



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño

Satélites de observación de la Tierra. Evolución de la
erupción volcánica en la isla de La Palma

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería Aeroespacial

AUTOR/A: García Ruiz, Pedro José

Tutor/a: Priego de los Santos, Jose Enrique

CURSO ACADÉMICO: 2022/2023

Agradecimientos

A mi gente de Murcia, que siempre ha creído en mí y me ha acompañado durante todos estos años, siendo apoyo y refugio. Gracias por darme alas.

A mis compañeras del grado. No podría haber elegido mejor compañía para estos cuatro años. Empeño, tenacidad, ganas... Así, ¿quién no va a conseguir lo que se proponga? Suerte la mía que os veré llegar muy lejos. Os admiro.

A mis maestros y profesores, especialmente a los que con sus lecciones y consejos han sido capaces de dejar huella. Viva la educación pública, libre y de calidad.

Por último, a Jessica, mi psicóloga. Durante esta etapa hemos tenido que visitar los rincones más inhóspitos, viajando en el tiempo, luchando contra monstruos y creando nuevos caminos que ahora transito en paz. Sin ti hubiera sido imposible.

Resumen

La erupción volcánica de la isla española de La Palma, iniciada el 19 de septiembre de 2021, ha podido ser monitorizada gracias a los satélites artificiales de observación terrestre. En este trabajo se presenta el marco teórico de esta tecnología y una catalogación de las principales misiones que incorporan el radar de apertura sintética en su carga de pago. Además, también se realiza un estudio y análisis de los datos e imágenes que dichos satélites han ofrecido de la evolución de la lava, de las deformaciones del terreno y para la cuantificación de daños durante la erupción.

Palabras clave Satélites, observación de La Tierra, radar de apertura sintética, monitorización, volcán, gestión de emergencias.

Abstract

The volcanic eruption on the Spanish island of La Palma, which began on September 19th 2021, has been monitored thanks to artificial Earth observation satellites. This work presents the theoretical framework behind this technology and a catalogue covering the main missions carrying a synthetic aperture radar in their payload. Moreover, it is also provided with an analysis of the data these satellites offered on the quantification of damage for the evolution of the lava and the deformations of the terrain during the eruption.

Keywords Satellites, Earth observation, synthetic aperture radar, monitoring, volcano, emergency management.

Índice general

1. Introducción	7
2. Marco teórico	9
2.1. Principio físico SAR	9
2.1.1. Señal LFM o <i>chirp</i>	10
2.1.2. Resolución	11
2.1.3. Apertura sintética	14
2.1.4. Integración de pulsos	16
2.1.5. Ecuación radar del SAR	18
2.2. Modos de adquisición	19
2.3. Procesado de imágenes SAR	20
2.3.1. Matriz de datos crudos	20
2.3.2. Migración de celdas en rango (RCM)	20
2.3.3. Algoritmos de focalización SAR	22
2.4. Principales técnicas SAR	25
2.4.1. Polarimetría (PolSAR)	25
2.4.2. Interferometría (InSAR)	27
3. Estado del arte: misiones SAR y aplicaciones	30
3.1. Antecedentes y primeras misiones	30
3.1.1. Quill	30
3.1.2. Primeras misiones científicas	32
3.2. Avances tecnológicos y segundas generaciones	35
3.3. Constelaciones satelitales SAR	38
3.3.1. COSMO-SkyMed: la primera constelación SAR	38
3.3.2. TerraSAR-X y TanDEM-X	41
3.4. Copérnicus: el programa europeo de observación terrestre y los satélites Sentinel	43
3.5. El desarrollo de constelaciones comerciales y retos futuros	46
4. Aplicación práctica	49
4.1. Descarga de los datos	49
4.2. Análisis del desplazamiento terrestre	50
4.2.1. Descripción del algoritmo empleado	51
4.2.2. Resultados	60

4.3. Identificación de la superficie cubierta por lava y análisis de daños . . .	62
4.3.1. Descripción del algoritmo empleado	62
4.3.2. Resultados	68
5. Pliego de condiciones	76
5.1. Condiciones del puesto de trabajo	76
5.2. Condiciones técnicas	76
6. Presupuesto	78
6.1. Coste de personal	78
6.2. Coste de equipos informáticos, software y datos	78
6.3. Presupuesto total	80
7. Conclusiones	81

Índice de figuras

2.1. Parámetros principales SAR [Elaboración Propia]	10
2.2. Tren de pulsos chirp [E. P.]	11
2.3. Resolución transversal [E. P]	12
2.4. Variación frecuencia Doppler con el tiempo de iluminación [E.P.][3] . .	14
2.5. Parámetros característicos de una agrupación de antenas [10]	15
2.6. Agrupación real y sintética de antenas [8]	16
2.7. Modos de adquisición SAR	20
2.8. Disposición de los ecos en la matriz de datos crudos	20
2.10. Reindexación de la matriz de datos crudos en el proceso de corrección de la RCM [6]	21
2.11. Ejemplo de la variación de la posición del objetivo mediante la multiplicación con una señal Chirp [15]	24
2.12. Uso y estimación del porcentaje de humedad del suelo con el tiempo a partir de análisis polarimétrico de datos SAR obtenidos en banda L [18].	27
2.13. Parámetros geométricos involucrados en la interferometría SAR [18] . .	28
2.14. Modelo digital de elevaciones del volcán Etna desarrollado a partir de las adquisiciones obtenidas por el par de satélites de la misión ERS [82]	29
3.1. Telescopio anamórfico de la misión Quill para procesado analógico SAR [21]	31
3.2. Diagrama de los paneles ranurados con guías de onda de la antena SAR a bordo de ERS [32].	33
3.3. Adquisición SAR sobre el Monte Fuji (23 de abril de 1992) por el satélite JERS-1 [34]	34
3.4. Trazado de ruta marítima sobre el ártico (en rojo) a partir de adquisiciones SAR, identificando las masas de hielo [38]	35
3.5. Interferograma sobre Japón, a partir de dos adquisiciones SAR tomadas en febrero y marzo de 2011, en el que se puede apreciar la deformación del terreno debida al terremoto de Sendai. [41].	36
3.6. Diagrama de las posibles configuraciones orbitales de la constelación COSMO-Skymed [47].	39
3.7. Detalles de la formación HELIX	42
3.8. Modos de adquisición de TerraSAR-X y TanDEM-X	42
3.9. Cuantificación de daños en Marco Island (Florida, USA) ante las inundaciones provocadas por el huracán Ian (2022), a partir de imagerie SAR [64]	48

4.1.	Interfaz gráfica y búsqueda avanzada Copernicus Open Access Hub . . .	49
4.2.	Algoritmo desarrollado en el análisis del desplazamiento terrestre estudiado	51
4.3.	Imagen capturada por el satélite Sentinel-1A sin procesar	52
4.4.	Configuración herramienta S-1 TOPS Split	52
4.5.	Configuración herramienta Back-Geocoding	53
4.6.	Imagen SAR antes y después de aplicar la herramienta S-1 TOPS Deburst	54
4.7.	Producto después del preprocesado	54
4.8.	Herramienta Interferogram Formation para la creación del interferograma y la sustracción de la componente topográfica y de tierra plana de la fase.	55
4.9.	Interferograma antes (izquierda) y después (derecha) de aplicar el filtrado Goldstein al interferograma	56
4.10.	Interferograma antes (izquierda) y después (derecha) de aplicar el proceso de <i>Unwrapping</i>	57
4.11.	Producto antes (izquierda) y después (derecha) de aplicar la conversión de fase a desplazamiento	58
4.12.	Producto final tras realizar la ortorectificación y geocodificación.	59
4.13.	Representación de la información de desplazamiento terrestre en ArcMap	60
4.14.	Algoritmo desarrollado en la identificación de la superficie cubierta por lava y el análisis de daños	63
4.15.	Producto GRDH (Banda Intensity_VV)	64
4.16.	Coordenadas geográficas seleccionadas para el recorte del producto . . .	64
4.17.	Estimación de la coherencia. Los píxeles más blancos indican una mayor coherencia entre el par de adquisiciones SAR.	66
4.18.	Bandas en el producto generado tras la coregistración, a partir del cual se genera el producto MTC	66
4.19.	Configuración composición RGB	67
4.20.	<i>Multitemporal Coherence Analysis</i> mediante Composición RGB para las adquisiciones del 1 y 13 de Noviembre de 2021.	67

Índice de tablas

3.1.	Comparativa características misiones Seasat, ERS y JERS-1 [25][29][35]	32
3.2.	Características misiones ENVISAT y ALOS [39][42][43][44]	37
3.3.	Características constelación COSMO-Skymed [48][49]	38
3.4.	Especificación estándar HRTI/DTED-3 para la generación de DEM [54]	41
3.5.	Características constelación TerraSAR-X y TanDEM-X [53]	43
3.6.	Características constelación Sentinel -1 [60]	45
3.7.	Características constelación ICEYE [62]	47
4.1.	Productos empleados en la elaboración de los estudios.	50
4.2.	Información temporal de los pares analizados para la creación de los MTC	62
4.3.	Cuantificación de daños	68
6.1.	Coste de personal para el desarrollo de este Trabajo de Fin de Grado	78
6.2.	Coste de equipos informáticos, software y datos para el desarrollo de este Trabajo de Fin de Grado	79
6.3.	Presupuesto total para este Trabajo de Fin de Grado	80

Capítulo 1. Introducción

El pasado 19 de septiembre de 2021 inicia, en la isla española de La Palma, una erupción volcánica de magnitud 3.0 en el índice de explosividad volcánica. Con una duración de 85 días, es la más larga registrada en la historia de la isla.

Esta actividad volcánica habría sido ya predicha entre 2009 y 2010 por un grupo de científicos del Instituto de Geociencias del CSIC, como arroja el artículo “*Detection of volcanic unrest onset in La Palma, Canary Islands, evolution and implications*”, publicado el 28 de enero de 2021 en la revista Nature [1]. En esta investigación, el uso de imaginería satelital permitió detectar deformaciones significativas en el terreno y, junto a otras técnicas, observar una acumulación de magma entre 8 y 10 kilómetros bajo la superficie de las proximidades del área afectada.

Durante el desarrollo de la erupción, los satélites de observación terrestre fueron fundamentales en la gestión de la emergencia. El programa Copérnicus de la Agencia Espacial Europea, mediante su *Emergency Management Service*, proporcionó 126 mapas casi en tiempo real con información relevante sobre la erupción, como la extensión cubierta por la lava o las infraestructuras dañadas [2].

Los satélites empleados en estas aplicaciones se caracterizan por montar en su plataforma un radar de apertura sintética (SAR), que envían ondas electromagnéticas a la superficie y forman imágenes a partir de los ecos recibidos. Es este carácter activo lo que hace al SAR un instrumento muy útil en la gestión de este tipo de emergencias.

La radiación emitida es capaz de llegar a la superficie sin importar las condiciones meteorológicas, o si es de día o de noche, algo de lo que sí depende un sensor óptico. En una erupción volcánica, caracterizada por el desarrollo de fenómenos meteorológicos como grandes columnas de humo, esta tecnología adquiere un gran valor porque permite obtener una radiografía, casi en tiempo real, en cualquier condición, detallada y general del desarrollo de erupción.

El radar de apertura sintética es inventado por Carl Wiley en 1951. Durante los 50 y los 60, su desarrollo estuvo enfocado en aplicaciones militares, instalado en plataformas aéreas para actividades de reconocimiento. Es a partir de los 70 y 80 cuando comienza a tener aplicaciones civiles, de carácter científico y embarcado en plataformas satelitales, que ofrecen multitud de ventajas operacionales. Podemos hablar de una *edad dorada* de esta tecnología, pues en la actualidad existen 17 misiones SAR activas, mientras que otras 15 se encuentran en desarrollo para los próximos años [65].

Este trabajo de Fin de Grado tiene los siguientes objetivos principales:

1. Describir el marco teórico bajo el cual se desarrolla la tecnología SAR y sus aplicaciones.
2. Demostrar la utilidad de los satélites de observación terrestre y el SAR en aplicaciones científicas y medioambientales, analizando las misiones más importantes en el desarrollo histórico de estos satélites.
3. Emplear los datos producidos por estos satélites en el desarrollo de una aplicación práctica, familiarizándose con los algoritmos de procesado existentes y un software especializado en el tratamiento de estos datos para obtener datos sobre la evolución de la erupción volcánica de La Palma de 2021.

