores ventajas de usar imágenes SAR es la facilidad con la que se pueden diferenciar zonas de agua de otras clases, dado el alto contraste que existe. Las zonas de agua actúan como un espejo superficial reflector, por lo que su respuesta hacia el sensor es baja y por ello aparecen como zonas oscuras (bajas en brillo). La superficie terrestre en general, refleja una mayor cantidad de energía debido al grado de "rugosidad" que presentan los distintos materiales. Por ejemplo, en el caso de suelos desnudos con algunas zonas inundadas se produce un gran contraste entre agua y tierra, lo que facilita la tarea de detección de zonas inundadas. Así mismo las bandas C y L ofrecen resultados para inundaciones en zonas de vegetación alta, siendo la polarización HH mejor que la VV. De

esta forma, los sensores SAR resultan idóneos para la detección de inundaciones de áreas extensas, dado que la firma de retrodispersión del agua es fácilmente diferenciable del resto de la imagen [108].

Tradicionalmente, la detección de zonas de agua en imágenes SAR se ha llevado a cabo mediante la ejecución de técnicas de umbralizado en la intensidad de la imagen. Sin embargo, las técnicas de umbralizado ofrecen resultados pobres en la separación de agua del resto de clases debido a, por ejemplo, los diferentes ángulos de incidencia en la misma imagen. Para la detección de agua se ha comprobado que cuanto mayor es el ángulo de incidencia, mayor contraste existe entre el agua y el resto de las superficies terreras. Un método más apropiado sería la detección de cambios en varias imágenes. A través de la detección de cambios es posible saber el estado de varios fenómenos visualizando una misma zona en momentos diferentes. Por este motivo, para la teledetección de lluvias se ha optado por realizar tests sobre un algoritmo de *Wishart* de detección de cambios en imágenes SAR

4.4.2.1. Caso de estudio: temporal de lluvia en el municipio grancanario de Telde, Octubre de 2015

Durante la tarde del día 23 de Octubre de 2015, el municipio de Telde en la isla de Gran Canaria fue sacudido por una intensa borrasca que descargó una fuerte lluvia durante toda la tarde. De esta forma, el municipio costero grancanario quedaba sumergido entre una capa de agua y barro. El Cabildo de Gran Canaria elevó el nivel de emergencia 1, movilizando a 56 efectivos de la Unidad Militar de Emergencia (UME), a 30 bomberos del Consorcio y a otros 13 miembros de la unidad de presas, que se sumó al desbordado operativo desplegado por los servicios municipales. Los datos cifraron 312 incidencias, entre inundaciones, cortes eléctricos y accidentes de tráfico, además de rescatarse a 5 personas en peligro del interior de sus vehículos. El epicentro de la borrasca quedó registrado en el barrio costero de La Garita donde los datos recogidos apuntaban 111 l/m^2 en cuatro horas. Este fuerte aguacero se sumaba al que cayó un día antes en la misma zona, multiplicando de esta forma las consecuencias [109]. En las figuras 4.35 y 4.36 se pueden observar varias imágenes de las lluvias y sus efectos sobre el municipio de Telde. En el capítulo 5 serán presentados los resultados del procesado de teledetección de lluvias para este caso de estudio.

Procesado de datos SAR del satélite Sentinel-1 para el estudio de zonas costeras.



Figura 4.35. Imágenes de la lluvia el 23 de Octubre de 2015 sobre el municipio de Telde, Gran Canaria [109].



Figura 4.36. Imágenes de los efectos posteriores a la lluvia sobre el municipio de Telde, Gran Canaria. A la izquierda, vista aérea de la playa de La Garita. En el centro, imagen del estado de la playa de la Garita. En la derecha, estado de la entrada a la playa de Salinetas [109].

4.4.3. Detector de cambios de imágenes SAR

Para la teledetección de la nieve y las zonas inundadas por la lluvia se propuso, como ya se ha comentado, un detector de cambios basado en el algoritmo de *Wishart* y las matrices de covarianza polarimétricas. El algoritmo, propuesto por el profesor Juan Manuel López Sánchez de la Universidad de Alicante, se fundamenta en tres artículos publicados en IEEE para la detección de cambios en imágenes SAR [110][111][112]. De estos artículos el más importante es el de "*Change Detection in Full and Dual Polarization, Single- and Multifrequency SAR Data*" [112], donde se dan instrucciones para ejecutar un algoritmo que sea capaz de identificar cambios en imágenes polarimétricas SAR. El algoritmo es parte del documento y está publicado (gratuito y público) en lenguaje Matlab. Así mismo, los códigos están recogidos en los anexos de esta memoria. El funcionamiento básico consiste en conseguir dos imágenes SAR de una misma zona pero de distintas fechas para realizar una comparación estadística píxel a píxel de sus matrices de covarianza polarimétricas siguiendo una distribución de *Wishart*. El resultado final es una imagen de la misma zona, donde las áreas oscuras representan pocos o ningún

cambio, mientras que las zonas con altos niveles de brillo implican grandes cambios de la zona en cuestión.

Uno de los pre-procesados más importantes a la hora de aplicar este algoritmo es la coregistración, no explicada hasta ahora, pues sólo la aplicaremos aquí. En este pre-procesado, a una de las imágenes se le llama *master* (en castellano imagen maestra, que habitualmente se asocia a la primera de las imágenes siguiendo el orden cronológico de adquisición de las mismas), y a la otra *slave* (en castellano imagen esclava). En esta operación, la imagen esclava es alineada píxel a píxel a la imagen maestra usando la información de la órbita del satélite así como modelos digitales de elevación, de manera que mediante técnicas de remuestreo, cada píxel de la imagen esclava mantiene un nexo al píxel correspondiente de su imagen maestra. El resultado de este pre-procesado nos permite evaluar las diferencias en las matrices de covarianza para cada píxel. La coregistración será llevada a cabo en SNAP y se detallará aún más en el capítulo 5 de resultados. Como aclaración, el resultado de esta operación consiste en dos productos coregistrados, uno para cada canal de polarización.

En este punto, se deben preparar también los datos para la exportación a PolSARpro y ejecutar así el filtrado polarimétrico de *Speckle*. Esta parte del pre-procesado se lleva a cabo en un sencillo código de IDL proporcionado por la Universidad de Alicante (adjunto en los anexos de esta memoria), que realiza llamadas a funciones de PolSARpro para obtener a la salida las matrices de covarianza de la imagen maestra y de la imagen esclava. Para ello, primero compone la matriz de covarianza de las imágenes maestra y esclava usando la información de los dos canales polarimétricos que obtuvimos a la salida del SNAP en la operación de coregistración. Posteriormente estas matrices son filtradas por el filtro Refined Lee polarimétrico de PolSARpro.

Por último, el código escrito en Matlab utiliza una función de densidad de probabilidad de *Wishart* para agrupar los píxeles de la imagen final en función del cambio estadístico observado en las matrices de covarianza de las imágenes maestra y esclava. El resultado final podemos exportarlo a SNAP para ortorectificar la imagen y generar un archivo georeferenciado para Google Earth, dada la fácil y cómoda visualización que ofrece esta plataforma.

Con todo esto, de forma resumida y breve, enumeramos aquí los pasos de ejecución del procesado de detección de cambios completo:

Procesado de datos SAR del satélite Sentinel-1 para el estudio de zonas costeras.

- 1) Obtenemos dos imágenes de la misma zona de estudio pero con fechas de adquisición diferentes. Cabe notar aquí que las imágenes deben tener el mismo tipo de pase del satélite (pase ascendente o descendente) para que las imágenes sean correctamente comparadas. De no ser así, el procesado puede dar lugar a errores debido a la distinta perspectiva del satélite de la zona de estudio en cada tipo de pase, generando esta situación "falsos positivos" de cambio.
- 2) Calibración de las dos imágenes SAR en SNAP.
- 3) Coregistración en SNAP.
- 4) *Deburst* de los dos productos coregistrados en SNAP.
- 5) Generación de las matrices de covarianza polarimétricas y filtrado polarimétrico de *Speckle*, usando IDL y PolSARpro.
- 6) Ejecución del algoritmo de *Wishart* sobre las matrices de covarianza de las imágenes maestra y esclava, usando Matlab.
- 7) Ortorectificación de los resultados en SNAP.
- 8) Generación de una imagen georeferenciada en SNAP para la visualización en Google Earth.

Así mismo, en el capítulo 5 de resultados, se detallarán en mayor profundidad los pasos a seguir en cada paquete software para la correcta ejecución de los códigos sobre los datos de interés.

Capítulo 5

Resultados del procesado de datos SAR

5.1. Descripción de herramientas software

En este apartado se describirán brevemente las diferentes herramientas utilizadas durante el desarrollo de este proyecto para la correcta consecución de los distintos objetivos y la obtención de resultados de las diversas aplicaciones de los datos SAR.

5.1.1. SNAP 3.0

Con el objetivo de difundir y maximizar el uso de los datos de observación de la Tierra recogidos por el programa Copérnico, la Agencia Espacial Europea (ESA) provee desde su web, un paquete software gratuito para la visualización y manipulación de estos datos. Se trata del software SNAP (*Sentinels Application Platform*), un paquete informático que engloba distintas herramientas para ejecutar los datos de las diferentes misiones Copérnico [113]. De esta forma, dentro del entorno SNAP se pueden utilizar las distintas herramientas de los *Toolboxes* de las misiones Sentinel-1, Sentinel-2, Sentinel-3...y sucesivas. En este proyecto sólo haremos uso de las herramientas del Sentinel-1, que son

Capítulo 5: Resultados del procesamiento de datos SAR

las que aparecen dentro del apartado radar (SAR), como puede observarse en la figura 5.2. De este modo, las herramientas del Sentinel-1 *Toolbox* consisten en una colección de funciones de procesamiento, lectores de datos y un visualizador (*display*) de los datos de varias misiones SAR, incluyendo Sentinel-1, ERS-1 & 2, ENVISAT, ALOS PALSAR, TerraSAR-X, Cosmo SkyMed y Radarsat-2. La herramienta incorpora algoritmos de calibración, filtrado de Speckle, coregistración, ortorectificación, conversión de datos, polarimetría e interferometría [114].

En cuanto a la versión con la que trabajaremos, será la 3.0 (versión más reciente a fecha de finalización de este proyecto final de carrera). Las distintas versiones son publicadas en la página web de la ESA a medida que los desarrolladores solucionan *bugs* o incluyen nuevas características y mejoras al software [115].



Figura 5.1. Imagen del software SNAP de la ESA durante el arranque.

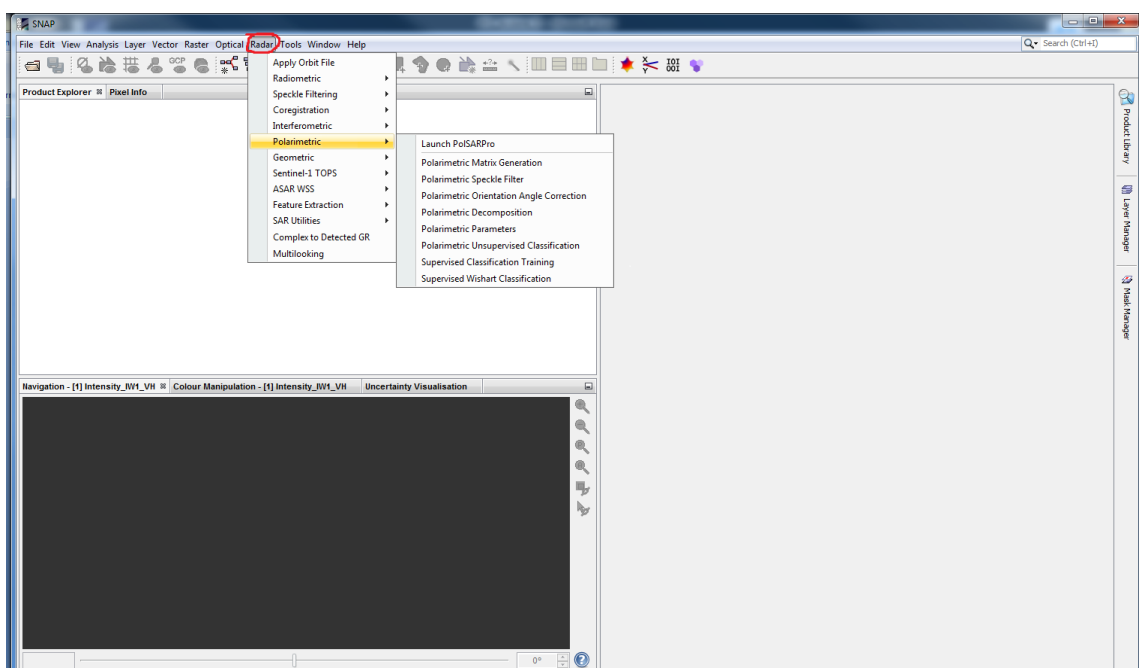


Figura 5.2. Visualización de la herramienta SNAP. De rojo remarcado, las funciones pertenecientes de forma exclusiva a los datos radar (SAR).

Procesado de datos SAR del satélite Sentinel-1 para el estudio de zonas costeras.

Además, para obtener un continuo *feedback* del funcionamiento de la herramienta así como para la creación de una comunidad de usuarios, la ESA ha creado un foro oficial para cada *Toolbox* en el que los participantes (una vez registrados) pueden mantener contacto directo con los desarrolladores o con otros usuarios que se encuentren utilizando la herramienta. A este foro lo han denominado *Step Forum*, y en él se proponen mejoras al software, se comparten resultados de la utilización de las herramientas, así como soluciones a los problemas encontrados por los usuarios [116]. El aspecto visual del *Step Forum* del Sentinel-1 *Toolbox* aparece en la figura 5.3.

Thread Title	Category	Replies	Views	Time
About the s1tbx category	s1tbx	1	357	May '15
ALOS PALSAR -1 InSAR Issues	Interferometry	6	527	4h
Sentinel 1 Processing Chain	s1tbx	5	120	7h
Sentinel-1 RGB	s1tbx	0	12	9h
Is it possible to download S-1A SLC images without CRC errors?	s1tbx	4	32	9h
Export gcps from Sentinel-1 GRD product	s1tbx	0	9	20h
S1a debursting results look strange	Interferometry	14	344	21h
Bug: TOPSAR Split function missing on Linux machines in version 3.0	Problem Reports	1	95	1d
Negative Pixel Spacing in snaphu.conf	Interferometry	2	118	1d
About co-registration for ALOS-2	s1tbx	0	14	1d
Reading S1.xml calibration file	s1tbx	0	18	2d
SLC and phase band	s1tbx	0	21	2d
Manual coregistration of SAR images	s1tbx	1	35	2d

Figura 5.3. Visualización del *Step Forum* de la ESA para la herramienta Sentinel-1 *Toolbox*.

Este software constituye la herramienta fundamental para el manejo de los datos SAR del Sentinel-1 y es la pieza central en la obtención de resultados en este proyecto final de carrera. Para todas las aplicaciones que realicemos acudiremos a él, puesto que éste contiene los algoritmos de pre-procesado que necesitan los datos SAR para su posterior utilización, como por ejemplo, el algoritmo de calibración.

5.1.2. PolSARpro 5.0

Como consecuencia del primer *Workshop* de PolInSAR celebrada en ESRIN (Centro de la ESA para la observación de la Tierra), en Italia en 2003, la ESA inició el desarrollo de una herramienta para el manejo de datos SAR que facilitase el acceso del público general y de la comunidad científica al uso, manejo y comprensión de los datos disponibles en las distintas misiones SAR. Uniendo diversas empresas, instituciones y universidades se creó el

software PolSARpro, de libre uso y disponible en la web de la ESA [117]. La herramienta se centra principalmente en el procesado de datos SAR para la ejecución de filtrados y algoritmos de clasificación polarimétricos.

En este proyecto, la utilización de esta herramienta será fundamental en la aplicación de técnicas de clasificación de los datos SAR. En cuanto a la versión con la que trabajaremos, será la 5.0 (versión más reciente a fecha de finalización de este proyecto final de carrera).



Figura 5.4. PolSARpro de la ESA.

5.1.3. Matlab® 2010

Matlab®, abreviatura de *MATRIX LABORATORY*, o en castellano: "laboratorio de matrices", es una herramienta de software matemático que ofrece un entorno de desarrollo integrado con un lenguaje de programación propio (lenguaje M). Está disponible para las plataformas Unix, Windows, Mac OS X y GNU/Linux. Entre sus prestaciones básicas se hallan: la manipulación de matrices, la representación de datos y funciones, la implementación de algoritmos, la creación de interfaces de usuario (GUI) y la comunicación con programas en otros lenguajes y con otros dispositivos hardware [118].

Millones de ingenieros y científicos de todo el planeta utilizan Matlab® para analizar y diseñar los sistemas y productos que transforman nuestro mundo. Está presente en sistemas de seguridad activa de automóviles, naves espaciales interplanetarias, dispositivos de monitorización de la salud, redes eléctricas inteligentes y redes móviles

Procesado de datos SAR del satélite Sentinel-1 para el estudio de zonas costeras.

LTE. Se utiliza para aprendizaje automático, procesamiento de señales, procesamiento de imágenes, visión artificial, comunicaciones, finanzas computacionales, diseño de control, robótica y muchos otros campos [119].

Esta herramienta software será una pieza clave en la aplicación del detector de cambios para la aplicación de detección de nieve y zonas inundadas explicada en el apartado 4.4. del capítulo 4. En cuanto a la versión con la que trabajaremos, será la R2010a (disponible en el ordenador del laboratorio cedido por el IOGAG y descrito en el apartado 8.4.2. del capítulo 8 de presupuesto).

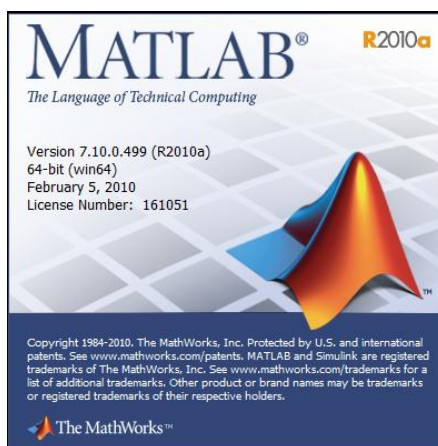


Figura 5.4. Matlab[®] R2010a de MathWorks[®].

5.1.4. IDL[®] 8.4.1

IDL (*Interactive Data Language*) es un lenguaje de programación usado para el análisis de datos. Se trata de un lenguaje orientado a la programación de vectores, y se usa en el procesamiento interactivo de grandes cantidades de datos (incluyendo el procesamiento de imágenes). Su uso habitual incluye aplicaciones de ciencias como la astronomía, física atmosférica e imágenes médicas y de observación de la Tierra [120]. La sintaxis incluye estructuras de Fortran y C. El software de análisis y procesamiento de imágenes ENVI está basado en este lenguaje. La empresa desarrolladora es Exelis Visual Information Solutions[®], subsidiaria de Harris Geospatial Solutions [121].

Esta herramienta software será fundamental en la aplicación del detector de cambios para la aplicación de detección de nieve y zonas inundadas explicada en el apartado 4.4. del capítulo 4. En cuanto a la versión con la que trabajaremos, será la 8.4.1

(disponible en el ordenador del laboratorio cedido por el IOCAG y descrito en el apartado 8.4.2. del capítulo 8 de presupuesto).

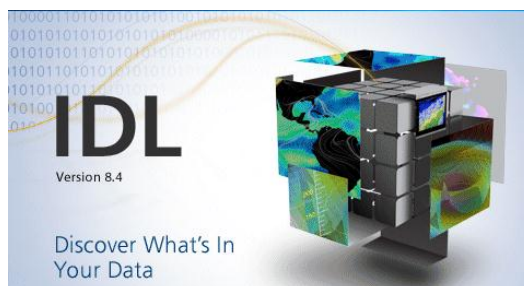


Figura 5.5. IDL[®] 8.4.1 de Exelis Visual Information Solutions[®].

5.1.5. Google Earth[®]

La plataforma Google Earth[®], propiedad de la compañía Google[®], es un programa informático gratuito que muestra imágenes en tres dimensiones de alta resolución de la Tierra. Puede ser utilizado como atlas, enciclopedia o como simulador de vuelo mundial. El mapa de Google Earth[®] está compuesto por una superposición de imágenes obtenidas por satélites, fotografías aéreas, información geográfica proveniente de modelos de datos SIG de todo el mundo y modelos digitales creados por ordenador. Las versiones más recientes incorporan información local detallada de lugares de interés, fotografías, visitas virtuales que incluyen hasta la Luna y al planeta Marte [75].

Esta herramienta software de uso gratuito será utilizada en la representación visual tridimensional de los resultados finales para cada aplicación de los datos SAR. En cuanto a la versión con la que trabajaremos, será la 7.1.5 (disponible en la web de Google Earth[®] a fecha de finalización de este proyecto).



Figura 5.6. Google Earth[®] 7.1.5 de Google[®].

5.2. Procesado para la aplicación de clasificación

En este apartado describiremos las técnicas aprendidas en apartado 4.2. del capítulo 4, en concreto, los procesados de clasificación del terreno para la obtención de cartografías terrestres. Se abordará la ejecución práctica de los distintos procesados en las herramientas software y se mostrarán los resultados finales de las distintas técnicas de clasificación.

5.2.1. Productos a emplear y metodología de procesado

La decisión sobre qué productos emplear a la hora de ejecutar los procesados de clasificación del terreno han atendido a tres criterios:

- ✓ Requisitos técnicos de las técnicas de procesado sobre la naturaleza de los datos.
- ✓ Mayor calidad posible (resolución) sobre el terreno en cuestión.
- ✓ Elección de datos captados sobre zonas costeras, siendo al menos una toma de datos sobre la isla de Gran Canaria, en la zona de Maspalomas.

En base a estos criterios se seleccionaron dos productos SAR del Sentinel-1:

- Producto Level 1 SLC IW DV (polarización dual VV/VH) sobre las Islas Canarias a fecha de: 08/02/2016 (toma de datos a las 19:04:49 UTC). Nombre técnico del producto descargado:

S1A IW SLC 1SDV 20160208T190449 20160208T190519 009859 00E707 6600.SAFE

- Producto Level 1 SLC S3 (swath número 3/6) SM DH (polarización dual HH/HV) sobre la zona costera de Baytown perteneciente al estado de Texas en Estados Unidos, a fecha de 24/02/2015 (toma de datos a las 00:18:03 UTC). Nombre técnico del producto descargado:

S1A_S3_SLC__1SDH_20150224T001803_20150224T001827_004758_005E60_19D
D.SAFE

Originalmente sólo se iba a utilizar un producto para las Islas Canarias que cubriese la zona de Maspalomas en Gran Canaria. Sin embargo, la baja resolución de los datos captados, debido a la planificación habitual de la misión Sentinel-1 sobre esta zona (modo del sensor IW predefinido), hizo que para poder validar las técnicas aquí estudiadas, se complementase esta imagen con otra de mayor resolución sobre una zona costera en cualquier lugar del mundo a una mayor resolución. De este modo, la imagen de las Islas

Canarias proporcionada por el producto IW tiene una resolución de 5x20 metros (*range x azimuth*), tal como se indicó en el apartado 2.2.2.1. del capítulo 2, mientras que el producto SM de la zona costera de Estados Unidos ofrece una calidad notablemente superior de 5x5 metros. Así mismo, la elección de ambos productos como SLC y doble polarización atendió a los requisitos técnicos necesarios de los procesados de clasificación estudiados en el apartado 4.2. del capítulo 4.

La metodología de procesado de ambos productos es idéntico salvo en la parte de pre-procesados. Si bien ambos productos son SLC, en uno el modo de funcionamiento del sensor es IW y en el otro SM. En los productos IW es necesario aplicar las técnicas de *Split* y *Deburst* descritas en el apartado 3.2.1. del capítulo 3. El producto SLC SM no necesita estos pre-procesados dado que ya partimos de un sólo *swath*. A partir de aquí, ambos productos (imágenes) pueden ser recortados mediante la herramienta "*Subset*" (enunciada también en el apartado 3.2.1.) para reducir la zona de procesado a la zona de interés. Una vez tenemos la zona de interés, será primordial aplicar el algoritmo de calibración descrito en el apartado 3.1.2. del capítulo 3. En este punto es opcional visualizar las bandas polarimétricas en una composición RGB mediante SNAP. Para mejorar el visionado de las bandas se propone realizar previamente un filtrado de *Speckle* simple tipo Refined Lee en SNAP. Volviendo al punto posterior a la calibración, el siguiente paso es la conversión del producto a formato PolSARpro para posteriormente aplicar el filtrado polarimétrico de *Speckle* en éste último software. Este filtro nos llevará de la matriz S (bandas polarimétricas) a la matriz de covarianza. Una vez hemos filtrado las imágenes en PolSARpro entramos en la etapa de procesado de clasificación. El procesado de clasificación no supervisada nos dará como resultado las imágenes de entropía, α , anisotropía y sus combinaciones para, mediante ortorectificación en SNAP, visualizar los resultados en Google Earth®. Todos estos pasos se realizan tanto para el producto IW como para el producto SM. Posteriormente se realizan las clasificaciones no supervisadas H/α y $H/A/\alpha$, explicadas en el apartado 4.2.2.2. del capítulo 4. Por último, se visualizan los resultados en Google Earth®. En el caso del procesado de la clasificación supervisada, primero se definen las regiones de entrenamiento, y finalmente, se realiza la clasificación *Supervised Wishart Classification* descrita en el apartado 4.2.2.3. del capítulo 4, observando finalmente los resultados en Google Earth®. El esquema de procesamiento global queda resumido en la figura 5.7, donde los cuadros de color celeste representan

operaciones realizadas en SNAP, los cuadros de color verde las operaciones realizadas en PolSARpro, y por último, los cuadros de color amarillo representan la visualización de resultados en Google Earth®.

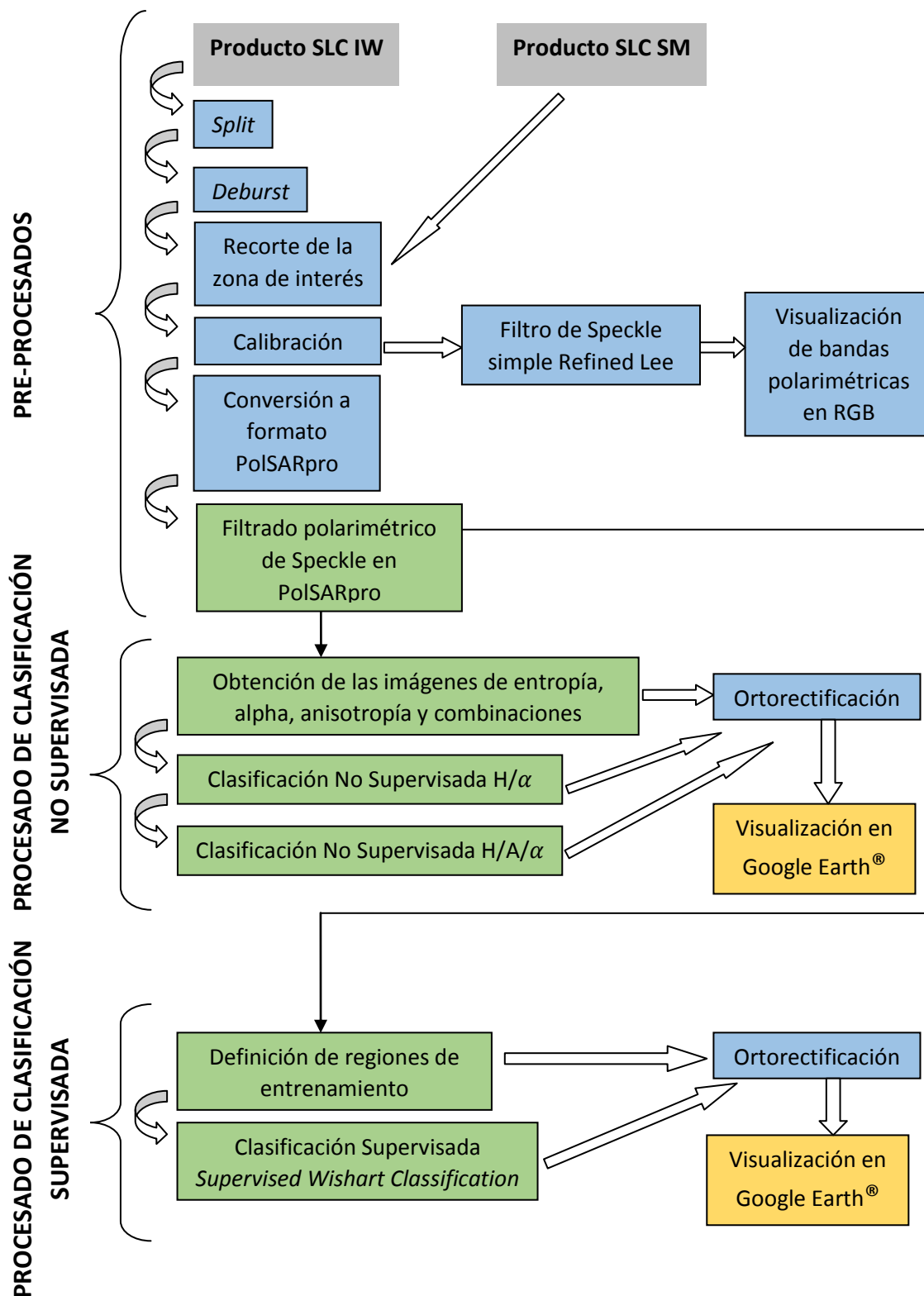


Figura 5.7. Metodología de procesamiento para los procesados de clasificación.

5.2.2. Pre-procesados

Como quedó indicado en el capítulo 3 de esta memoria, los pre-procesados constituyen una etapa fundamental en el tratamiento de los datos SAR. En este apartado se realizan y se muestran los pre-procesados necesarios para las aplicaciones de clasificación descritas en el capítulo 4.

Para iniciar el procesado abrimos la aplicación SNAP. Como el pre-procesado del producto SLC IW es más largo que el necesario para el producto SM, trataremos primero el producto SLC IW. En este caso, según se enunció en el apartado 5.2.1. y se explicó en el apartado 3.2.1. del capítulo 3, debemos realizar primero las operaciones de *split* y *deburst*. En estos productos, la forma de operar estas técnicas será siempre la misma. En las figuras 5.8 a 5.14 queda explicado gráficamente el proceso a seguir sobre la plataforma SNAP para obtener un subproducto Sentinel-1 que contenga solamente el *swath* y las subráfagas (*bursts*) en las que aparece la isla de Gran Canaria. En el paso de las figuras 5.12 a 5.13 se ha omitido la configuración del nombre y directorio del archivo de salida, dado que es idéntica a la mostrada en la figura 5.9 (todas las herramientas de procesado nos pedirán un nombre y directorio de salida siempre).

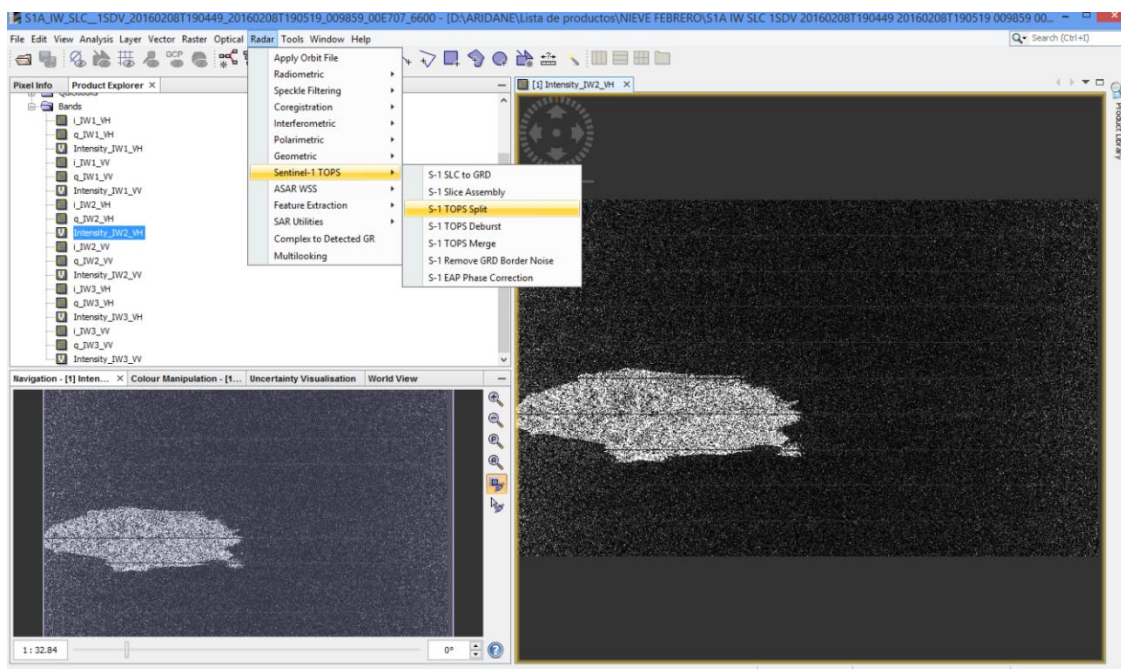


Figura 5.8. Selección de la herramienta *Split* en SNAP.

Procesado de datos SAR del satélite Sentinel-1 para el estudio de zonas costeras.

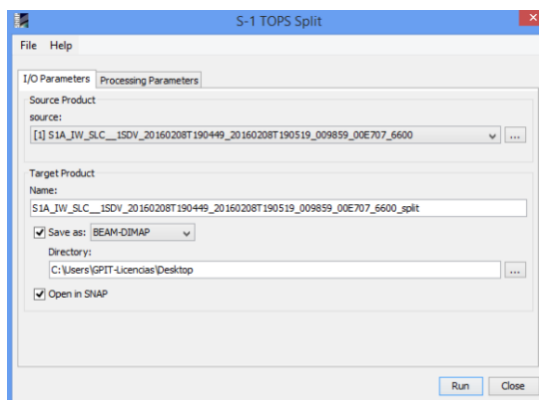


Figura 5.9. Configuración del nombre y directorio del archivo de salida.

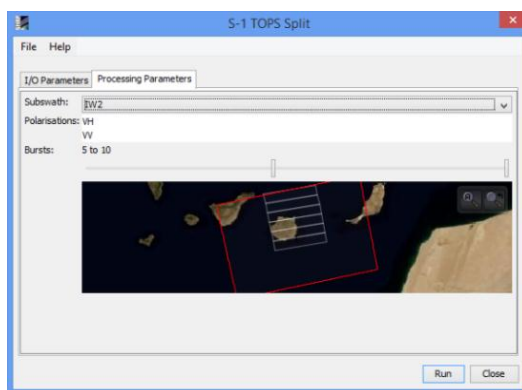


Figura 5.10. Selección del *swath* (en este caso el 2, IW2), las polarizaciones y las ráfagas (las ráfagas de Gran Canaria van de la 5 a la 10).

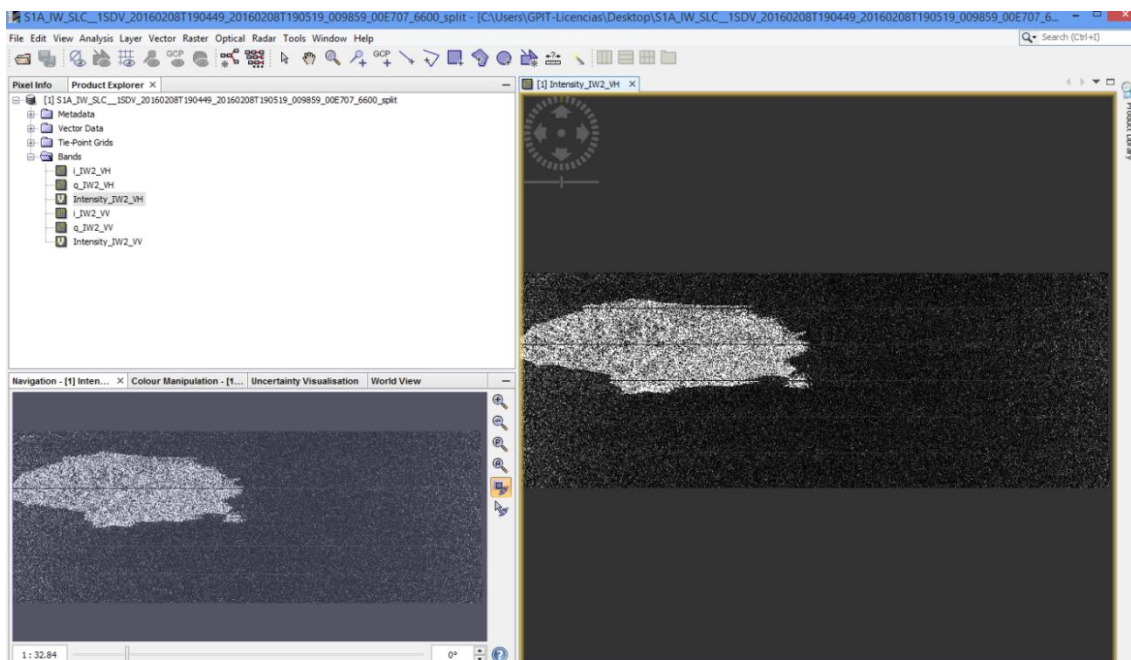


Figura 5.11. Subproducto de salida con la isla de Gran Canaria. El subproducto se compone únicamente del *swath* IW2 y de las ráfagas (*bursts*) 5 a 10. Visualización del canal VH.

Capítulo 5: Resultados del procesado de datos SAR

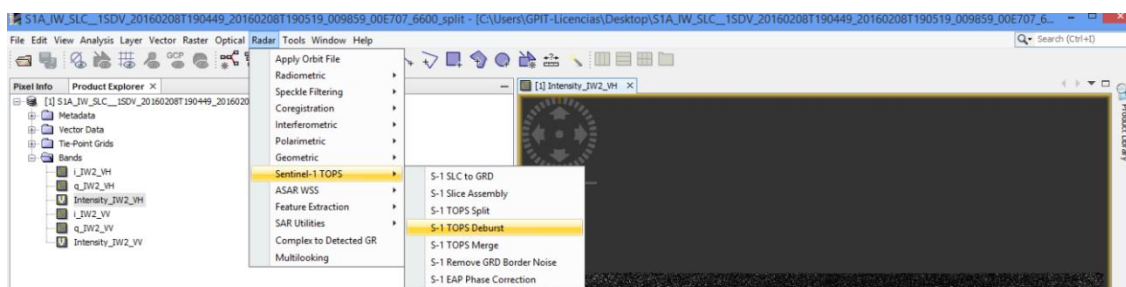


Figura 5.12. Selección de la herramienta *Deburst* en SNAP.

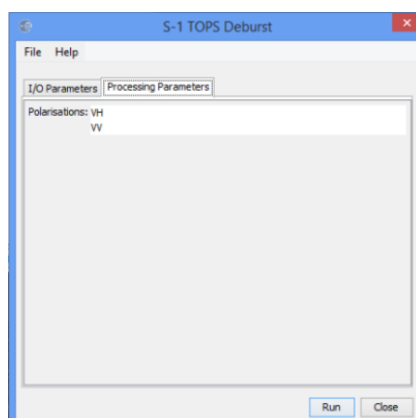


Figura 5.13. Selección de las polarizaciones dentro de la configuración de la herramienta de *Deburst*.

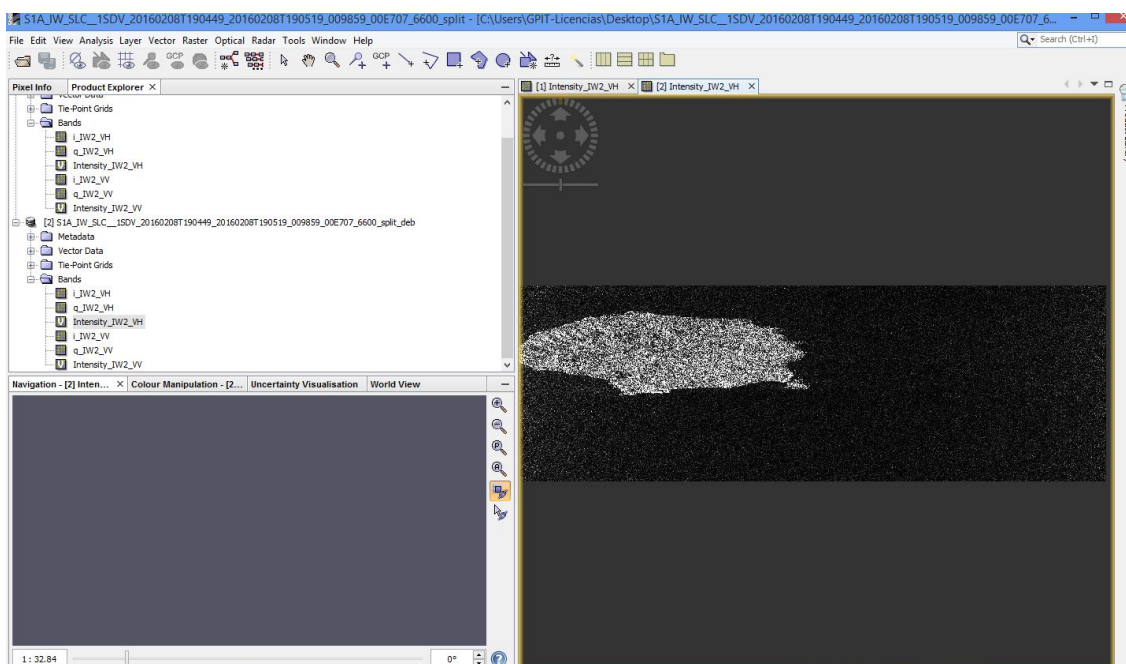


Figura 5.14. Subproducto de salida con la isla de Gran Canaria sin las franjas negras de la delimitación de ráfagas (*bursts*). Visualización del canal VH.

Como puede observarse en la figura 5.14, el resultado final es la imagen de la isla de Gran Canaria sin las líneas negras que delimitaban las distintas ráfagas. Para ahorrar memoria de trabajo en el ordenador, y para mayor comodidad a la hora de trabajar, el

Procesado de datos SAR del satélite Sentinel-1 para el estudio de zonas costeras.

software nos permite también "recortar" el área de interés a través de la herramienta "Subset". Los pasos a seguir para seleccionar la imagen del área de interés se describen gráficamente en las figuras 5.15 a 5.17.