Por lo tanto, se trata de un trabajo con una gran carga bibliográfica. Para obtener la información necesaria, se emplearán los repositorios documentales de carácter abierto o disponibles bajo licencia de la Universitat Politècnica de València.

El trabajo se estructura de la siguiente manera:

- **Marco teórico (Capítulo 2)**, en el que se presenta la teoría que define la tecnología SAR (Radar de Apertura Sintética), sobre la que esta basado el estudio de este proyecto. Se describe fundamentalmente el principio físico en que se sustenta esta tecnología, definiendo los parámetros más importantes de su geometría y funcionamiento, analizando los métodos para la adquisición, el procesado de imágenes SAR y las principales técnicas empleadas para su uso en observación terrestre.
- **Estado del Arte (Capítulo 3)**, donde se hace un repaso por las misiones más importantes en la historia del SAR satelital, ya sea por sus características operacionales, por sus objetivos, o por suponer un avance en el desarrollo de esta tecnología, analizando parámetros como resolución, modos de adquisición, periodo de revisita...
- **Aplicación Práctica (Capítulo 4)**. En este apartado se realiza una aplicación práctica a partir de los datos SAR obtenidos por la misión Sentinel-1 durante la erupción de La Palma. De este modo, se descargarán los datos obtenidos por el satélite, procesándolos para replicar la monitorización del flujo de lava durante la erupción, y el análisis de la deformación terrestre del área afectada previa a la erupción. De este modo, se detallará paso a paso el procedimiento seguido en esta tarea y se desarrollarán mapas con información relativa la erupción y cuantificación de daños.
- **Pliego de condiciones (Capítulo 5)**, donde se describen las condiciones técnicas y de puesto de trabajo que han influido en el desarrollo del Trabajo
- **Presupuesto (Capítulo 6)**, en el que se analiza el impacto económico de las tareas desarrolladas en el trabajo.

Capítulo 2. Marco teórico

2.1. Principio físico SAR

Un radar de apertura sintética (SAR) es una tecnología basada en un sensor activo que envía ondas electromagnéticas a la superficie terrestre y recibe la señal reflejada. La onda que recibe el sensor es procesada para obtener imágenes a partir de la retrodispersión medida.

En los casos que trata este texto, el instrumento SAR se encuentra embarcado en una plataforma satelital que se mueve a una velocidad V a una altitud h , iluminando la superficie terrestre con un ángulo de incidencia β . [7]

Para un tiempo cualquiera t , la distancia entre el radar moviéndose y un punto cualquiera de la superficie viene dado por la Ecuación 2.1

$$R(t) = \sqrt{r_o^2 + (Vt)^2} \approx r_o + \frac{(Vt)^2}{2r_o} \quad (2.1)$$

donde r_o es la posición de mínima distancia entre el radar y la superficie terrestre [7]. En la Figura 2.1 se muestran gráficamente los parámetros principales de la técnica SAR.

La dirección de movimiento de la plataforma se conoce como **dirección acimutal** o longitudinal, mientras que la **dirección transversal** o rango será aquella perpendicular a la trayectoria de vuelo.

De este modo, se hablará de **tiempo rápido o *fast time*** cuando se haga referencia al tiempo en la dirección transversal, mientras que el **tiempo lento o *slow time***, hará alusión al tiempo en el movimiento en la dirección acimutal de la plataforma [6].

En esta emisión electromagnética, se denomina **PRF (*pulse repetition frequency*)** a la frecuencia de emisión de pulsos, siendo entonces el **PRI (*pulse repetition interval*)** el tiempo que comprende la emisión de un pulso electromagnético y la recepción de los ecos.

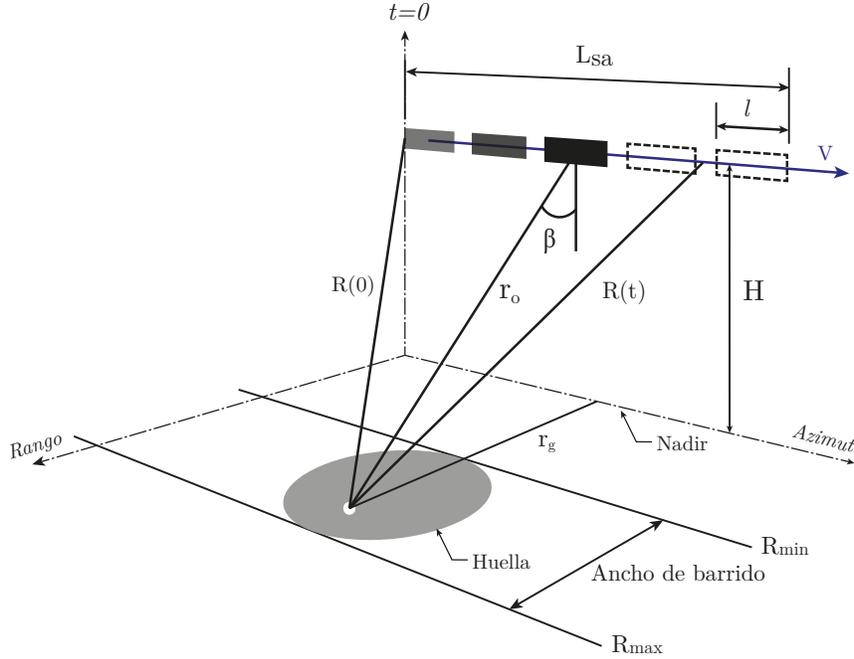


Figura 2.1: Parámetros principales SAR [Elaboración Propia]

2.1.1. Señal LFM o *chirp*

Los sensores SAR emplean, por lo general, pulsos linealmente modulados en frecuencia (LFM), conocidos como *chirp*. Esta modulación se caracteriza por la variación lineal de la frecuencia instantánea con el tiempo.

De este modo, el pulso tiene una duración τ , y su frecuencia instantánea varía de forma lineal de acuerdo a $f_i(t) = f_c \pm k_r \cdot t$ siendo k_r el ratio de variación de la frecuencia (*chirp rate* [hz/s]). Esto da lugar a un ancho de banda del pulso $B_r = K_r \cdot \tau$

De este modo, la señal *chirp* se describe matemáticamente según la Ecuación 2.2, mientras que una representación gráfica se presenta en la Figura 2.2.

$$s(t) = \alpha \cdot \exp(j \cdot 2\pi(f_c t \pm k_r \frac{t^2}{2})); \quad -\frac{\tau}{2} < t < \frac{\tau}{2} \quad (2.2)$$

donde α es la amplitud, f_c es la frecuencia portadora del oscilador local del sistema, y el término $2\pi(f_c t \pm k_r \frac{t^2}{2})$ es la fase instantánea $\Phi(t)$. El signo \pm depende de si la señal es "*upchirp*", por lo que la frecuencia aumenta con el tiempo, o "*downchirp*", cuando es al contrario. [17]

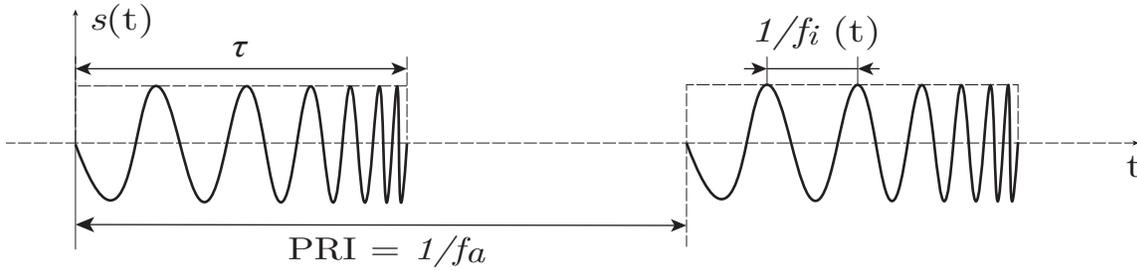


Figura 2.2: Tren de pulsos chirp [E. P.]

2.1.2. Resolución

La resolución se define como la mínima separación entre dos objetivos así que puedan ser distinguidos por el sistema [6]. En un SAR, la resolución se especifica en la dirección transversal y longitudinal (acimutal) al movimiento de la plataforma en su órbita [5].

Resolución transversal o en rango

La **resolución transversal** de un radar de apertura sintética, equivale a la resolución en distancia de un radar convencional, y por tanto depende de la duración del pulso transmitido [11]. De este modo, para un pulso de duración τ , la mínima separación entre dos blancos distinguibles queda definida por la Ecuación 2.3 [6]:

$$\Delta r = \frac{c\tau}{2 \cdot \sin(\beta)} \quad (2.3)$$

donde se tiene en cuenta el ángulo β con la que el satélite ilumina la superficie terrestre.

Sin embargo, para obtener una resolución transversal decente, son necesarios pulsos de duración muy corta, lo que contradice la necesidad de producir una energía suficiente para conseguir ecos con una *signal to noise ratio* (SNR) suficiente para una detección fiable.

Para ello, se emplean técnicas de compresión de pulsos para alcanzar una buena resolución con un pulso más largo y una SNR alta. Esto son los pulsos *chirp* mencionados anteriormente. La resolución dependerá del ancho de banda del pulso transmitido y del procesado [6].

Por lo tanto, el tamaño del **pixel transversal** depende de la frecuencia de muestreo de la señal, f_d , mediante la Ecuación 2.4

$$p_d = \frac{c}{2 \cdot f_d} \quad (2.4)$$

donde el factor 2 indica el camino de ida y vuelta de la onda. Para obtener la longitud del píxel sobre el terreno (p_g), se ha de dividir la Ecuación 2.4 por el ángulo de incidencia de la onda β , dando lugar a la Ecuación 2.5.

$$p_g = \frac{c}{2 \cdot f_d \cdot \text{sen}(\beta)} = \frac{p_d}{\text{sen}(\beta)} \quad (2.5)$$

Esta frecuencia f_d debe ser mayor al ancho de banda en el que el pulso es modulado con el tiempo B_r , de otro modo no se cumple el teorema de muestreo de Shannon y se produce aliasing.

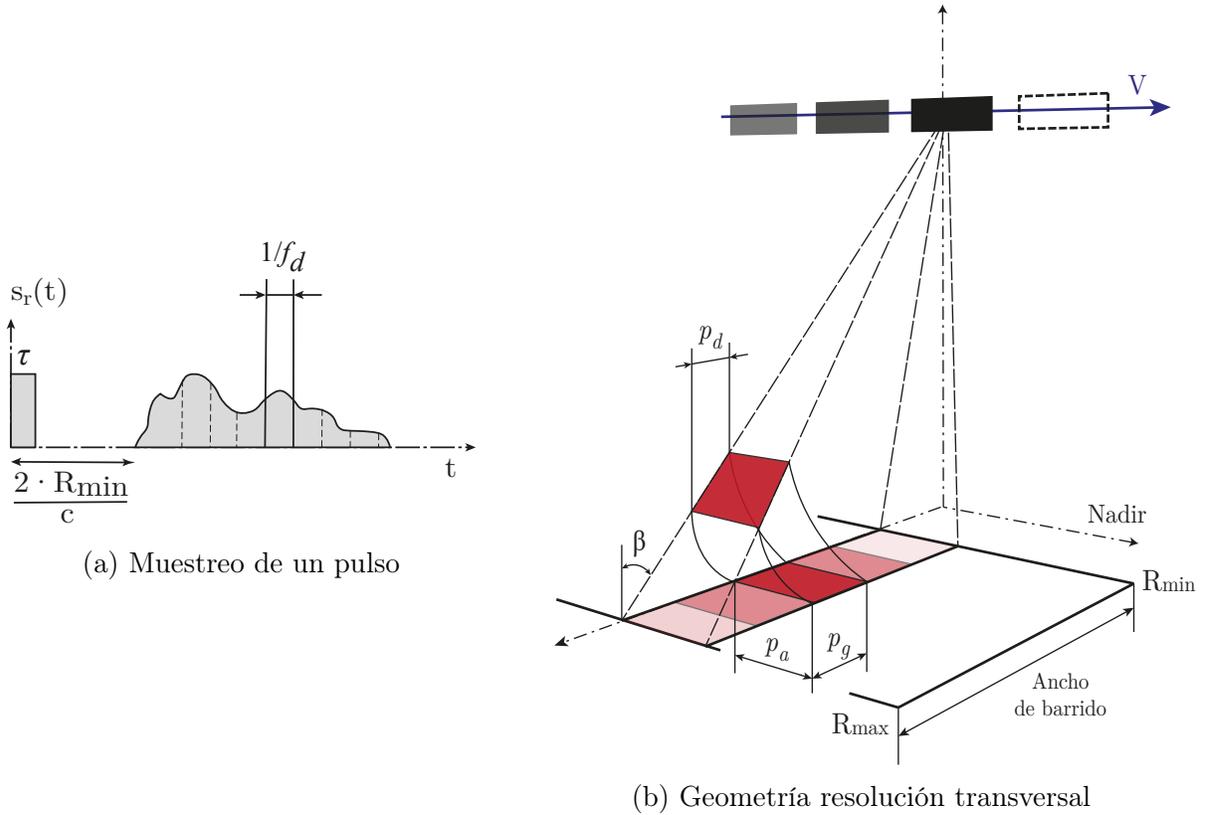


Figura 2.3: Resolución transversal [E. P]

Resolución acimutal o longitudinal

En cuanto a la **resolución acimutal**, en un radar convencional, la capacidad para distinguir dos blancos que difieren únicamente en posición angular respecto a la antena viene dada por la Ecuación 2.6:

$$\delta_x = R \cdot \theta_a \quad (2.6)$$

Donde R es la distancia a la antena y θ_a , el ancho de haz en una dirección determinada [11].

De forma geométrica, sabiendo que el ancho de haz de una antena viene dado por $\theta_a = \lambda/l$, la apertura sintética viene dada por la Ecuación 2.7:

$$L_{sa} = \theta_a \cdot r_o = \frac{\lambda \cdot r_o}{l} \quad (2.7)$$

y por tanto, se produce un ancho de haz virtual $\theta_{sa} = \lambda/2L_{sa}$ (el factor 2 indica el trayecto de ida y vuelta de la onda), que da lugar a una resolución acimutal según la Ecuación 2.8 [5]:

$$\delta_a = r_o \cdot \theta_{sa} = r_o \cdot \frac{\lambda}{2 \cdot L_{sa}} = r_o \cdot \frac{\lambda}{2 \cdot \frac{\lambda \cdot r_o}{l}} = \frac{l}{2} \quad (2.8)$$

Si pasamos al dominio de la frecuencia, en un radar SAR, dos blancos cercanos con distinta posición angular respecto a la plataforma, tienen en todo momento velocidades relativas distintas respecto de esta, debido a su movimiento [6]. Por lo tanto, podrán ser distinguidos teniendo en cuenta el desplazamiento Doppler a lo largo de la apertura sintética (segmento de la trayectoria en la que el radar recibe ecos de un mismo objetivo), según las Ecuaciones 2.9.2.10.2.11:

$$\Delta f^{dop} = \frac{V}{L_{sa}} \quad (2.9)$$

$$\delta f^{dop} = f_{max}^{dop} - f_{min}^{dop} = \frac{2 \cdot V \cdot \theta}{\lambda} = \frac{2 \cdot V \cdot \frac{\lambda}{l}}{\lambda} = \frac{2 \cdot V}{l} \quad (2.10)$$

$$\delta_a = \Delta f^{dop} \cdot \frac{\delta x}{\delta f^{dop}} = \frac{V}{L_{sa}} \cdot \frac{L_{sa}}{\frac{2 \cdot V}{l}} = \frac{l}{2} \quad (2.11)$$

La variación de esta frecuencia Doppler es aproximadamente lineal, por lo tanto, puede interpretarse como una señal *chirp* en la dirección acimutal [6].

Cuando la distancia más cercana entre objetivo y antena se encuentra en el centro de la zona iluminada por esta última (Figura 2.4a) el ancho de banda Doppler está centrado en cero y hablamos de Doppler de media cero (*zero mean Doppler*) [3].

Sin embargo, los satélites de observación casi nunca siguen una órbita geoestacionaria, lo que hace que exista una velocidad aparente del objetivo visualizada por el radar, que es la contribución de la rotación de la Tierra y la velocidad orbital del satélite.

Para compensar esto y poder apuntar de forma perpendicular, la huella de la antena se adelanta un ángulo α , cuya tangente es igual al ratio de velocidades, según la Ecuación 2.12 (Figura 2.4b) [3]:

$$\alpha = 90 - \xi = atan\left(\frac{\vec{v}_{orb}}{\vec{v}_{rot}}\right) \quad (2.12)$$

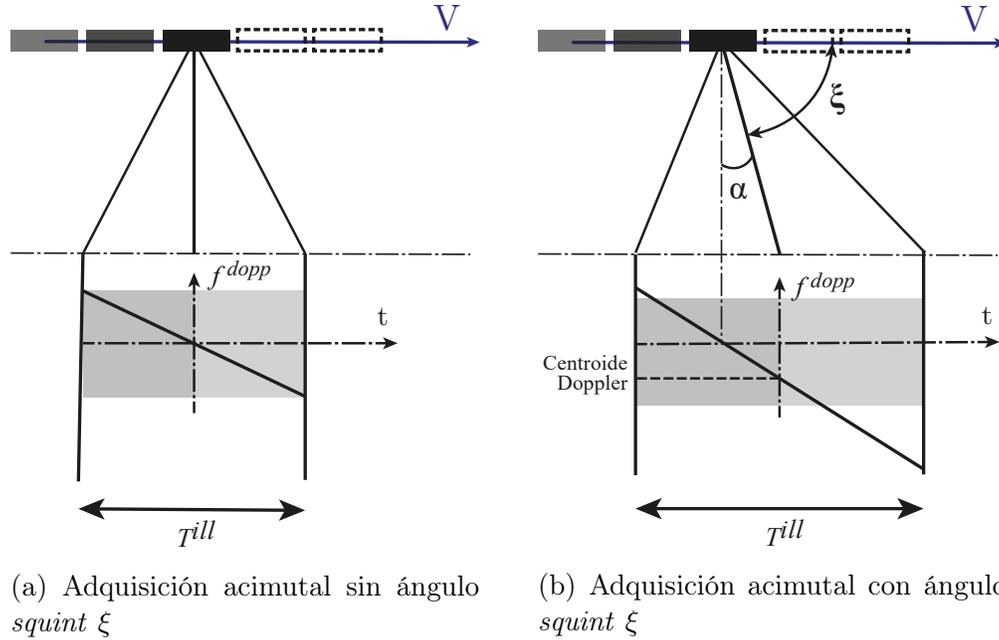


Figura 2.4: Variación frecuencia Doppler con el tiempo de iluminación [E.P.][3]

Para las características orbitales típicas de estos satélites, la antena solo tendrá que apuntar de forma perpendicular cuando cruce los polos, y la inclinación de la huella variará a lo largo de la órbita. Esto exige una ley de control para manejar la actitud, regida por la estimación del centroide Doppler, es decir, el ángulo de la antena para el cual la frecuencia Doppler es 0 en el centro del área iluminada [3].

De este modo, el tamaño del **pixel azimutal** p_a vendrá dado por la Pulse Repetition Frequency (PRF) f_a . Para un satélite, con una trayectoria curva, una aproximación de p_a viene dada por la Ecuación 2.13.

$$p_a \cdot T_{orb} \cdot f_a = C_{tierra} \cdot \cos(\theta) \quad (2.13)$$

donde T_{orb} es el periodo orbital y C_{tierra} es el perímetro terrestre (40000 km aproximadamente).

La PRF y la frecuencia de muestreo en el caso del rango se deben ajustar para un instrumento dado de forma que se relacionen aritméticamente con la frecuencia portadora del oscilador local y evitando el aliasing.

2.1.3. Apertura sintética

La antena es el elemento principal de cualquier sistema radar. En un instrumento SAR embarcado en un satélite, las características de la antena estarán condicionadas no solo por las necesidades de la misión en cuanto a propiedades del diagrama de radiación, si no también por las restricciones de tamaño propias de la plataforma.

En una antena SAR se persiguen altas potencias en la dirección de la radiación, lóbulos principales estrechos, altas relaciones de lóbulo principal a secundario, máximo de radiación transversal a la dirección de vuelo (*broadside*) [9].

Para esto, la antena SAR se basa en el concepto de agrupación de antenas, que permite modular las características del diagrama de radiación según el Factor de Array [8]. Esta modulación será fundamental para los distintos modos de adquisición que se presentan en la Sección 2.2. El Factor de Array se presenta en la Ecuación 2.14.

$$FA(\Phi) = \sum_{n=0}^{N-1} a_n \cdot e^{jn(kd \cdot \cos(\Phi) + \alpha)} \quad (2.14)$$

donde Φ es el ángulo de radiación, a_n es el módulo de la corriente, α es la fase relativa, d es el espaciado entre elementos y N es el número de elementos. Cada elemento (Figura 2.5) afecta de forma diferente a las características de la radiación. [10]

Sin embargo el parámetro de diseño más importante en un SAR espacial es el tamaño de la antena. Como se introduce anteriormente, de este dependen ambigüedad, resolución acimutal, ancho de la superficie barrida en la iluminación, sensibilidad y calidad de la imagen. [9]

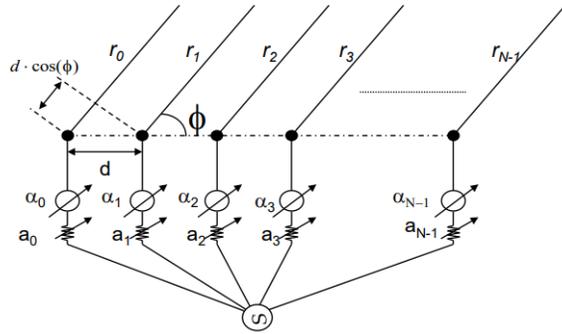


Figura 2.5: Parámetros característicos de una agrupación de antenas [10]

En una agrupación real de antenas (Figura 2.6a), la longitud de la antena (d_{re}) determina el ancho de haz del lóbulo principal (θ_{re}) según la aproximación $\theta_{re} = \lambda/d_{re}$. Para una resolución acimutal δ_a suficiente, del orden de magnitud de metros (Ecuación 2.43), la longitud de la antena necesaria estaría en el rango de los kilómetros, teniendo en cuenta la distancia entre plataforma y superficie terrestre.

Para ello, se aprovecha el movimiento de la plataforma. Empleando un oscilador muy estable que mantiene la fase en el trayecto, se construye un sistema coherente que permite combinar los ecos recibidos por una sola antena (Figura 2.6b). Esto permite no solo emplear un único elemento radiador de menor tamaño, sino también conseguir una **apertura sintética** L_{sa} (segmento de la trayectoria en el que el radar recibe ecos de un mismo objetivo) de gran longitud.

El tamaño de la apertura sintética viene dado a partir de la Ecuación 2.15:

$$L_{sa} = \theta_{re} \cdot r_o = \frac{\lambda \cdot r_o}{d_{re}} \quad (2.15)$$

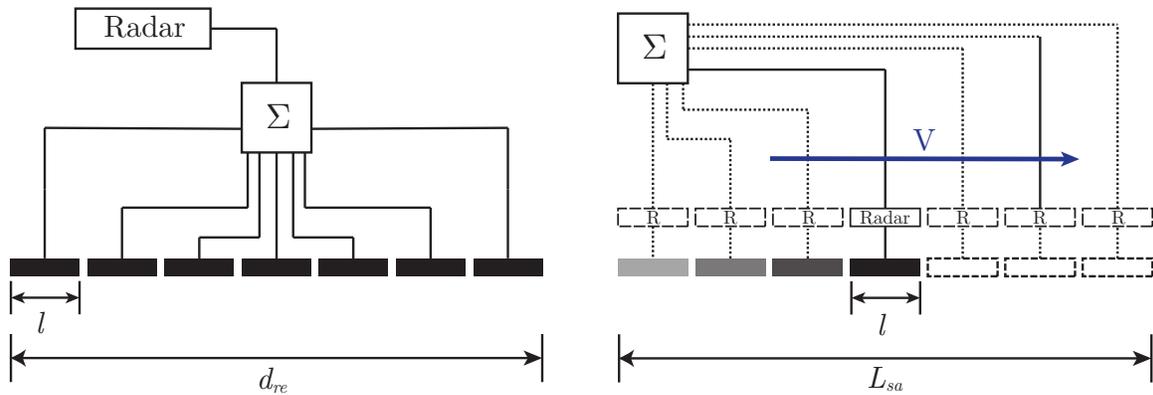
y el ancho del lóbulo principal, teniendo en cuenta el viaje de ida y vuelta de la onda,

resulta según la Ecuación 2.16:

$$\theta_{sa} = \frac{\lambda}{2 \cdot L_{sa}} = \frac{d_a}{2 \cdot r_o} \quad (2.16)$$

De esta última expresión se deduce que cuanto menor sea el elemento radiante, menor será el ancho del haz, y por tanto, mayor resolución acimutal. Un radar con una antena más pequeña visualiza el objetivo durante un mayor tiempo, como queda reflejado en la Ecuación 2.17.

$$T^{ill} \approx \frac{L_{sa}}{V} = \frac{\lambda \cdot r_o}{d_{re} \cdot V} \quad (2.17)$$



(a) Agrupación real de antenas. La alimentación en fase (*phase array*) de los radiadores permite modular el diagrama de radiación del conjunto.