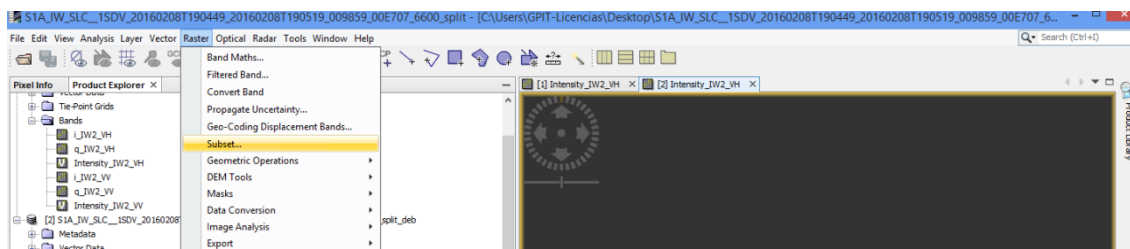


Figura 5.15. Selección de la herramienta *Subset* en SNAP.

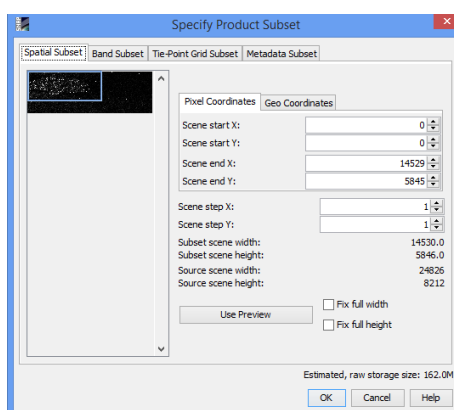


Figura 5.16. Selección del área de interés. Dentro de la línea azul tenemos el área seleccionada. Abajo a la derecha podemos observar el tamaño del archivo resultante.

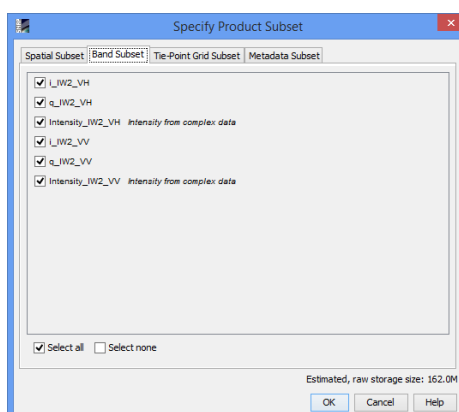


Figura 5.17. Selección de las bandas (polarizaciones, parte real, fase e intensidad) de interés.

De esta forma quedan explicados los pasos necesarios para obtener desde un producto SLC IW que originalmente contenía varias de las Islas Canarias, a una imagen que sólo contenga la isla de Gran Canaria, tal y como puede observarse en la figura 5.18. Ahora bien, nuestra zona de interés es Maspalomas, por lo que es necesario recortar aún más la imagen y quedarnos solamente con dicha zona. En la figura 5.19 se puede apreciar la

imagen final de la zona de Maspalomas. Cabe notar aquí que la orientación y geometría de la zona no es correcta dado que aún nos encontramos en la geometría *slant range* y el producto aún no ha sido ortorectificado. Esta última técnica se llevará a cabo al final de todos los procesados, tal como se explicó en el apartado 3.2.2. del capítulo 3 y se remarcó en el apartado 5.2.1. de este capítulo.

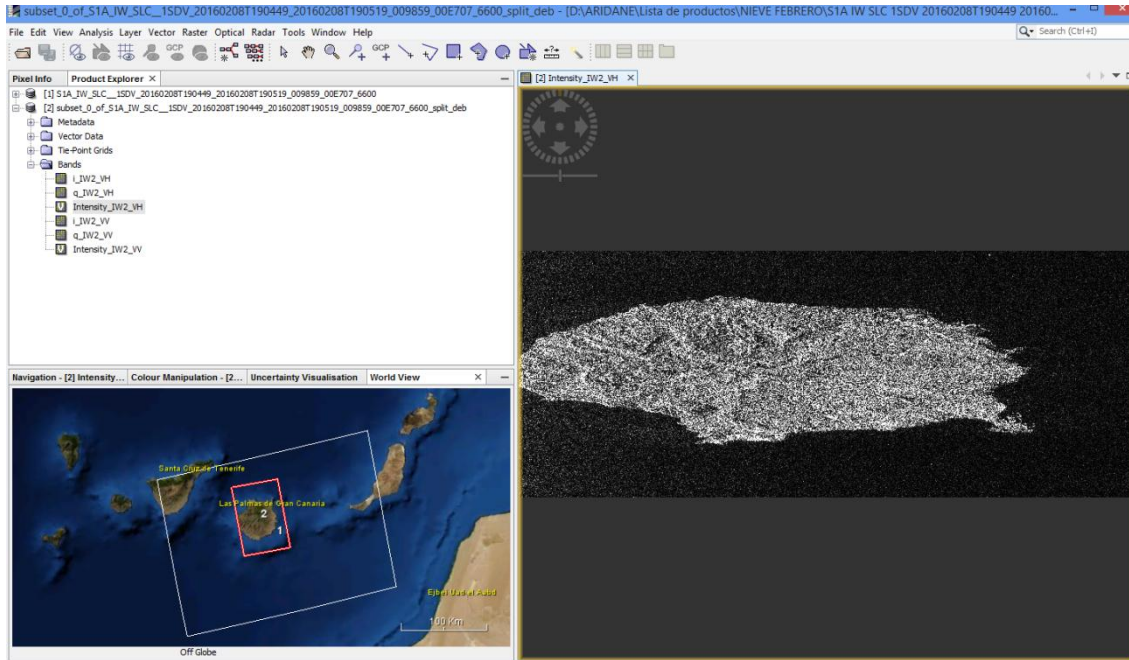


Figura 5.18. Imagen final de la isla de Gran Canaria. En el mapa terrestre de la izquierda se puede observar remarcado en blanco el producto IW SLC original, y en rojo, el subproducto final, que contiene la isla de Gran Canaria. Visualización del canal VH.

Una vez tenemos la imagen final de nuestra zona de interés, el paso siguiente es aplicar el algoritmo de calibración en SNAP. Los pasos a seguir pueden observarse en las figuras 5.20 y 5.21. Para la zona de Baytown en Estados Unidos con el producto SLC SM, los pasos para la calibración son idénticos (la imagen calibrada puede observarse en la figura 5.23). De las imágenes finales cabe destacar la baja resolución del producto IW frente al SM. La resolución de 5x20 metros (*range x azimuth*) del producto IW podría ocasionar unos resultados de baja calidad para las técnicas de clasificación, por lo que contaremos también, a la par, con el producto SM de Baytown a medida que realicemos los distintos procesados de clasificación. Cabe aclarar además el aspecto visual de las imágenes (aún no ortorectificadas) de Maspalomas y de Baytown. Dado que el ángulo de incidencia es mayor para el *swath* IW2 ($38,3^\circ$ en el centro del *swath*) que para el *swath* S3 del producto SM ($31,2^\circ$ en el centro del *swath*), la imagen del producto IW parece mucho más inclinada que

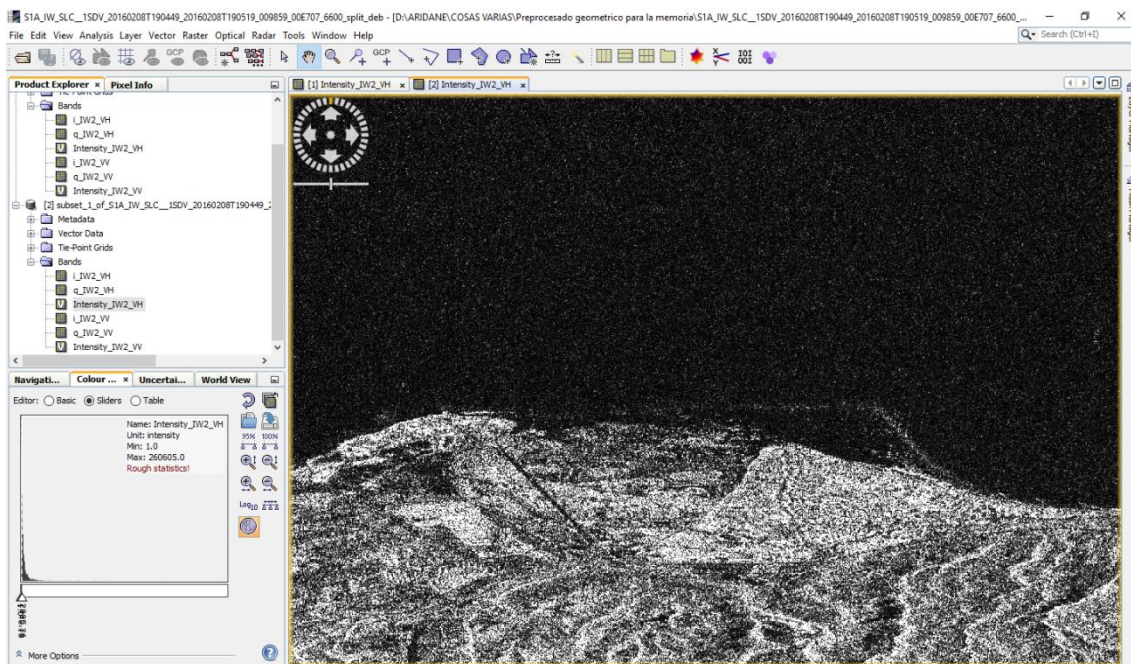


Figura 5.19. Imagen final de la zona costera de Maspalomas, Gran Canaria (zona de interés). Visualización del canal VH.

la del producto SM. Cabe notar también la inversión del terreno dependiendo de si el paso del satélite ha sido ascendente o descendente. Todos estos datos pueden visualizarse en SNAP mediante los metadatos del producto o subproducto que tengamos. Como aclaración, cabe indicar que los metadatos se actualizan a medida que realizamos procesados con los productos. Un ejemplo sería la calibración, que en este caso los metadatos indicarían que el producto se encuentra ya calibrado. En la figura 5.22 pueden observarse parte de los metadatos del producto SLC IW de Maspalomas (sólo se observa una parte porque se trata de una ventana desplazable).

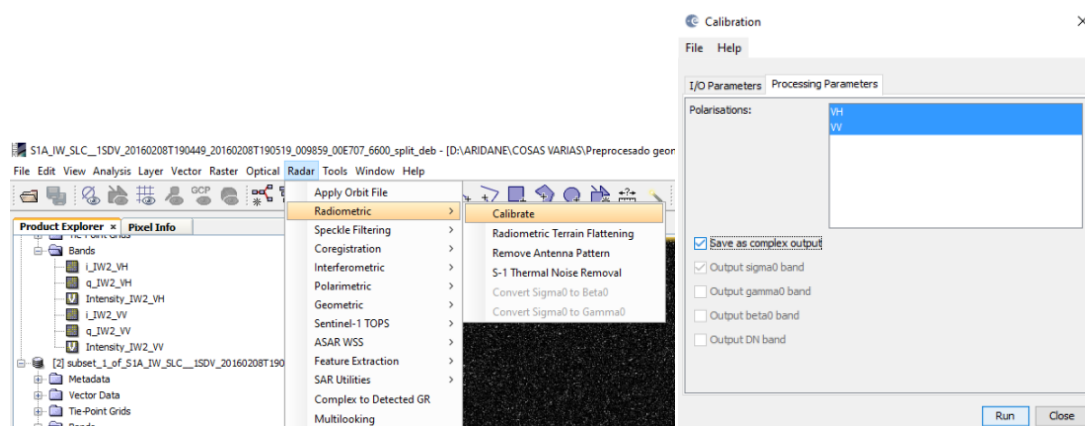


Figura 5.20. Selección de la herramienta *Calibrate* en SNAP (izquierda). Configuración de los parámetros de calibración (derecha). Seleccionamos los dos canales de polarización y guardamos la imagen de salida en formato de datos complejo.

Capítulo 5: Resultados del procesado de datos SAR

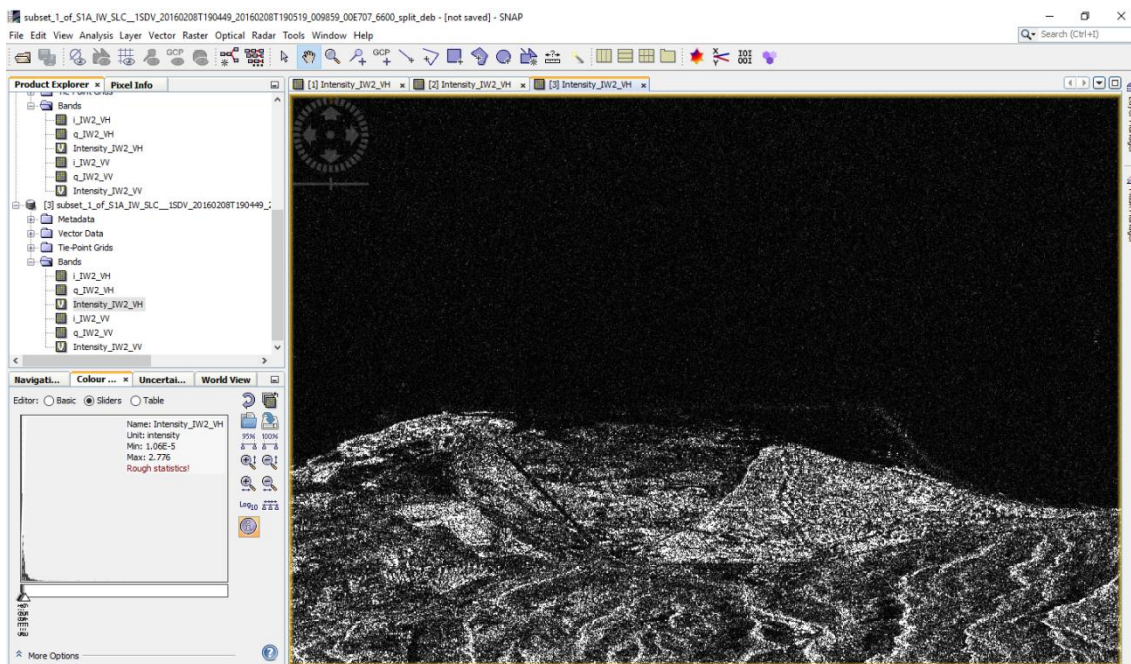


Figura 5.21. Imagen final con la zona costera de Maspalomas en Gran Canaria ya calibrada. Visualización del canal VH.

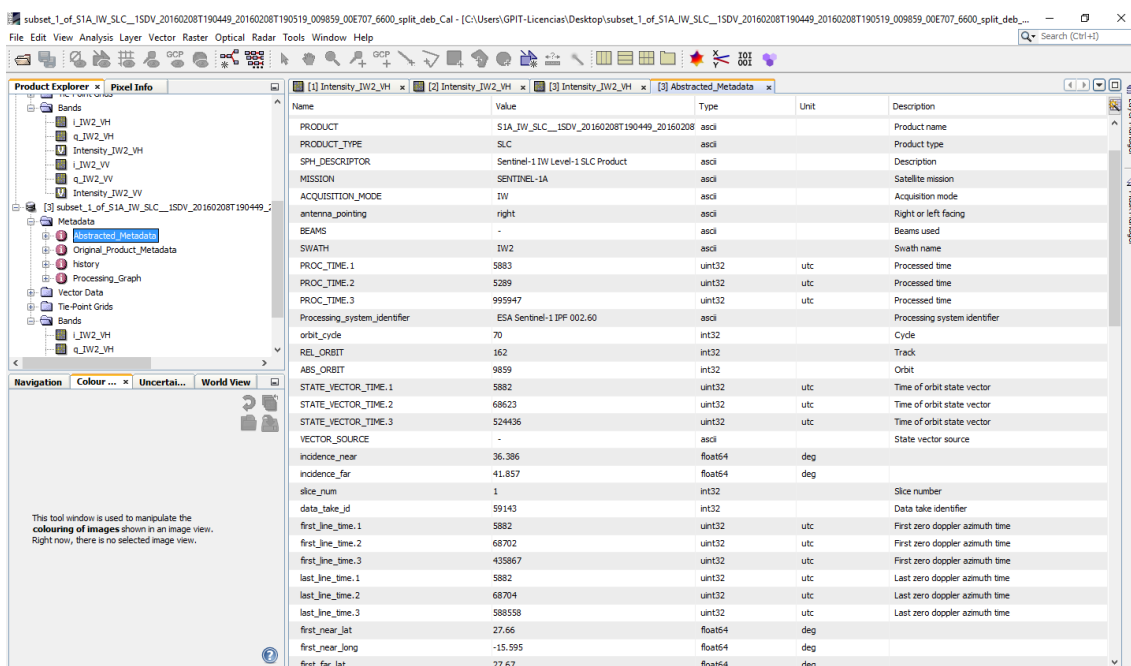


Figura 5.22. Visualización en SNAP de parte de los metadatos del producto SLC IW de la zona de Maspalomas, Gran Canaria.

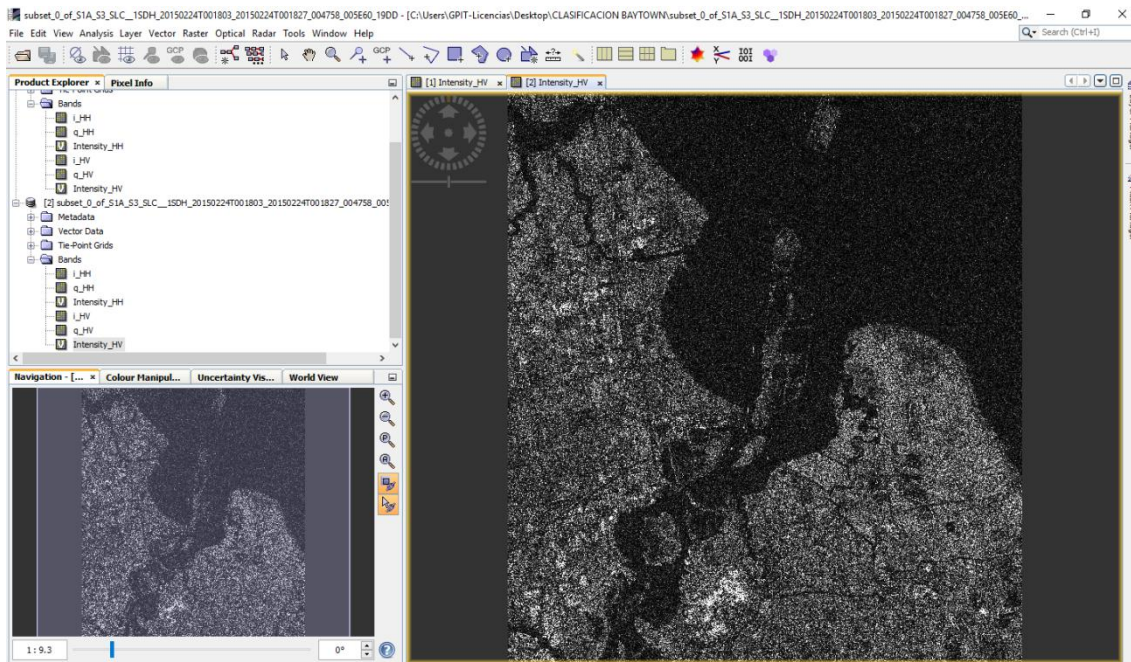


Figura 5.23. Imagen final ya calibrada de la zona de Baytown en Estados Unidos (Producto SLC SM).
Visualización del canal HV.

5.2.2.1. Visualización de bandas polarimétricas (composiciones RGB)

Como se indicó en el apartado 4.2.2.1. del capítulo 4, con una configuración *Dual Polarized* (la que tenemos en estos productos) no podremos realizar una representación en base *Pauli* aunque, sin embargo, el software SNAP nos permite realizar una serie de representaciones en RGB para previsualizar, como ya se ha explicado, de forma intuitiva la intensidad de los distintos canales polarimétricos. Aquí visualizaremos algunas de ellas, como: *Dual Pol (Dual Pol Ratio Intensity)*, *Dual Pol Multiple Intensity*, y por último, *Dual Pol Difference Intensity*. Las distintas configuraciones RGB quedaron descritas en el apartado 4.2.2.1. y son equivalentes tanto para la doble polarización VV+VH como para la HH+HV. Al cambiar de caso de polarización, en la configuración RGB simplemente se cambia VV por HH y VH por HV, o viceversa. Cabe notar que las imágenes son previamente filtradas por un filtro de *Speckle* simple tipo Refined Lee en SNAP. Los pasos para la representación de los canales polarimétricos en las composiciones RGB de SNAP pueden observarse en las figuras 5.24 a 5.27.

Capítulo 5: Resultados del procesado de datos SAR

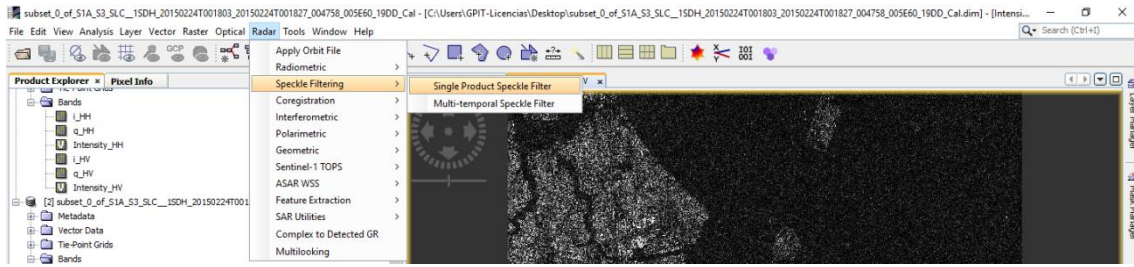


Figura 5.24. Selección de la herramienta de filtrado de *Speckle* simple.

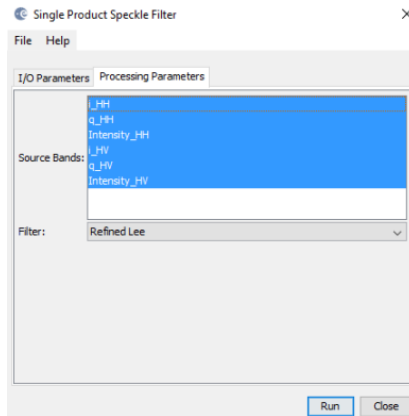


Figura 5.25. Selección del filtrado de *Speckle* tipo Refined Lee.

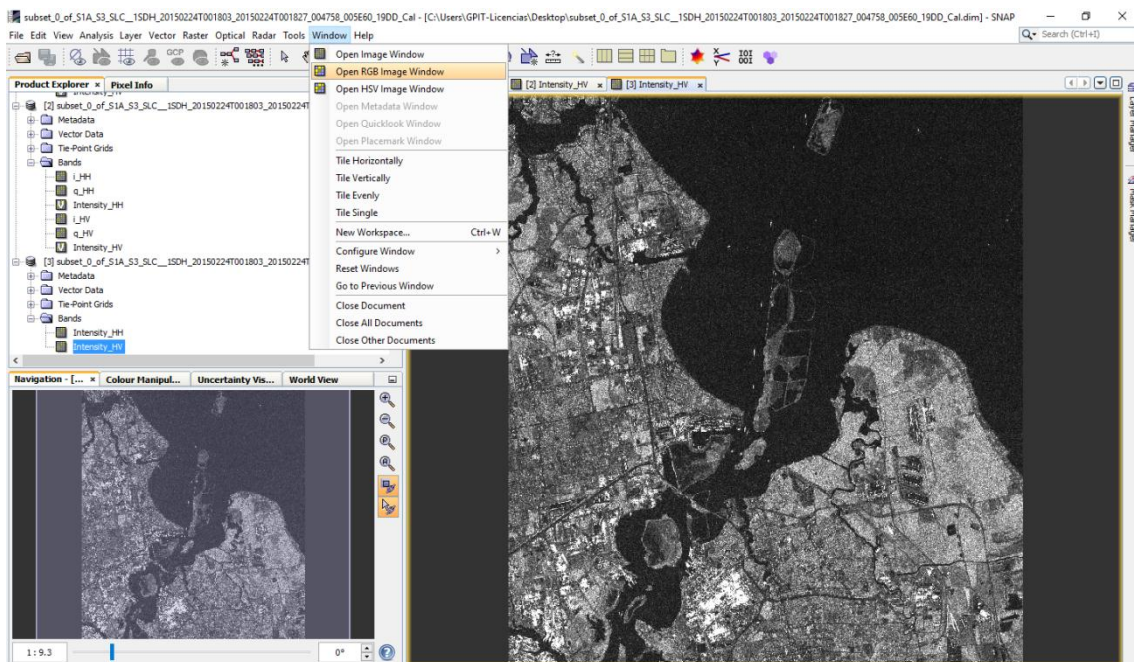


Figura 5.26. Imagen filtrada y selección de la herramienta de visualización RGB. Visualización del canal HV.

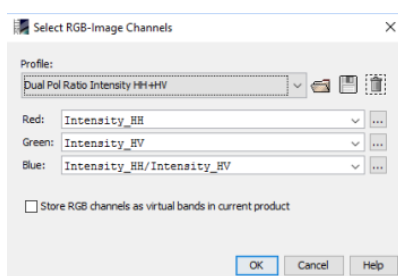


Figura 5.27. Selección del tipo de representación RGB.

En las figuras 5.26 y 5.30 se pueden observar las imágenes filtradas para cada zona de interés. Así mismo, las distintas configuraciones RGB se muestran en las figura 5.28 y 5.29 para la zona de Baytown en Estados Unidos, y en la figura 5.30 para la zona de Maspalomas en Gran Canaria. De las imágenes y las distintas configuraciones RGB se deduce la información que nos proporcionan las distintas polarizaciones sobre los materiales y la geometría de los objetos detectados en la superficie terrestre. Aunque no contienen información propia de clasificación, nos proporcionan una interpretación visual de la diferente información de cada una de las bandas. Cabe indicar que se han usado las bandas en forma de intensidades, es decir, el módulo de la parte real y de la fase de cada banda. Esta última aclaración remarca la cantidad de información que posee la matriz S , dado que ésta sí que trabaja con bandas polarimétricas y con información de parte real y de fase. Por este motivo, en los procesados de clasificación trabajaremos con esta matriz, dado que posee la mayor cantidad de información disponible de los datos captados.

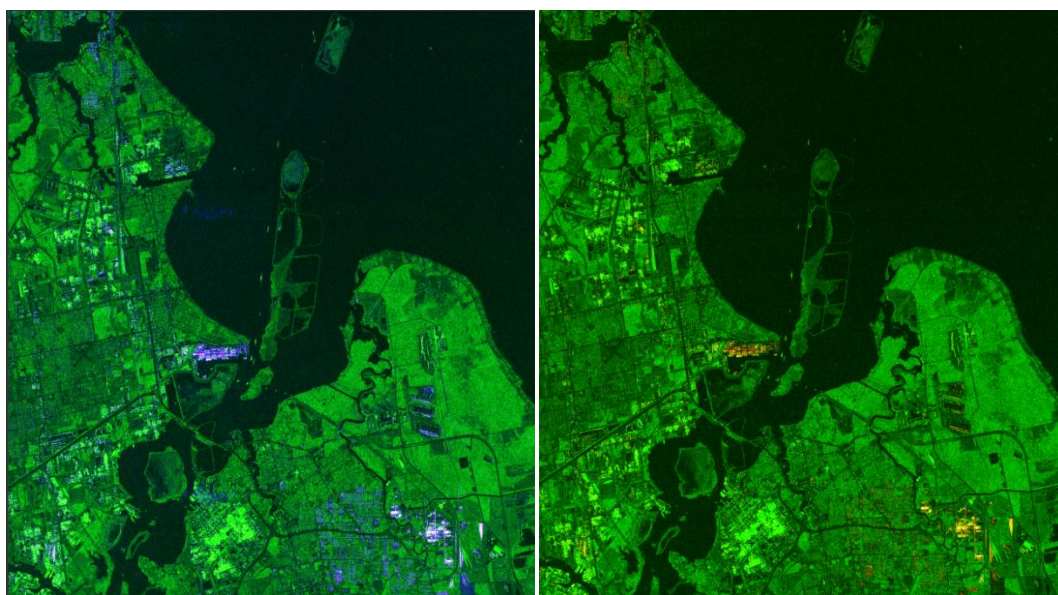


Figura 5.28. Representaciones RGB: *Dual Pol Ratio Intensity* (a la izquierda) y *Dual Pol Multiple Intensity* (a la derecha) para la zona costera de Baytown, Estados Unidos.

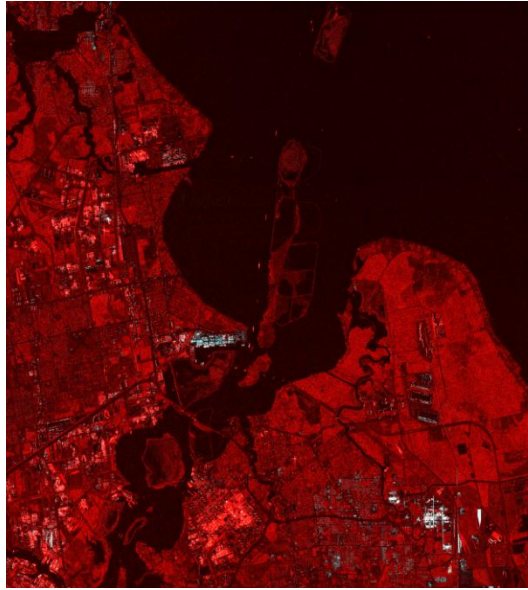


Figura 5.29. Representación RGB: *Dual Pol Difference Intensity* para la zona costera de Baytown, Estados Unidos.

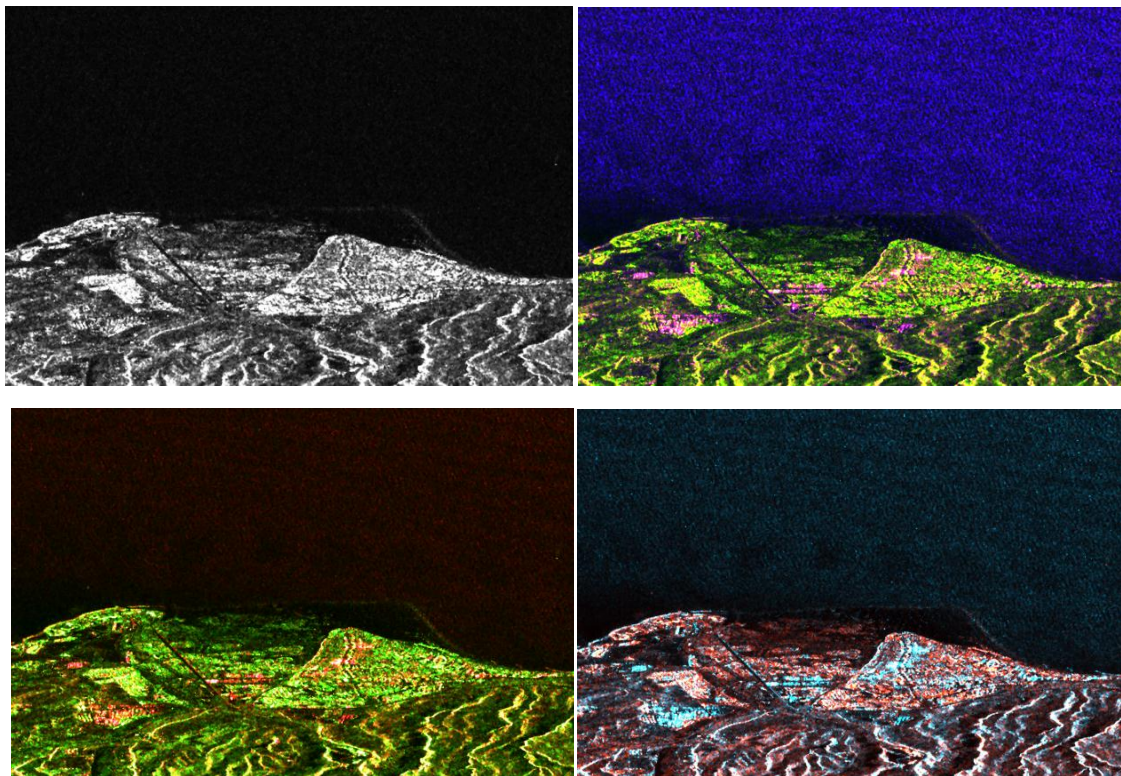


Figura 5.30. Imagen filtrada de Maspalomas, Gran Canaria, visualización del canal VH (arriba a izquierda). Representaciones RGB: *Dual Pol Ratio Intensity* (arriba a la derecha), *Dual Pol Multiple Intensity* (abajo a la izquierda) y *Dual Pol Difference Intensity* (abajo a la derecha), para la zona costera de Maspalomas, Gran Canaria.

5.2.2.2. Conversión de los datos a formato PolSARpro desde SNAP

Una vez hemos calibrado nuestros productos, el siguiente paso en los pre-procesados es convertir los datos a formato PolSARpro. Para ello, abrimos el producto en SNAP y lo exportamos a formato PolSARpro, tal como se indica en la figura 5.31 (aquí se ha realizado un ejemplo para el producto SLC SM de Baytown, aunque es igualmente aplicable al producto SLC IW de Maspalomas). Este paso nos da como resultado una carpeta que contiene todos los datos necesarios para abrir y tratar nuestro producto en PolSARpro. Los contenidos habituales de la carpeta se muestran en la figura 5.32. En ella se encuentran los distintos canales polarimétricos segmentados en las partes real e imaginaria correspondientes, en forma de archivos .bin. De esta forma tenemos para la parte real del canal HH el archivo "i_HH.bin", mientras que para la parte imaginaria tendríamos "q_HH.bin", y así sucesivamente para cada uno de los casos de polarización. Además se incluye un archivo de texto ("config.txt") que contiene la descripción de las dimensiones del producto, el tipo de sensor polarimétrico (monoestático o biestático) y la configuración polarimétrica usada (dual o full). El contenido de este archivo puede observarse en la figura 5.33. En el caso del producto de Baytown tenemos 6758 píxeles de alto por 6057 de ancho. El sensor SAR polarimétrico es (como esperábamos) monoestático en configuración dual.

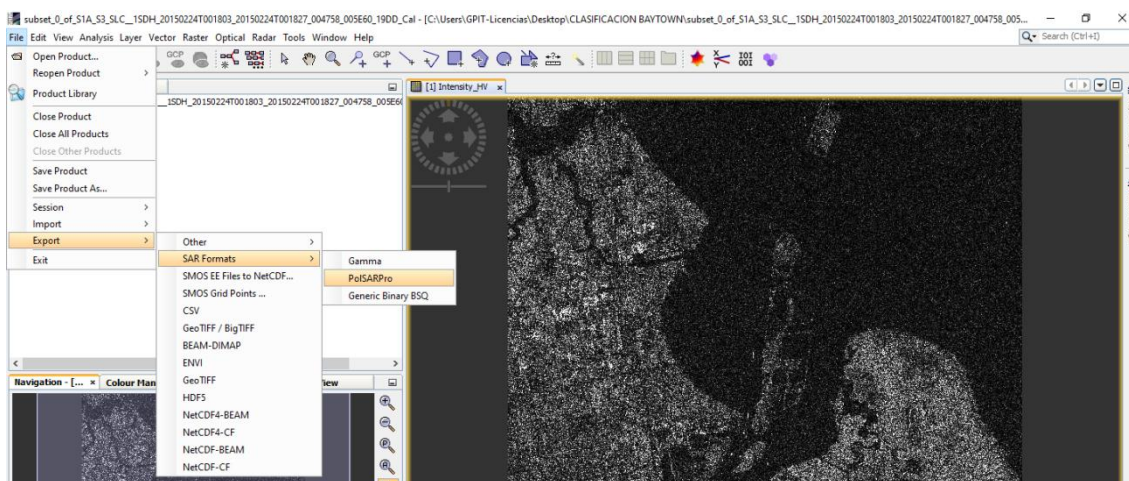


Figura 5.31. Conversión de datos a formato PolSARpro desde SNAP.

Capítulo 5: Resultados del procesado de datos SAR

Nombre	Fecha de modifica...	Tipo	Tamaño
config	05/08/2016 17:01	Documento de tex...	1 KB
i_HH	05/08/2016 17:02	Archivo BIN	159.896 KB
i_HH.bin	05/08/2016 17:01	Archivo HDR	1 KB
i_HV	05/08/2016 17:02	Archivo BIN	159.896 KB
i_HV.bin	05/08/2016 17:01	Archivo HDR	1 KB
metadata	05/08/2016 17:01	Documento XML	34 KB
q_HH	05/08/2016 17:02	Archivo BIN	159.896 KB
q_HH.bin	05/08/2016 17:01	Archivo HDR	1 KB
q_HV	05/08/2016 17:02	Archivo BIN	159.896 KB
q_HV.bin	05/08/2016 17:02	Archivo HDR	1 KB

Figura 5.32. Contenido de la carpeta creada en la conversión de datos a formato PolSARpro.

```
config: Bloc de notas
Archivo Edición Formato Ver Ayuda
Nrow
6758
-----
Ncol
6057
-----
PolarCase
monostatic
-----
PolarType
dual
-----
```

Figura 5.33. Contenido del archivo "config.txt".

Una vez que tenemos la carpeta con los datos en formato PolSARpro, el siguiente paso es abrir este último programa. La apariencia visual del entorno es la mostrada en la figura 5.34. En esta misma figura se indica la forma de abrir la carpeta con los datos del producto de interés. Para ello, debemos pulsar en el icono superior al principio de la barra de herramientas, en "Single Data Set", que nos llevará al cuadro de diálogo de la figura 5.35, donde debemos establecer el directorio de la carpeta con los datos en formato PolSARpro, creada por el SNAP, como directorio de trabajo (*Main Input Directory*). A continuación presionamos guardar y salir (*Save & Exit*). Nos aparece entonces la ventana de la figura 5.36 a la que se debe responder "No".

Procesado de datos SAR del satélite Sentinel-1 para el estudio de zonas costeras.

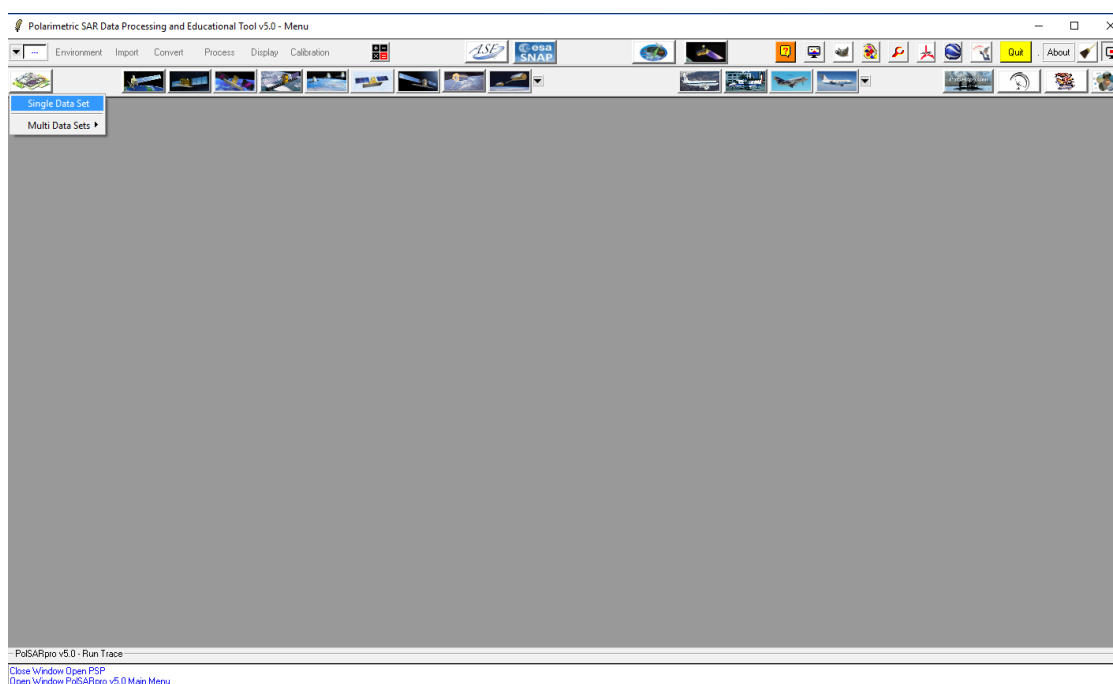


Figura 5.34. Para abrir los archivos hay que presionar *Single Data Set* en la barra de herramientas de PolSARpro.

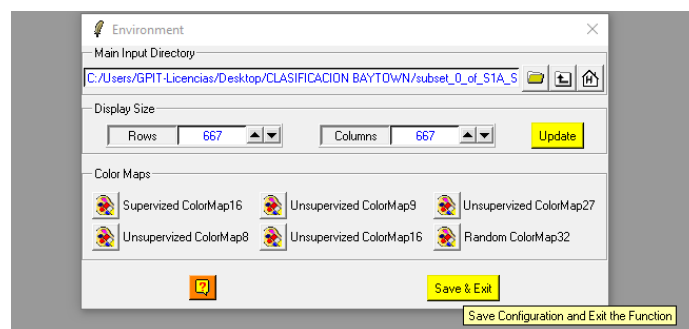


Figura 5.35. Configuración del directorio de trabajo.

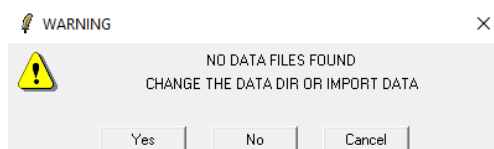


Figura 5.36. Cuadro de diálogo de advertencia en la configuración del directorio de trabajo.