(b) Agrupación sintética de antenas. El uso de un oscilador estable permite la combinación coherente de los ecos empleando el movimiento de la antena con la plataforma.

Figura 2.6: Agrupación real y sintética de antenas [8]

2.1.4. Integración de pulsos

La integración de los pulsos consiste en el sumatorio coherente de los ecos recibidos por la antena procedentes de un mismo objetivo.

El eco de un objetivo A está caracterizado por una amplitud α_a y una fase natural Φ_a , y por lo tanto tiene una expresión compleja $\alpha_a \cdot e^{j\Phi_a}$.

Cuando este mismo objetivo A se encuentre desplazado k píxeles azimutales del punto más cercano al radar, será recibido por la antena con un desplazamiento de fase $\Delta\Phi(k)$, y por lo tanto su contribución al eco queda definida por la Ecuación 2.18:

$$\alpha_a \cdot e^{j\Phi_a} e^{j\Delta\Phi(k)} = \alpha_a \cdot e^{j[\Phi_a + \Delta\Phi(k)]} \quad (2.18)$$

Esta contribución de los ecos se pondera a partir del diagrama de radiación azimutal de la antena, según el píxel azimutal k en el que se encuentre el objetivo. Este coeficiente β se establece según una función $\text{sinc}(x)$ normalizada, de modo que será $\beta(0) = 1$ en el centro de radiación de la antena, y $\beta(k) = 0$ para $|k| = N/2$, siendo N el número de muestras contenidas en el ancho de radiación de la antena.

De este modo, de forma general, la señal $s(l)$ recibida como eco de un pulso número l , está compuesta por todas las contribuciones $\alpha_k e^{j\Phi_k}$ de los objetivos presentes en el diagrama de radiación de la antena en las posiciones k , ponderado por el último y modificado por la distribución de fase $\Delta\Phi(k)$.

$$s(l) = \sum_{k=l-N/2}^{k=l+N/2} \beta(k-l) \cdot \alpha_k \cdot e^{j\Delta\Phi(k)} \cdot e^{j\Delta\Phi(k-l)} \quad (2.19)$$

Como la plataforma se mueve, el diagrama de radiación recibido por cada objetivo cambia con la sucesión de pulsos. Recordando que la PRF define el tamaño de píxel azimutal, se supone ahora un objetivo M cuyo punto más cercano a la plataforma (R_0) se da en el pulso de índice m . Definiendo el vector k como aquel que contiene los índices de los pulsos en los que el objetivo M es iluminado (2.20):

$$k' = \left[m - \frac{N}{2}, m + \frac{N}{2} \right] \quad (2.20)$$

para el pulso de índice m :

$$s(m) = \sum_{k=m-N/2}^{k=m+N/2} \beta(k-m) \cdot \alpha_k \cdot e^{j\Delta\Phi(k)} \cdot e^{j\Delta\Phi(k-m)} \quad (2.21)$$

y la integración de todas los pulsos que capturan el objetivo M , s_f , se establece según (2.22):

$$s_f(m) = \sum_{k'=m-N/2}^{k'=m+N/2} \beta(k'-m) \cdot s(k') \cdot e^{-j\Delta\Phi(k'-m)} \quad (2.22)$$

donde el último exponente implica la eliminación de las contribuciones ajenas al objetivo M , y los pulsos del mismo objetivo son ponderados según la intensidad de radiación que los captura [3].

2.1.5. Ecuación radar del SAR

Para un radar convencional, suponiendo un blanco a una distancia R y una antena omnidireccional transmitiendo una potencia $P_T[W]$, la densidad de potencia \mathcal{P}_i incidente sobre el blanco viene dada por la Ecuación 2.23:

$$\mathcal{P}_i[W/m^2] = \frac{P_T}{4\pi R^2} \quad (2.23)$$

Si la antena del radar es direccional con una ganancia $G(\theta, \phi)$, la densidad de potencia incidente se define entonces según (2.24) como:

$$\mathcal{P}_i[W/m^2] = \frac{P_T}{4\pi R^2} \cdot G(\theta, \phi) \quad (2.24)$$

Por otro lado, el blanco no dispersa la potencia de forma uniforme, por esto se introduce la sección secta-radar σ , un parámetro que caracteriza la dispersión de la potencia incidente. De este modo, la potencia dispersada por el blanco P_{sc} se caracteriza por la Ecuación 2.25:

$$P_{sc}[W] = \mathcal{P}_i[W/m^2] \cdot \sigma[m^2] = \frac{P_T G_T(\theta, \phi)}{4\pi R^2} \cdot \sigma \quad (2.25)$$

Teniendo en cuenta además la atenuación por la dispersión isotrópica, el resto de pérdidas del sistema L , y el área efectiva de la antena del radar A_{ef} que se define en la Ecuación 2.26, la potencia recibida en el radar debido al eco vendrá dada por la Ecuación 2.27.

$$A_{ef} = \frac{G_R(\theta, \phi) \lambda^3}{4\pi} \quad (2.26)$$

$$P_R[W] = P_{sc}[W] \cdot \frac{1}{4\pi R^2} \cdot A_{ef} = \frac{P_T \cdot G_T \cdot G_R \cdot \sigma \cdot \lambda^2}{(4\pi)^3 \cdot R^4} \quad (2.27)$$

Sin embargo, en un radar de apertura sintética, tenemos que tener en cuenta dos particularidades: la integración coherente de los ecos y la expresión de la sección recta-radar.

En cuanto a la sección secta-radar, esta dependerá del coeficiente de dispersión normalizado para la superficie terreste σ^o y la superficie del píxel A :

$$\sigma = \sigma^o \cdot A = \sigma^o \cdot p_a \cdot p_g \quad (2.28)$$

De este modo, a partir de las Ecuaciones 2.28, 2.14 y 2.7:

$$\sigma = \sigma^o \cdot r_o \frac{\lambda}{T_{ill} \cdot V} \cdot \frac{c}{2 \cdot B_r \cdot \sin(\beta)} \quad (2.29)$$

Por otro lado, la intensidad en la recepción se incrementa el número n de ecos integrados para un mismo objetivo. Según la Ecuación 2.30:

$$n = T^{ill} \cdot f_a \quad (2.30)$$

De este modo, para un SAR, la potencia recibida en el radar P_R viene dada por la Ecuación 2.31:

$$P_R[W] = \frac{P_T G(\theta, \phi) A_{ef}}{(4\pi)^2 R^4} \cdot \frac{1}{L} \cdot \sigma^o \cdot r_o \frac{\lambda}{T^{ill} V} \cdot \frac{c}{2 \cdot B_r \cdot \sin(\beta)} \cdot T^{ill} \cdot f_a \quad (2.31)$$

Simplificando, llegamos a la expresión 2.32:

$$P_R[W] = \frac{P_T \cdot G_T \cdot G_R \cdot \lambda \cdot \sigma^o \cdot f_a \cdot p_g}{(4\pi)^3 \cdot R_o^3 \cdot V} \cdot \frac{1}{L} \quad (2.32)$$

En un sistema SAR toma especial importancia la relación señal a ruido (SNR), expresada según la Ecuación 2.33

$$SNR = \frac{S}{N} = \frac{P_R}{K \cdot T_s \cdot F \cdot B_r} \quad (2.33)$$

donde K es la constante de Boltzmann ($1,38054 \cdot 10^{-23} JK^{-1}$) y F es el factor de ruido.

2.2. Modos de adquisición

Los sistemas SAR actuales son capaces de operar en diferentes modos controlando el diagrama de radiación de la antena. Dependiendo de la configuración del sistema, el SAR es capaz de adquirir datos en tres modos distintos (Figura 2.7) [18][19]:

- **Stripmap SAR:** cuando el ángulo de incidencia se mantiene constante en la trayectoria orbital de la plataforma, fijo en un único barrido.
- **ScanSAR:** se emplea cuando es necesario un ancho de barrido de mayor tamaño. El ángulo de incidencia β es variado de forma cíclica entre diferentes posiciones, que dan lugar a sub-barridos o *sub-swaths*. Cada *sub-swath* es iluminado por varios pulsos pero durante un tiempo menor. Por lo tanto, la longitud de la apertura sintética se reduce y también lo hace la resolución acimutal.
- **Spotlight SAR:** el radar enfoca un mismo área en su paso sobre este, variando el ángulo de iluminación α de la antena. Un mayor tiempo de iluminación supone un incremento en la longitud de la apertura sintética y por tanto una mayor resolución acimutal.

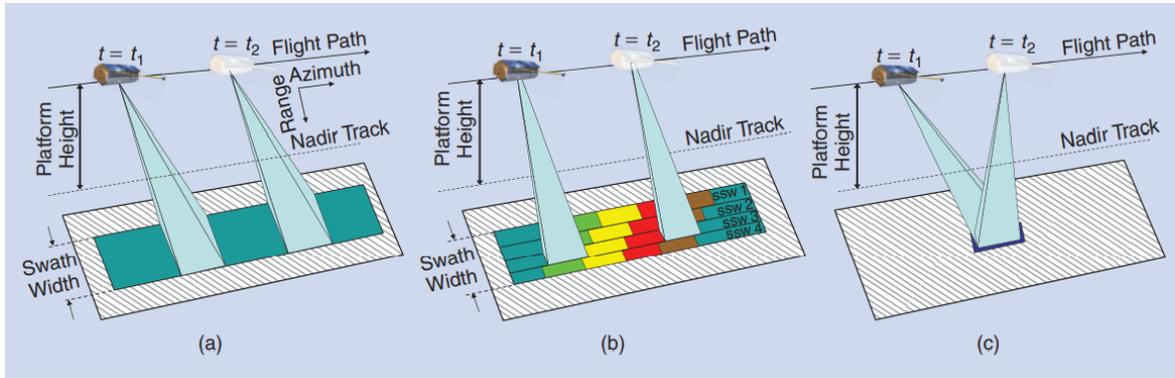


Figura 2.7: Modos de adquisición SAR

2.3. Procesado de imágenes SAR

2.3.1. Matriz de datos crudos

Los ecos recibidos por la antena SAR son almacenados en una matriz de datos crudos (Figura 2.8) de dos dimensiones (acimut y rango) [6]. En esta matriz, cada fila corresponde al eco de cada pulso enviado, y cada columna corresponde al muestreo de este eco. Por lo tanto, el tamaño de cada celda, como ya se explica anteriormente corresponde a la frecuencia de muestreo f_d y a la PRF en sus direcciones transversal y acimutal respectivamente.