Una vez hemos establecido el directorio de trabajo debemos rellenar la tabla de datos de entrada (*Raw Binary Input Data*) que aparece en la figura 5.38, a la que accedemos como se indica en la figura 5.37. En esta tabla especificamos el tipo de sensor, el formato de la matriz S , el formato de los datos y las dimensiones de la imagen. En este caso el tipo de sensor es monoestático, la matriz de datos S es parcial (S_{11} , S_{21}) porque sólo disponemos de S_{11} y S_{21} (HH+HV), el formato de los datos es Real/Imaginario, y por último, las dimensiones de la imagen son 6758 filas por 6057 columnas. Además de esto se deben

definir los archivos de entrada para las bandas, de forma que presionando en *Input File Names*, accedemos a la ventana de la figura 5.39 (*Raw Binary Input Data Files*), en la que debemos indicar el directorio de los archivos (.bin) correspondientes a las partes real e imaginaria de las distintas bandas polarimétricas, para cada una de las componentes de la matriz S parcial. En este caso nos quedaría que la parte real de S_{11} es "i_HH.bin", la parte imaginaria sería "q_HH.bin", y así sucesivamente. Una vez aceptamos esta configuración nos aparecerá el mensaje de la figura 5.40, que hace referencia a que debemos extraer el producto antes de ejecutar cualquier procesado. La operación de extracción queda resumida en las figuras 5.41 y 5.42. Esta operación tiene como resultado el visionado de las imágenes en el entorno software. Así, finalmente, las imágenes correspondientes a Baytown y a Maspalomas pueden observarse en las figuras 5.43 y 5.44 respectivamente (composición en RGB).

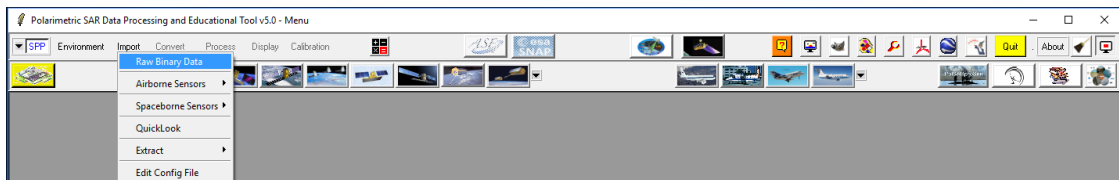


Figura 5.37. Acceso a la tabla de datos de entrada (*Raw Binary Data*) en PolSARpro.

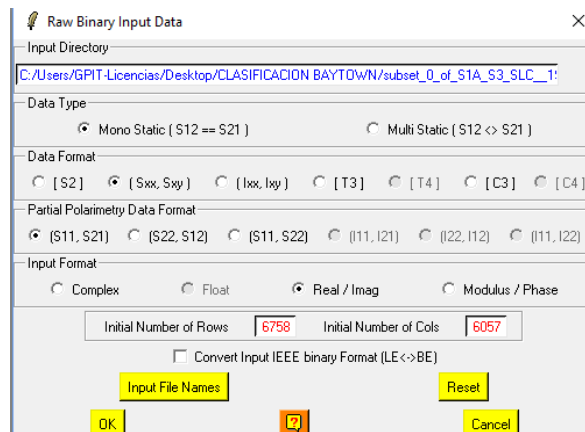


Figura 5.38. Tabla de datos de entrada (*Raw Binary Input Data*).

Procesado de datos SAR del satélite Sentinel-1 para el estudio de zonas costeras.

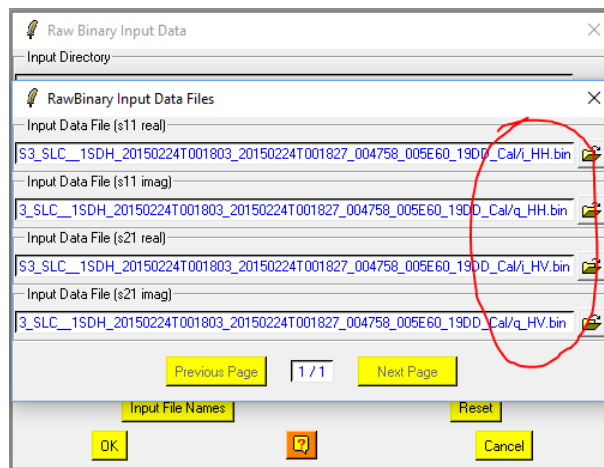


Figura 5.39. Tabla de archivos de entrada para los canales de imagen de la matriz parcial S (*Raw Binary Input Data*). Cabe notar los distintos archivos para cada componente de la matriz parcial S.

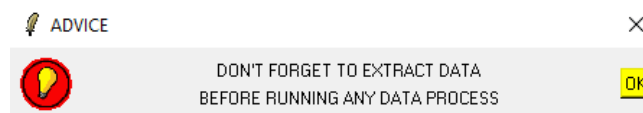


Figura 5.40. Mensaje de advertencia sobre la extracción del producto antes de cualquier procesado.

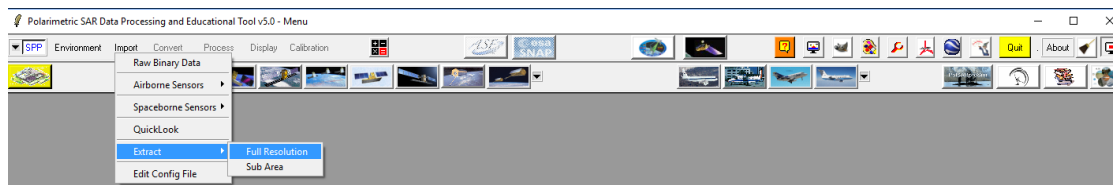


Figura 5.41. Selección de la herramienta de extracción de datos en PolSARpro.

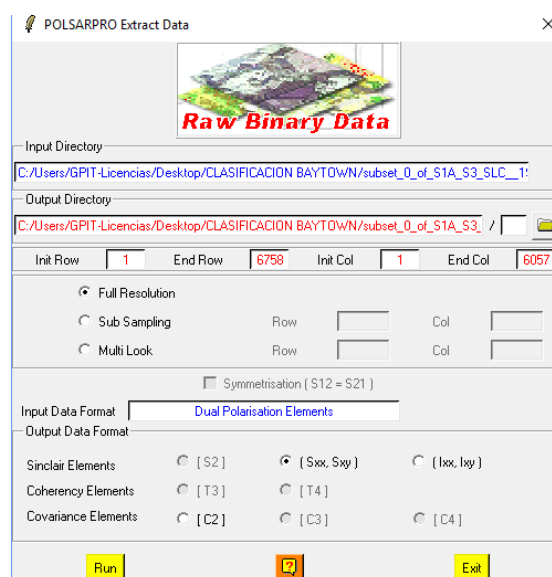


Figura 5.42. Configuración de la extracción de datos (*PolSARpro Extract Data*).

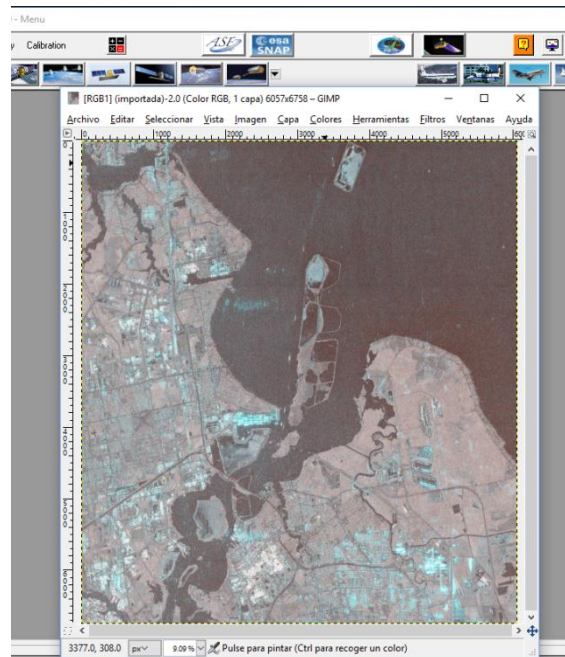


Figura 5.43. Composición RGB del producto de Baytown con los datos ya extraídos en PolSARpro.

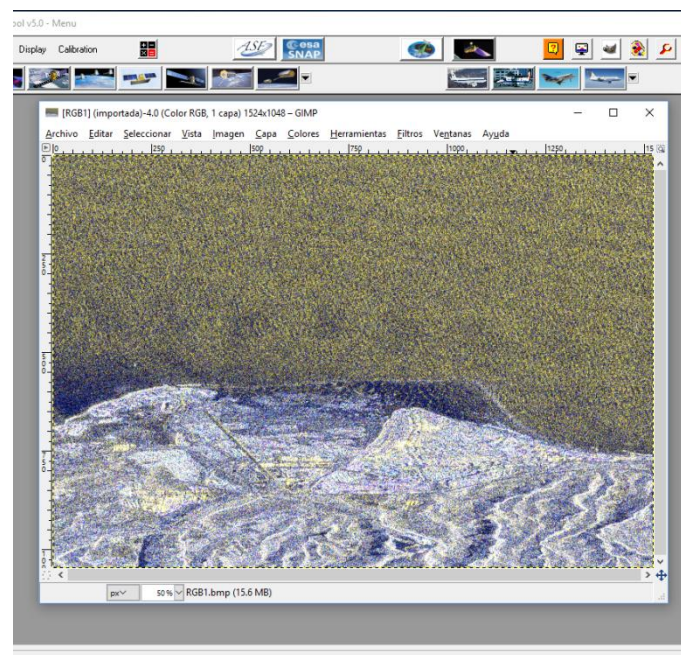


Figura 5.44. Composición RGB del producto de Maspalomas con los datos ya extraídos en PolSARpro.

5.2.2.3. Filtrado de *Speckle* polarimétrico en PolSARpro

Tal como se explicó en el apartado 3.1.3.2. del capítulo 3, antes de procesar los datos SAR debemos filtrar las imágenes del denominado ruido de Speckle. En este caso debemos filtrar las imágenes mediante filtros polarimétricos que mejoren la calidad visual de la imagen. Como se comentó, una de las mejores opciones era un filtro polarimétrico

Procesado de datos SAR del satélite Sentinel-1 para el estudio de zonas costeras.

tipo *Refined Lee*. Dentro de PolSARpro existen distintos filtros que nos ayudan a lidiar este problema, aunque aquí nosotros seleccionaremos el filtro tipo Refined Lee, tal y como se indica en las figuras 5.45 y 5.46. Realizamos el procesado tanto para la imagen SLC SM de Baytown como para la SLC IW de Maspalomas. Cabe notar aquí que hasta ahora hemos trabajado en PolSARpro con la matriz S parcial. En el entorno del programa, existe un indicador en la parte superior izquierda de la barra de herramientas, en la que se muestra el nivel de procesado de la matriz S. Cuando indica SPP significa que nos encontramos en la matriz S parcial, mientras que cuando indica C2 significa matriz de covarianza 2x2. Este indicador podrá observarse en las figuras de las capturas realizadas durante el procesado de las técnicas de clasificación (tanto no supervisadas como supervisadas).

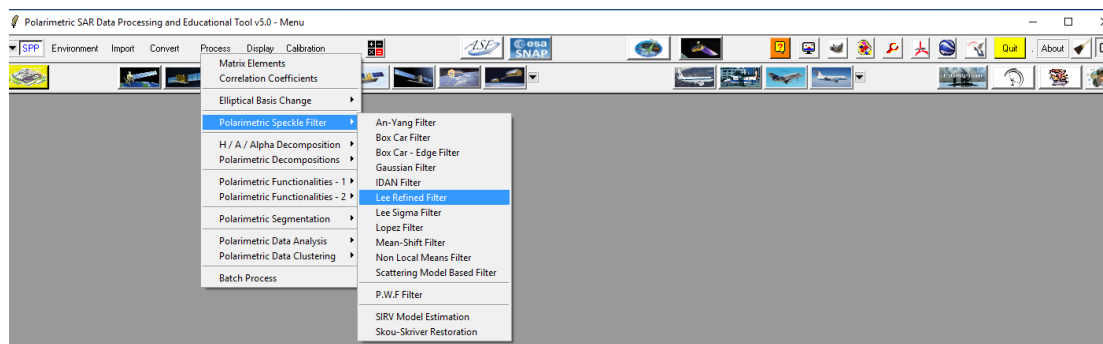


Figura 5.45. Selección del filtro de Speckle polarimétrico tipo *Refined Lee* en PolSARpro.

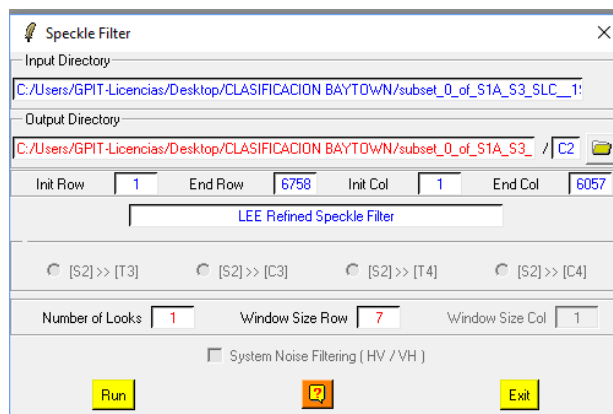


Figura 5.46. Configuración del filtro de Speckle polarimétrico tipo *Refined Lee*.

5.2.2.4. Visualización del producto del sensor TerraSAR-X

Entre el material de partida de este proyecto se encuentra una imagen TerraSAR-X de la zona de interés de Maspalomas cedida por el IOGAG. Las características técnicas de esta imagen SAR dentro de las especificaciones del sensor del satélite TerraSAR-X son:

Capítulo 5: Resultados del procesado de datos SAR

- ✓ Fecha de adquisición: 05/01/2008 a las 19:03:42 UTC.
- ✓ Modo de operación del sensor: *Spotlight* (SL)
- ✓ Resolución espacial: 1,2 x 2 m (*range* x *azimuth*)
- ✓ Modo de polarización: Simple (HH)
- ✓ Ángulo de incidencia medio: 42°

La gran resolución espacial de este producto hace que ofrezca una información de la superficie captada mucho más precisa que la del producto SLC IW del Sentinel-1 (5 x 20 m, *range* x *azimuth*). Sin embargo, la única polarización disponible en este producto imposibilita las técnicas de clasificación que se pretenden realizar en este capítulo. No obstante, mostramos aquí la imagen para observar su calidad visual y también como futura referencia cuando observemos los resultados de clasificación de la imagen de Maspalomas del producto Sentinel-1. De esta forma podemos tener una idea visual de cuánto podría mejorar la imagen, y por lo tanto los resultados de clasificación, cuando mejoramos la resolución espacial del sensor. Además de esto, cabe decir que la mayor resolución posible del sensor TerraSAR-X es de 0,6 x 0,24 m en el modo *Staring Spotlight* (ST), aunque en este modo, la superficie captada pasa de los 10 x 10 km de *Spotlight* (SL) a 4 x 3,7 km. Esto nos lleva a la conclusión de que la imagen de que disponemos del TerraSAR-X es todavía mejorable para la tecnología existente disponible al público particular. En la figura 5.47 puede observarse la imagen SAR de la zona de Maspalomas captada por el TerraSAR-X. La imagen se encuentra calibrada, filtrada y ortorectificada.



Figura 5.47. Imagen SAR de Maspalomas, Gran Canaria, captada por el sensor TerraSAR-X.

Visualización del canal HH.

Procesado de datos SAR del satélite Sentinel-1 para el estudio de zonas costeras.

Para poder comparar con el producto SLC IW del Sentinel-1, se muestra en la figura 5.48 el producto a utilizar para las técnicas de clasificación, calibrado, con filtrado polarimétrico (es decir, sin ruido de Speckle) y ortorectificado. Además, se incluye en la figura 5.49 la imagen óptica de la misma zona disponible en Google Earth®.

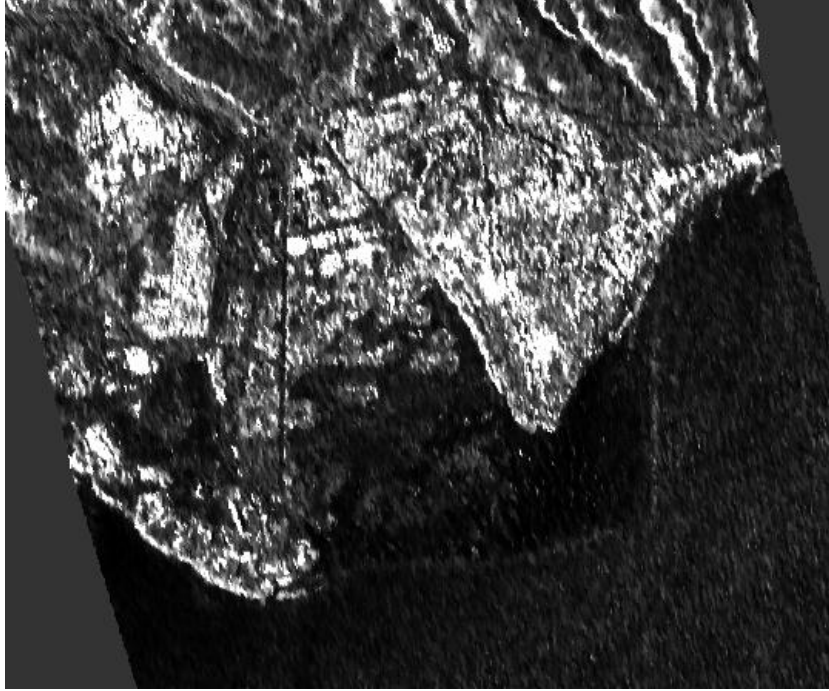


Figura 5.48. Imagen SAR de Maspalomas, Gran Canaria, captada por el sensor Sentinel-1 (producto SLC IW). Visualización del canal VH.



Figura 5.49. Imagen óptica de Maspalomas, Gran Canaria, disponible en Google Earth®.

5.2.3. Clasificación no supervisada

Una vez tenemos nuestro producto filtrado en PolSARpro y, por lo tanto, en forma de matriz de covarianza, los siguientes pasos consisten en la ejecución de las técnicas de clasificación. En este apartado trataremos la clasificación no supervisada, obteniendo primero las imágenes de entropía, alpha, anisotropía y sus combinaciones, tal como se describió en el apartado 4.2.2.2. del capítulo 4. Posteriormente se realizará la clasificación no supervisada H/α , y por último, la clasificación no supervisada $H/A/\alpha$.

5.2.3.1 Imágenes de entropía, alpha, anisotropía y combinaciones

En este apartado se obtienen las imágenes polarimétricas de entropía, alpha, anisotropía y sus combinaciones. Para ello, primero extraeremos las imágenes correspondientes al producto SLC SM de Baytown, y a continuación de igual forma, para el producto SLC IW de Maspalomas.

La forma de obtener los parámetros de entropía, alpha, anisotropía y sus combinaciones en PolSARpro se describe gráficamente en la figura 5.50. Cabe notar aquí el estado del indicador azul a la izquierda del todo en la barra de herramientas principal de PolSARpro, que indica C2 en lugar de SPP. Esto significa que el directorio de trabajo contiene información de la matriz de covarianza (C2) y que por lo tanto estamos trabajando con ella.

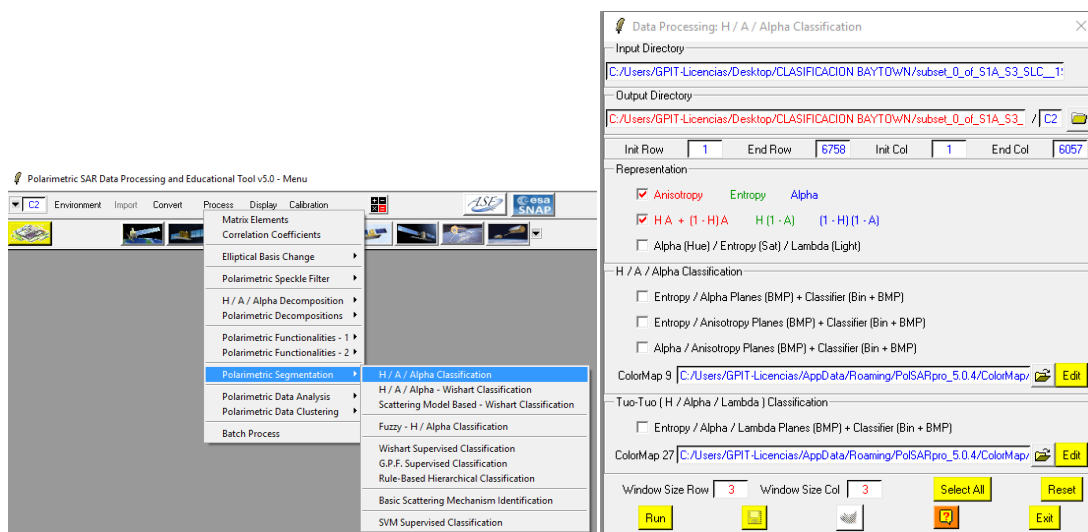


Figura 5.50. Selección de la herramienta H/A/Alpha Classification en PolSARpro para la obtención de los distintos parámetros polarimétricos (izquierda). Configuración de la extracción de parámetros polarimétricos: entropía, anisotropía, alpha y combinaciones (derecha).

La primera de las imágenes obtenidas para el producto SLC SM de Baytown es la imagen polarimétrica de alpha, que puede observarse en la figura 5.51. Todas y cada una de las imágenes resultado consisten en archivos BMP (mapa de bits) de 8 bits de precisión. De forma que una vez que ejecutemos cualquier procesado, el PolSARpro deposita en el directorio de trabajo los resultados correspondientes en forma de archivos BMP.

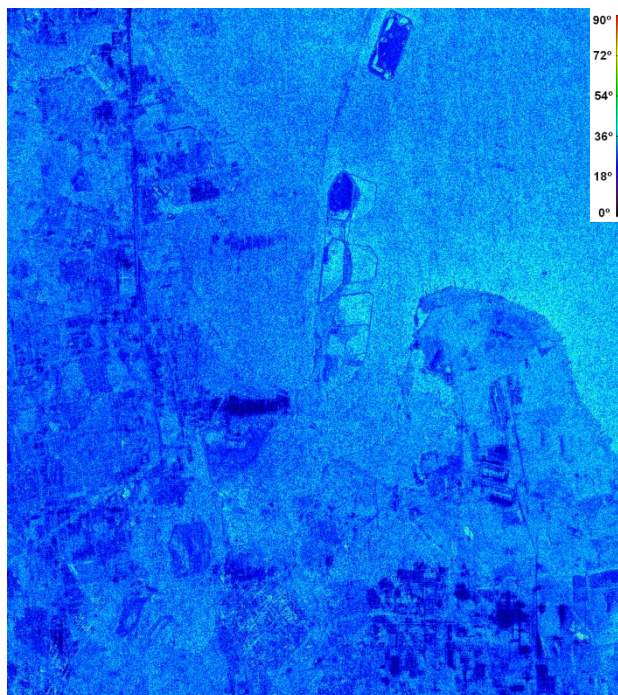


Figura 5.51. Imagen polarimétrica del parámetro alpha para el producto SLC SM de Baytown. La leyenda de colores se encuentra a la derecha superior de la imagen.

Como el objetivo es presentar los resultados finales ya ortorectificados y sobre la aplicación Google Earth®, procedemos aquí a procesar las imágenes desde la geometría *slant range* a *ground range* en SNAP, cuyos fundamentos teóricos quedaron recogidos en la sección 3.2.2. del capítulo 3. De esta forma, una vez explicada la conversión de geometría para la imagen de alpha, aplicaremos por igual dicho procesado al resto de imágenes resultado. Además, se presentará entonces como referencia la imagen óptica correspondiente a esta zona costera de Baytown en Estados Unidos.

Para pasar desde la geometría *slant range* a *ground range* debemos abrir la imagen BMP del resultado correspondiente en SNAP. Al mismo tiempo debemos abrir el producto SAR (en este caso SLC SM de Baytown) desde el que convertimos los datos a PolSARpro en SNAP. Visualizamos la imagen (en este caso alpha) y procedemos a reemplazar sus

metadatos con los del producto original. El procedimiento puede observarse en las figuras 5.52 y 5.53.

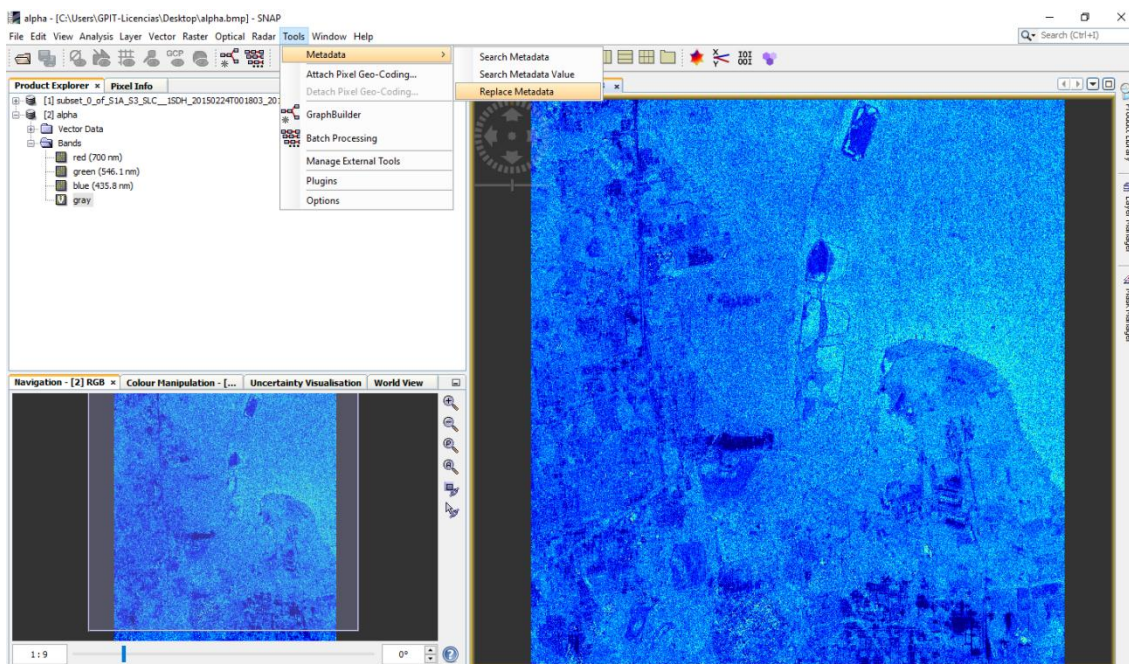


Figura 5.52. Procedimiento para ortorectificar los resultados de PolSARpro en SNAP. Selección de la herramienta de reemplazo de metadatos.

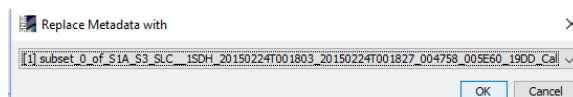


Figura 5.53. Los metadatos de la imagen BMP de PolSARpro se reemplazan por los metadatos del producto original.

Una vez que la imagen resultado contiene los metadatos del producto original se procede a ortorectificar la imagen. Con el producto ya ortorectificado se puede obtener un archivo KMZ para abrir la imagen (de forma tridimensional) en Google Earth®, tal como se explicó en el apartado 3.2.2.1. del capítulo 3. Los pasos de procesamiento a seguir en SNAP pueden observarse en las figuras 5.54 a 5.56.

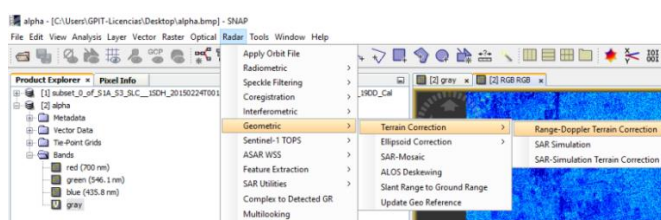


Figura 5.54. Selección de la herramienta de conversión de geometría *Range-Doppler Terrain Correction* en SNAP.

Procesado de datos SAR del satélite Sentinel-1 para el estudio de zonas costeras.

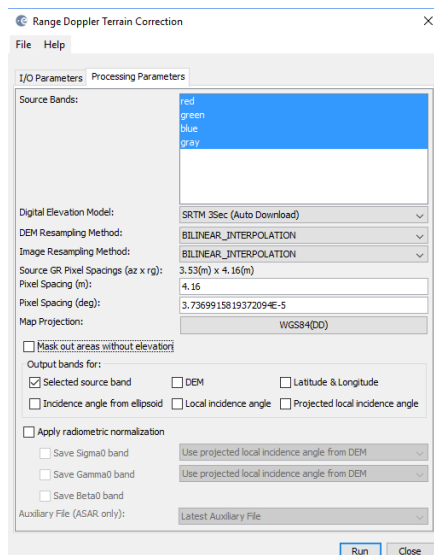


Figura 5.55. Configuración de la herramienta de conversión de geometría *Range-Doppler Terrain Correction* en SNAP.

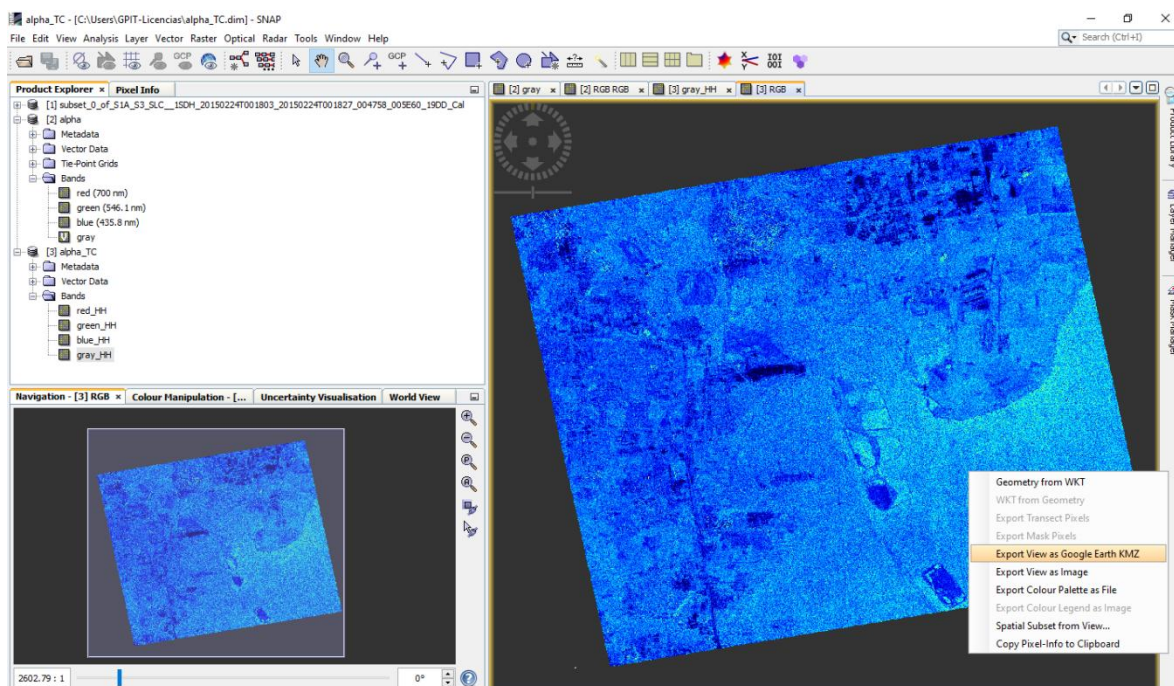


Figura 5.56. Imagen alpha ortorectificada. Pulsando el botón derecho del ratón sobre la imagen puede convertirse a un archivo KMZ para la aplicación Google Earth®.

Una vez se ha explicado el proceso a seguir para ortorectificar y presentar las imágenes resultado en Google Earth®, se presentan a continuación las imágenes de los parámetros alpha, anisotropía, entropía e imagen óptica de la zona de Baytown sobre dicha plataforma. Estas imágenes pueden observarse en la figura 5.57.

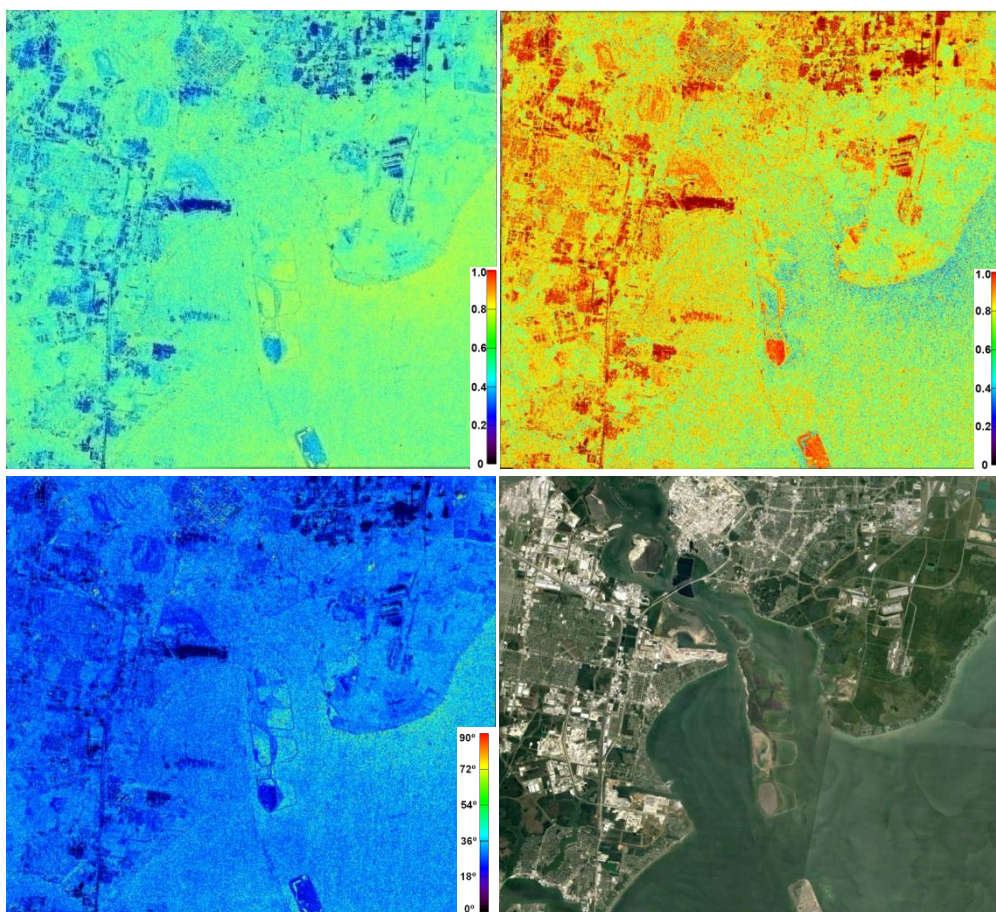


Figura 5.57. Imágenes de entropía, anisotropía, alpha e imagen óptica disponible en Google Earth® para el producto SLC SM de Baytown.

Como introducción a las imágenes de la figura 5.57, cabe indicar que el tamaño real de la escena medido sobre la plataforma Google Earth® es de 23,8 km de alto por 25,2 km de ancho. Esta figura ha sido formada a través de capturas de pantalla. Si bien las imágenes han sufrido una considerable pérdida de información por la compresión de datos durante la edición, en esta memoria se pretende esbozar visualmente la idea principal de los resultados obtenidos. Para una observación más precisa y exacta de los datos, las imágenes se encuentran disponibles en el anexo de esta memoria en su formato original digital. Además de esto, disponer del archivo digital original posibilita la acción de realizar zoom sobre aquellas zonas que más interesen.

En la primera imagen de la figura 5.57 tenemos el parámetro de entropía. Como se indicó en el apartado 4.2.2.2. del capítulo 4, este parámetro nos habla de la aleatoriedad del proceso de retrodispersión captado en los píxeles. En la imagen tenemos que los valores más bajos los encontramos en zonas urbanas y en zonas industriales, donde el

proceso de retrodispersión es más puro que por ejemplo en las zonas de vegetación o en el mar. En la imagen de anisotropía, los valores más altos se concentran en las zonas urbanas y en las zonas industriales dado que este parámetro nos habla de la importancia de los segundos, terceros o más mecanismos de retrodispersión presentes en la escena. El total de la imagen aparece con valores de anisotropía medios-altos a excepción de algunas zonas de vegetación y zonas de mar. Esto es debido a que si bien estas zonas tienen valores medios-altos de entropía, los segundos, terceros y demás retrodispersores presentes en cada píxel devuelven la misma energía de retrodispersión que el dominante (son aproximadamente equitativos). La imagen de α está compuesta por tonos de azul oscuro a azul claro, con algunas zonas puntuales de color verde amarillento. Esto se traduce en valores de α que van desde los 25° a 45° con zonas puntuales de hasta 75° aproximadamente. Los valores de 25° a 45° revelan zonas de retrodispersión simple a volumétrica, mientras que las zonas puntuales (sobre todo en zonas urbanas e industriales) de hasta 75° , indican la presencia de retrodispersión múltiple.

Como aclaración, los resultados remarcan quizá, la baja precisión de los datos en formato *Dual Polarized* para este tipo de técnicas, tal como se indicó en el apartado 4.2.2.2. Por ejemplo, si bien las zonas de vegetación presentan siempre un gran valor de entropía debido al grado de desorden en la retrodispersión que estas zonas producen, parece poco coherente que las zonas urbanas muestren valores de entropía tan bajos. Así mismo, los valores de α en las zonas urbanas en el caso estudiado para la bahía de San Francisco, USA, eran generalmente, mayores. Cabe tener en cuenta que también se trabaja a una resolución de 5×5 m, si bien es una resolución aceptable, aún está lejos de resoluciones de 1 m. A excepción de estos inconvenientes, estas imágenes evidencian la información que se puede obtener de las matrices de retrodispersión y de su procesado.

En la figura 5.58 tenemos las combinaciones de entropía y anisotropía estudiadas en el apartado 4.2.2.2. La imagen $H \times A$ se asocia a la presencia de dos mecanismos de retrodispersión con la misma intensidad. La imagen presenta, en general, valores medios y muy bajos en varias de las zonas industriales y residenciales. Quizá la más interesante de las imágenes sea la $(1-H) \times A$, asociada a la presencia de varios mecanismos de retrodispersión siendo uno el dominante. De esta forma la imagen $(1-H) \times A$ se asemeja a un detector de zonas industriales y urbanas, pues los grandes valores se concentran en ellas.

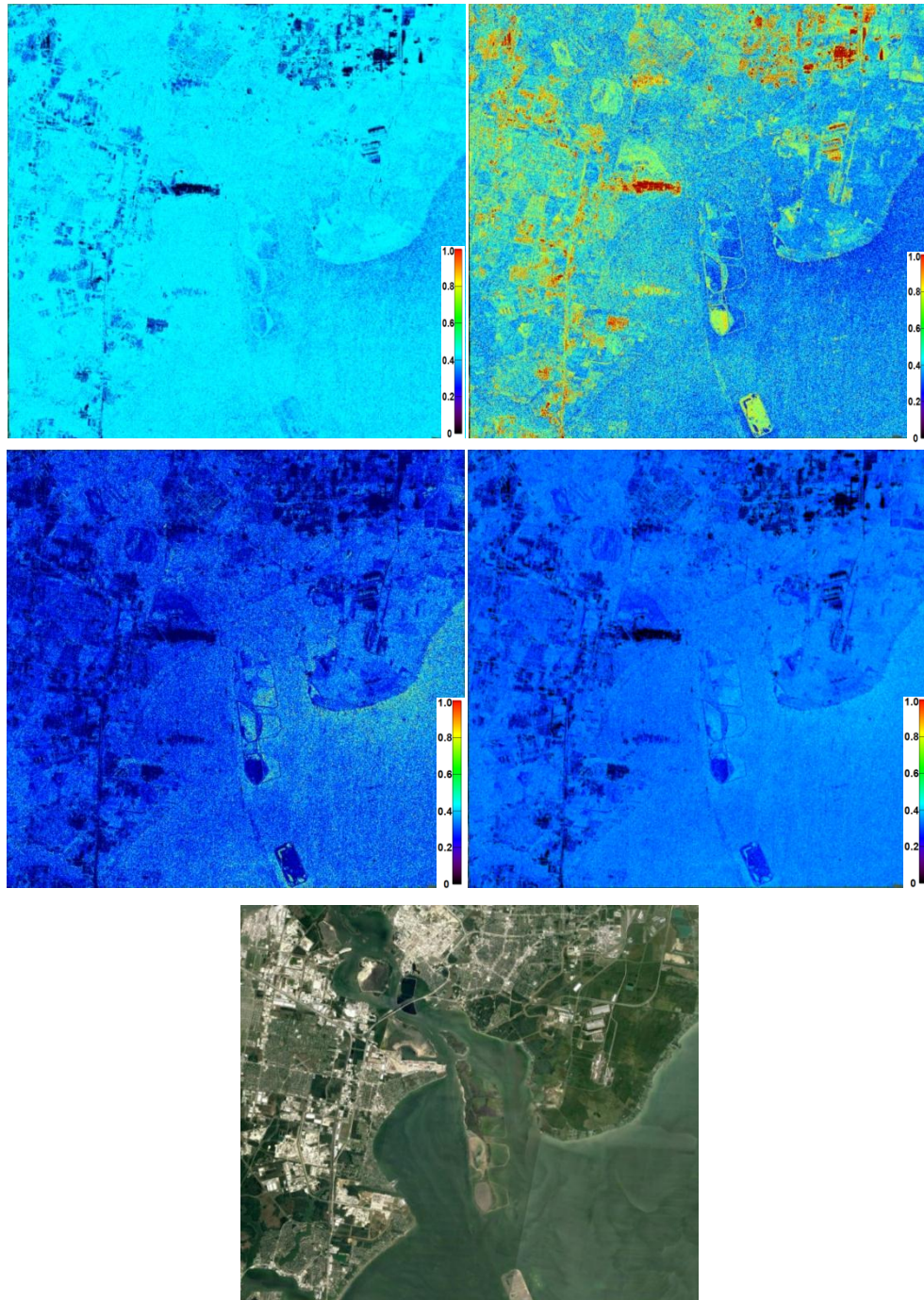


Figura 5.58. Imágenes de las combinaciones de entropía y anisotropía e imagen óptica disponible en Google Earth® para el producto SLC SM de Baytown. Arriba a la izquierda HxA, a la derecha (1-H)xA, abajo a la izquierda Hx(1-A), y por último, abajo a la derecha (1-H)x(1-A).

Los valores medios y bajos se encuentran en las zonas de vegetación o de mar. La imagen de Hx(1-A) corresponde a procesos de retrodispersión aleatorios donde existen varios procesos con igual intensidad. La imagen presenta valores bajos en general, siendo aún más bajos en las zonas industriales o urbanas, donde se entiende que los procesos de retrodispersión no tienen todos la misma intensidad, como quedó gráficamente descrito

Procesado de datos SAR del satélite Sentinel-1 para el estudio de zonas costeras.

en la imagen de $(1-H) \times A$. Por último, la imagen $(1-H) \times (1-A)$ nos habla de la presencia de un único proceso de retrodispersión. Para este caso la imagen presenta también tonos azules claros y oscuros, negando la existencia de un único proceso de retrodispersión. En la figura 5.59 tenemos las imágenes de entropía, anisotropía y alpha correspondientes a la zona de Maspalomas en Gran Canaria. El tamaño real de la escena medido sobre la plataforma Google Earth® es de 6,5 km de alto por 5,7 km de ancho.

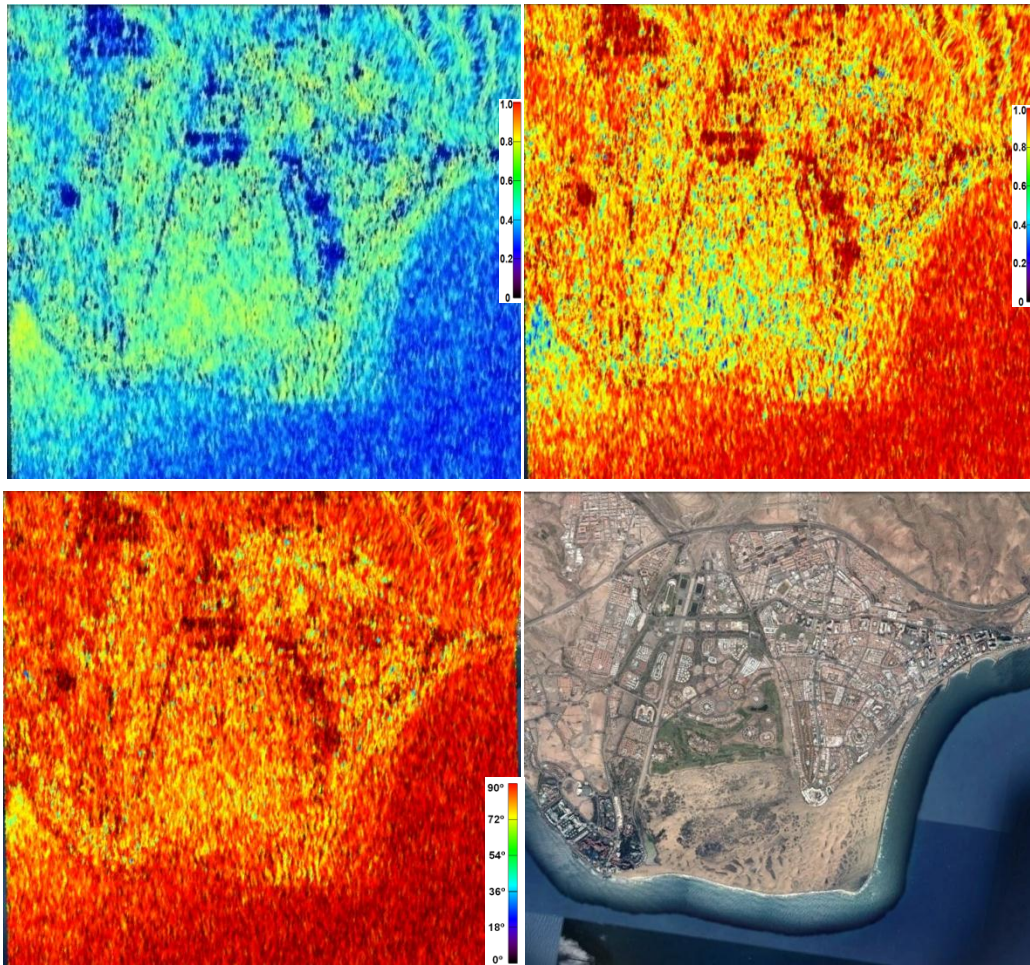


Figura 5.59. Imágenes de entropía, anisotropía, alpha e imagen óptica disponible en Google Earth® para el producto SLC IW de Maspalomas.

Al igual que ocurría para el caso de Baytown, los valores de entropía más bajos se encuentran sobre las zonas urbanas y el mar (tonos azules). Las zonas de vegetación, suelos desnudos y parte de las zonas urbanas, entremezcladas, presentan los valores más altos (tonos verde amarillentos). La imagen de anisotropía tiene sus máximos en las zonas urbanas y el mar (tonos rojos) mientras que los valores medios y bajos aparecen

puntualmente sobre zonas de suelo desnudo o de vegetación. La imagen de alpha contiene, en general, valores muy elevados, a excepción de algunas zonas de suelo desnudo y de vegetación. Aparecen valores más bajos aún, de forma muy puntual, en algunas zonas urbanas. Teniendo en cuenta que la resolución a la que trabajamos en este caso es de 5 x 20 m, la precisión de esta técnica se reduce considerablemente. Al igual que en el caso de Baytown, no es coherente que las zonas urbanas presenten valores de entropía tan bajos. Así mismo, las imágenes de anisotropía y de alpha son muy diferentes al caso de Baytown. Aquí, las zonas de mar presentan altos niveles de anisotropía y de alpha. Por ello cabe recordar aquí el mayor ángulo de inclinación del producto IW ($38,3^\circ$ en el centro del *swath*) frente al SM ($31,2^\circ$ en el centro del *swath*), que puede afectar considerablemente al valor de alpha y de anisotropía. Así mismo el estado de la mar puede ser el causante de este cambio, aunque se desconoce su estado para la fecha de adquisición del producto. En este punto hay que indicar que el mar de Baytown se encuentra en una zona interior abierta sólo al océano mediante una serie de diques, mientras que el mar de Maspalomas es parte del Océano Atlántico, lo que podría causar una mayor inestabilidad en el estado del mar de Maspalomas. Además, cabe mencionar también los artefactos que aparecen en la zona superior de las imágenes de Maspalomas debidos a los efectos de *foreshortening*, *layover* y *shadows* (explicados en el apartado 2.1.2.1.) ocasionados por las irregularidades del terreno de Gran Canaria en cuanto nos alejamos de la costa de Maspalomas y nos dirigimos hacia la cumbre. En cualquier caso, los altos valores de anisotropía se asocian a la importancia de los segundos, terceros o más mecanismos de retrodispersión presentes en la escena, mientras que los valores altos de alpha en el mar se traducen como un proceso de retrodispersión de múltiples rebotes. Éste es el caso en las imágenes de anisotropía y de alpha, por lo que estos valores podrían interpretarse como un mal estado del mar.

Al igual que para el caso de Baytown, en la figura 5.60 tenemos las combinaciones de entropía y anisotropía para el producto de Maspalomas. La imagen de HxA presenta valores muy bajos a lo largo de toda la escena, siendo especialmente bajos en algunas zonas urbanas. Una vez más, la imagen de $(1-H)xA$ se asemeja a un detector de zonas urbanas dado que en éstas se concentran los valores más altos. Aparecen también valores altos en la zona de mar. En estas áreas, esto se traduce a varios procesos de retrodispersión, de los cuales, uno es el proceso dominante. La imagen de $Hx(1-A)$ muestra

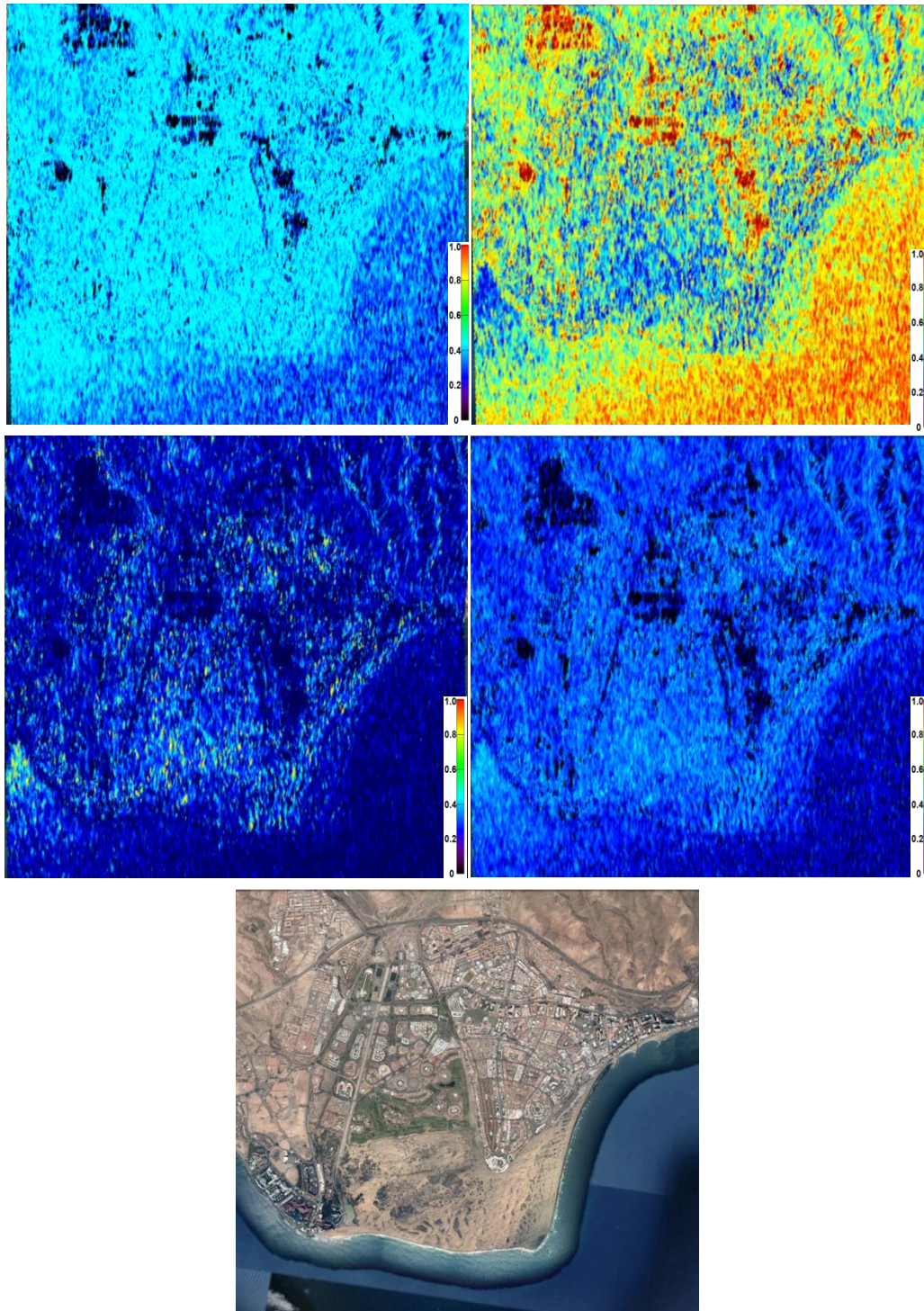


Figura 5.60. Imágenes de las combinaciones de entropía y anisotropía e imagen óptica disponible en Google Earth® para el producto SLC IW de Maspalomas. Arriba a la izquierda $H \times A$, a la derecha $(1-H) \times A$, abajo a la izquierda $H \times (1-A)$, y por último, abajo a la derecha $(1-H) \times (1-A)$.

valores bajos en general, siendo aún más bajos en las zonas urbanas, donde se entiende que no todos los procesos de retrodispersión tienen la misma intensidad. Esto último coincide con la imagen de $(1-H) \times A$. Cabe indicar que en zonas puntuales de las áreas de

suelo desnudo y vegetación aparecen valores altos. Por último, la imagen de $(1-H) \times (1-A)$ presenta también tonos azules claros y oscuros, negando la existencia de un único proceso de retrodispersión.

5.2.3.2. Clasificación no supervisada H/α y $H/A/\alpha$

Como se indicó en el apartado 4.2.2.2. del capítulo 4, para la realización de la clasificación no supervisada *H/A/Alpha Classification* se hace uso del plano H- α , donde, como hemos explicado, están representados todos los mecanismos aleatorios de retrodispersión. Por lo tanto, para obtener el plano H- α de las escenas de los productos en PolSARpro se debe pulsar el *checkbox* de "*Entropy/Alpha Planes (BMP)*" del cuadro de diálogo que vimos en la figura 5.50, cuando configuramos la herramienta de *H/A/Alpha Classification* para la obtención de los parámetros de entropía, anisotropía y α . El resultado del plano H- α para el producto de Baytown puede observarse en la figura 5.61.

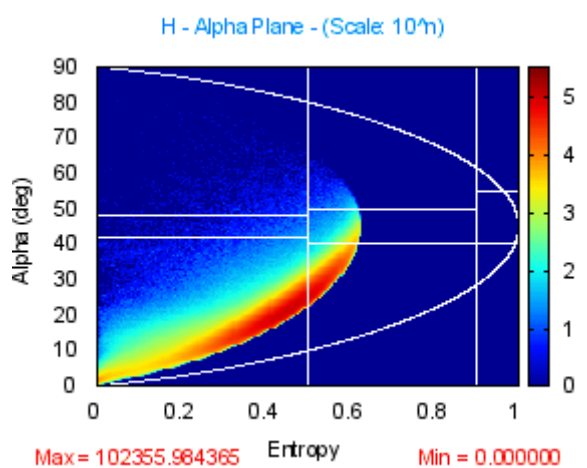


Figura 5.61. Plano H- α para el producto de Baytown.

Una de las primeras observaciones que hay que hacer sobre la figura 5.61 es la ubicación de los datos dentro de las áreas del plano H- α y sus valores límite. En este sentido, llama la atención la inexistencia de datos con entropía mayor a 0,6. Esto concuerda con la imagen del parámetro de entropía del producto de Baytown, pues en este caso la imagen tampoco mostraba valores de entropía elevados. Esta anomalía en la distribución de datos podría ser un error del software PolSARpro. Por otro lado, en el plano, los valores de α ponen de manifiesto la existencia de zonas puntuales con altos valores, si bien la mayor parte de los datos aparece con valores bajos, tal como mostraba la imagen del parámetro α . Asumiendo que la distribución de datos en el plano es

Procesado de datos SAR del satélite Sentinel-1 para el estudio de zonas costeras.

correcta, observamos que la mayor parte de los datos se concentra en las regiones de "*Bragg Surface*", "*Surface roughness propagation effects*" y "*Vegetation*". De acuerdo a la descripción del plano estudiado en el capítulo 4, los píxeles dentro de la zona de "*Bragg Surface*" contienen superficies como agua en calma, hielo en el mar así como superficies terrestres muy planas. La zona "*Surface roughness propagation effects*" refleja los cambios en la rugosidad de las superficies anteriores debido al incremento de la entropía. La zona "*Vegetation*" contiene procesos de retrodispersión ligeramente correlados, de forma que existe un leve desequilibrio entre las amplitudes HH y HV. Esto ocurre en áreas con vegetación en las que existe cierta correlación en la orientación de elementos retrodispersores anisotrópicos. En menor medida aparecen datos en las zonas "*Dipole*", "*Forestry double bounce*" y "*Dihedral scatterer*". La zona "*Dipole*" es igual a la de "*Vegetation*" pero con una entropía menor, que se interpreta como varios procesos de retrodispersión intensamente correlados, de forma que existe un gran desequilibrio entre las amplitudes HH y HV. En la zona de "*Forestry double bounce*" encontraríamos bosques, donde los mecanismos que producen dobles rebotes están afectados por efectos de multipropagación a través de las hojas y ramas de la vegetación. También se enmarcan aquí algunas zonas urbanas con alta densidad de estructuras, edificios y objetos. Por último, la zona "*Dihedral scatterer*" contiene baja entropía y doble o más rebotes de señal radar producidos, por ejemplo, por dihedros metálicos. En este sentido, la distribución de datos y la interpretación del plano H- α coincide con la escena de Baytown, pues la mayor parte de la superficie está constituida por el agua del mar, suelos desnudos y vegetación. De forma relativa, en menor medida aparecen las zonas urbanas e industriales, con alta densidad de elementos y objetos metálicos.

Como se indicó en el apartado 4.2.2.2., el siguiente paso es la utilización de estos datos para la clasificación no supervisada del terreno usando la distribución estadística compleja de Wishart. Para realizar este procesado en PolSARpro debemos seleccionar y configurar la herramienta "*Wishart H/A/Alpha Classification*", tal y como se describe en la figura 5.62. Como parámetros de entrada tenemos la entropía, la anisotropía y alpha. En la configuración hemos indicado que el procesado se detendrá para un número de iteraciones superior a 30 o cuando el porcentaje de relación de píxeles entre clases dentro de un mismo *cluster* sea menor al 2 %. El tamaño de ventana de procesado es de 3. Este proceso nos dará dos imágenes: La primera es la imagen de clasificación no supervisada

usando los parámetros de entropía y alpha. La segunda será la imagen de clasificación no supervisada usando los parámetros de entropía, anisotropía y alpha. La selección de colores para las clases puede configurarse en las pestañas *Edit* del apartado *Color Maps* (hay que configurar intuitivamente a modo de prueba-error los mapas de color para la clasificación H/α y $H/A/\alpha$). Estas imágenes pueden observarse en las figuras 5.63 y 5.64.

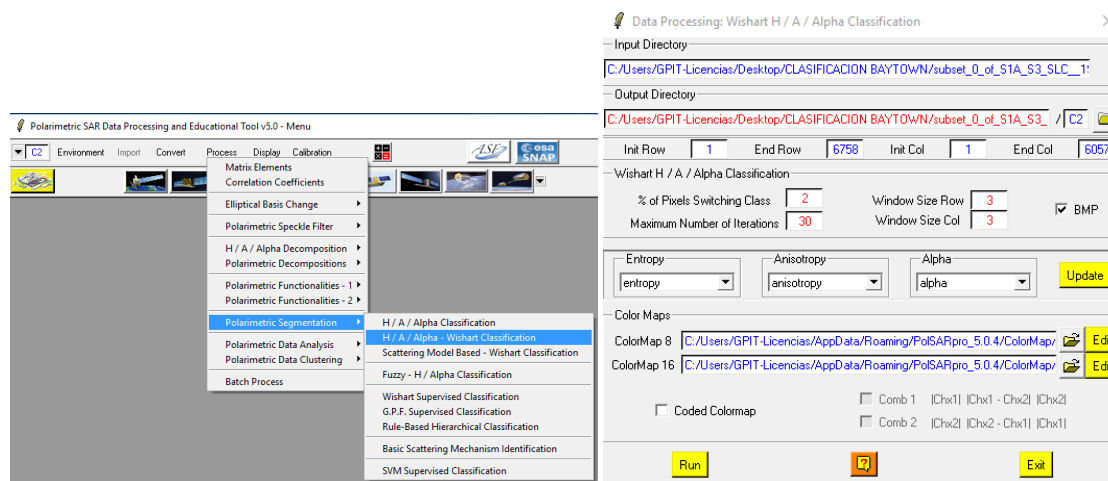


Figura 5.62. Selección (a la izquierda) y configuración (derecha) de la herramienta $H/A/\alpha$ -Wishart classification en PolSARpro.

En la imagen de la figura 5.63, la escena de Baytown ha sido dividida en cinco colores que representan los cinco *clusters* en los que el algoritmo de Wishart ha agrupado los datos de la distribución del plano $H-\alpha$. Observando la imagen óptica disponible en Google Earth® de la figura 5.65, la interpretación de los colores de la figura 5.63 es la siguiente:

- ✓ Azul: Agua del mar, ríos, embalses, carreteras y suelo desnudo.
- ✓ Rojo: Zonas urbanas, zonas industriales, metales y trenes.
- ✓ Verde oscuro: Vegetación densa y ciertas estructuras metálicas.
- ✓ Verde claro: Vegetación.
- ✓ Gris: Superficies planas de cemento u hormigón.

Siguiendo esta leyenda tenemos que, aunque las clases principales de superficies como el agua, la tierra y la vegetación se pueden diferenciar visualmente, éstas se encuentran entremezcladas en cierto grado. Por ejemplo, resulta imposible distinguir el agua del mar, ríos o embalses de las carreteras, lo que lleva a la confusión de interpretar las carreteras como ríos. Así mismo, las zonas de suelo desnudo, al tener una superficie

Procesado de datos SAR del satélite Sentinel-1 para el estudio de zonas costeras.

mucho más lisa que el resto, se interpreta como agua en calma y por eso la clasificación no supervisada lo incluye en el *cluster* de color azul, donde se encuentra el agua. En definitiva, aunque tenemos 5 clases, el algoritmo no es capaz aún de diferenciar con precisión las distintas características de la superficie captada. Por este motivo, cuando añadimos el parámetro de anisotropía tenemos la imagen de la figura 5.64, en la que la interpretación de colores sería la siguiente:

- ✓ Marrón: Suelo desnudo y carreteras.
- ✓ Azul oscuro: Agua del mar, embalses y ríos.
- ✓ Azul claro: Suelo desnudo y sobre todo, edificaciones urbanas (casas).
- ✓ Verde claro: Vegetación y suelo desnudo.
- ✓ Verde oscuro: Vegetación densa.
- ✓ Gris: Agua de mar, ríos y carreteras.
- ✓ Rojo: Zonas industriales, metales y trenes.
- ✓ Violeta: Metales en zonas industriales.
- ✓ Rojo vino: Superficies planas de hormigón sobre todo en zonas industriales o de puertos (barcos).
- ✓ Amarillo: Zonas industriales (frecuentemente alrededor de estructuras metálicas).

Como vemos, hemos pasado de 5 a 10 clases añadiendo el parámetro de anisotropía. Esto nos permite diferenciar mejor algunas clases de la imagen anterior. Por ejemplo, se puede distinguir el agua del mar del agua más cercana a la costa y a los afluentes de las desembocaduras de los ríos. Estas aguas podrían estar contaminadas o contener ciertas cantidades de residuos que hacen que la rugosidad del agua superficial cambie y de esta forma, el radar lo detecte. Hay que tener en cuenta que la mayor parte de la costa de este escenario está ocupada por zonas industriales. Se puede distinguir ahora también entre el suelo desnudo y las superficies de vegetación. En las zonas industriales se pueden distinguir distintas estructuras metálicas y también podemos diferenciar mejor las zonas urbanas de las industriales. Se pueden distinguir las carreteras (superficies lisas) del agua, aunque ahora éstas se confunden con el suelo desnudo. Las mejoras son notorias, aunque sin embargo, aún con estas 10 clases se producen ciertos errores y confusiones. Quizá una forma de mejorar los resultados sería interpretando ciertas combinaciones de colores en diversas zonas. Por ejemplo, la combinación de color

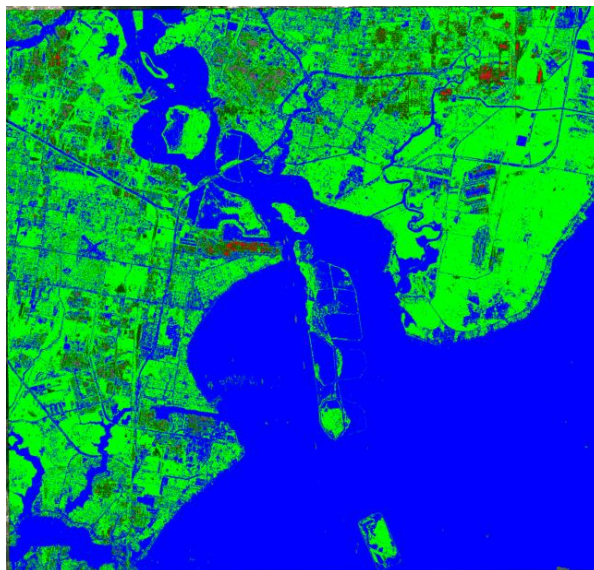


Figura 5.63. Clasificación no supervisada H/α para el producto de Baytown.



Figura 5.64. Clasificación no supervisada H/A/α para el producto de Baytown.

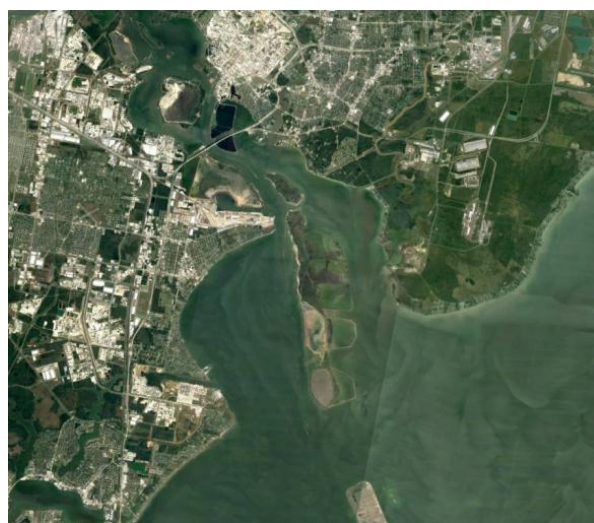


Figura 5.65. Imágen óptica disponible en Google Earth®.

Procesado de datos SAR del satélite Sentinel-1 para el estudio de zonas costeras.

marrón, gris y/o azul pueden interpretarse como el agua de ríos o de embalses. Las combinaciones de rojo y amarillo se dan siempre en zonas industriales. Así mismo, la combinación de azul claro, amarillo, verde claro y marrón suele ocurrir sobre las zonas urbanas de la escena.

Para el caso de la zona de Maspalomas repetimos el proceso y obtenemos, en primer lugar, el plano H- α de la escena. El resultado se encuentra en la figura 5.66

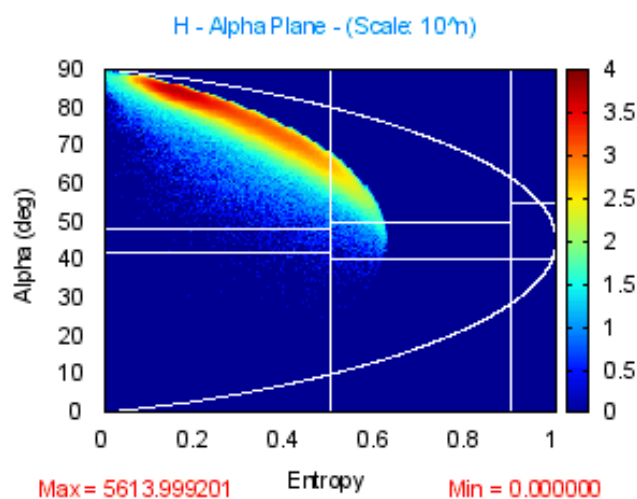


Figura 5.66. Plano H- α para el producto de Maspalomas.

Al igual que con la figura 5.61, una de las primeras observaciones que podemos hacer es la ubicación de los datos dentro de las áreas del plano H- α y sus valores límite. Aquí también se da el caso de la inexistencia de datos con entropía mayor a 0,6. Esto también coincide con la imagen del parámetro de entropía del producto de Maspalomas, pues en este caso la imagen tampoco mostraba valores de entropía elevados. Como ya habíamos apuntado, esta anomalía en la distribución de datos podría ser un error del software PolSARpro. Por otro lado, la distribución de los datos en la zona superior del plano pone de manifiesto los elevados valores de alpha que ya se mostraban en la figura 5.59. Asumiendo entonces que la distribución de datos en el plano es correcta, observamos que la mayor parte de los datos se concentra en las regiones de "*Dihedral scatterer*" y "*Forestry double bounce*". De acuerdo a la descripción del plano estudiado en el capítulo 4, los píxeles dentro de la zona de "*Dihedral scatterer*" corresponden a procesos de retrodispersión con baja entropía y doble o más rebotes de señal radar producidos, por ejemplo, por dihedros metálicos o superficies de elevada rugosidad. En la zona de

"*Forestry double bounce*" encontraríamos procesos de retrodispersión de dihedros con moderada entropía. Se enmarcan aquí algunas zonas urbanas, donde la alta densidad de estructuras, edificios y objetos, puede producir este tipo de retrodispersión. Por último, en menor medida aparecerían píxeles en la zona de "*Vegetation*". En esta zona tenemos áreas con vegetación en las que existen varios procesos de retrodispersión ligeramente correlados, de forma que existe un desequilibrio entre las amplitudes de VV y VH y, por lo tanto, existe cierta correlación en la orientación de elementos retrodispersores anisotrópicos. En este sentido, la distribución de datos y la interpretación del plano H- α coincide en cierto grado con la escena de Maspalomas. La mayor parte de los datos se encuentra en "*Dihedral scatterer*", que podría interpretarse como parte del suelo urbano y, sobre todo, como parte del agua del mar (si éste se encontraba en mal estado para el momento de la adquisición de datos). El área de "*Forestry double bounce*" recoge las estructuras propias del suelo urbano y turístico mientras que la zona de "*Vegetation*" concentra los datos de las zonas de vegetación del suelo de Maspalomas.

Al igual que se hizo con el producto de Baytown, el siguiente paso es la utilización de estos datos para la clasificación no supervisada del terreno usando la distribución estadística compleja de Wishart. En las figuras 5.67 y 5.68 tenemos las imágenes correspondientes a las clasificaciones no supervisadas H/ α y H/A/ α , respectivamente.

En la figura 5.67, la escena de Maspalomas ha sido dividida en cinco colores que representan los cinco *clusters* en los que el algoritmo de Wishart ha agrupado los datos de la distribución del plano H- α . Observando la imagen óptica disponible en Google Earth® de la figura 5.69, la interpretación de los colores de la figura 5.63 es la siguiente:

- ✓ Verde oscuro: Vegetación y suelo desnudo.
- ✓ Amarillo: Zonas urbanas y suelo desnudo.
- ✓ Rojo: Zonas urbanas.
- ✓ Azul: Agua del mar, arena, dunas, canal del barranco, charca y suelo desnudo.
- ✓ Gris: Algunas zonas urbanas.

Siguiendo esta leyenda tenemos que, aunque las clases principales de superficies como el agua, la superficie terrestre y ciertas zonas de vegetación se pueden diferenciar

Procesado de datos SAR del satélite Sentinel-1 para el estudio de zonas costeras.

de forma somera visualmente, éstas se encuentran entremezcladas intensamente. En el caso de Maspalomas, con respecto al de Baytown, la reducción en la resolución afecta drásticamente a las capacidades de clasificación de esta técnica. Por ejemplo, resulta imposible distinguir el agua del mar de la arena de la playa, las dunas o la charca de Maspalomas. Así mismo, el canal del barranco se interpreta como parte del mar. Las clases de color amarillo, rojo y gris se entremezclan en las zonas urbanas sin un orden lógico visual. Por otro lado, el color verde recoge tanto suelo desnudo como suelo con vegetación. En definitiva, aunque tenemos 5 clases, el algoritmo no es capaz aún de diferenciar con cierta precisión las distintas características de la superficie captada. Por este motivo, cuando añadimos el parámetro de anisotropía tenemos la imagen de la figura 5.68, en la que la interpretación de colores sería la siguiente (la interpretación de cada color contiene de forma aproximada los objetos o superficies mencionadas):

- ✓ Rojo: Zonas urbanas.
- ✓ Rojo vino: Zonas urbanas.
- ✓ Amarillo: Zonas urbanas.
- ✓ Violeta: Zonas urbanas.
- ✓ Azul claro: Agua del mar.
- ✓ Azul oscuro: Agua del mar, zonas puntuales de suelo desnudo y arena.
- ✓ Ocre: Arena, agua del mar, charca y zonas puntuales de suelo desnudo.
- ✓ Naranja: Suelo desnudo y vegetación.
- ✓ Marrón: Puntualmente sobre parte de suelos desnudos.
- ✓ Verde: Zonas de vegetación y suelo desnudo.

Como vemos, hemos pasado de 5 a 10 clases añadiendo el parámetro de anisotropía. Esto nos permite diferenciar mejor algunas clases de la imagen anterior. Sin embargo, en el caso de Maspalomas, la baja resolución hace que las mejoras sean notoriamente ínfimas. Una de las mejoras más importantes sea quizá la detección de la arena de la playa como una clase diferente a la del agua del mar, aunque sin embargo, hay zonas del mar que son a su vez detectadas como arena. Así mismo, aparecen ahora más clases dentro de las zonas urbanas de los edificios turísticos, teniendo un total de cuatro clases: rojo, rojo vino, amarillo y violeta. Por lo general, estos cuatro colores aparecen combinados sobre aquellas zonas urbanas y edificios. También, se incluye una mejora en la

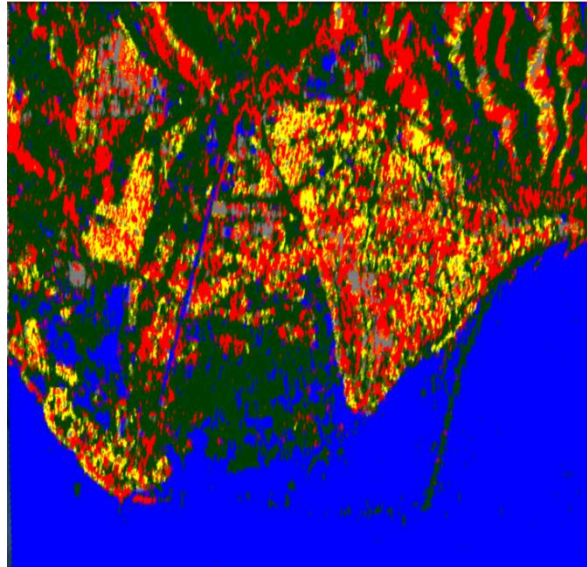


Figura 5.67. Clasificación no supervisada H/α para el producto de Maspalomas.

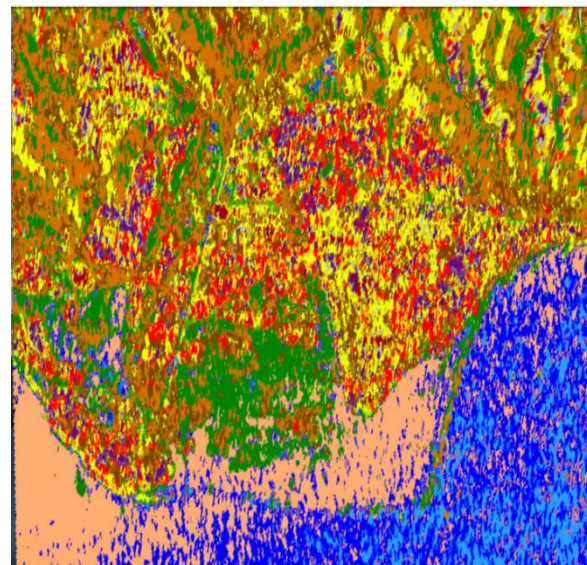


Figura 5.68. Clasificación no supervisada $H/A/\alpha$ para el producto de Maspalomas.



Figura 5.69. Imagen óptica disponible en Google Earth®.

Procesado de datos SAR del satélite Sentinel-1 para el estudio de zonas costeras.

detección de vegetación y suelos desnudos mediante la incorporación de las clases naranja y marrón, aunque sin un resultado aceptable. Como dato curioso se encuentra la clase azul claro que aparece únicamente en el agua mar adentro. La distinción entre dos clases de agua de mar podría ser síntoma de un mal estado del mismo como ya apuntábamos en párrafos anteriores. El mal estado del mar podría producir una superficie altamente rugosa y, por lo tanto, originar múltiples rebotes en los procesos de retrodispersión de la señal radar, lo que podría causar la diferenciación de varias clases.

Como conclusión, han quedado demostradas las capacidades de los métodos de clasificación no supervisada estudiados y aplicados a los casos de Baytown y Maspalomas. Si bien los resultados para Maspalomas no son aceptables, para el caso de Baytown los resultados han probado el potencial de estas técnicas, pues debemos tener en cuenta que a medida que mejoramos la resolución, mejoramos la precisión de los resultados. Así mismo cabe indicar que la inclusión de las cuatro bandas polarimétricas sería el caso ideal para la ejecución de estas técnicas, lo cual mejoraría aún más los resultados. Por último cabe indicar las mejoras aplicables al software puesto que para el plano H- α originado existe poca ayuda de interpretación disponible además de que no existe la posibilidad de configurar los colores por área del plano. En este punto, si nos fijamos, hemos tenido como resultado 5 y 10 clases para el plano bidimensional y el tridimensional, respectivamente. Según la teoría debían originarse 8 y 16 clases. Aún así, PolSARpro nos proporciona los resultados que aquí se han expuesto.

5.2.4. Clasificación supervisada (*Supervised Wishart Classifier*)

Como se indicó en la sección 4.2.2.3. del capítulo 4, la idea básica de toda clasificación supervisada consiste en que el usuario es quien decide y selecciona las áreas (*clusters*) iniciales de entrenamiento para la clasificación. Bajo esta filosofía, en el entorno PolSARpro disponemos de la herramienta *Wishart supervised Classification*, que nos servirá para realizar una clasificación supervisada de los escenarios de Baytown y Maspalomas. En este caso, continuamos trabajando desde la matriz de covarianza C2 creada en el apartado 5.2.3.2. para cada escenario. A continuación seleccionamos y configuramos la herramienta, tal y como aparece en las figuras 5.70 y 5.71. Si observamos

el cuadro de diálogo, el algoritmo que utilizará el PolSARpro será el *Wishart* para "*Partial-Polar Supervised Classifier*".

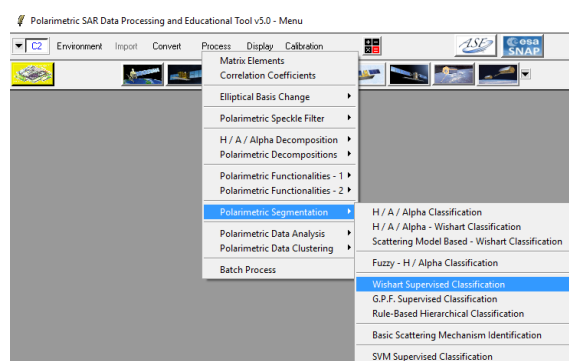


Figura 5.70. Selección de la herramienta *Wishart Supervised Classification* en PolSARpro.

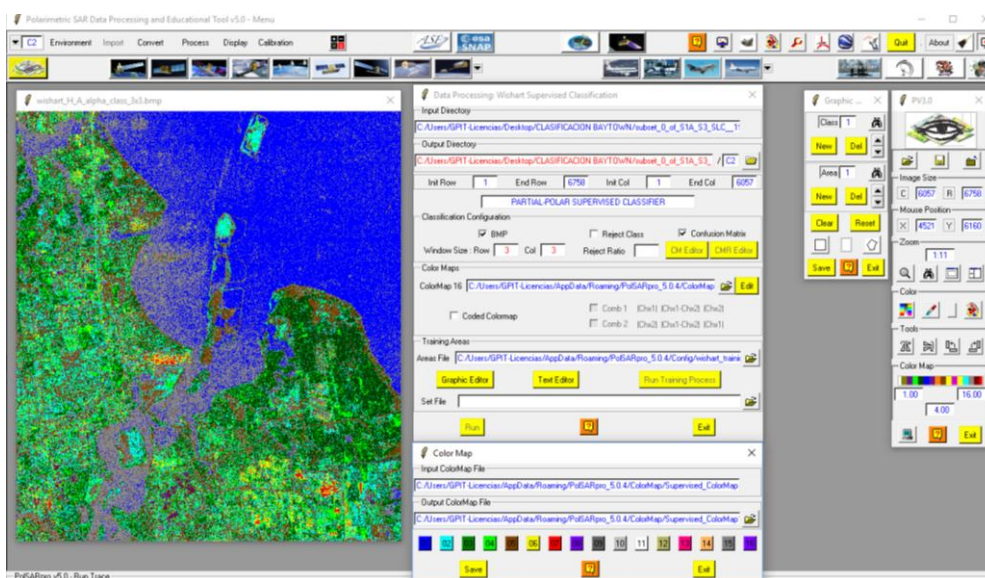


Figura 5.71. Configuración de la herramienta *Wishart Supervised Classification* en PolSARpro.

En la configuración de la herramienta seleccionamos el formato de archivo "BMP", y pulsamos el *checkbox* de "*Confusion Matrix*". Esto último hará que el algoritmo nos genere la matriz de confusión de clases una vez ha terminado el procesado. El tamaño de la ventana de procesado será de 3. Así mismo, debemos pulsar en "*Graphic Editor*" para crear las regiones de entrenamiento (ROIs). Se nos pedirá que abramos una imagen de las anteriormente creadas para poder dibujar las áreas de entrenamiento sobre ella. En este punto, se aconseja abrir la imagen de la clasificación no supervisada H/A/Alpha, dado que ésta nos puede servir de guía a la hora de realizar una cuidada selección y creación de las diferentes ROIs. De esta forma, a medida que creamos clases, como por ejemplo, el mar, la vegetación, el suelo desnudo..., se debe pulsar el botón "New" del apartado "Class" en el cuadro de diálogo "*Graphic Editor*" para crear otra clase. Recordemos que en este tipo de

Procesado de datos SAR del satélite Sentinel-1 para el estudio de zonas costeras.

técnicas existe también la posibilidad de elegir varias áreas para una misma clase, de forma que el conjunto de áreas representen una mejor aproximación de la clase en cuestión. Así, en el momento de crear una clase definiendo un área de la misma, podemos seguir añadiendo más áreas de la misma clase presionando el botón "New" del apartado "Area" en el cuadro de diálogo "Graphic Editor". Así mismo, el color asignado a cada clase en la clasificación puede ser configurado en el botón "Edit" del apartado *Color Map* en el cuadro de diálogo "Wishart Supervised Classification". La adjudicación de colores se realiza por orden de clases creadas y según el índice en la paleta de color (la paleta puede observarse en la parte inferior central de la figura 5.71). En las imágenes de la figura 5.72 se pueden observar varias ROIs dibujadas sobre la imagen de clasificación no supervisada H/A/Alpha del escenario de Baytown. Para mayor comodidad, la herramienta nos permite hacer *zooms* de las diferentes zonas para definir con mayor precisión y cuidado las distintas regiones. Cabe indicar aquí que, aunque las ROIs son dibujadas sobre la imagen de clasificación no supervisada, el algoritmo de clasificación tomará únicamente las coordenadas de los puntos de las ROIs para definir los *clusters*. Esto se realiza cuando ya hemos terminado de definir nuestras ROIs. En ese momento debemos presionar "Save" en el cuadro de diálogo de "Graphic Editor" y a continuación pulsar "Run Training Process" en la configuración del cuadro de diálogo de clasificación de *Wishart*. De esta forma, el PolSARpro ya tiene los datos necesarios de las diferentes clases y subáreas que hemos creado para el proceso de clasificación. El paso siguiente será presionar el botón "Run" para dar comienzo al algoritmo de clasificación. El algoritmo tomará los *clusters* de las ROIs creadas y la información contenida en los datos de la matriz de covarianza C2 para realizar el proceso de clasificación. En la figura 5.73 puede observarse la imagen de la clasificación supervisada de *Wishart* realizada sobre el escenario de Baytown.