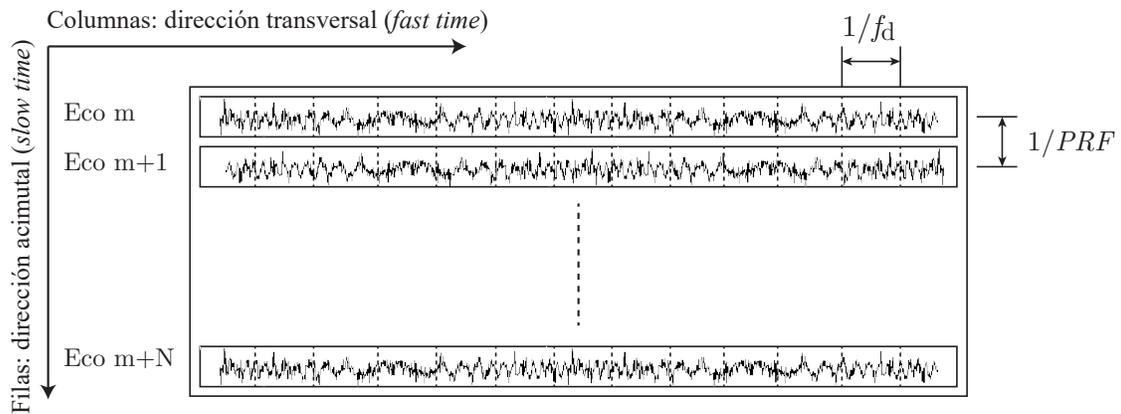
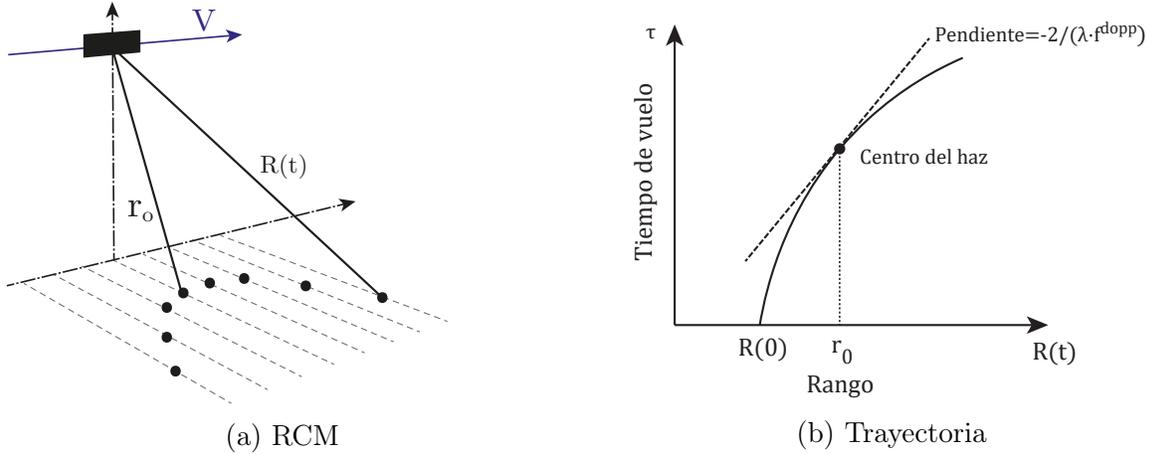


Figura 2.8: Disposición de los ecos en la matriz de datos crudos

2.3.2. Migración de celdas en rango (RCM)

Como consecuencia del propio movimiento de la plataforma, la distancia del SAR a un punto sobre la superficie terrestre $R(t)$ es una función del tiempo (*slow time*) [14].

El movimiento del satélite provoca que la información de rango de los ecos procedentes de un mismo punto varíe según una trayectoria curva (Figura 2.9b). De este modo, la información de posición del punto varía con cada pulso τ_k emitido durante el tiempo de iluminación. Este fenómeno se conoce como migración de celdas en rango o *range cell migration*



Esta migración se define en función del tiempo según (2.34):

$$RCM(t) = \sqrt{R_o^2 + (V \cdot t)^2} - R_o \approx \frac{(V \cdot t)^2}{2 \cdot R_o} \quad (2.34)$$

Esta variación del rango es la responsable de la excursión en frecuencia Doppler de la que depende este sistema. Sin embargo, el tratamiento de este fenómeno previo a la integración acimutal es crucial a la hora de evitar errores de enfoque en la imagen.

Si esta variación es pequeña puede ser ignorada. De hecho, aquellos sistemas embarcados en aeronaves se diseñan para que así sea. En SAR embarcados en satélite de alta resolución, esto no es posible [14].

La migración en rango puede ser ignorada siempre que sea menor a la mitad de la longitud transversal del píxel (Ecuación 2.35). Es a partir de esta distancia cuando la migración provoca la distribución de la energía recibida de un punto hacia otros píxeles [15].

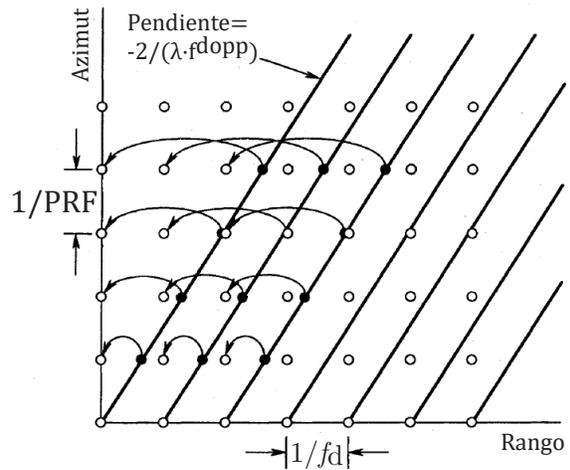


Figura 2.10: Reindexación de la matriz de datos crudos en el proceso de corrección de la RCM [6]

$$RCM_{max} = RCM(t = T^{ill/2}) > \delta_r/2 \quad (2.35)$$

Por lo tanto, la corrección de la RCM consiste en el tratamiento de la matriz de datos crudos con el fin de que cada columna corresponda a la misma posición transversal para todos los pulsos enviados sobre un mismo objetivo (Figura 2.10) [6]. La corrección de la RCM es el mayor reto en el procesado SAR y ha sido un tema de investigación intenso que ha derivado en variedad de soluciones a lo largo de su historia.

2.3.3. Algoritmos de focalización SAR

La focalización es el proceso por el cual se pasa de la matriz de datos crudos a una imagen compleja precisa con información de amplitud y fase para cada píxel de la escena. A lo largo de la historia del SAR se han propuesto diversas soluciones a esta focalización, las cuales se pueden agrupar en los tres algoritmos que se presentan a continuación.

Algoritmo *Range-Doppler*

El algoritmo range-Doppler (RDA por sus siglas en inglés) se desarrolla para el procesado de los datos del satélite SEASAT (1978) y es aún uno de los más empleados en procesado SAR. Se diseña para alcanzar una alta eficiencia de procesado, trabajando en el dominio de la frecuencia tanto en rango como en acimut, manteniendo la simplicidad con operaciones en una sola dimensión [15].

Su funcionamiento está basado en la técnica del filtro adaptado (*matched filtering*) para la focalización o compresión en ambas direcciones. Todas las convoluciones propias de esta técnica se realizan como multiplicaciones en el dominio de la frecuencia, lo que reduce la carga computacional [15].

El diagrama de ejecución del algoritmo consta de los siguientes pasos:

1. Se aplica la Transformada Rápida de Fourier (FFT) a cada fila de la matriz RAW (dirección transversal), y a la réplica de la señal *chirp* transmitida y se calcula su conjugado.
2. Ya en el dominio de la frecuencia, se realiza la compresión en rango. Para ello, se emplea la técnica del filtro adaptado con la correlación de la señal recibida y una función de referencia (réplica del pulso *chirp*). Esto es la multiplicación de los productos del paso 1.
3. Se aplica la Transformada Rápida de Fourier Inversa (IFFT) al producto de la compresión en rango para volver al dominio temporal, mientras que se aplica la FFT a las columnas de la matriz RAW (dirección acimutal). Con esto se transforma la señal al dominio range-Doppler (tiempo-frecuencia), en el que se realizarán el resto de operaciones. En este dominio, los objetivos que tengan trayectorias con el mismo rango forman una única trayectoria.

4. Se realiza la corrección de la migración en rango (RCMC) mediante una función de interpolación. De este modo, se recorren las columnas de la matriz corrigiendo el registro de rango en las celdas necesarias, convirtiendo las trayectorias curvas en paralelas rectas al eje de frecuencias acimutal.
5. Una vez realizada la RCMC, se procede a la compresión en azimut. En este caso, la función de referencia acimutal se calcula para cada columna de la matriz, varía con el rango. Para ello se aprovecha que la variación de la frecuencia Doppler es prácticamente lineal, por lo que la señal en la dirección acimutal se puede entender como un *chirp* Doppler.
6. Por último, se aplica la IFFT en la dirección acimutal, regresando al dominio temporal en ambas direcciones. Esto que resulta en una imagen enfocada y compleja (cada píxel tiene atribuido información de amplitud y fase).

Algoritmo *Chirp-Scaling*

El algoritmo *Chirp-Scaling*, o CSA por sus siglas en inglés, se desarrolla con la intención de eliminar el uso de interpolador en la RCMC, que puede suponer una alta carga computacional.

De este modo, este algoritmo busca ecualizar la curva RCM. Esto se logra a través del principio de "*chirp scaling*", por el cual una señal modulada en FM se aplica a una señal *chirp* para conseguir un cambio de posición del objetivo (Figura 2.11). De este modo, en el caso del SAR satelital, donde la curva RCM no es lineal, se puede implementar una corrección variable con el rango en el dominio frecuencial.

Las operaciones básicas propias del CSA son las siguientes:

1. Se aplica la FFT en la dirección acimutal para pasar al dominio range-Doppler.
2. Se multiplica la señal por la primera función de fase (*chirp-scaling*) para ecualizar la curva de migración en rango de todas las trayectorias.
3. Se transforma la matriz al dominio espectral bidimensional aplicando una FFT la dirección transversal.
4. Se realiza la segunda multiplicación de la señal con una función de fase, con la que se consigue la compresión en rango y la RCMC.
5. Se vuelve al dominio range-Doppler mediante una IFFT en rango.
6. Se realiza la última multiplicación con la tercera función de fase, con la que se consigue la compresión en azimut.
7. Por último, se realiza una IFFT en la dirección acimutal para regresar al dominio temporal, obteniendo la imagen focalizada.

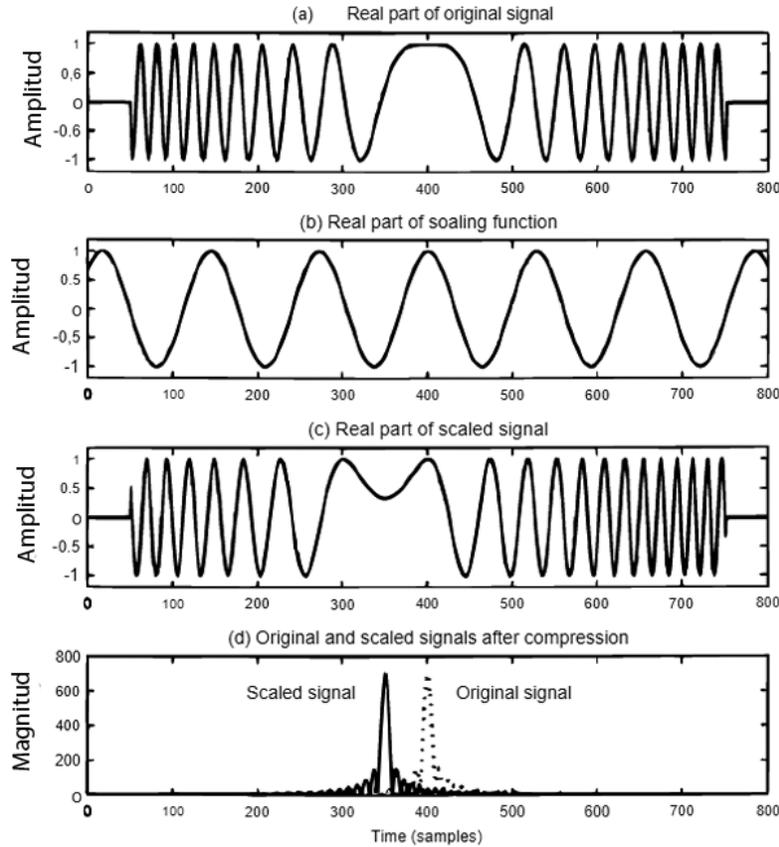


Figura 2.11: Ejemplo de la variación de la posición del objetivo mediante la multiplicación con una señal Chirp [15]

De este modo, este algoritmo es un híbrido que emplea operaciones tanto en el dominio range-Doppler (tiempo-frecuencia) como en el de la frecuencia bidimensional, empleando una característica de los datos SAR para focalizar la imagen sin la necesidad de interpoladores.

Algoritmo ω - k

Tanto los algoritmos range-Doppler como los *chirp-scaling* emplean aproximaciones de la fase mediante expansiones de Taylor. Esto produce ciertas limitaciones a la hora de procesar los datos adquiridos cuando la apertura sintética es muy grande o si existe un elevado ángulo de *squint*. Para solucionar esto, el algoritmo ω - k fue propuesto en el año 1991 [16].

Este algoritmo está caracterizado por realizar todas sus operaciones en el dominio bidimensional de la frecuencia, trabajando con el número de onda k en azimuth y con la frecuencia angular ω en rango. En este dominio las aproximaciones de fase no son necesarias.

La implementación de este algoritmo consta de los siguientes pasos:

1. Se aplica una FFT en ambas direcciones, acimutal y transversal (rango) para transformar los datos al dominio espectral.
2. Se lleva a cabo una compresión general de los datos RAW multiplicando por una función de referencia.

Al trabajar en el dominio espectral, las variables de rango y velocidad efectiva de la plataforma se convierten en constantes. Por lo tanto, la función de referencia realiza la compensación de fase para un solo rango y asumiendo una velocidad efectiva constante con este. Por ello, los blancos que se encuentren en el rango de referencia serán enfocados perfectamente, mientras que a partir de este rango el enfoque será parcial.

3. Tras el enfoque general, se realiza un enfoque diferencial mediante el mapeo de Stolt. Esta técnica permite, mediante una interpolación, resolver la ecuación de onda en el dominio de la frecuencia, resolviendo el enfoque para rangos distintos al de referencia.
4. Tras el enfoque general y diferencial, se realiza una IFFT bidimensional para volver al dominio temporal, obteniendo una imagen focalizada.

La RCMC se realiza durante ambos enfoques. Por último, cabe destacar que asumir la velocidad efectiva constante con el rango supone una pérdida de enfoque en sistemas espaciales.

2.4. Principales técnicas SAR

2.4.1. Polarimetría (PolSAR)

La polarimetría SAR es una técnica ampliamente usada para el estudio cualitativo y cuantitativo de terrenos, océanos, superficies de hielo o áreas urbanas, a partir del análisis de las propiedades polarimétricas de los ecos recibidos, analizando la rotación angular de una onda polarizada en su interacción con la superficie terrestre.

Las antenas radar están diseñadas para enviar y recibir radiación electromagnética con una polarización definida. Existen diversas configuraciones: *single-pol*, cuando la antena emite y recibe en una única polarización (horizontal o vertical) (imágenes HH o VV); *dual-pol*, cuando emite en una única polarización pero recibe en ambas (imágenes HH, HV, VH o VV); y por último, la configuración *quad-pol*, en la que se alternan pulso a pulso ondas con polarización horizontal y vertical.

En configuración *quad-pol* se transmite un pulso con polarización horizontal ($\vec{E}^t/|\vec{E}^t| = [1 \ 0]^T$) y se almacena la componente horizontal $\vec{E}^r/|\vec{E}^r| = [1 \ 0]^T$ y vertical $\vec{E}^r/|\vec{E}^r| = [0 \ 1]^T$ en su regreso a la antena. De este modo se obtienen los elementos S_{HH} y S_{HV} . Los otros dos elementos, S_{VH} y S_{VV} se obtienen de igual forma pero enviando un pulso con polarización vertical ($\vec{E}^t/|\vec{E}^t| = [0 \ 1]^T$).

Por lo tanto, esta técnica se basa en el análisis de la matriz de dispersión $[S]$, que describe la transformación bidimensional de una onda transmitida \vec{E}^t en su interacción con un píxel $(p_g \cdot p_a)$. De modo que la onda recibida \vec{E}^r se establece por las Ecuaciones 2.36 y 2.37 como:

$$\vec{E}^r = \frac{e^{-jkr}}{r} [S] \vec{E}^t \quad (2.36)$$

$$\begin{bmatrix} E_H^r \\ E_V^r \end{bmatrix} = \frac{e^{-j \cdot k \cdot r}}{r} \begin{bmatrix} S_{HH} & S_{HV} \\ S_{VH} & S_{VV} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_H^t \\ E_V^t \end{bmatrix} \quad (2.37)$$

Donde los cuatros elementos de S son las amplitudes complejas de dispersión (2.38) y los subíndices H y V indican la polarización en la dirección horizontal y vertical respectivamente. El factor e^{-jkr}/r expresa la variación de fase y la atenuación, donde $k = 2\pi/\lambda$ indica el número de onda y r la distancia entre el objetivo y la antena.

$$S_{IJ} = |S_{IJ}| \cdot e^{j\phi_{IJ}} \quad (2.38)$$

Las características de la matriz de dispersión es independiente del método empleado para su obtención.

La configuración puede ser monoestática (cuando emisión y recepción se realizan con la misma antena) o biestática (cuando el emisor y el receptor están separados). En el caso monoestático, el más habitual en SAR, la matriz $[S]$ se hace simétrica ($S_{HV} = S_{VH} = S_{XX}$)

Cuando existe *speckle*, es decir, interferencias aleatorias entre los dispersores que se encuentren dentro de un mismo píxel, la matriz de dispersión no es suficiente para describir el cambio en la polarización de la onda. Para ello, se recurre a la matriz de coherencia $[T]$ que se define a partir del vector de dispersión \vec{k}_p :

$$\vec{K}_P = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot [S_{HH} + S_{VV}, S_{HH} - S_{VV}, 2S_{XX}]^T \quad (2.39)$$

De modo que la matriz de coherencia $[T]$ se describe según 2.40, donde * indica el conjugado transpuesto y $\langle \dots \rangle$ la operación de promediado espacial propio del *multi-looking*.

$$\begin{aligned} [T] &= \langle \vec{k}_p \vec{k}_p^* \rangle = \\ &= \frac{1}{2} \cdot \begin{bmatrix} \langle |S_{HH} + S_{VV}|^2 \rangle & \langle (S_{HH} + S_{VV})(S_{HH} - S_{VV})^* \rangle & 2 \langle (S_{HH} + S_{VV})S_{XX}^* \rangle \\ \langle (S_{HH} - S_{VV})(S_{HH} + S_{VV})^* \rangle & \langle |S_{HH} - S_{VV}|^2 \rangle & 2 \langle (S_{HH} - S_{VV})S_{XX}^* \rangle \\ 2 \langle S_{XX}(S_{HH} + S_{VV})^* \rangle & 2 \langle S_{XX}(S_{HH} - S_{VV})^* \rangle & 4 \langle |S_{XX}|^2 \rangle \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2.40)$$

A partir de esta matriz de coherencia, podemos obtener el coeficientes de correlación entre las diferentes polarizaciones γ_{HHVV} dado por (2.41):

$$\gamma_{HHVV} = \frac{\langle |S_{HH}S_{VV}^*| \rangle}{\sqrt{\langle |S_{HH}S_{HH}^*| \rangle \langle |S_{VV}S_{VV}^*| \rangle}} \quad (2.41)$$

Los elementos de la matriz de dispersión, así como los derivados de esta, nos permiten recoger información detallada de las propiedades de la superficie observada, como su estructura, orientación o condiciones medioambientales [18]. En la Figura 2.12 puede observarse una aplicación de esta técnica, mediante la comparación de 3 imágenes de distinta fecha que estiman el porcentaje de humedad del suelo. Para ello, se ha realizado un análisis polarimétrico de datos SAR obtenidos en la banda L.

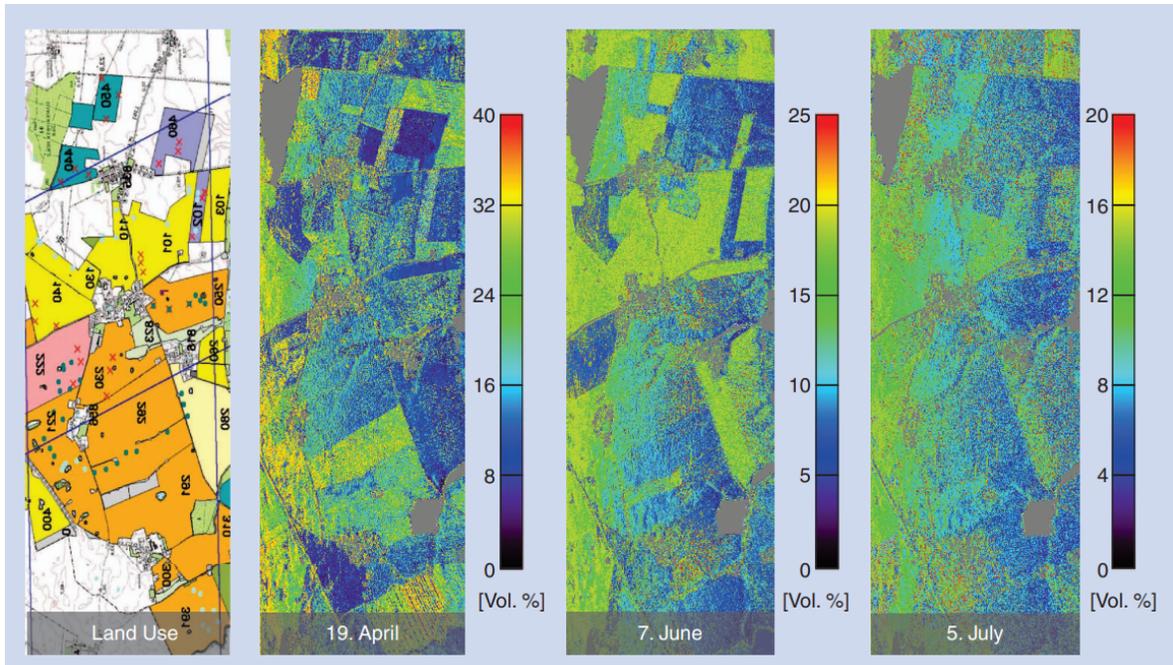


Figura 2.12: Uso y estimación del porcentaje de humedad del suelo con el tiempo a partir de análisis polarimétrico de datos SAR obtenidos en banda L [18].

2.4.2. Interferometría (InSAR)

La interferometría es otra de las técnicas ampliamente usadas en el análisis SAR, la cual permite la medición y análisis de parámetros geofísicos como la topografía del terreno, deformación del suelo o movimiento de glaciares.

La interferometría se basa en la comparación de fase, para una misma escena, de imágenes tomadas en momentos distintos o desde posiciones ligeramente distintas. La fase contiene información sobre el rango de mucha precisión (fracción de la longitud de onda), por lo que se pueden detectar diferencias en rango centimétricas o incluso milimétricas.

Un satélite SAR puede observar el mismo área desde diferentes ángulos, ya sea de forma simultánea (con dos antenas montadas en el mismo satélite o en configuraciones particulares) o en momentos distintos (a partir del movimiento orbital de la antena sobre la superficie y su frecuencia de revisita) [82].

La distancia entre los dos satélites (u orbitas) en el plano perpendicular a la órbita es lo que se conoce como *interferometric baseline*, mientras que la proyección de esta perpendicular al rango es la *perpendicular baseline* (B_{\perp}).

El interferograma SAR se genera a través de la multiplicación cruzada, píxel a píxel, de la primera imagen por el complejo conjugado de la segunda. De este modo, la amplitud del interferograma es la amplitud de la primera imagen SAR multiplicada por la de la segunda, mientras que la fase interferométrica resulta en la diferencia entre la fase de ambas imágenes. Para esto, hay que asegurarse de que los píxeles de ambas imágenes están alineados y corresponden al mismo punto sobre la superficie. Esto se realiza en un proceso llamado corrección.

La fase interferométrica permite medir parámetros como la altitud del terreno y el movimiento de este. La variación en el recorrido de la onda Δr entre una celda de resolución a otra es proporcional a la diferencia de altura, y viene dada (para *baselines* cortas y celdas no demasiado alejadas) por la Ecuación 2.42, mientras que la geometría se presenta en la Figura 2.13.

$$\Delta r = \frac{B_{\perp}}{r_0 \cdot \sin(\beta)} \cdot \Delta h \quad (2.42)$$

De modo que esta diferencia de rango Δr corresponde a una diferencia de fase $\Delta\varphi$ según (2.43):

$$\Delta\varphi = m \frac{2\pi}{\lambda} \Delta r \quad (2.43)$$

donde $m = 1$ para una configuración de un transmisor y dos receptores (*single-pass* SAR) y $m = 2$ para una configuración *repeat-pass*, donde cada imagen SAR corresponde a una pasada con un transmisor y un receptor.

Esta diferencia de fase contiene una componente inducida por la curvatura de la tierra en el proceso de adquisición, la cual es sustraída en un proceso llamado *interferogram flattening*, generando un mapa de fase proporcional a la altitud relativa del terreno. En la Figura 2.14 se puede observar un modelo digital de elevaciones desarrollado a partir de interferometría SAR una vez realizado el *interferogram flattening* y resuelta la ambigüedad de fase mediante el *phase unwrapping* [82].