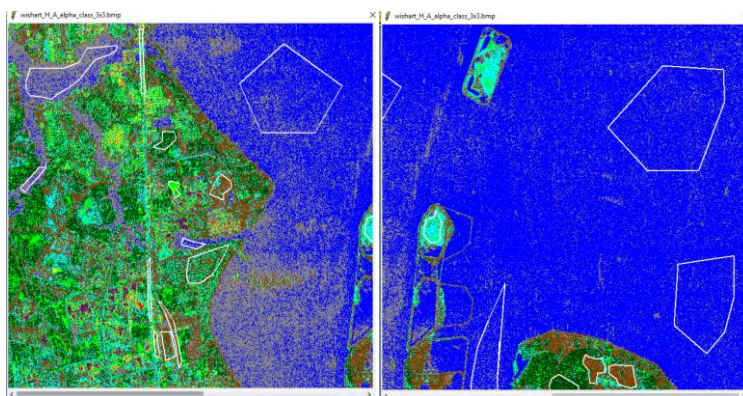


Figura 5.72. Selección de zonas de entrenamiento en el escenario de Baytown.

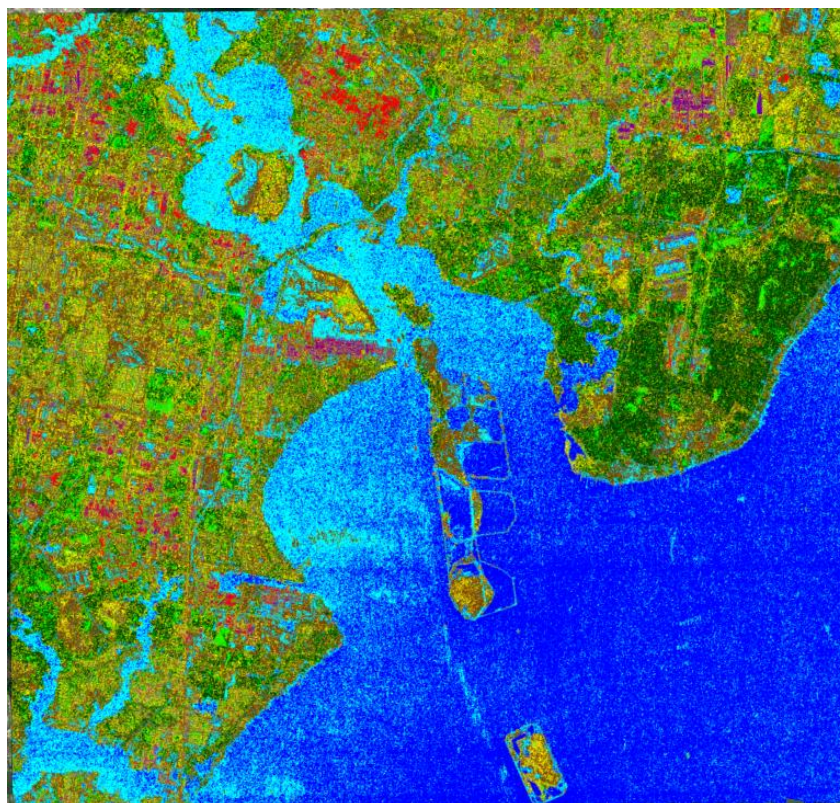


Figura 5.73. Imagen clasificada con el algoritmo de *Wishart* supervisado (9 clases) para el escenario de Baytown.

En el caso de la imagen clasificada supervisada se ha optado por un esquema de 9 clases. La leyenda de colores se describe a continuación:

- ✓ Azul oscuro: Mar.
- ✓ Azul claro: Ríos y embalses.
- ✓ Verde oscuro: Vegetación densa.
- ✓ Verde claro: Vegetación.
- ✓ Marrón: Suelo desnudo.
- ✓ Amarillo: Zonas urbanas.
- ✓ Rojo: Zonas industriales.
- ✓ Violeta: Trenes.
- ✓ Gris: Carreteras.

Como aclaración, la creación de las distintas clases tiene su origen en la observación y análisis de las distintas clases que se podían diferenciar en la clasificación no supervisada $H/A/\alpha$. De esta forma se optó por dos clases (azul oscuro y azul claro) que

Procesado de datos SAR del satélite Sentinel-1 para el estudio de zonas costeras.

diferencias entre el agua del mar y la de ríos y embalses. Otras dos clases más para dos grados de vegetación existentes en el escenario. Otra clase para los suelos desnudos. Una única clase para zonas urbanas y otra para zonas industriales. Debido a la frecuencia de trenes y estaciones ferroviarias en la escena se optó por añadir una clase que la incluyera. Por último, para intentar solventar uno de los problemas más graves encontrados en las anteriores clasificaciones, se incluyó la clase de carreteras. Esta clase constituye uno de los retos de esta clasificación puesto que al tratarse de una superficie lisa, las clasificaciones no supervisadas la entremezclaban con las clases de suelo desnudo, agua de ríos, de embalses o del mar.

Los resultados mostrados en la imagen de la figura 5.73 apenas se diferencian, *a grosso modo*, de la imagen de la clasificación no supervisada de la figura 5.64. El cambio más visible es la codificación de colores por clases, aunque los grupos (clases) siguen siendo muy similares. Todas las zonas abundantemente metálicas de la escena, como por ejemplo, las estaciones de trenes y parte de los puertos y zonas industriales han quedado teñidas de violeta, que eran en principio, sólo los trenes. Por lo tanto, se podría decir que la clase de trenes ha quedado relegada a los objetos metálicos. Las zonas industriales aparecen de color rojo. Las dos clases de vegetación nos permiten distinguir, en general, la abundancia y tamaño de la vegetación de la zona. Los suelos desnudos aparecen de color marrón, mezclados con el color azul claro (propio del agua de ríos y embalses) y con el color amarillo (propio de las zonas urbanas). También aparecen de color marrón, aunque de forma muy excepcional, algún que otro tramo de carretera. Por lo tanto, en esta clase la precisión es baja. Así mismo, el color amarillo abunda en las zonas urbanas, pero ocupa también, como se ha dicho, parte de los suelos desnudos. El color azul oscuro aparece en el mar y en algunos ríos y embalses. De forma muy puntual aparece también sobre la superficie terrestre (alguna superficie muy lisa). El color azul claro aparece en el agua de mar más cercana a las costas, el agua de los ríos y los embalses. Así mismo, este último color es frecuente en las carreteras y las superficies lisas terrestres, siendo éste uno de los mayores defectos de la clasificación final. El color gris aparece de forma puntual sobre la superficie terrestre, pero no se distingue la carretera. Para analizar de forma objetiva y numérica la confusión entre las clases, el PolSARpro nos proporciona como resultado la matriz de confusión que podemos observar en la tabla 5.1.

%	C1 Mar	C2 Ríos y embalses	C3 Vegetación densa	C4 Vegetación	C5 Suelo desnudo	C6 Zonas urbanas	C7 Zonas industriales	C8 Trenes	C9 Carreteras
C1	79,48	20,50	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
C2	26,72	70,52	0,20	0,02	2,22	0,10	0,01	0,00	0,19
C3	0,00	0,04	77,90	8,52	3,22	8,40	0,00	0,00	1,91
C4	0,00	0,01	14,77	72,27	0,50	7,92	0,00	0,05	4,47
C5	0,08	15,23	3,13	0,78	58,71	10,86	0,00	0,00	11,20
C6	0,02	4,60	11,19	8,83	26,94	30,27	0,59	1,75	15,81
C7	0,00	1,37	1,71	8,04	5,20	11,16	38,51	23,22	10,79
C8	0,00	0,82	0,96	11,40	5,79	17,02	14,70	31,83	17,49
C9	0,56	26,07	5,45	2,10	40,82	10,63	0,26	1,15	12,96

Tabla 5.1. Matriz de confusión para la clasificación supervisada de *Wishart* de la escena de Baytown.

De los datos mostrados en la tabla tenemos que el grado de acierto mayor lo tienen las clases de "Mar", "Ríos y embalses", "Vegetación densa" y "Vegetación". Con un grado medio de acierto tendríamos las clases de "Suelo desnudo" y "Zonas industriales". Con un grado de acierto bajo entrarían las clases de "Zonas urbanas", "Trenes" y sobre todo la clase de "Carreteras", con un 12,96 %. Haciendo un análisis de la tabla, nos daremos cuenta de que la observación visual de la imagen clasificada comentada en el párrafo anterior queda reflejada en los datos numéricos de la tabla. Se podría decir que el mayor acierto de esta técnica de clasificación, para el producto que hemos utilizado, se encuentra en la precisión de la identificación de las clases de agua ("Mar" y "Ríos y embalses") y de vegetación ("Vegetación densa" y "Vegetación"). El resto de clases ofrece valores de precisión muy bajos, siendo el caso de las carreteras el mayor de los errores. Cabe indicar aquí que la clase de "Carreteras" es confundida sobre todo con el agua de "Ríos y embalses" y las superficies de "Suelos desnudos".

En definitiva, los resultados de la clasificación supervisada siguiendo el algoritmo de *Wishart* para el escenario de Baytown ofrecen una calidad y precisión similar a la conseguida con las técnicas de clasificación no supervisada realizadas anteriormente. Cabría esperar una notable mejora en el caso de un aumento de resolución o incluso, de disponer de las cuatro bandas polarimétricas.

A continuación, y al igual que se hizo para el caso de la escena de Baytown, en la figura 5.74 se muestra la imagen de clasificación supervisada de *Wishart* para el escenario de Maspalomas. En este caso se ha optado por un esquema de clasificación de 9 clases. La leyenda de colores se describe a continuación:

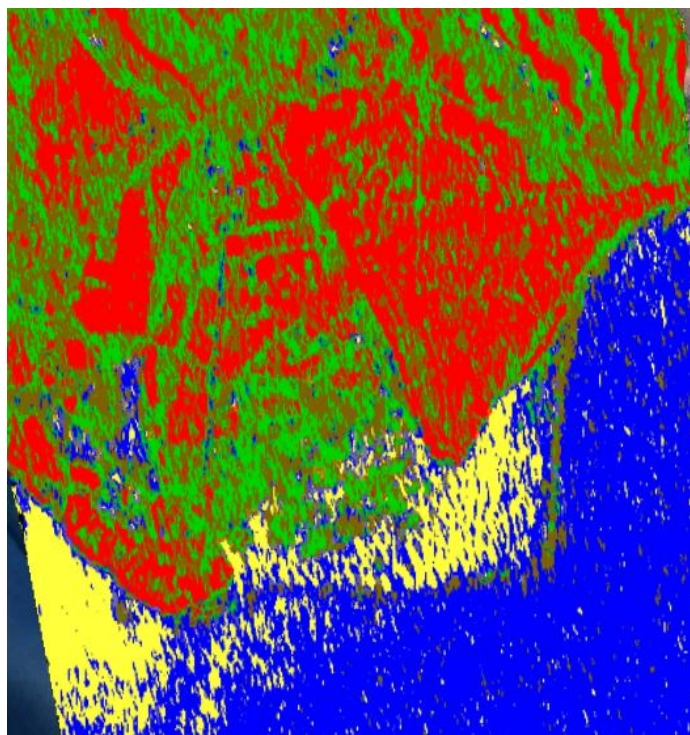


Figura 5.74. Imagen clasificada con el algoritmo de *Wishart* supervisado (5 clases) para el escenario de **Maspalomas**.

- ✓ Azul: Mar.
- ✓ Amarillo: Arena.
- ✓ Verde: Vegetación.
- ✓ Rojo: Zonas urbanas.
- ✓ Marrón: Suelo desnudo.

Al igual que en el caso de Baytown, la creación de las distintas clases tiene su origen en la observación análisis de las distintas clases que se podían diferenciar en la clasificación no supervisada de $H/A/\alpha$. De esta forma se optó por una clase para el mar, otra clase para las zonas de vegetación, otra para las zonas urbanas y otra para el suelo desnudo. Por último, para intentar solventar uno de los problemas más graves encontrados en las anteriores clasificaciones, se añadió una clase para la arena de playa. Como puede observarse en las figuras 5.67 y 5.68, en las anteriores clasificaciones la arena se entremezclaba siempre con el agua del mar.

Los resultados mostrados en la figura 5.74 se diferencian bastante, de forma general, de la imagen de clasificación no supervisada de la figura 5.68. Para empezar, la variedad de clases existentes en la zona urbana de la imagen de clasificación no

supervisada (colores amarillo, rojo y violeta) han quedado reducidas a una, el color rojo. Por otro lado, la clase de vegetación ocupa ahora la totalidad de las zonas de vegetación de Maspalomas y algunas zonas de suelo desnudo y de arena. Las zonas de suelo desnudo se encuentran repartidas a lo largo de toda la escena con el color marrón. Los mayores problemas han ocurrido en las clases de mar y de arena. Si bien ahora el mar aparece en general de un único color (azul), las zonas cercanas a la arena de la playa aparecen de color amarillo (propio de la playa) y viceversa (ver la banda inferior izquierda de la imagen de color amarillo, que debería ser azul). A su vez, la charca de Maspalomas aparece dentro del *cluster* de arena. También se puede apreciar el color azul del agua de mar en una pequeña parte de suelo desnudo en el interior de la costa en la banda inferior izquierda. al igual que para el caso de Baytown, para analizar de forma objetiva y numérica la confusión entre las clases, el PolSARpro nos proporciona como resultado la matriz de confusión que podemos observar en la tabla 5.2.

%	C1 Mar	C2 Arena	C3 Vegetación	C4 Zonas urbanas	C5 Suelo desnudo
C1	95,78	2,40	0,01	0,00	1,81
C2	28,31	68,78	0,39	0,00	2,52
C3	1,70	0,13	40,29	5,43	52,45
C4	0,08	0,00	10,98	57,32	31,62
C5	10,73	1,94	29,26	2,88	55,19

Tabla 5.2. Matriz de confusión para la clasificación supervisada de *Wishart* de la escena de Maspalomas.

De los datos mostrados en la tabla tenemos que el grado de acierto mayor lo tienen las clases de "Mar" y "Arena", mientras que con un grado de acierto medio tendríamos las clases de "Zonas urbanas", "Suelo desnudo" y "Vegetación". Haciendo un análisis de la tabla, nos daremos cuenta de que la observación visual de la imagen clasificada comentada en el párrafo anterior queda reflejada en los datos numéricos de la tabla. Se puede decir que el mayor acierto de esta técnica de clasificación, para el producto que hemos utilizado, reside en la precisión de la identificación de la clase de "Mar" y de "Arena". Aunque aparecen entremezcladas, comparadas de forma relativa al resto de clases, tienen una elevada precisión de acierto. Esto no quiere decir que el resultado sea del todo aceptable, pues como se ha visto, parte de la arena aparece clasificada como mar y parte del mar aparece clasificado como arena. En cuanto a la clase de "Zonas urbanas", tenemos otro de los puntos fuertes relativos de esta clasificación.

Procesado de datos SAR del satélite Sentinel-1 para el estudio de zonas costeras.

Todas las zonas urbanas han quedado teñidas de rojo, a diferencia de la variedad de colores que teníamos en las clasificaciones no supervisadas anteriores. Si bien también es cierto que parte de los "Suelos desnudos" aparecen catalogados como "Zonas urbanas". En la clase de "Vegetación" encontramos el mayor defecto de la clasificación. La mayor parte de las áreas seleccionadas para la clase de "Vegetación" aparecen en la clase de "Suelos desnudos", un 52,45 %, como puede observarse en la tabla. En resumen, las clases de "Vegetación" y "Suelos desnudos" son las dos clases que más se entremezclan de los cinco *clusters*.

En definitiva, los resultados de la clasificación supervisada siguiendo el algoritmo de Wishart para el escenario de Maspalomas ofrece una calidad y precisión ligeramente superior a la conseguida con las técnicas de clasificación no supervisada realizadas anteriormente. Al igual que se indicó en el caso de Baytown, cabría esperar una notable mejora en el caso de un aumento de resolución o incluso, de disponer de las cuatro bandas polarimétricas. Esta mejora debería ser mayor en el caso de Maspalomas que en el de Baytown, puesto como hemos indicado varias veces, la resolución del producto de Maspalomas es drásticamente inferior al producto de Baytown (5x20 m frente a 5x5 m, *range x azimuth*).

Todas las imágenes resultado mostradas en este apartado, así como los ficheros .kmz para Google Earth® se encuentran disponibles en el anexo digital de esta memoria.

5.3. Procesado para la aplicación de detección de vertidos de petróleo en el mar

En este apartado se presentan los resultados tras aplicar los conceptos teóricos vistos en el apartado 4.3. del capítulo 4, en concreto, la visualización de vertidos de petróleo en el mar a través de imágenes SAR. Se abordará la ejecución práctica de la herramienta de procesado incluida en el SNAP para la detección automática del vertido de petróleo del caso de estudio expuesto en el apartado 4.3.4.

5.3.1. Productos a emplear y metodología de procesado

Como se detalló en la sección 4.3.4., nuestro caso de estudio consiste en detectar y visualizar la mancha de petróleo originada por el hundimiento del barco pesquero *Oleg Naydenov* frente a las costas del sur de Gran Canaria. La fecha exacta del hundimiento es el 14 de Abril de 2015 a las 22 horas. Los pases del satélite Sentinel-1 sobre las Islas Canarias durante los días cercanos al accidente y al hundimiento fueron los siguientes:

- ✓ 14 de Abril de 2015 a las 19:04:55 UTC
- ✓ 22 de Abril de 2015 a las 07:02:09 UTC
- ✓ 26 de Abril de 2015 a las 19:04:56 UTC
- ✓ 4 de Mayo de 2015 a las 07:02:10 UTC
- ✓ 8 de Mayo de 2015 a las 19:04:56 UTC
- ✓ 16 de Mayo de 2015 a las 07:02:10 UTC

Con esta disponibilidad de datos, la decisión sobre qué productos emplear a la hora de visualizar y ejecutar el procesado de detección de vertidos de petróleo en el mar ha atendido a tres criterios:

- ✓ Requisitos técnicos de las técnicas de procesado sobre la naturaleza de los datos.
- ✓ Mayor calidad posible (resolución) sobre el terreno en cuestión.
- ✓ La zona del hundimiento debe estar incluida en el área captada en el producto.

En base a estos criterios se seleccionaron tres productos SAR del Sentinel-1:

- Producto Level 1 GRDH IW DV (polarización dual VV/VH) sobre las Islas Canarias a fecha de: 22/04/2015 (toma de datos a las 07:02:09 UTC). Nombre técnico del producto descargado:
S1A_IW_GRDH_1SDV_20150422T070209_20150422T070233_005593_00728E_B2
4B.SAFE
- Producto Level 1 GRDH IW DV (polarización dual VV/VH) sobre las Islas Canarias a fecha de: 04/05/2015 (toma de datos a las 07:02:10 UTC). Nombre técnico del producto descargado:
S1A_IW_GRDH_1SDV_20150504T070210_20150504T070234_005768_007686_11
BE.SAFE

Procesado de datos SAR del satélite Sentinel-1 para el estudio de zonas costeras.

- Producto Level 1 GRDH IW DV (polarización dual VV/VH) sobre las Islas Canarias a fecha de: 16/05/2015 (toma de datos a las 07:02:10 UTC). Nombre técnico del producto descargado:
S1A_IW_GRDH_1SDV_20150516T070210_20150516T070239_005943_007A81_83
02.SAFE

Los productos de las fechas 22 y 26 de Abril, así como del 8 de Mayo han sido descartados puesto que para esos pases el satélite había trazado la órbita en sentido ascendente. En este tipo de pases la región captada en los productos sobre las Islas Canarias no incluye la zona del hundimiento del *Oleg Naydenov*. Por el contrario, el conjunto de productos seleccionados toma los pases de sentido descendente del total de los pases disponibles, asegurando así la inclusión de la zona de interés en el producto. Se ha desechado también el producto del 14 de Abril porque es justo horas antes del hundimiento y, por lo tanto, aún no existe mancha que visualizar o detectar. Por otro lado, los productos seleccionados son de nivel 1 tipo GRDH con el modo de operación IW. Se ha escogido el tipo GRDH dado que para los objetivos propuestos en este apartado no es necesario contar con la información de fase de la imagen SAR, tan sólo con las intensidades de los dos canales polarimétricos disponibles. Así mismo, el modo de operación del sensor es IW, siendo éste el modo de mayor resolución con el que opera el sensor SAR del satélite para la zona de las Islas Canarias.

La metodología de procesado será igual para todos los productos. En este caso, y atendiendo a los requisitos técnicos de la herramienta de detección de vertidos (*oil spills*) del SNAP, los pasos necesarios desde el pre-procesado al procesado en cuestión, quedan descritos gráficamente en el esquema de la figura 5.75, donde los cuadros de color celeste representan operaciones realizadas en SNAP y el cuadro de color amarillo, las operaciones realizadas en Google Earth®. Como se explicó en el apartado 3.2.1., en los productos GRDH no es necesario aplicar las técnicas de *Split* y *Deburst*. Por lo tanto, el punto de inicio consiste abrir el producto y recortar nuestra zona de interés. Una vez tenemos la zona, los pasos siguientes serán la calibración y reducción de ruido de Speckle mediante un filtro tipo *Refined Lee* simple. Estos últimos pasos se explicaron en los apartados 3.1.2. y 3.1.3.2. y se llevaron también a la práctica en los apartados 5.2.2. y 5.2.2.1., respectivamente, cuando se realizaron los pre-procesados para los productos de clasificación. Una vez

tenemos nuestro producto recortado con la zona de interés, calibrado y con la reducción del ruido de Speckle, podemos visualizar el mismo en la plataforma Google Earth® realizando previamente una ortorectificación (descrita teóricamente en el apartado 3.2.2. y llevada a la práctica en el apartado 5.2.3.1.) y conversión a archivo .kmz para Google Earth® (el proceso se encuentra detallado teóricamente en el apartado 3.2.2.1. y llevado a la práctica en el 5.2.3.1.). Este último paso nos servirá para visualizar la zona de interés y detectar las posibles manchas de petróleo en el mar. Una vez hayamos localizado las zonas del vertido podemos llevar a cabo el procesado de la herramienta de detección de vertidos del software SNAP. Las imágenes resultado son también ortorectificadas y mostradas en la plataforma Google Earth.

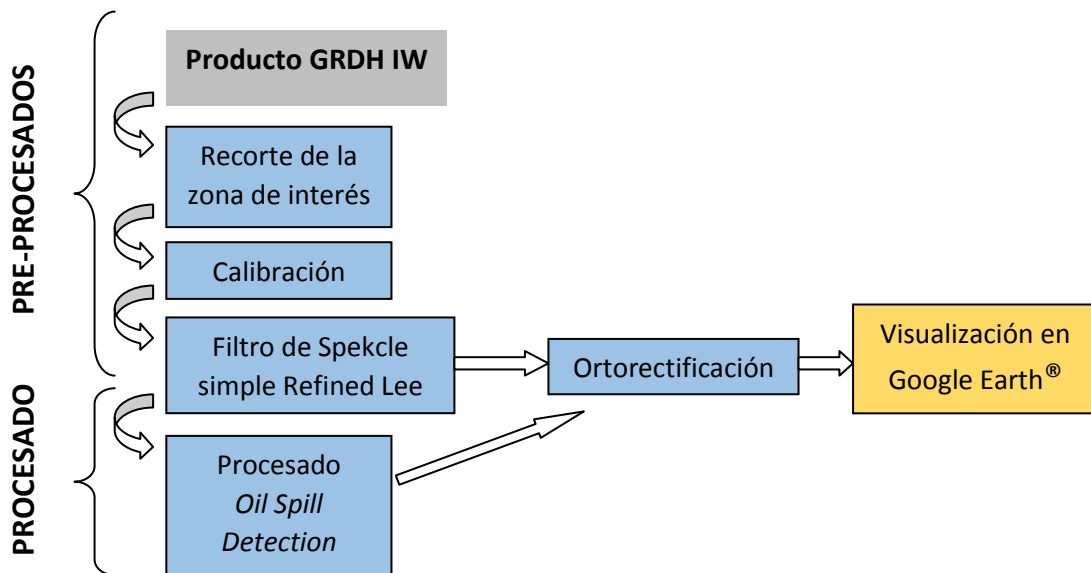


Figura 5.75. Metodología de procesado para el proceso de visualización y detección de vertidos de petróleo en el mar.

5.3.2. Pre-procesados

Para el caso de detección de vertidos en los productos GRDH, los pasos de pre-procesado se reducen al recorte de la zona de interés mediante la herramienta *Subset* de SNAP, al proceso de calibración y al filtrado de Speckle simple tipo Refined Lee. La aplicación de la herramienta *Subset* de SNAP quedó demostrada y detallada en el apartado 5.2.2. de este capítulo. Así mismo, las bases teóricas del proceso de calibración quedaron detalladas en el apartado 3.1.2. del capítulo 3. La aplicación práctica de este proceso pudo observarse en los pre-procesados para los productos de clasificación en el apartado 5.2.2.

Procesado de datos SAR del satélite Sentinel-1 para el estudio de zonas costeras.

de este capítulo. Por último, los fundamentos teóricos del filtrado de Speckle fueron explicados en el apartado 3.1.3.2. y llevados a la práctica en el apartado 5.2.2.1. de este capítulo.

De esta manera, los tres productos seleccionados quedan, a partir de este punto de la memoria de proyecto, recortados a la zona de interés, calibrados y filtrados para para la reducción del ruido de Speckle.

5.3.3. Visualización de manchas de vertido de petróleo en el mar

En las figuras 5.76, 5.77 y 5.78 pueden observarse las imágenes SAR de los productos GRDH originados por el satélite Sentinel-1 a su paso por las Islas Canarias en las fechas del 22/04/2015, 04/05/2015 y 16/05/2015. Para cada caso tenemos la banda de intensidad VV en la izquierda y la intensidad VH a la derecha. De todas las imágenes, en un vistazo rápido podemos darnos cuenta de que la mancha de petróleo en el mar aparece justo en la primera de ellas. La imagen en concreto es la perteneciente al canal VV del día 22/04/2015. En ese momento, el pesquero Oleg Naydenov yacía en el fondo del océano desde hacía ya más de una semana. Tiempo suficiente para que el carburante y aceites contenidos en su interior salieran a superficie y se dirigiesen a la costa, tal como se describió en el apartado 4.3.4. Otra observación que podemos hacer es la relativa a las diferencias existentes en las bandas polarimétricas. En general, como se indicó en el apartado 4.3.3., la visualización del estado de rugosidad de la superficie del mar es más visible desde la polarización vertical (es la mejor para ello), por ello es en esta banda donde se aprecian las distintas condiciones del mar y, por lo tanto, de la mancha de petróleo. Para el primer caso (día 22/04), el mar presenta una rugosidad superficial media, lo que indica la existencia de vientos medios (de 2 a 11 m/s aprox.). Ésto es lo que hace que la mancha de petróleo sea visible. Para el segundo caso (día 4/05), el mar presenta baja rugosidad superficial, lo que indica un estado del mar en calma y vientos de muy baja intensidad. Esto provoca que sea imposible distinguir si hay o no mancha de petróleo en la superficie. En el tercer caso (día 16/05), el mar tiene un aspecto de muy alta rugosidad superficial, lo que apunta a un muy mal estado del mar y del viento (probablemente con vientos superiores a 11 m/s). En este caso también es imposible detectar las manchas de petróleo. Aún así, es posible identificar los barcos de limpieza y control medioambiental situados en las coordenadas del hundimiento ($15^{\circ} 30' 24''\text{O}$, $27^{\circ} 28' 56''\text{N}$). En las imágenes

del 22/04 y del 16/05 se aprecia un único barco. En la imagen del 4/05 aparecen tres barcos repartidos por la zona donde (se supone) se encontraría la mancha. Cabe mencionar que de los tres casos, aquel en el que es más difícil distinguir los barcos es en el tercero, con el mal estado del mar. Por el contrario el caso en el que es más fácil es el segundo, cuando el mar se encuentra en calma. Esto remarca también la teoría de las condiciones para ver las manchas de petróleo, aunque aquí ocurre a la inversa. Los barcos

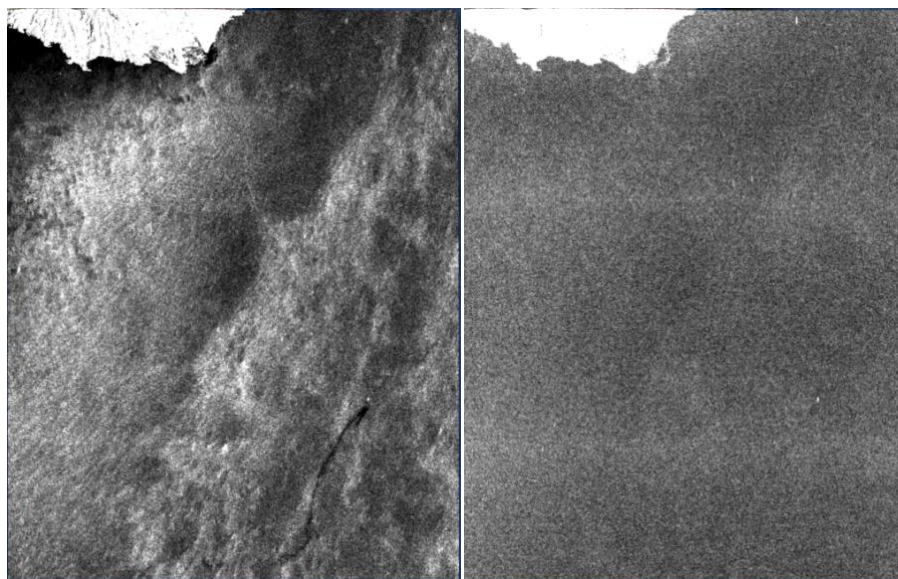


Figura 5.76. Imagen SAR del producto GRDH del día 22/04 sobre la costa sur de Gran Canaria. A la izquierda intensidad del canal de polarización VV, a la derecha intensidad del canal VH.

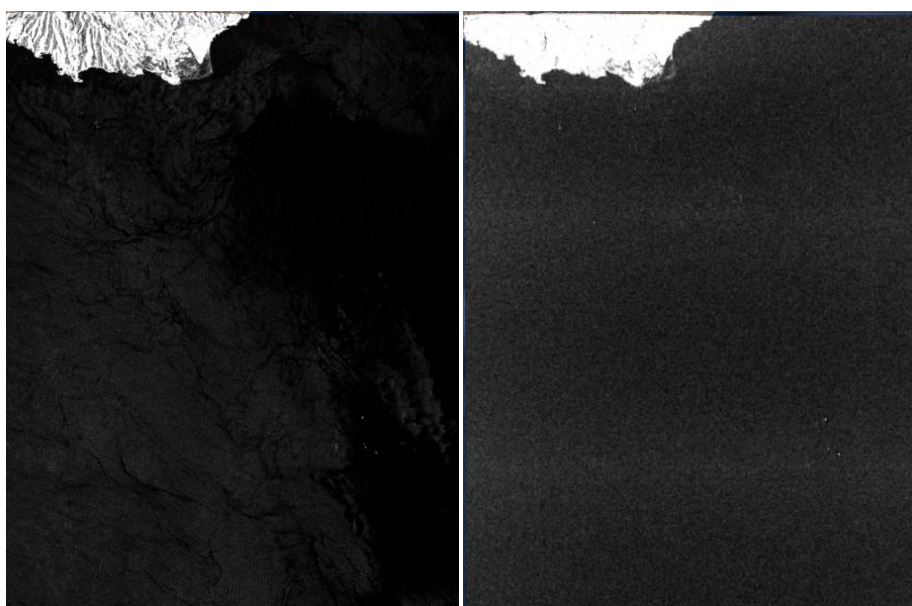


Figura 5.77. Imagen SAR del producto GRDH del día 04/05 sobre la costa sur de Gran Canaria. A la izquierda intensidad del canal de polarización VV, a la derecha intensidad del canal VH.

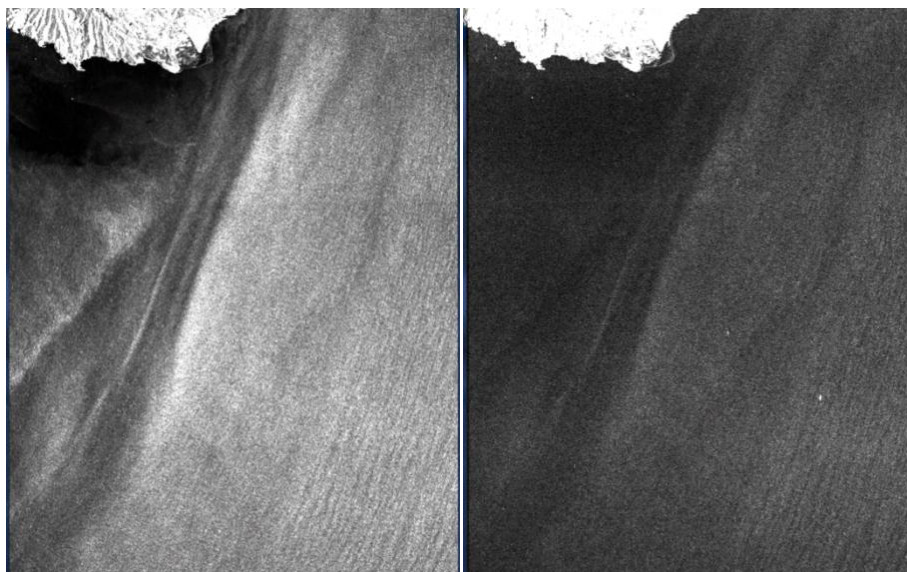


Figura 5.78. Imagen SAR del producto GRDH del día 16/05 sobre la costa sur de Gran Canaria. A la izquierda intensidad del canal de polarización VV, a la derecha intensidad del canal VH.

son objetos metálicos que producen grandes retrodispersiones en las imágenes SAR, por lo que se distinguirán mejor cuanto más en calma se encuentre el mar. Sin embargo, como el estado de la mar no afecta tanto a la polarización VH, casi siempre es posible visualizarlos en esta otra polarización. Para mayor detalle, y poder visualizar cómodamente los barcos, se ha realizado un zoom de la zona del hundimiento de todas las imágenes en las figuras 5.79, 5.80 y 5.81. Se ha remarcado con un círculo rojo la zona del hundimiento en estas últimas imágenes.

De todas las imágenes disponibles, se procesará la imagen del canal VV del día 22/04/2015 para la detección automática de vertidos con la herramienta de SNAP, ya que es la única en la que es posible visualizar la mancha de petróleo.

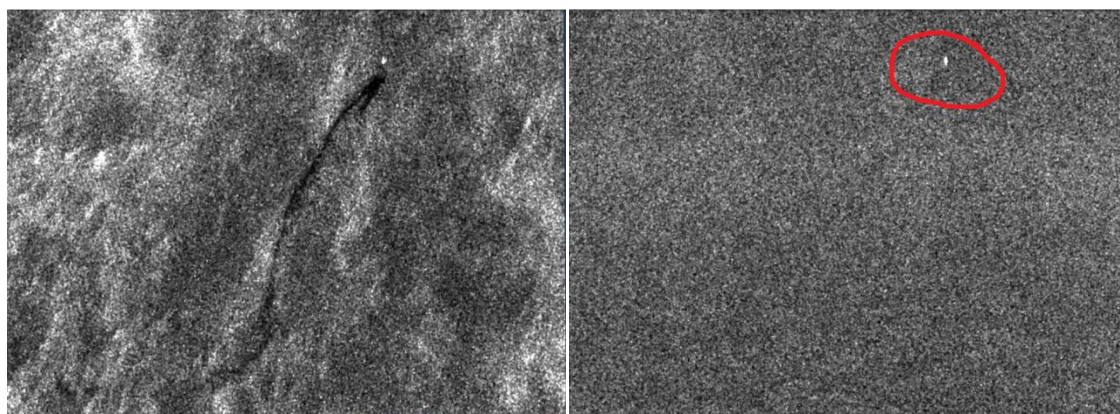


Figura 5.79. Detalle en la zona de hundimiento de la imagen SAR del día 22/04. A la izquierda intensidad del canal de polarización VV, a la derecha intensidad del canal VH.

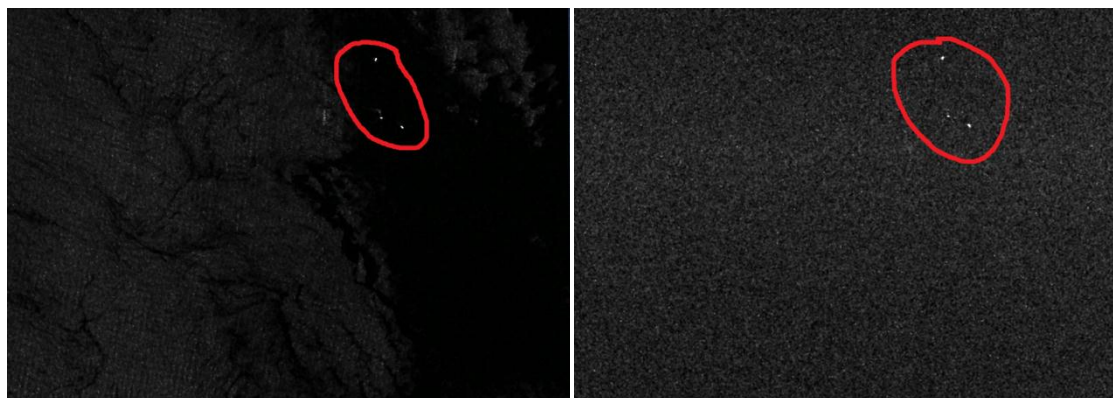


Figura 5.80. Detalle en la zona de hundimiento de la imagen SAR del día 04/05. A la izquierda intensidad del canal de polarización VV, a la derecha intensidad del canal VH.

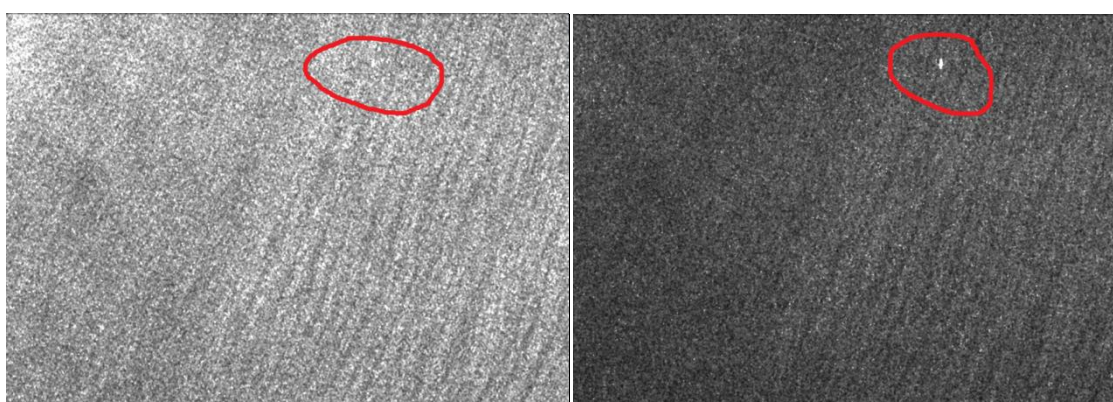


Figura 5.81. Detalle en la zona de hundimiento de la imagen SAR del día 16/05. A la izquierda intensidad del canal de polarización VV, a la derecha intensidad del canal VH.

Como un dato más, sobre la plataforma Google Earth® es posible medir la distancia de la mancha a la costa así como el tamaño de la misma. Los datos medidos mostraron que la distancia de la playa de Maspalomas a la zona más cercana de la mancha era de 29,85 km, tal como se puede observar en la figura 5.82. Así mismo el tamaño de la mancha en la zona del foco (lugar del hundimiento) es de 960 m de ancho por 2,1 km aproximadamente. La parte más estrecha, que se alarga en dirección suroeste (siguiendo probablemente las corrientes superficiales de viento como se explicó en el apartado 4.3.1.), tiene unas dimensiones de de 13 km de largo y 500-700 metros de ancho medio, aproximadamente.

En conclusión, las imágenes aquí mostradas y captadas demuestran las capacidades y el potencial del sensor SAR para la detección de manchas de petróleo en el

Procesado de datos SAR del satélite Sentinel-1 para el estudio de zonas costeras.

mar. Han quedado probadas además, los requisitos de la superficie del mar para la correcta visualización de las manchas (*oil spills*) en las imágenes SAR.

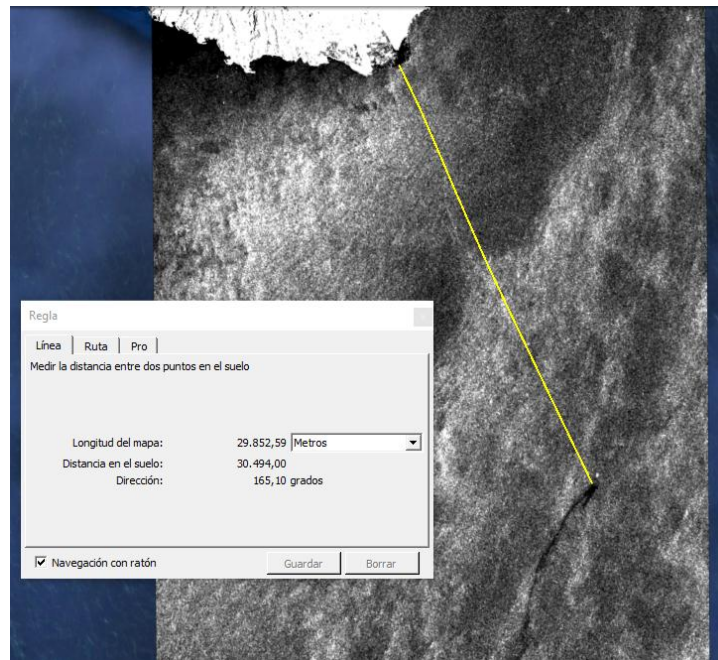


Figura 5.82. Medición de la distancia desde la costa de Gran Canaria hasta el punto de comienzo de la mancha (lugar del hundimiento del *Oleg Naydenov*). Imagen SAR del producto GRDH del día 22/04 sobre la costa sur de Gran Canaria. Imagen de la intensidad del canal VV.