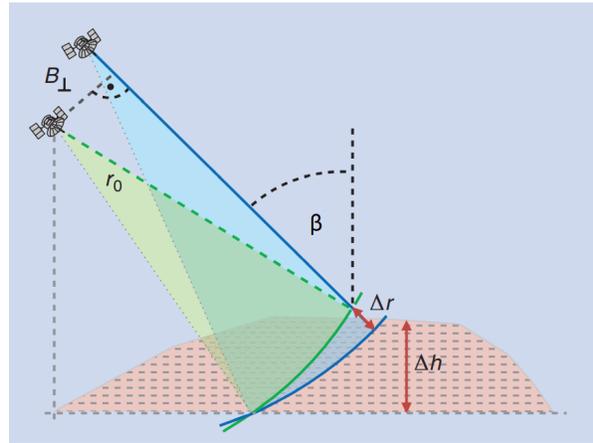


Figura 2.13: Parámetros geométricos involucrados en la interferometría SAR [18]

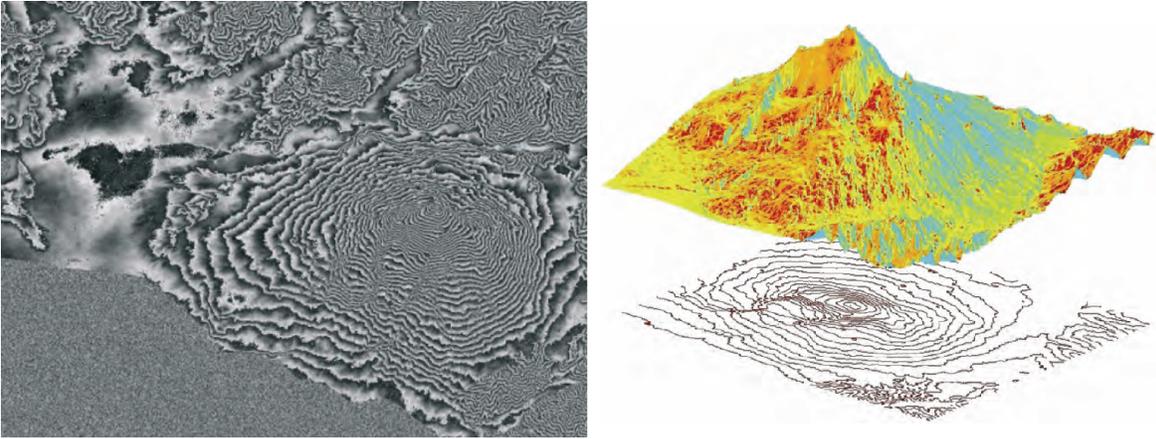


Figura 2.14: Modelo digital de elevaciones del volcán Etna desarrollado a partir de las adquisiciones obtenidas por el par de satélites de la misión ERS [82]

Una vez se sustrae la componente correspondiente a la curvatura de la tierra, la diferencia de fase es la combinación de la contribución de altitud y del posible movimiento terrestre entre adquisiciones. La contribución de la altitud puede sustraerse de esta diferencia de fase a partir de un modelo digital de elevaciones (DEM), generando el conocido como **interferograma diferencial**, que permite medir la deformación terrestre con precisión centimétrica o milimétrica (fracción de la longitud de onda).

Un análisis más profundo de esta técnica, así como del proceso seguido en el tratamiento de los productos SAR para la creación de interferogramas y los diversos problemas que pueden surgir, se presenta en la aplicación práctica de este Trabajo de Fin de Grado, para el análisis de la erupción volcánica de la isla de La Palma, desarrollada en el Capítulo 4.

Capítulo 3. Estado del arte: misiones SAR y aplicaciones

3.1. Antecedentes y primeras misiones

Desde su invención en 1951, el SAR ya había sido empleado exitosamente a bordo de aviones. Sin embargo, ingenieros en su desarrollo comienzan a plantear los satélites como una gran plataforma para embarcar esta tecnología por dos razones:

1. La resolución SAR mejora cuanto más pequeña es la antena y no depende de la distancia al objetivo
2. Una plataforma orbital ofrece una estabilidad casi perfecta, al contrario de un avión, cuyo movimiento irregular en el aire debe ser registrado y sustraído de la señal Doppler recibida.

3.1.1. Quill

El lanzamiento de Sputnik por la Unión Soviética en 1957 tiene un efecto catalizador en el desarrollo de tecnologías satelitales por parte de Estados Unidos, especialmente en el ámbito militar. En este contexto, la entonces recién creada National Reconnaissance Office (NRO) desarrolla una serie de programas en el campo del reconocimiento terrestre que culmina con el lanzamiento en 1964 de Quill, el primer satélite del mundo en incorporar la tecnología SAR. El programa “P-40” en el cual se enmarca el desarrollo de Quill, fue recientemente desclasificado por la NRO en 2012 [20].

Quill no se concibe dentro del desarrollo de nueva tecnología o la creación de un programa espacial, sino como un experimento con dos objetivos: comprobar si la integración de pulsos en órbita podía arrojar la resolución acimutal deseada, y si las condiciones espaciales podrían afectar a los componentes o a la calidad de la imagen [21].

La carga de pago SAR, desarrollada por Goodyear Aerospace Corporation, es una adaptación del sensor que entonces montaba el F-4 Phantom II. El sistema radar montaba una antena de 4,5 x 0,6 metros, que apuntaba a la superficie con un ángulo de incidencia β de 55° . El dispositivo fue adaptado a la misión eliminando sistemas aéreos innecesarios, mientras que se planteaban otros desafíos como el control térmico de los sistemas [21].

3.1. ANTECEDENTES Y PRIMERAS MISIONES

La misión duró únicamente 4 días, hasta las baterías se agotaran durante las órbitas 72-73. El radar operó 14 veces (5 minutos por órbita) entre los días 22 y 26 de diciembre de 1964 [20].

El sistema de recepción de los ecos estaba integrado por un tubo de rayos catódicos, mediante el cual, los ecos recibidos trazaban una línea en la pantalla de este, que variaba dependiendo de la intensidad del eco. Esta información era grabada en un film fotográfico que se desplazaba frente a la pantalla [21].

La información fue transmitida a tierra de dos formas:

- Mediante una cápsula de reentrada en la que se almacenaba la cinta con el film fotográfico a bordo, eyectada y recuperada durante la órbita número 33.
- A través de un enlace de datos UHF, mediante el cual se transmitían en tiempo real los pulsos Doppler recibidos a dos estaciones terrestres. Estos pulsos eran grabados en film fotográfico empleando un tubo de rayos catódicos igual al que había a bordo.

El procesado SAR se abordó de forma óptica, pues la capacidad de computación de entonces no era capaz de realizar las FFT necesarias a una velocidad superior. De este modo, a través de un láser se genera un haz de radiación coherente, que a su paso por el film es difractado en tres ondas, dos de las cuales con la capacidad de generar imágenes a distancias focales según el rango. Por último, con un telescopio anamórfico se produce la imagen final, enfocadas en rango y azimut (Figura 3.1) [21].

La importancia de esta misión reside en los resultados y conclusiones extraídas, que responden a múltiples preguntas técnicas y sientan precedente para misiones futuras [21]:

- Quill alcanzó una resolución transversal de 25 metros y una resolución azimutal máxima de aproximadamente 2,13 metros. Siendo la azimutal el máximo teórico para la longitud de la antena.
- Se generaron imágenes útiles de casi el 80% de la superficie iluminada. La degradación de las imágenes generadas a partir del enlace de datos es mínima en comparación a las imágenes extraídas a partir del film generado a bordo.
- Las imágenes obtenidas contienen un nivel de detalle sobre el terreno suficiente como para considerar esta tecnología como una herramienta de reconocimiento estratégico.

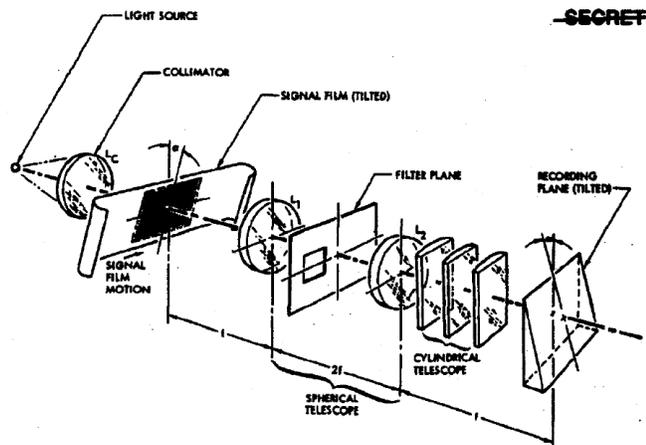


Figura 3.1: Telescopio anamórfico de la misión Quill para procesado analógico SAR [21]

- Una plataforma orbital, mucho más estable, permite evitar el uso de sistemas complejos para compensar el movimiento, como se venía requiriendo hasta ahora en aviones, así como las limitaciones en resolución producidas por este mismo movimiento de la plataforma.

3.1.2. Primeras misiones científicas

El primer satélite en embarcar en su carga de pago el SAR como instrumento científico fue el **Seasat**, lanzado en junio de 1978 por el *Jet Propulsion Laboratory* de la NASA.

Este fue seguido por la Agencia Espacial Europea (ESA) con la misión **ERS**, cuyos dos satélites, ERS-1 y ERS-2, fueron lanzados en julio de 1991 y abril de 1995 respectivamente. Además, una misión de características similares fue impulsada por la Agencia Espacial Japonesa (JAXA) con el programa **JERS-1** (Japanese Earth Resource Satellite), cuyo satélite FUYO-1 fue lanzado en febrero de 1992.

Todas estas misiones comparten un objetivo similar: el empleo de diversos sensores, entre ellos un radar de apertura sintética que, embarcados en una plataforma satelital, permitan la recopilación a gran escala de datos terrestres y marinos para su aplicación en diferentes ciencias.

Las características orbitales, así como las especificaciones técnicas del sensor SAR no difieren demasiado entre estas primeras misiones. Estas se presentan en la Tabla 3.1.

	Seasat	ERS (ERS-1, ERS-2)	JERS-1
Fecha de lanzamiento	27/06/1978	17/07/1991, 21/04/1995	11/02/1992
Organización	NASA (USA)	ESA (Europa)	JAXA (Japón)
Nº satélites	1	2	1
Nº órbitas	1	1	1
Tipo de órbita	Polar, no heliosíncrona	Polar, heliosíncrona	Polar, heliosíncrona
Periodo [min]	101	100	96
Altura [km]	800	785	568
Tiempo de revisita [días]	3	35	44
Duración de la misión	3 meses	9 años, 16 años	6 años
Tamaño de antena SAR [m]	10.74 x 2.16	10 x 1	11.9 x 2.5
Banda de operación	L	C	L
Frecuencia [GHz]	1.275	5.3	1.275
PRF [Hz]	1464-1640	1640-1720	1505.8-1606
Duración del pulso [τ s]	33.4	37.12	35
Polarización	HH	VV	HH
Ángulo de incidencia β [°]	23	23	35.21

Tabla 3.1: Comparativa características misiones Seasat, ERS y JERS-1 [25][29][35]

Estas misiones son multisensor, es decir, el dispositivo SAR no es el único elemento en la carga de pago, si no que ha de convivir con otros dispositivos, los cuales dependerán de los objetivos de la misión. Debido a esto, ahora las antenas están formadas por una serie de paneles electricamente acoplados que se despliegan una vez en órbita. La antena de Seasat y JERS-1 está formada por 8 paneles microstrip, mientras que ERS-1 y ERS-2 incorporan 10 paneles ranurados con guías de onda o *slotted antenna arrays with waveguides* (Figura 3.2) [32][23][34].

En cuanto a las características de las imágenes producidas por estas antenas, Seasat, con un ancho de barrido de 100 km, era capaz de alcanzar una resolución espacial máxima de 25 metros si los datos eran procesados digitalmente, o de 40 metros si eran procesados ópticamente [23]. ERS proporcionaba una resolución espacial de 30 metros, también con un ancho de barrido de 100 km [29]. JERS-1, por su parte, alcanzaba una resolución de 18 metros

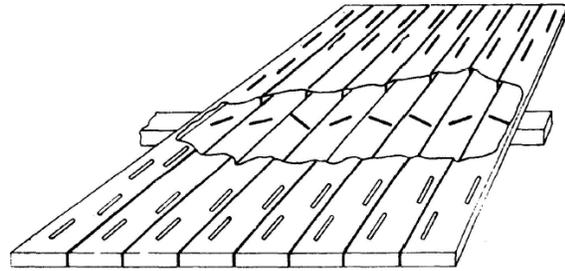


Figura 3.2: Diagrama de los paneles ranurados con guías de onda de la antena SAR a bordo de ERS [32].

La capacidad de los sistemas de adquisición y envío de información también experimentan una importante evolución. El alto volumen de los datos SAR, del orden de 100 Mb/s, complica la grabación de datos a bordo con la tecnología de la época. Únicamente JERS-1 es capaz de grabar hasta 20 minutos de datos SAR con una memoria a bordo de 9 Gb [35]. En el resto de misiones, la operabilidad del SAR queda aún limitada a un *downlink* en tiempo real, cuando el satélite se sitúa en el campo de visión de alguna estación.