5.3.4. Procesado y resultados de la detección de vertidos de petróleo en el mar (*oil spill detection*)

Para la ejecución del procesado de detección automática de vertidos en SNAP debemos abrir la imagen recortada, calibrada y filtrada del día 22/04/2015. Seleccionamos la herramienta *Oil Spill Detection* tal y como se indica en la figura 5.83.

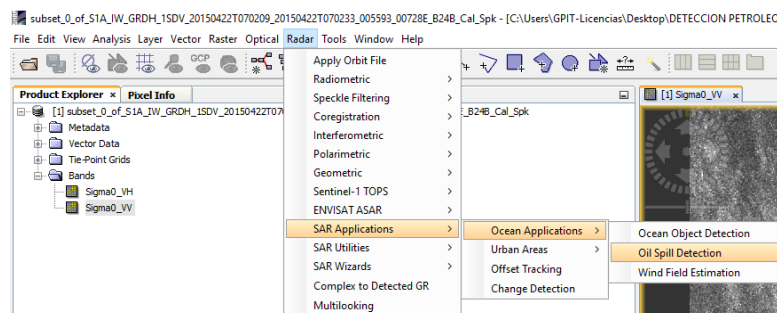


Figura 5.83. Selección de la herramienta de detección de vertidos de petróleo en el mar (*oil spill detection*) en SNAP.

Como se indicó en el apartado 4.3.5., este procesado realizará primero una máscara de descarte sobre la zona terrestre para eliminar esos datos del procesado. A continuación ejecutará el algoritmo de umbralizado adaptativo. El tamaño de la ventana para el cálculo de la media local de retrodispersión puede ser fijado en el parámetro "*Background Window Size (BWS)*" que aparece en la figura 5.84. El umbral de detección de manchas se fija K decibelios por debajo de la media local. En este caso, este parámetro puede configurarse en la pestaña "*Threshold Shift (dB) (TS)*" que puede observarse en el cuadro de diálogo de la figura 5.84. A continuación se desarrolla la fase de discriminación, agrupando los píxeles detectados contiguos en un *cluster* individual. Finalmente, los *clusters* con tamaños menores al valor fijado en el parámetro "*Minimum Cluster Size (sq km) (MCS)*" son descartados. En este punto del procesado se produce la imagen resultado con una máscara que indica las zonas detectadas como manchas de petróleo.

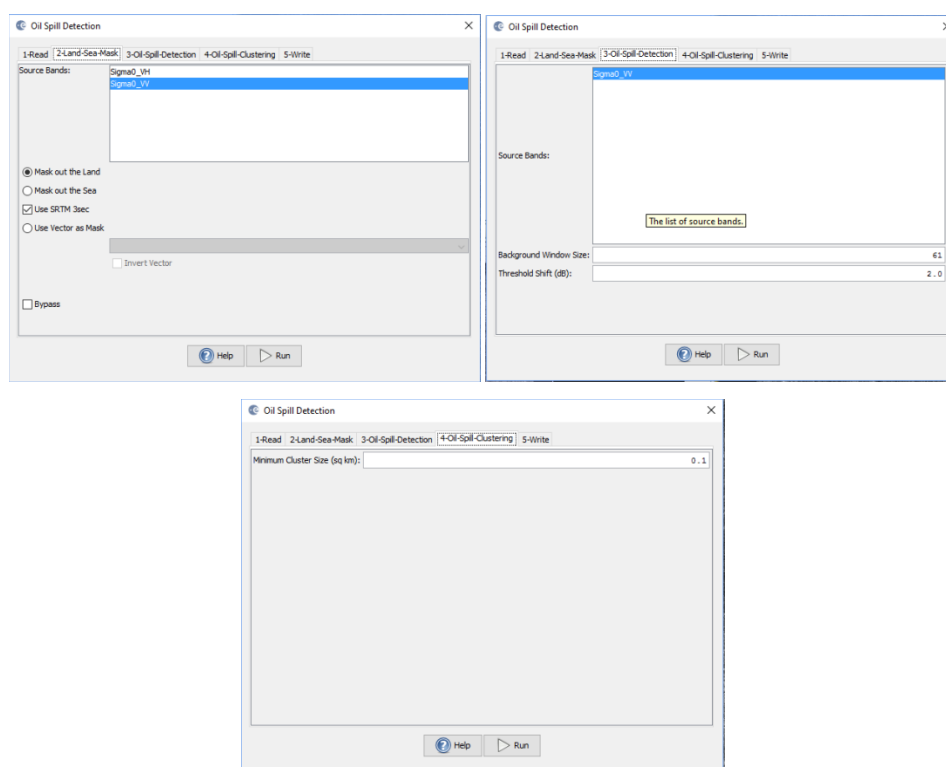


Figura 5.84. Configuración de la herramienta de detección de vertidos de petróleo en el mar (*oil spill detection*) en SNAP.

En las figuras 5.85 y 5.86 se pueden observar los resultados finales para la imagen del 22/04/2015 (canal VV) con diferentes configuraciones de los parámetros de procesado de detección de manchas (ver el pie de figuras).

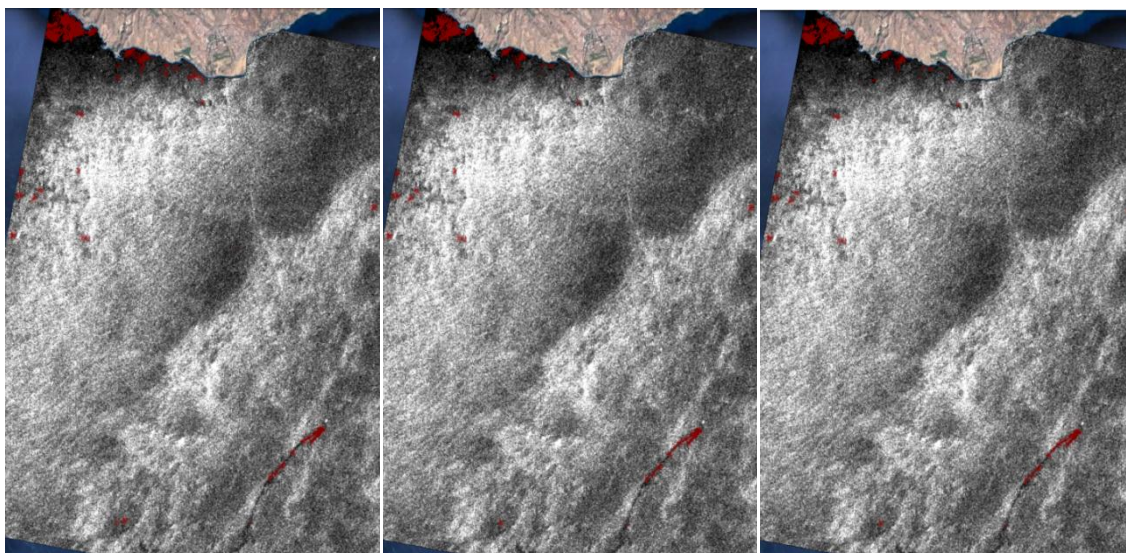


Figura 5.85. Imágenes finales de detección de vertidos de petróleo en el mar. Imagen del 22/04/2015, canal VV. A la izquierda imagen procesada con $BWS = 576$, $TS = 1,8$ y $MCS = 0,05$. En el centro, imagen procesada con $BWS = 729$, $TS = 1,8$ y $MCS = 0,05$. A la derecha imagen procesada con $BWS = 576$, $TS = 1,6$ y $MCS = 0,05$.

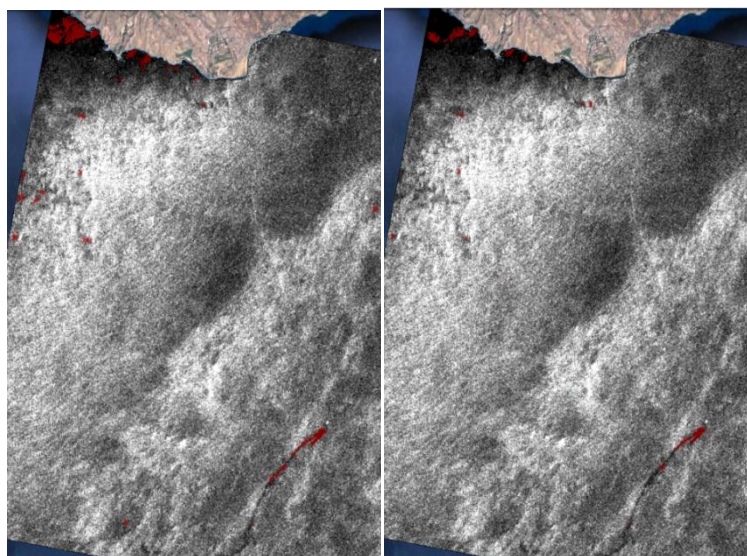


Figura 5.86. Imágenes finales de detección de vertidos de petróleo en el mar. Imagen del 22/04/2015, canal VV. A la izquierda imagen procesada con $BWS = 484$, $TS = 1,8$ y $MCS = 0,05$. A la derecha imagen procesada con $BWS = 225$, $TS = 1,8$ y $MCS = 0,05$.

Como se ha visto en las imágenes mostradas, los resultados de la detección de vertidos mejoran en la última de las imágenes, detectando mejor la zona de la mancha y descartando falsos positivos a lo largo de la escena. La zona en cuestión contiene un área de mar en calma justo en la costa suroeste de Gran Canaria, por este motivo la zona aparece con bajos niveles de brillo. Por este motivo, a la hora de ejecutar el algoritmo de

detección, el proceso puede confundir y tomar como positivas las zonas de mar en calma (zonas oscuras en la imagen). Para medir la eficiencia de este algoritmo se han realizado cuatro tamaños de ventana diferentes para el cálculo de las medias locales de retrodispersión: 729 (27 x 27 píxeles), 576 (24 x 24 píxeles), 484 (22 x 22 píxeles) y 225 (15 x 15). Si bien, a medida que disminuimos el tamaño de la ventana los falsos positivos disminuyen (sobre todo en la zona de mar en calma en la costa suroeste), la región de la mancha detectada disminuye en igual proporción. También se ha jugado a disminuir el parámetro de umbralizado entre 1,8 y 1,6 dB, aunque no ha aportado demasiada mejora a la detección. En SNAP se recomienda mantener este parámetro en torno a los 2 dB. Cuanto mayor es, más descarta zonas de mancha, cuanto menor es, más falsos positivos incluye, por lo que hemos fijado el parámetro a esos valores. Por último, el tamaño mínimo de *cluster* ha sido fijado a 0,05 km² para todos los casos. Esta superficie equivale a 50 000 m², es decir, una superficie rectangular aproximada de 225 x 225 metros. Por lo tanto, con esta configuración, manchas inferiores a esa superficie serán descartados, que está por debajo de las dimensiones de la mancha en cuestión (ver las medidas sobre la plataforma Google Earth[®], en los párrafos anteriores, página 216).

En conclusión, los resultados observados demuestran la eficacia relativa de la herramienta para este caso. Por lo tanto, al obtener un resultado de esta herramienta es fundamental conocer la escena, el tamaño esperado del vertido y el estado de la mar para poder distinguir las manchas de los falsos positivos. Como se indicó en el apartado 4.3.3., el estado de la superficie del mar junto con el viento juegan un papel fundamental en las capacidades de detección de vertidos de petróleo en imágenes SAR.

Todas las imágenes resultado mostradas en este apartado, así como los ficheros .kmz para Google Earth[®] se encuentran disponibles en el anexo digital de esta memoria.

5.4. Procesado para la aplicación de detección de nieve y zonas inundadas

En este apartado llevaremos a cabo los conceptos teóricos vistos en la sección 4.4 del capítulo 4, en concreto, la teledetección de algunos eventos meteorológicos sucedidos en el archipiélago canario durante la realización de este proyecto final de carrera. Los dos

Procesado de datos SAR del satélite Sentinel-1 para el estudio de zonas costeras.

casos de estudio consisten en la teledetección de la nieve caída sobre las cumbres de las islas de Tenerife y Gran Canaria durante el mes de Febrero de 2016, y también, la teledetección de fuertes lluvias y zonas inundadas durante la tormenta ocurrida en el municipio grancanario de Telde en Octubre de 2015. Para el desarrollo, comprensión y ejecución de los procesados llevados a cabo en este apartado se trabajó en estrecha colaboración con el Doctor Ingeniero de Telecomunicación, Juan Manuel López Sánchez, del Departamento de Física, Ingeniería de Sistemas y Teoría de la Señal de la Universidad de Alicante. En este apartado se recoge la metodología y resultados del procesado para los dos casos de estudio.

5.4.1. Productos a emplear y metodología de procesado

Como se detalló en la sección 4.4.1.1., para el caso de estudio de la detección de nieve sobre las cumbres de las islas del Archipiélago Canario necesitaremos productos captados en torno a las fechas del 19 y 22 de Febrero de 2016. Así mismo, como quedó descrito en el apartado 4.4.2.1., para el caso de detección de zonas inundadas sobre el municipio grancanario de Telde necesitaremos productos captados en torno a la fecha del 23 de Octubre de 2015. Los pases del satélite Sentinel-1 sobre las Islas Canarias durante los días próximos a la ola de frío polar que provocó las nevadas fueron los siguientes:

- ✓ 8 de Febrero de 2016 a las 19:04:49 UTC (Pase ascendente)
- ✓ 16 de Febrero de 2016 a las 07:02:08 UTC (Pase descendente)
- ✓ 20 de Febrero de 2016 a las 19:04:49 UTC (Pase ascendente)
- ✓ 28 de Febrero de 2016 a las 07:02:08 UTC (Pase descendente)
- ✓ 3 de Marzo de 2016 a las 19:04:49 UTC (Pase ascendente)
- ✓ 11 de Marzo de 2016 a las 07:02:08 UTC (Pase descendente)
- ✓ 15 de Marzo de 2016 a las 19:04:49 UTC (Pase ascendente)

Con esta disponibilidad de datos, la decisión sobre qué productos emplear a la hora de visualizar y ejecutar el procesado de detección de nieve sobre las cumbres de las islas ha atendido a tres criterios:

- ✓ Requisitos técnicos de las técnicas de procesado sobre la naturaleza de los datos.
- ✓ Mayor calidad posible (resolución) sobre el terreno en cuestión.

- ✓ La zona de cumbres de las islas debe estar incluida en el área captada en el producto.

En base a estos criterios se seleccionaron, para el primer caso de estudio (detección de nieve), dos productos SAR del Sentinel-1:

- Producto Level 1 SLC IW DV (polarización dual VV/VH) sobre las Islas Canarias a fecha de: 08/02/2016 (toma de datos a las 19:04:49 UTC). Nombre técnico del producto descargado:

S1A IW SLC 1SDV 20160208T190449 20160208T190519 009859 00E707 6600.SAFE

- Producto Level 1 SLC IW DV (polarización dual VV/VH) sobre las Islas Canarias a fecha de: 20/02/2016 (toma de datos a las 19:04:49 UTC). Nombre técnico del producto descargado:

S1A IW SLC 1SDV 20160220T190449 20160220T190519 010034 00EC3C 4D68.SAFE

Los productos de las fechas 16 y 28 de Febrero, así como 3, 8 y 15 de Marzo han sido descartados puesto que, a excepción del pase del día 16 (que es previo a la nevada), todos pertenecen a fechas posteriores a los días de máxima nevada. Para la realización del procesado eran necesarios dos productos con el mismo tipo de pase de órbita. Además de esto, uno de estos productos debía contener una imagen SAR de la zona previa a la nevada, y otro debía tener una fecha de adquisición que fuese en el momento de la nevada o posterior a ella. Esto nos hace escoger los productos del 8 y el 20 de Febrero dado que ambos tienen el mismo tipo de pase, el primero es previo a las nevadas y el segundo fue captado durante uno de los días de mayor intensidad en la caída de nieve. Por otro lado, los productos seleccionados son de nivel 1 tipo SLC con el modo de operación IW. Se ha escogido el tipo SLC dado que para los objetivos propuestos en este apartado es necesario contar con la información de fase de la imagen SAR, para poder obtener la matriz de covarianza polarimétrica usada en el procesado de detección de cambios. Así mismo, el modo de operación del sensor es IW, siendo éste el modo de mayor resolución con el que opera el sensor SAR del satélite para la zona de las Islas Canarias.

En el caso de estudio de las zonas inundadas, los pases del satélite Sentinel-1 sobre las Islas Canarias durante los días próximos al 23 de Octubre de 2015 fueron los siguientes:

- ✓ 11 de Octubre de 2015 a las 19:04:57 UTC (Pase ascendente)
- ✓ 19 de Octubre de 2015 a las 07:02:17 UTC (Pase descendente)

Procesado de datos SAR del satélite Sentinel-1 para el estudio de zonas costeras.

- ✓ 23 de Octubre de 2015 a las 19:04:57 UTC (Pase ascendente)
- ✓ 31 de Octubre de 2015 a las 07:02:17 UTC (Pase descendente)
- ✓ 4 de Noviembre de 2015 a las 19:04:57 UTC (Pase ascendente)

Con esta disponibilidad de datos, al igual que con el caso de estudio de detección de nieve, la decisión sobre qué productos emplear a la hora de visualizar y ejecutar el procesado de detección de zonas inundadas sobre el municipio grancanario de Telde ha atendido a tres criterios:

- ✓ Requisitos técnicos de las técnicas de procesado sobre la naturaleza de los datos.
- ✓ Mayor calidad posible (resolución) sobre el terreno en cuestión.
- ✓ La zona de cumbres de las islas debe estar incluida en el área captada en el producto.

En base a estos criterios se seleccionaron, para el segundo caso de estudio (detección de zonas inundadas), dos productos SAR del Sentinel-1:

- Producto Level 1 SLC IW DV (polarización dual VV/VH) sobre las Islas Canarias a fecha de: 11/10/2015 (toma de datos a las 19:04:49 UTC). Nombre técnico del producto descargado:
S1A IW SLC 1SDV 20151011T190457 20151011T190527 008109 00B5EC 0294.SAFE
- Producto Level 1 SLC IW DV (polarización dual VV/VH) sobre las Islas Canarias a fecha de: 23/10/2015 (toma de datos a las 19:04:49 UTC). Nombre técnico del producto descargado:
S1A IW SLC 1SDV 20151023T190457 20151023T190527 008284 00BACF 7972.SAFE

Los productos de las fechas 19 y 31 de Octubre, así como 4 de Noviembre han sido descartados. En este caso concreto de estudio, la casualidad hizo que el evento tormentoso se desarrollara durante uno de los pases del satélite Sentinel-1 sobre las Islas Canarias. Este producto en particular fue captado el día 23 de Octubre de 2015 a las 19:04 UTC, que en hora local canaria equivaldría a las 20:04 horas del día. Según los datos recogidos [109], la tormenta y las consecuentes lluvias se desarrollaron entre las 16 y 20 horas (hora local canaria), teniendo su máximo a las 18:30 horas. Por este motivo, el producto captado a las 20:04 supone el caso ideal de toma de datos, pues de esta forma obtenemos una muestra de datos nada más finalizar el evento tormentoso, que es cuando nos podemos encontrar las zonas inundadas en el terreno. Como para la realización del

procesado eran necesarios dos productos con el mismo tipo de pase de órbita y, además de esto, que uno de estos productos fuese anterior a la tormenta y otro posterior, se tomó como primer producto (previo al evento tormentoso) el del pase del día 11 de Octubre, y como segundo, el del pase del día 23. Por otro lado, al igual que en el caso de detección de nieve, los productos seleccionados son de nivel 1 tipo SLC con el modo de operación IW. Se ha escogido el tipo SLC dado que para los objetivos propuestos en este apartado es necesario contar con la información de fase de la imagen SAR, para poder obtener la matriz de covarianza polarimétrica usada en el procesado de detección de cambios. Así mismo, el modo de operación del sensor es IW, siendo éste el modo de mayor resolución con el que opera el sensor SAR del satélite para la zona de las Islas Canarias.

La metodología de procesado es igual para los dos casos de estudio. En este caso y atendiendo a los requisitos de procesado para la detección de cambios en Matlab[®], los pasos necesarios desde el pre-procesado al procesado en cuestión, quedan descritos gráficamente en el esquema de la figura 5.87, donde los cuadros de color celeste representan operaciones realizadas en SNAP, los cuadros de color naranja las operaciones realizadas sobre el entorno IDL[®], los de color verde sobre PolSARpro, los de color rojo sobre el programa Matlab[®], y por último, de color amarillo las operaciones realizadas sobre la plataforma Google Earth[®]. Como se explicó en el apartado 4.4.3., los primeros pasos de pre-procesado para realizar la operación final de detección de cambios consisten en, primero, calibrar los dos productos SLC IW por separado con sus tres *swaths* al completo, respectivamente. Posteriormente se deben realizar las coregistraciones de los canales VV y VH de ambos productos por separado. A continuación, a los dos productos resultantes coregistrados se les debe aplicar la técnica de *Deburst*. Después de esto, se debe proceder a la conversión de ambos productos a formato PolSARpro. Con los datos en PolSARpro ejecutamos los *scripts* desarrollados en IDL[®], que crearán la estructura de carpetas necesarias dentro del sistema Windows para los procesados. Así mismo, éste código creará y guardará en las carpetas correspondientes las matrices C2 a partir de los productos de formato PolSARpro. Por último, desde IDL[®] se realizará una llamada a las rutinas de PolSARpro de filtrado polarimétrico para tratar los archivos de la matriz de covarianza (C2) de las carpetas correspondientes. Las dos carpetas finales, una perteneciente al "producto maestro", y otra del "producto esclavo" son llevadas, como

parámetros de entrada, al *script* de Matlab® para la ejecución del detector de cambios de Wishart. El algoritmo nos devolverá una imagen final con el resultado de la detección de cambios entre la imagen SAR maestra y la esclava. Esta imagen será ortorectificada y georeferenciada en SNAP, para posteriormente poder generar una archivo .kmz que nos permita visualizar el resultado cómodamente sobre la plataforma Google Earth®.

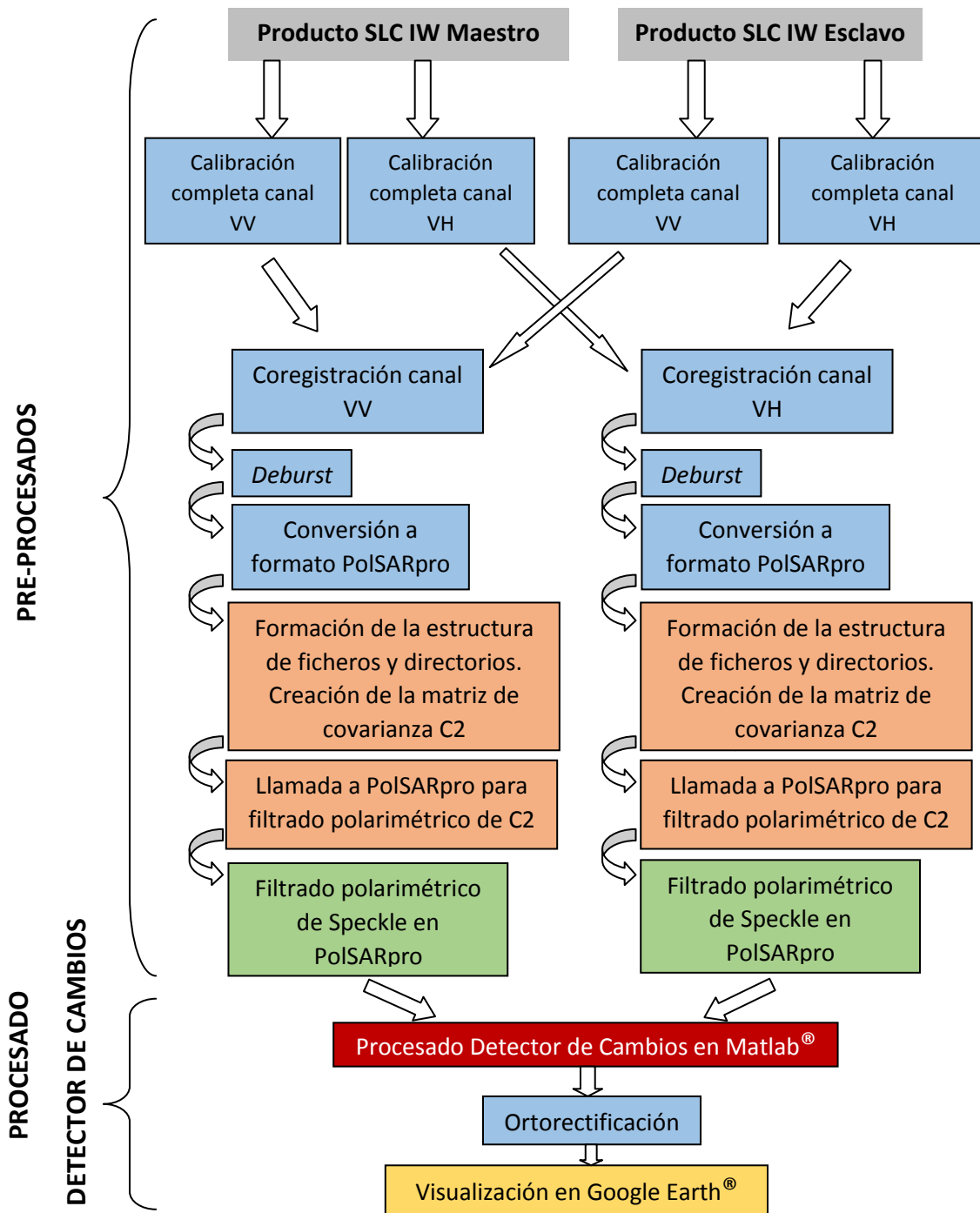


Figura 5.87. Metodología de procesado para la ejecución del algoritmo de detección de cambios en imágenes SAR.

Así mismo, para la visualización de las diferencias entre los dos productos usados para la detección de cambios, se ha incluido un corto procesado a la par, en el que se puede visualizar cada producto por separado con la combinación RGB *Dual Pol Multiple Intensity*, tal como se explicó en el apartado 4.2.2.1. y se llevó a la práctica en el apartado 5.2.2.1. Las imágenes en composición RGB, para cada caso de estudio, están incluidas dentro de los siguientes apartados 5.4.3. 5.4.4., además de encontrarse en el anexo digital de este proyecto final de carrera.

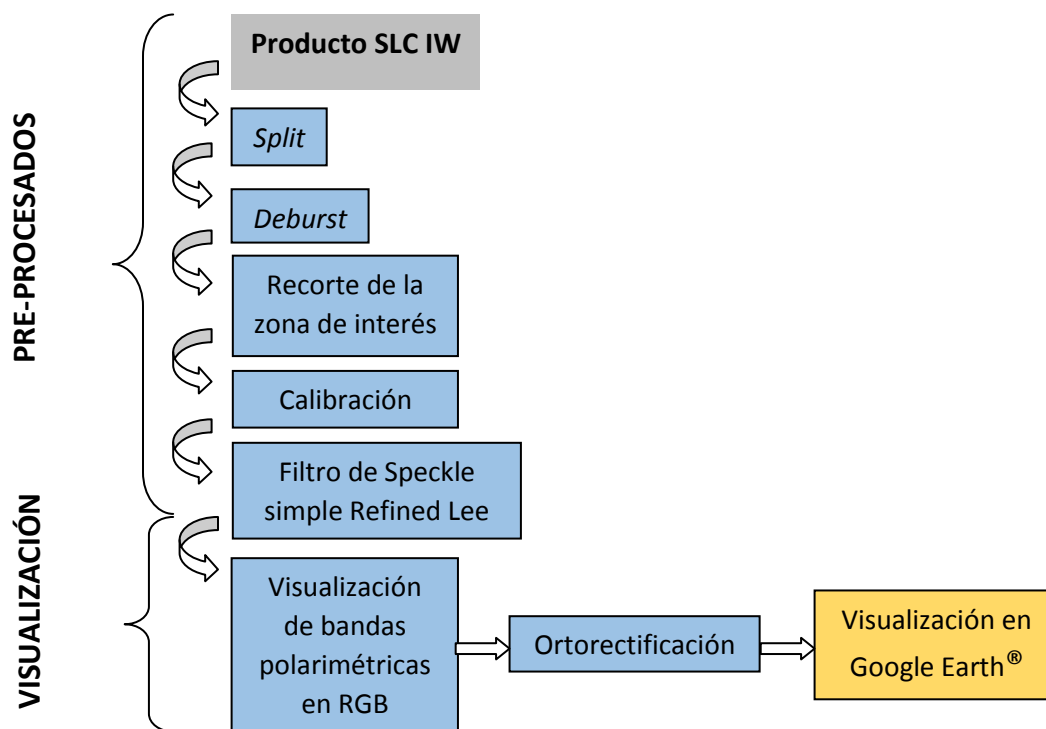


Figura 5.88. Metodología de procesado para la visualización de las bandas polarimétricas, en composición RGB, de los dos productos usados para la detección de cambios.

5.4.2. Pre-procesados

Los pre-procesados para ambos casos de estudio comienzan con la calibración completa de los productos separando sus canales. Cabe decir que ha sido necesaria realizar la calibración completa, es decir, de los tres *swaths*, dado que a la hora de coregistrar, el SNAP nos pide que el producto de entrada para la operación contenga todos sus *swaths* originales, a pesar de que en el proceso de coregistración nos vayamos a quedar con uno sólo. El proceso de calibración se explicó teóricamente en el apartado 3.1.2. y se llevó a la práctica en los apartados 5.2.2. y 5.3.2. A continuación para realizar el

Procesado de datos SAR del satélite Sentinel-1 para el estudio de zonas costeras.

proceso de coregistración en SNAP debemos seleccionar y configurar la herramienta de "S1 TOPS Coregistration", tal y como se indica en las figuras 5.89 a 5.92. Este proceso se llevará a cabo dos veces: uno para el canal VV del producto maestro con el esclavo, e igualmente otro para el canal VH de ambos productos.

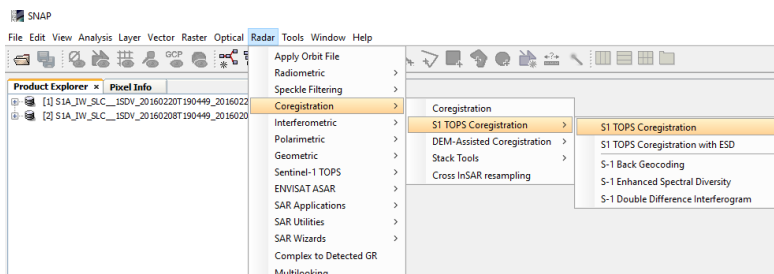


Figura 5.89. Selección de la herramienta S1 TOPS Coregistration en SNAP.

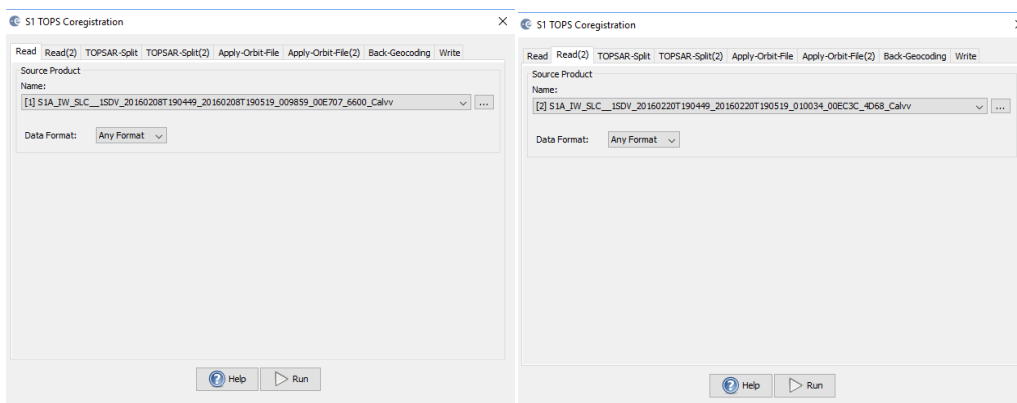


Figura 5.90. Configuración de la herramienta S1 TOPS Coregistration en SNAP. Selección del "producto maestro" a la izquierda y del "producto esclavo" a la derecha.

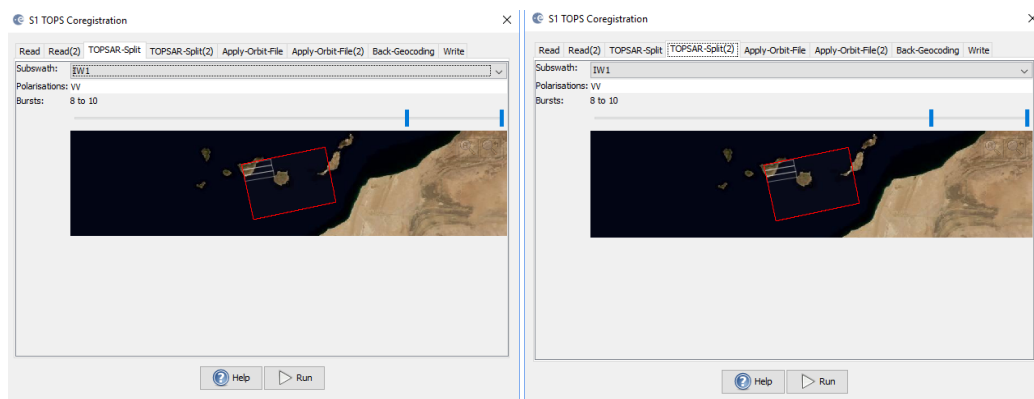


Figura 5.91. Configuración de la herramienta S1 TOPS Coregistration en SNAP. Selección del swath y bursts en cada uno de los productos. Deben ser los mismos, de lo contrario la operación da error.

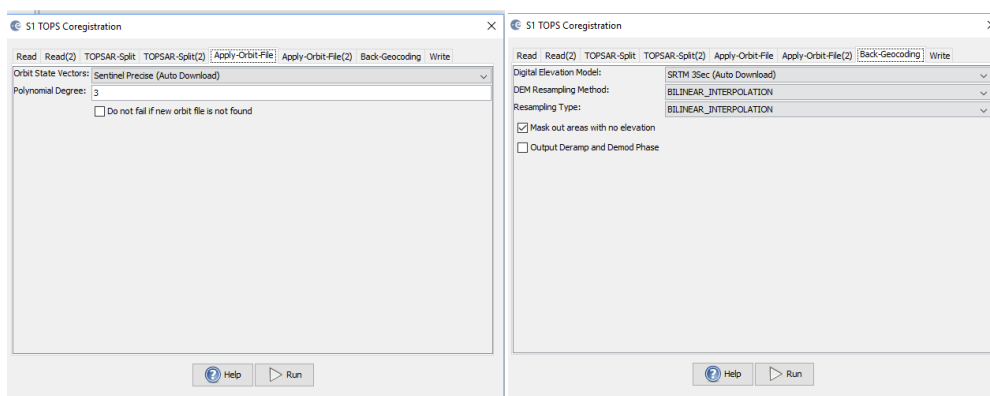


Figura 5.91. Configuración de la herramienta *S1 TOPS Coregistration* en SNAP. A la izquierda, selección de los datos del *Orbit State Vectors* (vector estado de órbita, que es autodescargable en SNAP) en cada uno de los productos. A la derecha, selección del modelo digital de elevación (DEM, que es autodescargable en SNAP) y de los métodos de remuestro del DEM y de la imagen.

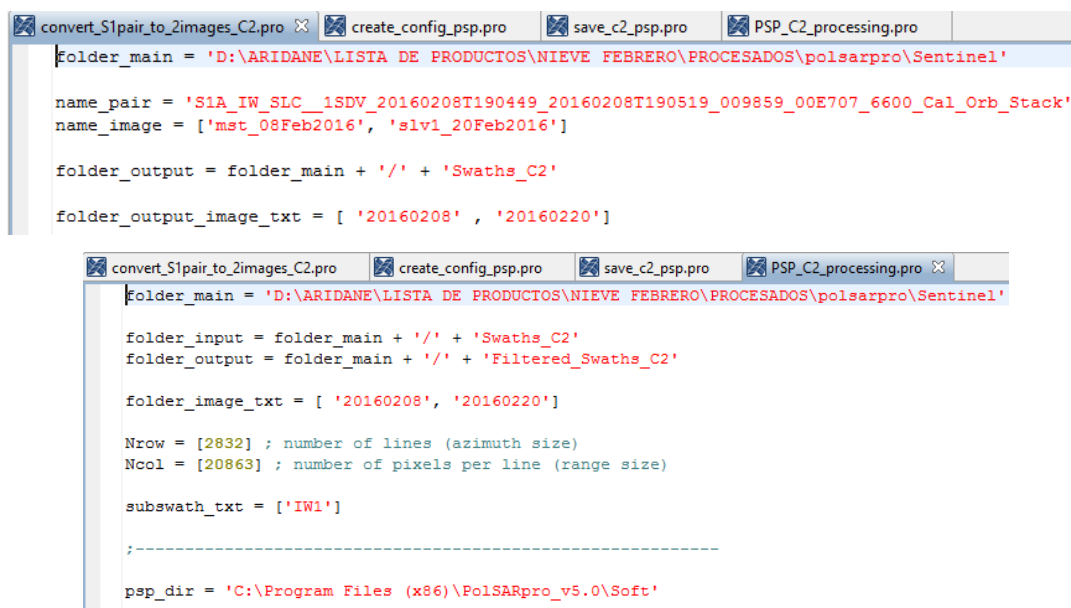
Como aclaración, en la configuración del procesado de coregistración, en la pestaña "*Back-Geocoding*" debemos pulsar el *checkbox* de "*Mask out areas with no elevation*" para enmascarar las zonas de mar y por lo tanto reducir el espacio de memoria utilizado y los tiempos de computación. Una vez que ambos productos (de cada canal) están coregistrados se debe realizar la operación de *Deburst*. Las bases teóricas de esta operación quedaron explicadas en el apartado 3.2.1. y se llevaron a la práctica en el apartado 5.2.2. Posteriormente se deben convertir los datos a formato PolSARpro tal como se realizó en el apartado 5.2.2.2. A partir de este momento se deben ejecutar los cuatro scripts desarrollados en IDL[®]. Los cuatro *scripts* (incluidos y explicados en el anexo de esta memoria) son:

- ✓ convert_S1pair_to_2images_C2.pro
- ✓ create_config_psp_.pro
- ✓ save_c2_psp.pro
- ✓ PSP_C2_processing.pro

De todos los *scripts*, los más importantes son "*convert_S1pair_to_2images_C2.pro*" y "*PSP_C2_processing.pro*". El primero de ellos convierte los datos contenidos en las carpetas coregistradas a formato C2. Hay que tener en cuenta que a diferencia de en el caso del procesado de clasificación, en esta ocasión no tenemos las polarizaciones VV y VH dentro de la carpeta que nos llevamos a PolSARpro para el procesado polarimétrico. Como se ha indicado en los párrafos anteriores, las

Procesado de datos SAR del satélite Sentinel-1 para el estudio de zonas costeras.

polarizaciones están coregistradas y separadas en carpetas diferentes, por lo que este código en IDL, elaborará, a partir de ambas carpetas, las matrices C2 correspondientes. A su vez, las funciones "create_config_psp.pro" y "save_c2_psp.pro" son subrutinas necesarias dentro de la primera. El segundo de los *scripts* mencionados al principio de este párrafo tiene como parámetros de entrada las carpetas resultado del anterior *script*. Su función es llamar a las rutina de filtrado polarimétrico *Refined Lee* dentro de PolSARpro para tratar las carpetas de entrada. Las carpetas de salida son el resultado final de todos los pre-procesados necesarios en esta metodología para la realización del detector de cambios. El siguiente paso será llevar estas carpetas como parámetros de entrada a los *scripts* de Matlab®. Como aclaración, cabe indicar que lo único necesario para la ejecución de estos *scripts* es indicar correctamente la ubicación de los archivos/carpetas de entrada para cada caso y actualizar dentro los *scripts* algunos nombres de archivos, tal como se puede observar en las figura 5.92. Para más información y consulta de estos *scripts*, consultar el anexo de esta memoria.



```
convert_S1pair_to_2images_C2.pro | create_config_psp.pro | save_c2_psp.pro | PSP_C2_processing.pro
folder_main = 'D:\ARIDANE\LISTA DE PRODUCTOS\NIEVE FEBRERO\PROCESADOS\polsarpro\Sentinel'
name_pair = 'S1A_IW_SLC__1SDV_20160208T190449_20160208T190519_009859_00E707_6600_Cal_Orb_Stack'
name_image = ['mst_08Feb2016', 'slv1_20Feb2016']

folder_output = folder_main + '/' + 'Swaths_C2'
folder_output_image_txt = [ '20160208' , '20160220' ]

convert_S1pair_to_2images_C2.pro | create_config_psp.pro | save_c2_psp.pro | PSP_C2_processing.pro
folder_main = 'D:\ARIDANE\LISTA DE PRODUCTOS\NIEVE FEBRERO\PROCESADOS\polsarpro\Sentinel'
folder_input = folder_main + '/' + 'Swaths_C2'
folder_output = folder_main + '/' + 'Filtered_Swaths_C2'
folder_image_txt = [ '20160208', '20160220' ]

Nrow = [2832] ; number of lines (azimuth size)
Ncol = [20863] ; number of pixels per line (range size)

subswath_txt = ['IW1']

;-----
psp_dir = 'C:\Program Files (x86)\PolSARpro_v5.0\Soft'
```

Figura 5.92. Configuración de los parámetros de entrada a los *scripts* desarrollados en IDL®.

5.4.3. Procesado y resultados para la detección de nieve

Una vez que tenemos las dos carpetas preparadas desde el tratamiento realizado por IDL® y PolSARpro, el siguiente paso es la ejecución del algoritmo de detección de cambios de los *scripts* desarrollados en Matlab®. Los *scripts* se enumeran a continuación:

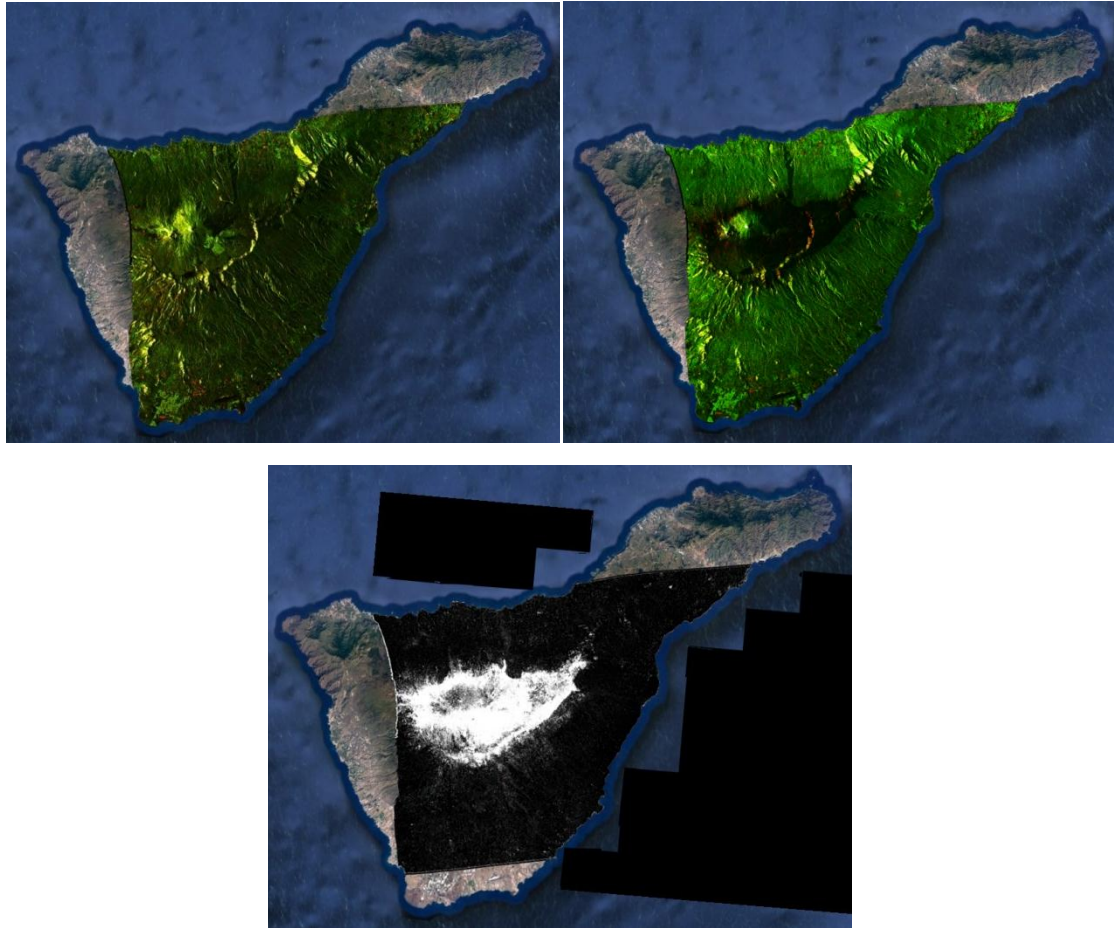


Figura 5.94. Arriba a la izquierda, composición RGB de las bandas polarimétricas para el producto SAR SLC IW del día 08/02/2016 sobre la isla de Tenerife. Arriba a la derecha, composición RGB de las bandas polarimétricas para el producto SAR SLC IW del día 20/02/2016 sobre la isla de Tenerife. Abajo, imagen resultado del detector de cambios de Wishart.

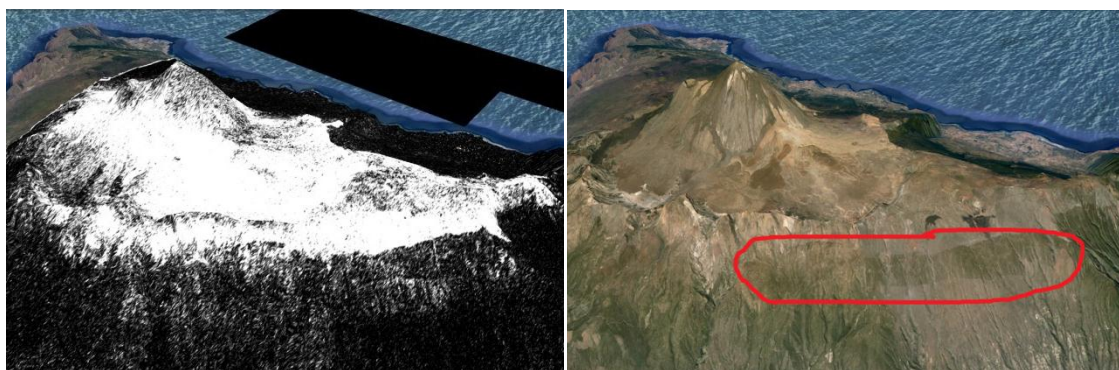


Figura 5.95. Detalle de la cota de nieve en la zona del Teide en Tenerife.

En las imágenes de la figura 5.94 podemos observar las representaciones en composición RGB de las bandas polarimétricas para los productos del 8 y 20 de Febrero de 2016. Los cambios más significativos en las dos imágenes son, por un lado, los bajos

niveles de retrodispersión en la zona del Teide para la imagen captada durante la nevada. Esto coincide con la teoría estudiada en el apartado 4.4.1. acerca de la visualización de nieve en imágenes SAR en banda C. Como se explicó, la nieve produce bajos niveles de retrodispersión con respecto a la misma zona sin nieve. Esto es debido a que la nieve produce un proceso de retrodispersión volumétrica de la señal SAR, teniendo como consecuencia una dispersión isotrópica de energía que hace que el sensor SAR capte menos energía de vuelta para esa zona. La segunda de las variaciones tiene que ver con el tono general de verde de las dos imágenes, pues no es el mismo. Esto puede ser debido a que, aunque en la banda de las microondas los efectos atmosféricos apenas producen atenuación, justo en el momento de la segunda imagen, Tenerife estaba totalmente cubierto por la borrasca que causó la nevada. Las minúsculas diferencias de atenuación podrían causar este ligero cambio en el tono de color verde del total de la imagen. Por lo demás, el resto de la imagen parece, visualmente, muy similar. Tal es así, que cuando obtenemos la imagen resultado del detector de cambios podemos observar que el único gran cambio de la escena se encuentra en la zona nevada de la cumbre de Tenerife. El resto de la isla aparece de color oscuro representando niveles de cambio relativo muy bajos o nulos. Corroborando la información dada en los medios de comunicación, las medidas sobre Google Earth[®] acerca de la cota máxima de nieve, dio como resultado una cota media de 1700-1900 m de altitud. Además de esto, en la imagen se aprecia que la cara norte de la montaña del Teide parece menos afectada por la nieve, es decir, tiene un nivel de cambio menor, lo cual no tiene sentido. Esta apariencia de tonos grisáceos en la cara norte del Teide puede estar provocada por el efecto de *Foreshortening*, *Layover* y *Shadows* explicados en el apartado 2.1.2.1. de esta memoria. El pase del satélite en sentido ascendente con vista a la izquierda puede estar provocando que esta zona se quede en sombra para las dos imágenes. Hay que tener en cuenta que esta montaña supone la zona de mayor pendiente de todo el escenario, y por lo tanto, la zona que más puede estar afectada por estas distorsiones geométricas. Por último, como observación añadida se puede examinar las imágenes de la figura 5.95. En esta figura se ha tratado de representar el efecto de la vegetación sobre la zona nevada. Si observamos detenidamente la imagen de la derecha, dentro del círculo rojo podemos observar las franjas de pinar en la cumbre sureste de Tenerife. La zona de pinar alcanza como máximo los 2000 m de altitud, esto hace que de 2000 m hacia abajo tengamos vegetación densa y, por eso, las tonalidades de brillo cambian justo en esta altura, como puede observarse

Procesado de datos SAR del satélite Sentinel-1 para el estudio de zonas costeras.

para la misma zona en la imagen de la izquierda. Esto corrobora la teoría vista cuando estudiamos los fundamentos de la teledetección radar en el apartado 2.1.1., donde se explicaba que la banda C tenía capacidades limitadas para penetrar a través de la vegetación. De hecho, la banda X es la peor de todas para observar objetos bajo la vegetación, mientras que la L es la que mayor capacidad de penetración tiene. En esta escala, la banda C se encuentra en medio de las bandas X y C.

En el caso de la isla de Gran Canaria, las dos composiciones RGB nos llevan a una interpretación visual parecida a la comentada en el caso de Tenerife, si bien en esta ocasión no encontramos ninguna mancha oscura en la segunda imagen para la zona de las cumbres de Gran Canaria. Sin embargo, al analizar la imagen resultado del detector de cambios de Wishart podemos encontrar varias zonas "minúsculas" aisladas que muestran

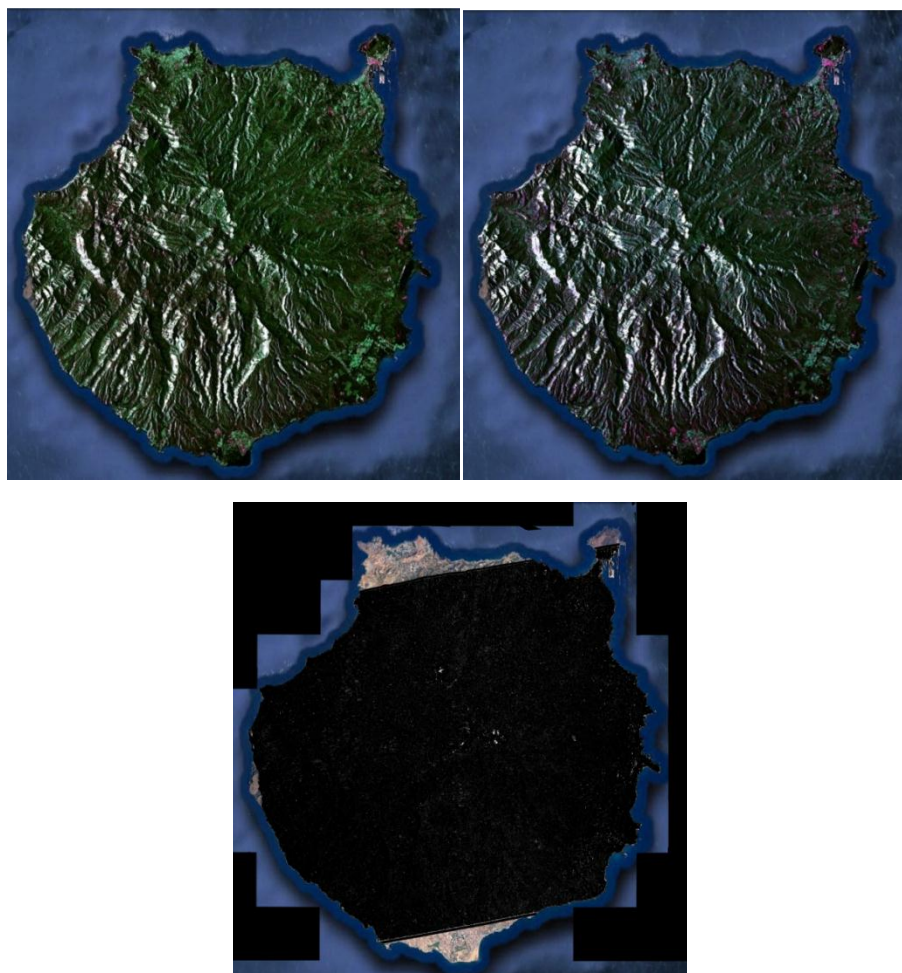


Figura 5.96. Figura 5.94. Arriba a la izquierda, composición RGB de las bandas polarimétricas para el producto SAR SLC IW del día 08/02/2016 sobre la isla de Gran Canaria. Arriba a la derecha, composición RGB de las bandas polarimétricas para el producto SAR SLC IW del día 20/02/2016 sobre la isla de Gran Canaria. Abajo, imagen resultado del detector de cambios de Wishart.

elevadísimos niveles de brillo. Analizando en detalle estas zonas en la plataforma Google Earth® podemos darnos cuenta de que estas zonas son en realidad pequeñas zonas de suelo desnudo en la cumbre. Debemos tener en cuenta un dato muy importante y es que la altura máxima de la isla de Gran Canaria es de 1956 metros de altura en el Pico de las Nieves. Esto supone que la superficie libre de pinar es prácticamente nula, puesto que como se ha visto en la imagen de Tenerife, esta especie puede desarrollarse hasta altitudes de 2000 m. Por lo tanto, podemos suponer que, salvo algunas zonas descampadas, la mayor parte de la cumbre grancanaria se encuentra cubierta por pinos. Además de esto, si recordamos que la cota de nieve estaba situada en torno a los 1700 y 1900 m, la superficie nevada en la isla de Gran Canaria es muy inferior si la comparamos a la de la isla de Tenerife. En la imagen SAR, toda esta nieve se encuentra bajo el pinar de la cumbre, por lo que no aparece en la imagen. Sí aparece, con muchísima claridad estas zonas aisladas comentadas al inicio de este párrafo que se encuentran en torno a los 1700-1800 metros de altitud.

5.4.4. Procesado y resultados para la detección de zonas inundadas

Procediendo de igual forma que para el caso de detección de zonas nevadas en el anterior apartado, en esta sección se exponen las imágenes resultado para la detección de zonas inundadas sobre el municipio costero de Telde en la isla de Gran Canaria en las figuras 5.97 y 5.98.

En las imágenes de la figura 5.97 podemos observar las representaciones en composición RGB de las bandas polarimétricas para los productos del 11 y 23 de Octubre de 2015. Los cambios más significativos en las dos imágenes son, al igual que en el caso de las imágenes de Tenerife y Gran Canaria para el caso de zonas inundadas, el cambio en el tono de color verde entre la primera y la segunda imagen. Como se indicó en el anterior caso, este cambio podría estar debido a las diferentes condiciones meteorológicas de cada toma de datos, pues para el momento en que fue captada la segunda imagen, la isla de Gran Canaria estaba cubierta por un manto de nubes que de hecho, desencadenó la tormenta que causó las lluvias sobre el municipio de Telde. Además de esto, si hacemos un

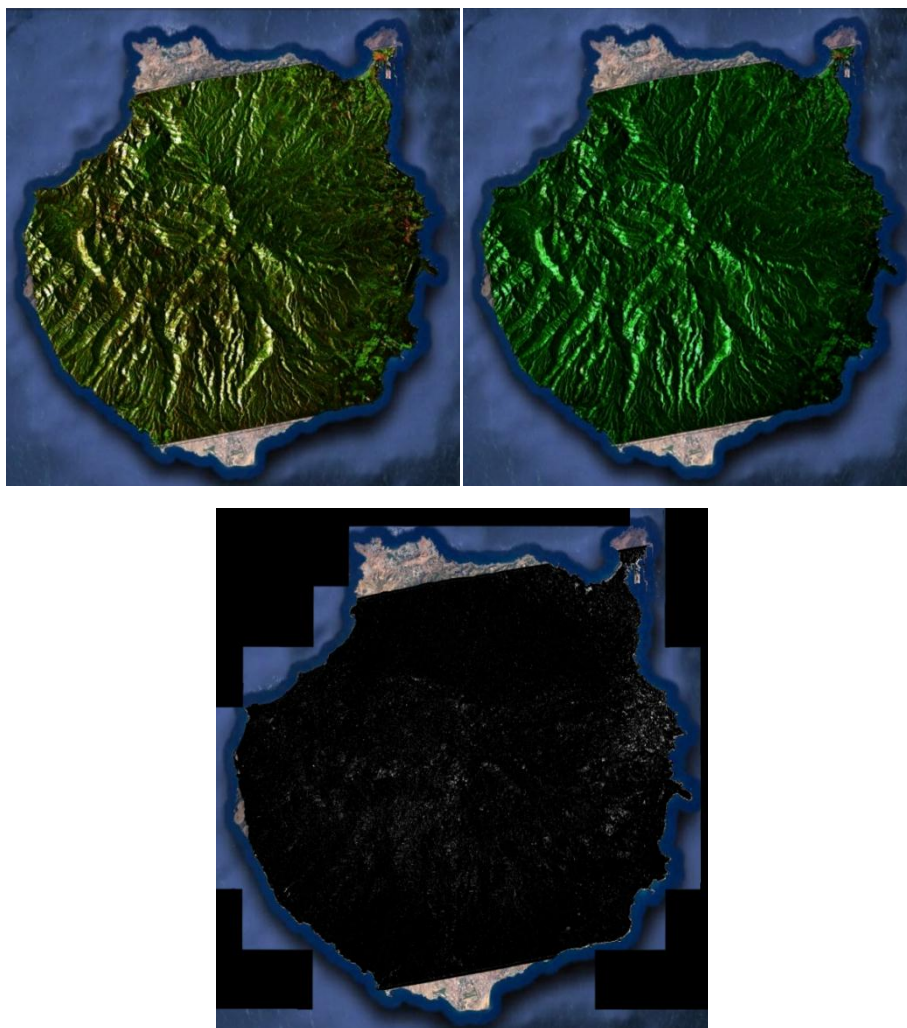


Figura 5.97. Figura 5.94. Arriba a la izquierda, composición RGB de las bandas polarimétricas para el producto SAR SLC IW del día 11/10/2015 sobre la isla de Gran Canaria. Arriba a la derecha, composición RGB de las bandas polarimétricas para el producto SAR SLC IW del día 23/10/2015 sobre la isla de Gran Canaria. Abajo, imagen resultado del detector de cambios de Wishart.

zoom en las imágenes RGB sobre la zona de Telde, comprobaremos que existen intensas diferencias de colores rojo y verde en numerosas pequeñas zonas sobre la superficie del municipio costero. A priori, estas diferencias podríamos interpretarlas cualitativamente como la captación de zonas inundadas a causa de la lluvia en la segunda de las imágenes. Observando la imagen resultado del detector de Wishart, comprobamos que la imagen de la isla de Gran Canaria presenta, en general, tonos oscuros para toda la superficie salvo en la zona de Telde, donde presenta numerosas zonas pequeñas con elevados brillos y un tono general grisáceo repartido por todas las cercanías a la costa del municipio. Esta mancha grisácea se interpreta como el cambio producido por las inundaciones del terreno debidas a la lluvia. Se observa también otra zona pequeña muy brillante en la parte norte

de la isla, cercana a la playa de las Canteras. Se comprobó, en la banda óptica, que esta zona corresponde a un área de agricultura y se dedujo que, probablemente el estado de humedad de la vegetación para ambas fechas de adquisición era diferente. Este hecho era posible debido a que probablemente, debido a las tareas de regadío en determinados momentos, la cantidad de agua presente en la vegetación no era la misma. Por último, en la figura 5.98 puede observarse una imagen detallada de la zona del municipio costero de Telde con las imágenes del detector de cambios de Wishart y la imagen óptica disponible en Google Earth®. Una aclaración importante acerca de la detección de zonas inundadas en tecnología SAR es que, cuanto mayor es el ángulo de incidencia, mejor se podrán detectar estas zonas. Esto último tiene su explicación en el proceso de reflexión de la onda SAR cuando entra en contacto con el agua de las superficies inundadas. Cuando mayor es el ángulo de incidencia, mayor es el ángulo de reflejo de la onda y, por lo tanto, más se aleja del sensor el reflejo de las zonas inundadas y por ello, más oscuras aparecerán con respecto al terreno seco.

Todas las imágenes resultado mostradas en este apartado, así como los ficheros .kmz para Google Earth® se encuentran disponibles en el anexo digital de esta memoria.



Figura 5.98. Detalle ampliado para la zona costera del municipio grancanario de Telde. A la izquierda imagen resultado del detector de cambios de Wishart. A la derecha imagen óptica disponible en Google Earth®.

Capítulo 6

Conclusiones

En este capítulo se revisan los objetivos iniciales y se exponen las conclusiones alcanzadas tras la realización del proyecto, así como algunas de las dificultades más relevantes. También se proponen las posibles líneas futuras de trabajo.

6.1. Revisión de objetivos

La línea de trabajo principal de este proyecto ha estado orientada al estudio de la tecnología SAR así como de los datos y paquetes software proporcionados por la ESA para la obtención de productos y aplicaciones de interés. Con estos datos se ha llevado a cabo un estudio detallado del satélite Sentinel-1 y de sus productos. Se han estudiado las distintas funcionalidades de los paquetes software para el tratamiento de estos datos, como por ejemplo, la etapa de pre-procesados. Posteriormente, se han identificado y estudiado las diversas herramientas y técnicas de interés que nos han permitido analizar y obtener productos finales para diversas aplicaciones a partir de los datos SAR. Las tres aplicaciones llevadas a cabo consistieron en:

- Desarrollo de cartografías de un área terrestre costera de Gran Canaria, en este caso de Maspalomas, a partir de técnicas de clasificación en imágenes SAR.

- Detección de manchas de fuel en el mar ocasionadas por el hundimiento del *Oleg Naydenov* al sur de la isla de Gran Canaria.
- Detección de áreas nevadas en las cumbres de las islas de Gran Canaria y Tenerife durante la nevada de Febrero de 2016.
- Detección de áreas inundadas durante la lluvia ocasionada por una intensa borrasca el 23 de Octubre de 2015 sobre la costa del municipio de Telde, en Gran Canaria.

Para la consecución del objetivo global del proyecto, así como de las diversas aplicaciones finales aquí nombradas, ha sido necesario abordar con éxito las siguientes actuaciones:

- ✓ Se ha realizado un estudio detallado de la tecnología SAR. Se ha profundizado en sus bases teóricas de funcionamiento, sus ventajas y desventajas frente a tecnologías basadas en sensores ópticos, sus distorsiones geométricas y radiométricas y, además, las diversas aplicaciones de estos datos en el campo de observación de la Tierra.
- ✓ Se ha realizado un estudio detallado del satélite a emplear: Sentinel-1. Se han estudiado los aspectos técnicos, el funcionamiento del satélite y, especialmente, los niveles de procesamiento y formato de los datos.
- ✓ Se han estudiado, además, las características de la plataforma espacial TerraSAR-X, dado que se ha usado una imagen SAR de alta resolución captada por su sensor, en el desarrollo del proyecto.
- ✓ Se han estudiado las técnicas de pre-procesado necesarias en las imágenes SAR para garantizar que los datos de la imagen se correspondiesen adecuadamente con la energía reflejada por la superficie terrestre. Se ha profundizado en los conceptos de ruido radiométrico y de los pre-procesados necesarios para su corrección.
- ✓ Se han estudiado las técnicas de corrección geométrica necesarias para la correcta representación gráfica de los datos.
- ✓ Se ha estudiado el funcionamiento, así como las utilidades y herramientas del software principal empleado en este proyecto: El SNAP 3.0 y el PolSARpro 5.0 de la ESA. Se ha realizado un estudio de la metodología a seguir sobre estas plataformas para la correcta ejecución de cada una de las aplicaciones planteadas.

- ✓ Se han estudiado las técnicas de clasificación y obtención de cartografías terrestres disponibles en el software PolSARpro para los datos proporcionados por el Sentinel-1. Se ha profundizado en las bases y los conceptos fundamentales de los distintos procesados de clasificación polarimétricos aplicables a las imágenes SAR.
- ✓ Para los productos de clasificación finales, se han definido e identificado con rigor cada una de las categorías discriminadas sobre las imágenes, teniendo en cuenta su propia variabilidad sobre la zona de estudio. Se ha profundizado especialmente en el clasificador no supervisado H/A/Alpha y en la clasificación supervisada *Supervised Wishart Classifier*.
- ✓ Para la obtención de productos finales de identificación de vertidos de fuel sobre el mar se ha estudiado la problemática de los vertidos de hidrocarburos, así como los conceptos fundamentales derivados de la observación del océano con el SAR. Se ha profundizado en el estudio de las características del mar necesarias para la viabilidad de la correcta detección de vertidos de petróleo usando la tecnología SAR. Además se ha estudiado la herramienta disponible en el SNAP 3.0 para la detección automática de vertidos sobre la superficie oceánica.
- ✓ Para la aplicación de detección de nieve se han estudiado las características de retrodispersión de zonas nevadas en imágenes SAR. En este punto se ha decidido aplicar un detector de cambios polarimétrico en Matlab® para su detección, usando imágenes con fechas de adquisición anterior y posterior a la fecha de la nevada.
- ✓ Para la aplicación de detección de zonas inundadas se han estudiado las características de retrodispersión de zonas cubiertas por agua en la superficie terrestre en imágenes SAR. Al igual que para la detección de zonas nevadas, en este punto se ha decidido aplicar un detector de cambios polarimétrico en Matlab® para su detección, usando imágenes con fechas de adquisición anterior y posterior a la fecha de las lluvias que causaron las inundaciones.

En definitiva, tras la realización de este proyecto, a partir de todas las técnicas y fundamentos teóricos estudiados, se ha logrado identificar las bondades y limitaciones de la tecnología SAR y, obtener además, métodos robustos para la obtención de los diversos productos finales de interés en cada una de las aplicaciones propuestas al comienzo del mismo, a través del uso de imágenes SAR.

6.2. Revisión de resultados

Tras analizar los resultados obtenidos, nos vemos en disposición de listar las principales conclusiones extraídas:

- ✓ SNAP 3.0 es una herramienta indispensable para la etapa de pre-procesados de los productos obtenidos a través del Sentinel-1. Sin embargo, las funciones y herramientas disponibles en el mismo para el tratamiento de datos SAR son aún limitadas y es frecuente la aparición de errores durante la ejecución de varias de sus utilidades. Por otro lado, a medida que se actualiza la versión del software, los errores se solventan y se incluyen nuevas y mejoradas funciones.
- ✓ Dada la escasez de herramientas de clasificación polarimétricas disponibles en SNAP 3.0, se hizo uso de la herramienta PolSARpro 5.0. Sin embargo, esta última herramienta está orientada sobre todo a datos de polarización completa, es decir, con las cuatro polarizaciones. Cabe decir también que al igual que el SNAP, el software presenta errores durante la ejecución de varias de sus herramientas. Esto es debido a la naturaleza del mismo software, de libre distribución y creado de forma colaborativa entre numerosas entidades.
- ✓ A través de la ejecución de los pre-procesados se demostró la efectividad de la herramienta de filtrado de Speckle para la reducción de ruido en imágenes SAR.
- ✓ En la aplicación de clasificación se demostró la utilidad e interpretación de los parámetros de entropía, anisotropía y alpha, así como de sus combinaciones, para diferenciar entre distintos procesos de retrodispersión sobre la superficie de estudio. La clasificación H/A/Alpha mostró grandes mejoras de clasificación con respecto a la de H/Alpha debido a la inclusión del parámetro de anisotropía en el estudio de clasificación, lo que permitió diferenciar más clases en las imágenes. Los mayores problemas de clasificación se encontraron en la discriminación de las clases de agua, carreteras y suelos desnudos, dado que en imágenes SAR (si el mar está en calma), estas tres superficies presentan características retrodispersivas sustancialmente similares, lo que dificulta la discriminación entre las mismas. Por otro lado, las clases mejor diferenciables resultaron ser las de vegetación y zonas industriales, y a su vez, con el resto de clases nombradas anteriormente, dado que de forma general presentan procesos de retrodispersión muy diferentes entre sí.

- ✓ Los resultados para la clasificación supervisada usando el algoritmo *Supervised Wishart Classifier* mejoró bastante la clasificación de la zona costera de Maspalomas (producto de resolución IW) con respecto a la clasificación no supervisada H/A/Alpha, a costa de una reducción de las clases diferenciadas. Esto significó agrupar varias clases detectadas en el caso no supervisado, dentro de una o dos clases para el caso supervisado. En el caso de Baytown (producto de resolución SM), la precisión de la clasificación apenas mejoró ligeramente.
- ✓ La resolución de 5 x 20 metros (*range x azimuth*) en los productos IW del Sentinel-1 para zonas costeras es, en general, insuficiente y los productos tienen muy baja calidad para fines de clasificación. Por este motivo se incluyó el estudio de una zona costera (Baytown en Estados Unidos) que tuviese la máxima resolución del sensor, es decir, usando un producto SM (5 x 5 metros). Los resultados demostraron que a medida que mejora la resolución, los resultados de clasificación mejoran drásticamente. En este punto, de forma cualitativa, la visualización del producto SAR de 1 metro de resolución del sensor TerraSAR-X en el apartado 5.2.2.4. para la zona de Maspalomas en Gran Canaria, demostró la gran mejora de la información geográfica y la calidad de la imagen SAR cuando tenemos valores de resolución tan elevados.
- ✓ La capacidad de polarización dual del Sentinel-1 también afectó al grado de calidad y de acierto de los distintos métodos de clasificación utilizados. El caso ideal consistía en contar con las cuatro polarizaciones, pero en este caso, sólo hemos podido contar con dos, lo que reducía en un 50% la información polarimétrica disponible en cada píxel de la imagen SAR.
- ✓ En la aplicación de detección de vertidos de petróleo en el mar se demostró y visualizó el potencial de la tecnología SAR para la detección de los mismos. Se comprobó, de forma cualitativa, la viabilidad de detección de manchas. Sin embargo es muy dependiente de las condiciones de la superficie del mar. En este aspecto, a diferencia de la aplicación de clasificación, la resolución no es un factor determinante para la correcta detección de los vertidos, siendo la resolución de los productos IW más que suficiente para el objetivo planteado.
- ✓ Se comprobó, además, la eficacia de la herramienta de detección automática de vertidos dentro del SNAP 3.0. En este caso, los resultados observados demostraron efectividad relativa de la herramienta para este caso. Se comprobó que para

tamaños de ventana de 225 (15 x 15) en el cálculo de la media local se eliminaban la mayor parte de las zonas de mar en calma, sin descartar demasiado la zona real del vertido. De todo esto, se concluyó que al obtener un resultado de esta herramienta es fundamental conocer la escena, el tamaño del vertido y el estado de la mar para poder distinguir las manchas de los falsos positivos. Como se indicó en el apartado 4.3.3., el estado de la superficie del mar junto con el viento juegan un papel fundamental en las capacidades de detección de vertidos de petróleo en imágenes SAR.

- ✓ La inexistencia de herramientas para la detección de nieve o zonas inundadas en las plataformas software de la ESA llevó a la necesidad de utilizar un detector de cambios polarimétrico en la plataforma Matlab[®]. Gracias a la colaboración del profesor Juan Manuel López Sánchez de la Universidad de Alicante, y al estudio de las técnicas de detección de cambios polarimétricos en imágenes SAR de los documentos del IEEE de la bibliografía [110][111][112], fue posible enunciar un método robusto para la consecución de los objetivos de ambas aplicaciones.
- ✓ El detector de cambios polarimétrico basado en una distribución estadística compleja de Wishart ejecutado sobre los *scripts* de Matlab[®] demostró la viabilidad de la detección de cambios a partir de los datos de información polarimétrica. Esto hizo posible la detección de zonas nevadas y zonas de inundaciones en los casos estudiados. Aunque la resolución de los productos IW resultó suficiente para estos casos, un aumento de la resolución mejoraría, a priori, los resultados obtenidos en el nivel de precisión para zonas concretas y detalladas del terreno. Así mismo, la posibilidad de tener las cuatro bandas polarimétricas en lugar de dos, haría que el detector de cambios funcionase con mayor información de la escena y por lo tanto, obteniendo posiblemente también mejores resultados. Sin embargo, cabe mencionar aquí que, como se comprobó en el apartado 5.4.3., la banda C no permite la detección adecuada de nieve en zonas forestales densas, por lo que sería también aconsejable realizar tests de detección de cambios en otras bandas SAR, como X y L.

De todo esto se concluye el potencial de la tecnología SAR para su uso, al menos, en las aplicaciones aquí estudiadas, siendo por ejemplo una de sus virtudes la posibilidad de obtener datos de estudio durante un accidente de vertido de fuel en el mar, nevadas o

Procesado de datos SAR del satélite Sentinel-1 para el estudio de zonas costeras.

inundaciones, en cualquier condición atmosférica (a excepción de los vertidos de fuel en el mar, para los que la superficie oceánica se restringe a las condiciones estudiadas) y a cualquier hora (sin importar si es de día o de noche). Ha quedado demostrada aquí, la cantidad de información contenida en las bandas polarimétricas de las imágenes SAR para la ejecución de las distintas aplicaciones. Así mismo, se han presentado y estudiado los distintos métodos para la consecución de los objetivos con la obtención satisfactoria de resultados aceptables, a partir de los productos disponibles de forma gratuita a través de la ESA y su satélite, Sentinel-1.

6.3. Líneas futuras de trabajo

Siguiendo la línea de nuestras conclusiones, la mayor dificultad a la hora de obtener productos finales de calidad ha sido causada por la baja precisión de los datos de partida. La baja resolución y la capacidad polarimétrica, únicamente dual, del sensor del Sentinel-1 no son suficientes para obtener productos finales de gran precisión y calidad en las aplicaciones de clasificación. No se han visto tan afectadas por este factor las aplicaciones de detección de nieve y zonas inundadas y, sobre todo, de detección de vertidos en el mar. Por este motivo, una buena línea de trabajo futura sería realizar un estudio similar partiendo de datos de mayor resolución, como es el caso del sensor TerraSAR-X, de forma que se pueda verificar y validar el alto potencial de los datos SAR para las aplicaciones aquí estudiadas.

Además, de entre las aplicaciones realizadas, resulta muy interesante y necesaria la detección de vertidos de fuel en el mar para la conservación del medio ambiente y el cuidado de nuestro planeta. Por este motivo, se podría realizar un estudio en mayor profundidad de distintas técnicas de detección de vertidos usando diversas herramientas de procesado de imágenes y partiendo también, de imágenes de mayor resolución.

Podrían a su vez realizarse estudios basados en estas aplicaciones pero usando productos SAR que contengan además de las cuatro polarizaciones y mayor resolución, varias bandas del espectro radar, tales como las bandas C, X, L... teniendo así mayor información de la superficie captada y ampliando las posibilidades y la calidad de cada aplicación.

Otro estudio posible no contemplado en este proyecto sería el estudio de las técnicas interferométricas SAR para la obtención de mapas cartográficos que muestren desniveles o movimientos de tierra ocurridos durante terremotos o eventos de naturaleza volcánica. Para su aplicación práctica sería necesario disponer de datos captados sobre eventos de estas características, como por ejemplo ocurrió en el año 2011 en la isla del Hierro con la erupción del volcán submarino al sur de la isla. Sin embargo, en este caso, para esa fecha no hay datos disponibles del Sentinel-1 dado que en ese momento aún no existía la plataforma, por lo que habría que recurrir a los datos captados por otros satélites SAR.

BIBLIOGRAFÍA

Bibliografía

Procesado de datos SAR del satélite Sentinel-1 para el estudio de zonas costeras.

[1] Instituto Geográfico Nacional, Centro Nacional de Información Geográfica. Ministerio de Fomento.

<http://www.ign.es/ign/layoutIn/teledeteccionQueEs.do>

Consulta: [17 de Octubre de 2015].

[2] Teledetección ambiental. Autor: Emilio Chuvieco. Editorial Ariel. Edición: 2010.

ISBN: 9788434434981

[3] Agencia Espacial Europea, Eduspace. Historia de la observación terrestre.

http://www.esa.int/SPECIALS/Eduspace_ES/SEMZQYD3GXF_0.html

Consulta: [17 de Octubre de 2015].

[4] National Aeronautics and Space Administration, NASA. Seasat 1.

<http://science.nasa.gov/missions/seasat-1/>

Consulta: [16 de Octubre de 2015].

[5] Tutorial: Fundamentals of Remote Sensing. Natural Resources Canada.

<http://www.nrcan.gc.ca/earth-sciences/geomatics/satellite-imagery-air-photos/satellite-imagery-products/educational-resources/9309>

Consulta: [17 de Octubre de 2015].

[6] Agencia Espacial Europea, España. El programa Copérnico.

http://www.esa.int/esl/ESA_in_your_country/Spain/El_programa_Copernico

Consulta: [15 de Octubre de 2015].

[7] Agencia Espacial Europea, España. Sentinel-1 ya está listo para su lanzamiento.

http://www.esa.int/esl/ESA_in_your_country/Spain/Sentinel-1_ya_esta_listo_para_su_lanzamiento

Consulta: [16 de Octubre de 2015].

[8] Gibson, P. y C. H. Power. Introductory Remote Sensing: Digital Image Processing and Applications, London, Routledge, 2000b.

[9] Eduardo Gómez. Teledetección y sus Aplicaciones. Septiembre 2011.

<http://es.slideshare.net/EDU3364/teledeteccion-9476986?related=1>

Consulta: [13 de Marzo de 2016].

Bibliografía

[10] Jensen, J. R. *Introductory Digital Image Processing. A Remote Sensing Perspective*, Upper Saddle River N.J., Prentice-Hall, 2004.

[11] *Processing of SAR Data. Fundamentals, Signal Processing, Interferometry*. Achim Hein. Editorial: Springer. ISBN 978-3-642-05710-6

[12] Lillesand, T. M. y R. W. Kiefer. *Remote Sensing and Image Interpretation*, New York, John Wiley and Sons, 2000. Referencias 160.

[13] F. Henderson and A. Lewis, *Manual of Remote Sensing: Principles and Applications of Imaging Radar*. New York: Wiley, 1998.

[14] Pozar, David M. (1993). *Microwave Engineering* Addison-Wesley Publishing Company. ISBN 0-201-50418-9.

[15] Short, N. M. *The Remote Sensing Tutorial (An Online Handbook)*. Applied Information Sciences Branch. NASA's Goddard Space Flight Center, 2007.

[16] *A Tutorial on Synthetic Aperture Radar*. Alberto Moreira, Pau Prats-Iraola, Marwan Younis, Gerhard Krieger, Irena Hajnsek and Konstantinos P. Papathanassiou. Microwaves and Radar Institute of the German Aerospace Center (DLR), Germany. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, March 2013.

[17] "African humid periods triggered the reactivation of a large river system in Western Sahara". C. Skonieczny, P. Paillou, A. Bory, G. Bayon, L. Biscara, X. Crosta, F. Eynaud, B. Malaizé, M. Revel, N. Aleman, J.-P. Barusseau, R. Vernet, S. Lopez & F. Grousset. *Nature Communications*, 10 Noviembre 2015. DOI: 10.1038/ncomms9751.

[18] *Multitemporal InSAR in land-cover and vegetation mapping*. Marcus Engdahl. Aalto University publication series. Doctoral Dissertations 178/2013.

[19] *Polarimetric Radar Imaging, from basics to applications*. Jong-Sen Lee, Eric Pottier. Editorial: CRC Press, Taylor & Francis Group.

[20] Universidad de Murcia: <http://ocw.um.es/ciencias/herramientas-de-teledeteccion-aplicadas-a-la/material-de-clase-1/tema-5-plataformas-sensores-y-canales.pdf>.

Consulta: [22 de Marzo de 2016].

Procesado de datos SAR del satélite Sentinel-1 para el estudio de zonas costeras.

[21] Satélite AirSAR, NASA.

http://airsar.jpl.nasa.gov/index_detail.html

Consulta: [22 de Marzo de 2016]

[22] Curlander, J. C., & McDonough, R. N. (1991). Synthetic Aperture Radar: Systems and Signal Processing. Wiley Series in Remote Sensing. New York: John Wiley & Sons, Inc.

[23] Cumming, I. G., & Wong, F. H. (2005). Digital Processing of synthetic Aperture Radar Data: Algorithms and Implementation. Boston, London: Artech House.

[24] Christian, W., "Radar Basics." Polarisation of Electromagnetic Waves.

<http://www.radartutorial.eu/06.antennas/Polarization.en.html>.

Consulta: [29 de Marzo de 2016]

[25] P. Dubois-Fernandez, H. Cantalloube, B. Vaizan, G. Krieger, R. Horn, M. Wendler, and V. Giroux, "ONERA-DLR bistatic SAR campaign: Planning, data acquisition, and first analysis of bistatic scattering behaviour of natural and urban targets," IEEE Proc. Radar, Sonar Navigat. (1994-2006), vol. 153, no. 3, 2006.

[26] The NASA/JPL AirBorne Synthetic Aperture Radar System. YUnling Lou, Yunjin Kim, and Jakob van Zyl. Jet Propulsion Laboratory. California Institute of Technology.

[27] TanDEM-X Mission concept and status. Daniel Schulze, Mandred Zink, Gerhard Krieger, J. Böer, Alberto Moreira. German Aerospace Center (DLR) – Microwaves and Radar Institute Oberpfaffenhofen, P.O.-Box 1116, 82230 Weßling, Germany.

[28] Agencia Espacial Europea, programa Copérnico.

http://www.esa.int/Our_Activities/Observing_the_Earth/Copernicus/Overview4

Consulta: [1 de Abril de 2016]

[29] Sentinel-1 User Handbook. ESA. Prepared by Sentinel-1 Team. September 2013.

[30] Sentinel-1: ESA's Radar Observatory Mission for GMES Operational Services (ESA SP-1322/1, March 2012). K. Fletcher. An ESA Communications Production.

Bibliografía

[31] Analysis and precision processing of RADARSAT ScanSAR Data. Ian Cumming and Yi Guo. Dept. of electrical and Computer Engineering. the University of British Columbia.

http://sar.ece.ubc.ca/papers/BURST/burst_mode_GER.html

Consulta: [6 de Abril de 2016]

[32] De Zan, F., & Guarnieri, A. M. (2006). TOPSAR: Terrain Observation by Progressive Scans. Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on, 44(9), 2352–2360. doi:10.1109/TGRS.2006.873853

[33] Sentinel-1 Product Definition. Agencia Espacial Europea. Documento: S1-RS-MDA-52-7440. 22/07/2015.

[34] Planificación de adquisición de datos Sentinel-1, "Observation Scenario". ESA.

<https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-1/observation-scenario>

Consulta: [7 de Abril de 2016]

[35] Planificación de adquisición de datos Sentinel-1,"Acquisition Segments". ESA.

<https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-1/observation-scenario/acquisition-segments>

Consulta: [7 de Abril de 2016]

[36] ESA Monitoring Climate from Space MOOC - Satellite Tracking App.

<http://52.17.66.2/sattrackapp/index-nowebgl.html?noradID=25682>

Consulta: [7 de Abril de 2016]

[37] Base de datos pública de la ESA para las misiones Sentinel, "Scientific Data Hub". ESA.

<https://scihub.copernicus.eu/>

Consulta: [8 de Abril de 2016]

[38] Sentinel-1 SAR Technical Guide.

<https://earth.esa.int/web/sentinel/technical-guides/sentinel-1-sar;jsessionid=75F4285FB3C7C29C1501ACFAD080E8BC>

Consulta: [8 de Abril de 2016]

[39] Sentinel-1 Product Specification. Agencia Espacial Europea. Documento: S1-RS-MDA-52-7441. 08/10/2015.

Procesado de datos SAR del satélite Sentinel-1 para el estudio de zonas costeras.

[40] ESA Earth Online. SeaSat.

<https://earth.esa.int/web/guest/missions/3rd-party-missions/historical-missions/seasat>

Consulta: [4 de Mayo de 2016]

[41] Earth Observation Portal. Sharing Earth Observation Resources. SIR-A.

<https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/s/sir-a>

Consulta: [4 de Mayo de 2016]

[42] Earth Observation Portal. Sharing Earth Observation Resources. SIR-B.

<https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/s/sir-b>

Consulta: [4 de Mayo de 2016]

[43] ESA Earth Online. What is ERS?

<https://earth.esa.int/web/guest/missions/esa-operational-eo-missions/ers>

Consulta: [4 de Mayo de 2016]

[44] Canadian Space Agency. RADARSAT-1.

<http://www.asc-csa.gc.ca/eng/satellites/radarsat1/>

Consulta: [4 de Mayo de 2016]

[45] ESA Earth Online. What is Envisat?

<https://earth.esa.int/web/guest/missions/esa-operational-eo-missions/envisat>

Consulta: [4 de Mayo de 2016]

[46] Japan Aerospace Exploration Agency, JAXA. Earth Observation Research Center. About ALOS-PALSAR.

<http://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/about/palsar.htm>

Consulta: [4 de Mayo de 2016]

[47] Canadian Space Agency. RADARSAT-2.

<http://www.asc-csa.gc.ca/eng/satellites/radarsat2/>

Consulta: [4 de Mayo de 2016]

[48] UGS. Cosmo-SkyMed.

<http://www.cosmo-skymed.it/en/index.htm>

Consulta: [4 de Mayo de 2016]

Bibliografía

[49] Indian Space Research Organisation. Risat-1.

<http://www.isro.gov.in/Spacecraft/risat-1>

Consulta: [4 de Mayo de 2016]

[50] Japan Aerospace Exploration Agency, JAXA. Advanced Land Observing Satellite-2 "DAICHI-2" (ALOS-2)

<http://global.jaxa.jp/projects/sat/alos2/>

Consulta: [4 de Mayo de 2016]

[51] Comisión Nacional de Actividades Espaciales, CONAE. SAOCOM.

<http://www.conae.gov.ar/index.php/espanol/misiones-satelitales/saocom/objetivos>

Consulta: [4 de Mayo de 2016]

[52] HisdeSAT. Satélites, Observación de La Tierra, PAZ.

http://www.hisdesat.es/esp/satelites_observ-paz.html

Consulta: [6 de Mayo de 2016]

[53] TerraSAR-X Image Product Guide. Basic and Enhanced Radar Satellite Imagery. Airbus Defence and Space Geo-Intelligence Programme Line.

[54] German Aerospace Centre, DLR. TerraSAR-X.

http://www.dlr.de/eo/desktopdefault.aspx/tabid-5725/9296_read-15979/

Consulta: [8 de Abril de 2016]

[55] Henderson, F.M. and A.J. Lewis (1998), "Manual of Remote Sensing; Volume 2: Principles and Applications of Imaging Radar." John Wiley & Sons Inc.

[56] Ulaby, F. T. and M. C. Dobson (1989), "Handbook of Radar Scattering Statistics for Terrain.", Artech House, 685 Canton Street, Norwood, MA 02062 (USA).

[57] Raney, R. K., T. Freeman, R. W. Hawkins and R. Bamler (1994), "A plea for radar brightness." IEEE 1994 International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS'94), Pasadena (USA).

Procesado de datos SAR del satélite Sentinel-1 para el estudio de zonas costeras.

[58] SAREDU, Remote Sensing Education Initiative. Module 2300: SAR Polarimetry. Thomas Jagdhuber, Irena Hajnsek, Konstantinos P. Papathanassiou. Microwaves and Radar Institute, Pol-InSAR Research Group, DLR. Institute of Environmental Engineering, Earth Observation, ETH Zurich.

[59] Manual de ayuda del programa SNAP 3.0, Sentinels Application Platform de la ESA .

[60] Technical Note "Radiometric Calibration of S-1 Level-1 Products Generated by the S-1 IPF". ESA. Prepared by Nuno Miranda, P.J. Meadows. 21/05/2015.

[61] C. Oliver and S. Quegan, *Understanding Synthetic Aperture Radar Images*. Herndon, VA: SciTech Publishing, 2004.

[62] Lee J.S., *Digital image enhancement and noise filtering by use of local statistics*, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2 (2), 165-168, Marzo 1980.

[63] Durand J.M., y otros. *SAR data filtering for classification*, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, GE-25 (5), 629-637, Septiembre de 1987.

[64] Kuan D.T. y otros, *Adaptive noise filtering for images with signal-dependent noise*, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, PAMI-7 (2), 168-177, Marzo de 1985.

[65] Frost V.S. y otros, *An adaptive filter for smoothing noisy radar images*, *IEEE Proceedings*, 69 (1), 133-135, Enero de 1981.

[66] Lee J.S., *A simple speckle smoothing algorithm for synthetic aperture radar images*, *IEEE Transactions on System, Man, and Cybernetics*, SMC-13 (1), 85-89, Enero/Febrero 1983.

[67] Lee J.S., J.H. Wen, T.L. Ainsworth, K.S. Chen, y A.J. Chen, *Improved sigma filter for speckle filtering of SAR imagery*, *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, 46 (12), Diciembre de 2008.

[68] Lee J.S., *Refined filtering of image noise using local statistics*, *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, 15, 380-389, 2008.

Bibliografía

[69] Novak L.M. y M.C. Burl, *Optimal speckle reduction in polarimetric SAR imagery*, *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic systems*, 26 (2), 293-305, Marzo de 1990.

[70] Lee J.S., M.R. Grunes, y S.A. Mango, *Speckle reduction in multi-polarization, multifrequency SAR imagery*, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 29 (4), 535-544, Julio de 1991.

[71] Lee J.S., M.R. Grunes, y G. de Grandi, *Polarimetric SAR speckle filtering and its implication for classification*, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 37 (5), 2363-2373, Septiembre de 1999.

[72] Small D., Schubert A., Guide to ASAR Geocoding, RSL-ASAR-GC-AD, Issue 1.0, March 2008.

[73] National Geospatial-Intelligence Agency. Office of Geomatics: World Geodetic System 1984, WGS84.

<http://earth-info.nga.mil/GandG/wgs84/>

Consulta: [18 de Mayo, 2016]

[74] NASA, Jet Propulsion Laboratory. California Institute of Technology. Shuttle Radar Topography Mission. The Mission to Map the World.

<http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/>

Consulta: [18 de Mayo, 2016]

[75] Google Earth. La información geográfica en tu mano.

<https://www.google.es/intl/es/earth/>

Consulta: [19 de Mayo, 2016]

[76] Google. Ayuda de Google Earth, Acerca de KML.

<https://support.google.com/earth/answer/148118?hl=es>

Consulta: [19 de Mayo, 2016]

[77] Constante dieléctrica. Wikipedia.

https://es.wikipedia.org/wiki/Constante_diel%C3%A9ctrica

Consulta: [23 de Junio, 2016]

Procesado de datos SAR del satélite Sentinel-1 para el estudio de zonas costeras.

[78] Bakshi, U. A., and Bakshi, A. V., *Electromagnetic Fields*. Pune, India: Technical Publications, 2010.

[79] Manual de ayuda del programa PolSARpro, ESA. "Single vs. Multipolarization SAR data".

[80] Penta, B., A. O. Varghese, K. Nageswara Rao, and A. K. Joshi "Analysis of Synthetic Aperture Radar Polarimetric Decomposition Methods for Land Cover Interpretation." *Conference: ISRS and ISG National Symposium on Remote Sensing and GIS for Environment with Special Emphasis on Marine and Coastal Dynamics*, at Vishakhapattanam, India, 2013.

[81] Cloude, S.r., y Pottier, E., "A review of Target Decomposition Theorems in Radar Polarimetry." *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 34, no. 2 (1997).

[82] Matrices y determinantes. Ingeniería, UNAM.

<http://www.ingenieria.unam.mx/~luiscv/Algebra/Matrices/Operaciones%20sobre%20una%20matriz.htm>

Consulta: [27 de Junio de 2016]

[83] Manual de ayuda del programa PolSARpro, ESA. "Polarimetric Decompositions".

[84] Manual de ayuda de PolSARpro. "Advanced Concepts". Eric Pottier, Jong-Sen lee, Laurent Ferro-Famil. I.E.T.R.-UMR CNRS 6164-University of Rennes. Naval Research Laboratory.

[85] Manual de ayuda de PolSARpro. "Basic Concepts in Radar Polarimetry". Wolfgang-Martin Boerner. UIC-ECE Communications, Sensing & Navigation Laboratory.

[86] Sakshaug, S. E., *Evaluation of Polarimetric SAR Decomposition methods for tropical forest analysis*, Faculty of Science and Technology, University of Tromso, 2013.

[87] Polarisation. Applications in Remote Sensing. S.R. Cloude © 2010. ISBN 978-0-19-956973-1.

[88] "The dual polarisation Entropy/Alpha Decomposition: A Palsar case study". Shane CLOUDE, *AEL Consultants, Cupar, Scotland, UK*, e-mail: aelc@mac.com.

Bibliografía

[89] "Comparison of dual and full polarimetric entropy/alpha decompositions with Terrasar-X, suitability for use in classification". A. Tishampati Dhar, B. Doug Gray, C. Carl Menges. School of Engineering, Mathematics and Computer Science. Department of Electrical and Electronic Engineering & Department of Computer Science. University of Adelaide North Terrace, Adelaide Australia.

[90] J.S. Lee, M.R. Grunes, R. Kwok "Classificaciton of multi-look polarimetric SAR imagery based on the complex Wishart distribution". International Journal of Remote Sensing, vol. 15, No. 11, pp 2299-2311. 1997.

[91] *Oil Pollution Monitoring*. ESA BR-128/l.

[92] Using ERS-1 SAR images for oil spill surveillance.
Juerg Lichtenegger. ERS Data Utilisation Section, ESA/ESRIN.

[93] Oil spill detection by use of ERS SAR data.
TSS Publications. J.P. Pedersen, L.G. Seljelv, G.D. Strom, O.A. Follum, J.H. Andersen, T. Wahl, A. Skoelv.

[94] Earth Observation- a Cost-effective Improvement for Oil Spill Monitoring.
TSS Publications. J.P. Pedersen, T. Bauna, L.G. Seljelv, F. Landmark, R.T. Enorksen, J.H. Andersen.

[95] Agencia Espacial Europea, ESA. ESA in your country, Spain. "Las imágenes de ASAR-ENVISAT, revelan una gran extensión de vertido de fuel en toda la costa española".

[http://www.esa.int/esl/ESA_in_your_country/Spain/Las_imagenes_de_ASAR-
_Envisat_revelan_una_gran_extension_de_vertido_de_fuel_en_toda_la_costa_espanola](http://www.esa.int/esl/ESA_in_your_country/Spain/Las_imagenes_de_ASAR-Envisat_revelan_una_gran_extension_de_vertido_de_fuel_en_toda_la_costa_espanola)

Consulta: [5 de Julio de 2016]

[96] Proyecto Fin de Carrera: "Detección de vertidos de petróleo al mar mediante imágenes SAR: Estudio de un sistema operacional y desarrollo de una herramienta software".

Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica de Telecomunicación. Autora: Marta Romeo Gállego. Tutor: Javier Marcello Ruiz.

Procesado de datos SAR del satélite Sentinel-1 para el estudio de zonas costeras.

[97] El pesquero "Oleg Naydenov" se hunde a 15 millas al sur de Maspalomas con 1.400 toneladas de combustible. ABC Canarias. Fecha: 15 de Abril de 2015.

<http://www.abc.es/local-canarias/20150415/abci-pesquero-ruso-hundido-201504150957.html>

Consulta: [5 de Julio de 2016]

[98] Se hunde a 15 millas de Gran Canaria un pesquero con 1.409 toneladas de fuel en su interior. El Mundo. Fecha: 15 de Abril de 2015.

<http://www.elmundo.es/espana/2015/04/15/552e1b6322601d37088b4571.html>

Consulta: [5 de Julio de 2016]

[99] Hundimiento del pesquero ruso *Oleg Naydenov*. Canarias 7. Fecha: 15 de Abril de 2015.

<http://www.canarias7.es/multimedia/infografia.cfm?id=719>

Consulta: [5 de Julio de 2016]

[100] El Gobierno admite que puede haber más fugas de combustible no detectadas en el *Oleg Naydenov*. El Mundo. Fecha: 24 de Abril de 2015.

<http://www.elmundo.es/espana/2015/04/24/553a5978268e3ea22b8b456e.html>

Consulta: [5 de Julio de 2016]

[101] El *Oleg Naydenov* sigue mandando alquitrán a la superficie en aguas canarias. Europapress. Fecha: 24 de Abril de 2015.

<http://www.europapress.es/sociedad/noticia-oleg-naydenov-sigue-mandando-alquitran-superficie-aguas-canarias-20150424135719.html>

Consulta: [5 de Julio de 2016]

[102] *Algorithms for oil spill detection in Radarsat and ENVISAT SAR images*.

Anne Schistad Solberg. Department of Informatics. University of Oslo, Noruega. E-mail: anne@ifi.uio.no. Camilla Brekke. Norwegian Defence Research Establishment Kjeller, Noruega. E-mail: Camilla.Brekke@ffi.no. Rune Solberg y Per Ove Husoy. Norwegian Computing Center Oslo, Noruega. 0-7803-8742-2/04/\$20.00(C)2004 IEEE.

Bibliografía

[103] *Snow Monitoring over Mountainous Regions with C-Band Polarimetric SAR*. Autor: Xavier Banqué Casanovas. Mayo 2012. Univesitat Politècnica de Catalunya. BarcelonaTech. Departament de Teoria del Senal i Comunicacions.

[104] Tazio Strozzi, Shi, Christion Matzler, *Backscattering Measurements of Alpine Snowcovers at 5.3 and 35 GHz*, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, May 1998.

[105] "Una nevada histórica". Diario de avisos.com. 21 de Febrero de 2016.

<http://www.diariodeavisos.com/2016/02/nevada-historica-en-tenerife-gran-canaria/>

Consulta: [11 de Julio de 2016]

[106] "(GALERÍA) Imágenes aéreas de la nieve en la cumbre de Gran Canaria". Canariashora.com. 22 de Febrero de 2016.

<http://canariashora.com/#!/galeria-imagenes-aereas-de-la-nieve-en-la-cumbre-grancanaria>

Consulta: [11 de Julio de 2016]

[107] "Una de las mayores nevadas de la historia de Tenerife". La Opinión de Tenerife. 22 de Febrero de 2016.

<http://www.laopinion.es/sociedad/2016/02/21/mayores-nevadas-historia-tenerife/657287.html>

Consulta: [11 de Julio de 2016]

[108] *Detection of Areas Affected by Flooding River using SAR images*. Universidad Nacional de Córdoba. Master in Space Applications for Emergency Early Warning and Response. Juan Piedra Vilches. Marzo de 2013.

[109] Telde recurre al ejército tras descargar el temporal 111 litros en cuatro horas. La Provincia, Diario de Las Palmas. 24 de Octubre de 2015.

<http://www.laprovincia.es/telde/2015/10/23/decretada-alerta-maxima-ejercito-telde/755988.html>

Consulta: [11 de Julio de 2016]

Procesado de datos SAR del satélite Sentinel-1 para el estudio de zonas costeras.

[110] *A Test Statistic in the Complex Wishart Distribution and its Application to Change Detection in Polarimetric SAR Data*. Knut Conradsen, Allan Aasbjerg Nielsen, Jesper Schou, and Henning Skriver. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 41, NO. 1, Enero 2003.

[111] *CFAR Edge Detector for Polarimetric SAR Images*. Jesper Schou, Henning Skriver, Allan Aasbjerg Nielsen, and Knut Conradsen. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 41, NO. 1, Enero 2003.

[112] Change Detection in Full and dual Polarization, Single- and Multifrequency SAR Data. Allan Aasbjerg Nielsen, Knut Conradsen, and Henning Skriver, Member, IEEE. IEEE Journal of Selected Topics in applied Earth Observations and Remote Sensing. Marzo 2015.

[113] Step. Science Toolbox exploitation platform ESA. SNAP.

<http://step.esa.int/main/toolboxes/snap/>

Consulta: [3 de Agosto de 2016]

[114] Step. Science Toolbox exploitation platform ESA. Sentinel-1 Toolbox

<http://step.esa.int/main/toolboxes/sentinel-1-toolbox/>

Consulta: [3 de Agosto de 2016]

[115] Step. Science Toolbox exploitation platform ESA. Download.

<http://step.esa.int/main/download/>

Consulta: [3 de Agosto de 2016]

[116] Step. Science Toolbox exploitation platform ESA. Forum Step.

<http://forum.step.esa.int/c/s1tbx>

Consulta: [3 de Agosto de 2016]

[117] PolSARpro. The Polarimetric SAR Data Processing and Educational Tool. ESA. PolSARpro version 5.0.

<https://earth.esa.int/web/polsarpro/home>

Consulta: [3 de Agosto de 2016]

[118] Matlab®. Wikipedia.

<https://es.wikipedia.org/wiki/MATLAB>

Consulta: [3 de Agosto de 2016]

Bibliografía

[119] MathWorks®, Matlab®. El lenguaje del cálculo técnico.

<http://es.mathworks.com/products/matlab/>

Consulta: [3 de Agosto de 2016]

[120] IDL® (*programming language*). Wikipedia.

[https://en.wikipedia.org/wiki/IDL_\(programming_language\)](https://en.wikipedia.org/wiki/IDL_(programming_language))

Consulta: [3 de Agosto de 2016]

[121] IDL®. Harris Geospatial Solutions.

<http://www.harrisgeospatial.com/ProductsandSolutions/GeospatialProducts/IDL.aspx>

Consulta: [3 de Agosto de 2016]

PLIEGO DE CONDICIONES

Procesado de datos SAR del satélite Sentinel-1 para el estudio de zonas costeras.

En el presente capítulo se presenta el pliego de condiciones, donde se detallan los requisitos software y hardware necesarios para la elaboración de este Proyecto Fin de Carrera.

7.1. Pliego de condiciones

A continuación se va a proceder a indicar los requisitos hardware de los equipos, las herramientas software y las imágenes satelitales utilizadas para poder llevar a cabo este Trabajo Fin de Carrera.

7.1.1. Requisitos hardware

Para el presente proyecto, se ha utilizado una serie de herramientas hardware que se indican a continuación:

- Ordenador propiedad del IOCAG, ULPGC: PC ACER, ordenador de sobremesa en el que se ha instalado el software SNAP 3.0 (SentinelsApplicationPlatform), el PolSARpro 5.0 (ThePolarimetric SAR EducationalTool), el Matlab 2010, el IDL® (versión 8.4.1), y se ha realizado todo el procesado de las imágenes Sentinel-1. Además, se ha redactado la memoria de este Proyecto Final de Carrera en la aplicación Microsoft® Office® 2013.

Las principales características de este PC son:

- Procesador Intel Core i7-860 a 2,80 GHz, cache 8 MB.
- 8 GB de memoria RAM.
- Tarjeta gráfica NVIDIA® GeForce® GT320 1024 MB.
- 1 TB de disco duro.

Cabe destacar que para el desarrollo de los procesados es recomendable disponer de 8 GB de memoria RAM como requisito mínimo, con lo que las características arriba descritas son suficientes para la ejecución del proyecto en su totalidad.

- Disco duro extraíble Toshiba de 1 TB: Utilizado para guardar las imágenes procesadas, documentación y redacción de la presente memoria así como para la

realización de varias copias de seguridad periódicas durante la elaboración del presente proyecto.

- Impresora HP ColorLaserJet CP2025: Utilizada para la impresión del material necesario para el desarrollo del proyecto y de la presente memoria.

7.1.2. Requisitos software

Las herramientas software necesarias son:

- Sistema Operativo Windows 7[®]: Sistema operativo bajo el cual se ha realizado todo el proyecto.
- Microsoft[®] Office[®] 2013: Conjunto de aplicaciones utilizadas para la elaboración de las tablas, gráficas, textos y diagramas de bloques de la memoria de este Proyecto Fin de Carrera.
- Programa SNAP 3.0 (Sentinels Application Platform) de la ESA: Es un moderno sistema de procesamiento de imágenes SAR diseñado por la ESA para proporcionar el análisis de los datos obtenidos por teledetección mediante los satélites Sentinel [113]. Para información más detallada, acudir al apartado 5.1.1. del capítulo 5.
- Programa PolSARpro 5.0 (The Polarimetric SAR Educational Tool) de la ESA: Herramienta de procesamiento de datos SAR para la ejecución de filtrados, algoritmos y procesados polarimétricos. De libre distribución, su objetivo es facilitar el acceso al desarrollo e investigación de aplicaciones que utilicen dichas técnicas con los datos SAR [117]. Para información más detallada, acudir al apartado 5.1.1. del capítulo 5.
- Programa Google Earth[®] 7.1.5. de Google[®]. Es un programa informático gratuito que muestra imágenes en tres dimensiones de alta resolución de la Tierra. Puede ser utilizado como atlas, enciclopedia o como simulador de vuelo mundial. Su mapa está compuesto por una superposición de imágenes obtenidas por satélites, fotografías aéreas, información geográfica proveniente de modelos de datos SIG de todo el mundo y modelos digitales creados por ordenador. Las versiones más recientes incorporan información local detallada de lugares de interés, fotografías,

visitas virtuales y hasta visitas a la Luna y al planeta Marte [75]. Para información más detallada, acudir al apartado 5.1.1. del capítulo 5.

- Programa Matlab® R2010a de MathWorks®: Es una herramienta de software matemático que ofrece un entorno de desarrollo integrado con un lenguaje de programación propio (lenguaje M). Entre sus prestaciones básicas se hallan: la manipulación matrices, la representación de datos y funciones, la implementación de algoritmos, la creación de interfaces de usuario (GUI) y la comunicación con programas en otros lenguajes y con otros dispositivos hardware [118]. Para información más detallada, acudir al apartado 5.1.1. del capítulo 5.
- IDL® (versión 8.4.1) de Exelis Visual Information Solutions®: Es un lenguaje de programación usado para el análisis de datos. Se trata de un lenguaje orientado a la programación de vectores, y se usa en el procesado interactivo de grandes cantidades de datos (incluyendo el procesado de imágenes). Su uso habitual incluye aplicaciones de ciencias como la astronomía, física atmosférica e imágenes médicas y de observación de la Tierra [120] [121]. Para información más detallada, acudir al apartado 5.1.1. del capítulo 5.

7.1.3. Imágenes utilizadas

Las imágenes utilizadas para el desarrollo de este Trabajo Fin de Carrera son las imágenes en formato GeoTIFF, de los satélites:

- Sentinel-1.
- Terrasar-X.

Las Palmas de Gran Canaria, a 5 de Septiembre de 2016.

Fdo. Aridane Díaz Santana

PRESUPUESTO

8.1. Declaración jurada

D. Aridane Díaz Santana, autor del presente Proyecto Fin de Carrera,

DECLARA QUE:

El proyecto Fin de Carrera con título "Procesado de datos SAR del satélite Sentinel-1 para el estudio de zonas costeras", realizado a petición de la Escuela de Ingeniería de Telecomunicación y Electrónica de la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria y en un periodo de seis meses y medio(26 semanas), tiene un coste de desarrollo total de **CUARENTA MIL DOSCIENTOS CUARENTA Y NUEVE EUROS CON NOVENTA Y DOS CÉNTIMOS**, correspondiente a la suma de las cantidades consignadas en los apartados descritos a continuación.

Firmando la presente para que así conste a los efectos oportunos.

Autor del Proyecto:
Aridane Díaz Santana

Las Palmas de Gran Canaria, a 5 de Septiembre de 2016.

8.2. Desglose del presupuesto

La elaboración del presupuesto del presente proyecto se divide en varias partes: por un lado el gasto de personal y por otro los gastos derivados del uso del material hardware y software empleado, los costes de redacción del proyecto, los derechos de visado del COIT, los gastos de tramitación y envío y por último, la aplicación de impuestos correspondiente. Se tendrán así en cuenta los siguientes conceptos:

- Honorarios tarifados por tiempo empleado.
- Amortización del inmovilizado material, que constituye la amortización del software y del hardware empleados en el desarrollo del presente trabajo.
- Redacción del proyecto.
- Derechos de Visado del COIT.
- Gastos de tramitación y envío.
- Aplicación de impuestos

Para el cálculo de este presupuesto se ha utilizado la base de los “*Baremos orientativos para el cálculo de honorarios*” del Colegio Oficial de Ingenieros de Telecomunicación, actualizado a 1 de enero de 2008 (no existen baremos más actualizados ya que se ha prohibido su publicación para mantener la libre competencia). El documento especifica el coste por hora de trabajo en 75€ para horario normal y 95€ fuera del mismo. En base a ello se emplea la siguiente fórmula para el cálculo de los honorarios:

$$H = C * Hn * 75 + C * He * 95 \quad (\text{Ec. 9.1})$$

donde:

H son los honorarios.

Hn son las horas en jornada normal.

He son las horas fuera de jornada normal.

C es el factor de corrección en función del número de horas trabajadas.

Según el COIT el valor del coeficiente de corrección (C) respecto al tiempo necesario para realizar el proyecto viene reflejado en la siguiente tabla:

HORAS TRABAJADAS	FACTOR DE CORRECCIÓN C
Hasta 36 horas	1,0
De 36 a 72 horas	0,90
De 72 a 108 horas	0,80
De 108 a 144 horas	0,70
De 144 a 180 horas	0,65
De 180 a 360 horas	0,60
De 360 a 540 horas	0,55
De 540 a 720 horas	0,50
De 720 horas a 1080 horas	0,45
Más de 1080 horas	0,40

Tabla 9.1. Factor de corrección del COIT según las horas trabajadas.

8.3. Honorarios tarifados por tiempo empleado

El desarrollo del proyecto ha requerido un período de 6 meses y medio (26 semanas), a una media de 8 horas diarias y cinco días por semana, por lo que el cálculo de las horas empleadas sería:

$$8 \text{ horas/día} * 26 \text{ semanas} * 5 \text{ días/semana} = 1040 \text{ horas}$$

No se aplica la existencia de horas fuera de la jornada normal en la realización del trabajo.

En la Tabla 9.2 mostramos la fórmula a emplear (Ec. 9.1) para el cálculo de los honorarios para trabajos tarifados por tiempo empleado, a partir del comienzo del proyecto a fecha de 23/11/2015.

Año 2015/2016		
Trabajos tarificados por tiempo empleado	Mínimo	Fórmula
		240
H = Honorarios H _n = Horas en jornada normal H _e = Horas fuera de jornada normal		

Tabla 9.2. Baremo orientativo para el cálculo de los honorarios para trabajos tarificados.

Los honorarios de la Tabla 9.3 tendrán una reducción en función del número de horas aplicando el coeficiente de reducción proporcionado por el COIT, de acuerdo a la tabla 9.1, que para el total de horas de este proyecto (1040 horas), toma el valor de 0,45. En la Tabla 9.3 se presentan los cálculos de los honorarios.

Horas de trabajo	€/hora	Total (€)	Coeficiente de reducción	Total (€)
1040	75	78.000	0,45	35.100

Tabla 9.3. Cálculo de honorarios.

Con lo que los honorarios totales por tiempo dedicado libres de impuestos ascienden a *treinta y cinco mil cien euros (35.100 €)*.

8.4. Amortización del inmovilizado material

Entre los recursos materiales utilizados para la realización de este proyecto se incluyen las herramientas de ejecución de procesamiento de datos SAR, los paquetes software usados para la redacción de la memoria, y el sistema operativo bajo el que se ejecutó el trabajo. Asimismo, se incluye el equipo hardware usado para dar soporte a estas herramientas.

Se estipula el coste de amortización para un periodo de 3 años para el software y de 4 años para el hardware. Para ello, se utilizará un sistema de amortización lineal o constante, en el que se supone que el inmovilizado material se deprecia de forma constante a lo largo de su vida útil. La cuota de amortización anual se calcula usando la siguiente fórmula:

$$Cuota\ anual = \frac{Valor\ adquisición - Valor\ residual}{Número\ de\ años\ de\ vida\ útil} \quad (Ec.\ 9.2)$$

El "valor residual" es el valor teórico que se supone que tendrá el elemento después de su vida útil.

8.4.1. Amortización del software

El software empleado para la realización de este proyecto ha sido: SNAP 3.0 (Sentinels Application Platform) de la ESA (Agencia Espacial Europea), PolSARpro 5.0 (The Polarimetric SAR Data Processing and Educational Tool) también de la ESA, Google Earth® de Google®, *Matlab*® 2010 de Mathworks®, IDL® (versión 8.4.1) Exelis de Visual Information Solutions, el paquete Microsoft® Office Word® 2013 y el sistema operativo Windows® 7 de Microsoft®. Teniendo en cuenta que la duración del proyecto ha sido inferior a un año y el cálculo del coste de amortización se establece en un período de 3 años, los costes de amortización se calcularán para los primeros 6 meses. En la Tabla 9.4 se detallan los cálculos de amortización del software.

Concepto	Coste total(€)	Valor residual (€)	Meses	Amortización (€)
SNAP 3.0	0	0	6	0
PolSARpro 5.0	0	0	6	0
Google Earth® 7.1.5	0	0	6	0
MS Office® 2013	119	0	6	19,83
Sistema Operativo Microsoft® Windows 7®.	120	100	6	20
Mathworks® MATLAB®, Versión r2010a	3.900	3.250	6	650
IDL® (versión 8.4.1) Exelis Visual Information Solutions	3.000	2.500	6	500
Total amortización del software (€)				1.189,83

Tabla 9.4. Amortización del software.

Presupuesto

Debemos tener en cuenta que las imágenes empleadas están disponibles de forma gratuita a través de internet accediendo a la base de datos de la ESA y no se incurre en coste alguno en su adquisición una vez aceptados los términos y condiciones de uso de las mismas. También, como se ha explicado, la imagen SAR de la zona sur de Gran Canaria tomada por el satélite TerraSAR-X es propiedad del IOCAG, ULPGC, y ha sido cedida para su uso en este proyecto por la misma institución. Así mismo, los paquetes software SNAP 3.0, PolSARpro 5.0 de la ESA y Google Earth® de Google®, son de libre distribución y por lo tanto, no ocasionan coste alguno.

Finalmente, el coste total del material software empleado en el desarrollo de este proyecto asciende a *mil ciento ochenta y nueve euros con ochenta y tres céntimos (1189,83 €)*.

8.4.2. Amortización del hardware

Para el cálculo de la amortización hardware se considera un periodo de 4 años. El equipo empleado es un ordenador del IOCAG con procesador Intel Core i7 (2,80 GHz), con 8 GB de RAM y 1 TB de disco duro. El coste total ascendió a 800 €. La tabla 9.5 detalla los cálculos realizados.

Concepto	Coste (€)	Coste/mes (€)	Meses	Total (€)
Ordenador	800	16,66	6	100

Tabla 9.5. Amortización del hardware.

Por lo tanto el coste total del material hardware empleado en el desarrollo del proyecto asciende a *cien euros (100 €)*.

8.5. Redacción del proyecto

El importe de la redacción del proyecto se calcula haciendo uso de la siguiente fórmula:

$$R = 0,07 * P * Ch \quad (\text{Ec. 9.3})$$

donde:

Procesado de datos SAR del satélite Sentinel-1 para el estudio de zonas costeras.

P es el presupuesto del proyecto.

Ch es el coeficiente de ponderación en función del presupuesto.

El presupuesto calculado hasta el momento asciende a 36.389,83 €. Según el COIT el coeficiente de ponderación para presupuestos que se encuentran entre los 30.050 € y los 90.150 € queda fijado en 0,4. De este modo, el coste derivado de la redacción del proyecto es de.

$$R = 0,07 * 36.389,83 * 0,40 = 1.018,91 \text{ €}$$

Por tanto, el coste libre de impuestos derivados de la redacción del proyecto es de *mil dieciocho euros con noventa y un céntimos (1.018,91 €)*.

8.6. Derechos de visado del COIT

Los gastos de visado del COIT se tarifican mediante la siguiente expresión:

$$V = 0,006 * P * C_v \quad (\text{Ec. 9.4})$$

donde:

P es el presupuesto del proyecto.

C_v es el coeficiente reductor en función del presupuesto del proyecto.

El presupuesto calculado hasta el momento asciende a la suma de los costes de ejecución, costes de material y costes de redacción:

$$P = 36.389,83 + 1.018,91 = 37.408,74 \text{ €}$$

Como el coeficiente para presupuestos de más de 30.050 € y menos de 60.101 €, viene definido por el COIT con un valor de 0,90, el coste de los derechos de visado del proyecto asciende a la cantidad de:

$$V = 0,006 * 37.408,74 * 0,90 = 202 \text{ €}$$

Por lo tanto, el coste de los derechos de visado del proyecto asciende a *doscientos dos euros (202 €)*.

8.7. Gastos de tramitación y envío

Los gastos de tramitación y envío son fijos y se estipulan en *seis euros y un céntimo* (6,01 €).

8.8. Aplicación de impuestos y presupuesto total

El coste total del proyecto, antes de aplicarle los correspondientes impuestos, asciende a 37.099,98 €, a lo que hay que sumarle el 7% de IGIC, con lo que el coste definitivo del proyecto queda desglosado y especificado en la siguiente tabla (tabla 9.6):

Coste por tiempo empleado	35.100 €
Coste del software	1.189,83 €
Coste del hardware	100 €
Coste redacción del proyecto	1.018,91 €
Derechos de visado del COIT	202 €
Gastos de tramitación y envío	6,01 €
Total antes de impuestos	37.616,75 €
IGIC (7%)	2.633,17 €
Total	40.249,92 €

Tabla 9.6. Desglose de costes finales.

El presupuesto total, con los impuestos incluidos, asciende a la cantidad de *cuarenta mil doscientos cuarenta y nueve con noventa y dos céntimos (40.249,92 €)*.

El autor del proyecto

Fdo. Aridane Díaz Santana

Las Palmas de Gran Canaria, a 5 de Septiembre de 2016.

ANEXO

9.1. Introducción

Junto a esta memoria se adjunta un DVD-R en el que se recopila el trabajo realizado a lo largo de este Proyecto Final de Carrera.

El contenido de este DVD-R es el siguiente:

- Memoria en formato PDF.
- Resumen y *Abstract* del Proyecto Final de Carrera en formato PDF.
- Imágenes resultado para una cada una de las aplicaciones realizadas en el capítulo 5 de esta memoria.
- Funciones y *scripts* implementados en Matlab® e IDL®.

9.1.1. Descripción del contenido

Se ha organizado el contenido en cuatro carpetas: MEMORIA_Y_RESUMEN, APLICACION_DE_CLASIFICACION, APLICACION_DETECCION_DE_VERTIDOS, y DETECTOR_DE_CAMBIOS.

- I. **MEMORIA_Y_RESUMEN:** Contiene la memoria de este Proyecto Final de Carrera en formato PDF. Además, contiene por separado el Resumen y el *Abstract* (resumen en inglés) del mismo, encontrándose ambos en formato PDF.
- II. **APLICACION_DE_CLASIFICACION:** Contiene las carpetas CLASIFICACION_BAYTOWN y CLASIFICACION_MASPALOMAS.

CLASIFICACION_BAYTOWN: Contiene las imágenes .bmp y archivos .kmz correspondientes a los resultados de las técnicas de clasificación para el producto SLC SM sobre el área de Baytown en Estados Unidos que se desarrollaron durante el apartado 5.2 del capítulo 5 de esta memoria. Tanto las imágenes .bmp como los archivos .kmz tienen el mismo nombre (se incluye además la imagen en formato .png del plano H-Alpha de la zona de Baytown) y se enumeran a continuación:

- 1mHx1mA_Baytown (.bmp y .kmz)
- 1mHxA_Baytown (.bmp y .kmz)

Anexo

- Hx1mA_Baytown (.bmp y .kmz)
- HxA_Baytown (.bmp y .kmz)
- Alpha_Baytown (.bmp y .kmz)
- Anisotropy_Baytown (.bmp y .kmz)
- Entropy_Baytown (.bmp y .kmz)
- Wishart_H_A:Alpha_Baytown (.bmp y .kmz)
- Wishart_H_Alpha_Baytown (.bmp y .kmz)
- Wishart_Supervised_Baytown (.bmp y .kmz)
- Plano_H_Alpha_Baytown (.png)

CLASIFICACION_MASPALOMAS: Contiene las imágenes .bmp y archivos .kmz correspondientes a los resultados de las técnicas de clasificación para el producto SLC IW sobre el área de Maspalomas en Gran Canaria que se desarrollaron durante el apartado 5.2 del capítulo 5 de esta memoria. Tanto las imágenes .bmp como los archivos .kmz tienen el mismo nombre (se incluye además la imagen en formato .png del plano H-Alpha de la zona de Maspalomas) y se enumeran a continuación:

- 1mHx1mA_Maspalomas (.bmp y .kmz)
- 1mHxA_Maspalomas (.bmp y .kmz)
- Hx1mA_Maspalomas (.bmp y .kmz)
- HxA_Maspalomas (.bmp y .kmz)
- Alpha_Maspalomas (.bmp y .kmz)
- Anisotropy_Maspalomas (.bmp y .kmz)
- Entropy_Maspalomas (.bmp y .kmz)
- Wishart_H_A:Alpha_Maspalomas (.bmp y .kmz)
- Wishart_H_Alpha_Maspalomas (.bmp y .kmz)
- Wishart_Supervised_Maspalomas (.bmp y .kmz)
- Plano_H_Alpha_Maspalomas (.png)

III. **APLICACION_DETECCION_DE_VERTIDOS:** Contiene las imágenes .bmp y archivos .kmz correspondientes a los resultados de las técnicas de detección de vertidos que se desarrollaron durante el apartado 5.3 del capítulo 5 de esta memoria. Tanto

las imágenes .bmp como los archivos .kmz tienen el mismo nombre y se enumeran a continuación:

- 2204_VH (.bmp y .kmz)
- 2204_VV (.bmp y .kmz)
- 0405_VH (.bmp y .kmz)
- 0405_VV (.bmp y .kmz)
- 1605_VH (.bmp y .kmz)
- 1605_VV (.bmp y .kmz)
- OIL_SPILL_1 (.bmp y .kmz)
- OIL_SPILL_2 (.bmp y .kmz)
- OIL_SPILL_3 (.bmp y .kmz)
- OIL_SPILL_4 (.bmp y .kmz)
- OIL_SPILL_5 (.bmp y .kmz)

IV. **DETECTOR_DE_CAMBIOS:** Contiene las carpetas APLICACION_DETECCION_DE_NIEVE, APLICACION_DETECCION_DE_ZONAS_INUNDADAS y SCRIPTS.

APLICACION_DETECCION_DE_NIEVE: Contiene las imágenes .bmp y archivos .kmz correspondientes a los resultados de las técnicas de detección de nieve que se desarrollaron durante el apartado 5.4 del capítulo 5 de esta memoria. Tanto las imágenes .bmp como los archivos .kmz tienen el mismo nombre y se enumeran a continuación:

- 0802_2002_Nieve_Gran_Canaria (.bmp y .kmz)
- 0802_2002_Nieve_Tenerife (.bmp y .kmz)
- 0802_Gran_Canaria (.bmp y .kmz)
- 0802_Tenerife (.bmp y .kmz)
- 2002_Gran_Canaria (.bmp y .kmz)
- 2002_Tenerife (.bmp y .kmz)

APLICACION_DETECCION_DE_ZONAS_INUNDADAS: Contiene las imágenes .bmp y archivos .kmz correspondientes a los resultados de las técnicas de detección de zonas inundadas que se desarrollaron durante el apartado 5.4 del capítulo 5 de esta memoria.

Tanto las imágenes .bmp como los archivos .kmz tienen el mismo nombre y se enumeran a continuación:

- 1110_2310_Zonas_Inundadas_Telde (.bmp y .kmz)
- 1110_Gran_Canaria (.bmp y .kmz)
- 2310_Gran_Canaria (.bmp y .kmz)

SCRIPTS: Contiene las carpetas: IDL, MATLAB E INSTRUCCIONES.

IDL: Contiene los *scripts* IDL® necesarios para la ejecución del detector de cambios estudiado en el apartado 4.4.3. y llevado a la práctica en el apartado 5.4. en la ejecución de las aplicaciones de detección de nieve y zonas inundadas. Los *scripts* se enumeran a continuación:

- convert_S1pair_to_2images_C2.pro
- create_config_psp.pro
- PSP_C2_processing.pro
- save_c2_psp.pro

MATLAB: Contiene los *scripts* Matlab® necesarios para la ejecución del detector de cambios estudiado en el apartado 4.4.3. y llevado a la práctica en el apartado 5.4. en la ejecución de las aplicaciones de detección de nieve y zonas inundadas. Los *scripts* se enumeran a continuación:

- read_C2_psp.m
- test_changedetection_Nielsen.m
- wishart_change.m

INSTRUCCIONES: Contiene los archivos de texto “Pasos_procesados_SNAP_POLSARPRO.txt” y “Procesados.txt” que sirven como guía para la correcta utilización de los *scripts* de Matlab® e IDL® de las carpetas anteriores.