En cuanto al tratamiento de los ecos a bordo y su transmisión, Seasat emplea un enlace de datos analógico en banda S, con el objetivo de reutilizar la tecnología ya existente. De este modo, la variación de la ganancia del eco a lo largo del rango es compensada con un sistema STC (*sensitivity time control*), y la señal es modulada con la PRF y un oscilador local estable (STALO) previo al envío [26].

ERS y JERS sí que realizan una conversión analógico-digital a bordo, enviando los canales I/Q mediante un *downlink* en banda X con modulación digital QPSK (*Quadrature Phase-Shift Keying*) [31][35].

En cuanto a la razón de ser de estas misiones, el propósito principal de Seasat es la investigación oceanográfica, y nace de la necesidad de obtener productos que permitan monitorizar los océanos a mayor escala, pues la información disponible sobre vientos, olas, mareas y corrientes hasta entonces era escasa, fragmentada y en ocasiones poco fiable [22].

El programa ERS, por su lado, permitió grandes avances en el campo de la observación terrestre, desarrollándose un amplio abanico de aplicaciones [27]:

- Mapeo y monitorización: permitiendo medir la forma completa del geoide terres-

3.1. ANTECEDENTES Y PRIMERAS MISIONES

tre, monitorizar el estado de bosques, áreas de cultivo y las características de glaciares y capas de hielo.

- Comprensión y detección de procesos terrestres: detectando los procesos que gobiernan la deriva continental, las estructuras tectónicas bajo los océanos o la variación en las características del suelo.
- Modelado para previsión y predicción: desarrollando modelos climatológicos e hidrológicos con múltiples aplicaciones en agricultura, así como modelos de la dinámica de las superficies de hielo y la interacción entre los océanos y la superficie.

También JERS-1, al igual que sus misiones coetáneas, tenía como objetivo recopilar información terrestre para llevar a cabo estudios en agricultura, pesca, protección del medio ambiente, prevención de catástrofes o vigilancia costera, con especial énfasis en la localización de recursos naturales [35]. De hecho, resultó ser realmente efectivo en el estudio forestal, por ser la banda L más sensible a la estructura del follaje, e incluso capaz de interactuar masas de agua bajo este [33]. Un ejemplo de adquisición SAR por JERS-1 puede observarse en la Figura 3.3.

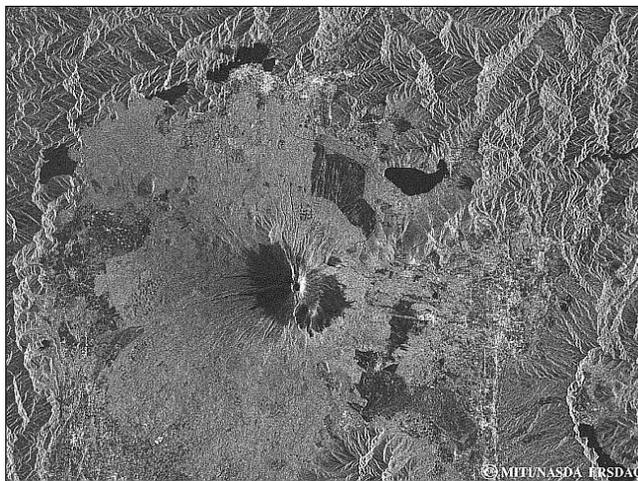


Figura 3.3: Adquisición SAR sobre el Monte Fuji (23 de abril de 1992) por el satélite JERS-1 [34]

Cabe destacar también una característica importante de la misión ERS, por el avance que supone en interferometría. Tras el lanzamiento del ERS-2, la misión se convierte en una misión de **tipo tandem**, es decir, los satélites comparten plano orbital. Esto supone que el ERS-2 sigue al ERS-1 con un retraso de aproximadamente 35 minutos. Este retraso, junto al movimiento de la Tierra, hace que la huella sub-satelital del ERS-2 se encuentre al oeste de la del ERS-1, y ajustando la trayectoria orbital, que la trayectoria del ERS-2 sobre la superficie coincida con la del ERS-1 24 horas antes [30].

Esta configuración permite observar una misma región con una diferencia temporal de un día, mejorando las capacidades de la tecnología SAR a bordo. De este modo, permite crear modelos de elevación digital (DEM) más precisos y de mayor resolución, menos sensible a la decorrelación temporal, así como detectar pequeños cambios en la superficie, como movimientos topográficos debidos a terremotos, desprendimientos, actividad volcánica o movimiento de glaciares [30]. Por supuesto, sienta precedente para las futuras constelaciones SAR.

3.2. Avances tecnológicos y segundas generaciones

El éxito de misiones anteriores lleva a las principales agencias mundiales a dar continuidad a sus programas SAR, actualizando los sistemas y por tanto, mejorando la capacidad operativa y la calidad y aplicaciones de los datos adquiridos.

De este modo, la ESA lanza en 2002 la misión **ENVISAT**, con el objetivo de asegurar la continuidad de ERS-1 y ERS-2. Entre sus instrumentos se encuentra el ASAR (Advanced Synthetic Aperture Radar), cuyas novedades técnicas suponen un gran avance en las capacidades de la observación terrestre.

ASAR introduce una antena electrónicamente orientable, que se convierte en el estándar en futuras misiones. Esto permite modelar el haz de la antena, controlando la amplitud y la fase de sus 320 módulos de transmisión y recepción [38].

Esta antena también se caracteriza por la polarización dual, que consigue nuevos avances científicos en diversos campos [40]:

- En estudios de la vegetación, el uso de la doble polarización permite mejorar la diferenciación entre suelo y la vegetación, y en el caso de bosques, mejora la extracción de datos relacionados con la biomasa (tipo de bosque, deforestación, regeneración...)
- En oceanografía, la doble polarización permite distinguir mejor entre masas de agua y hielo, mejorando la clasificación de este último (concentración, movimiento, tipo...). También mejora la capacidad de detección de otras características como frentes de viento o corrientes oceánicas (Figura 3.4).

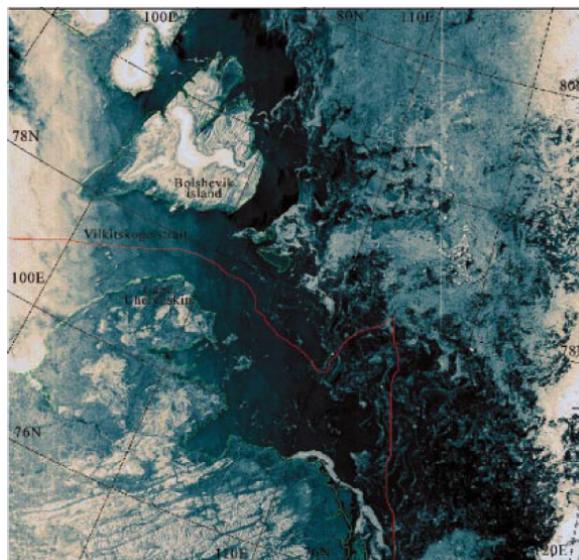


Figura 3.4: Trazado de ruta marítima sobre el ártico (en rojo) a partir de adquisiciones SAR, identificando las masas de hielo [38]

Así, estas dos novedades llevan a otra característica muy importante: la posibilidad de definir diversos modos operativos [38]. En este caso:

- **Image mode**: permite obtener imágenes de una alta resolución espacial (<30 m) en una de las siete franjas (150 km de ancho de barrido) que la antena eléctricamente orientable permite seleccionar, entre 15 y 45 grados de incidencia y en polarización horizontal (HH), vertical (VV), o alternandolas (*Alternating Polarization mode*), esto es, enviando una onda polarizada horizontal y recibiendo la componente vertical del eco (HV), o viceversa (VH).

3.2. AVANCES TECNOLÓGICOS Y SEGUNDAS GENERACIONES

- **Wave mode:** genera viñetas de 5x5 km cada 100 km en polarización horizontal o vertical, con una resolución inferior a los 10 metros. Este producto está dedicado principalmente a la investigación oceánica.
- **Wide Swath y Global monitoring:** que generan productos de gran ancho de barrido (405 km) con una resolución de 150 y 1000 m respectivamente, también en ambas polarizaciones.

Además, si bien el ciclo de repetición de la órbita es de 35 días [37], esta capacidad de orientar la antena permite reducir el tiempo de revisita de una determinada zona hasta los 3 días [38], lo que mejora la capacidad en el soporte a la gestión de emergencias naturales como inundaciones, terremotos o erupciones volcánicas. Un ejemplo se presenta en la Figura 3.5

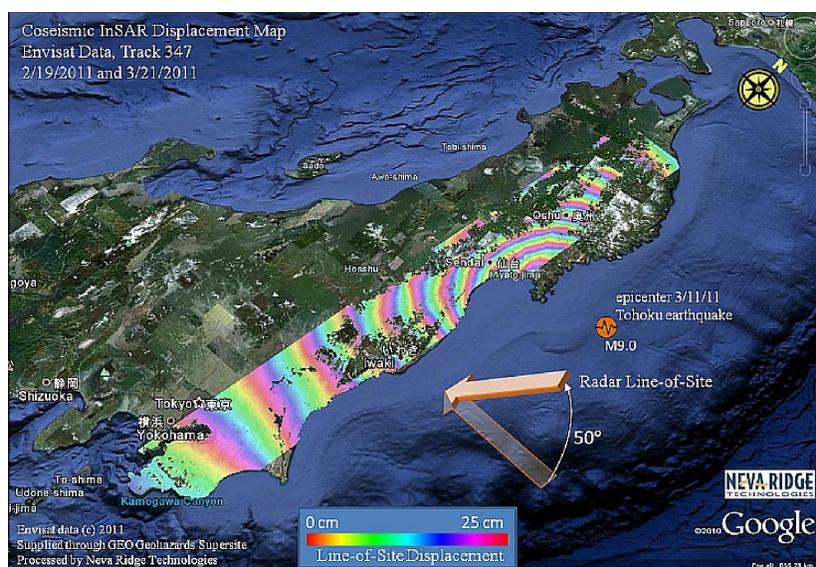


Figura 3.5: Interferograma sobre Japón, a partir de dos adquisiciones SAR tomadas en febrero y marzo de 2011, en el que se puede apreciar la deformación del terreno debida al terremoto de Sendai. [41].

En esta misión, que coincide en el tiempo con el aumento de la popularidad de internet, también es destacable el desarrollo de la ESA de herramientas para el procesamiento de las adquisiciones y su difusión a través de la web. De este modo, el segmento terrestre genera de diversos productos, que distribuye casi en tiempo real, mientras que la ESA comienza el desarrollo de software para la apertura y post-procesado de estos productos por los usuarios [37].

También en este contexto Japón actualiza su misión JERS-1 mediante los satélites **ALOS**. Estos incorporan sensores activos y pasivos cuya función principal es el mapeo cartográfico de grandes áreas, la investigación de recursos naturales y el monitoreo de desastres naturales. Es en esta última donde se focalizan los esfuerzos de la JAXA, en un país con tan alta actividad sísmica.

3.2. AVANCES TECNOLÓGICOS Y SEGUNDAS GENERACIONES

De este modo, en ALOS-1 (2006-2011) comparten plataforma un sensor SAR (PALSAR) y un óptico, que después se separan en el ALOS-2 (2014) con el sensor PALSAR-2 y ALOS-3 (Marzo 2023) que complementa la misión con un sensor óptico. ALOS-4 se encuentra en proceso de desarrollo y también embarcará un sensor actualizado PALSAR-3.

Características adicionales de las dos misiones presentadas en este punto se presentan en la Tabla 3.2

	ENVISAT	ALOS
Fecha de lanzamiento	Marzo 2002	ALOS-1: 2006 ALOS-2: 2014 ALOS-4: 2023
Organización	ESA (Europa)	JAXA (Japón)
Nº satélites	2	3
Nº órbitas	1	1
Tipo de órbita	Polar, heliosíncrona	Polar, heliosíncrona
Periodo [min]	100.6	98.51
Altura [km]	800	640
Tiempo de revisita [días]	35	14
Duración de la misión	12 años	Activa
Tamaño de antena SAR [m]	10 x 1.3	PALSAR-1: 8.9x3.1 PALSAR-2: 9.9x2.9 PALSAR-3: desconocido
Banda de operación	C	L
Frecuencia	5.3351 GHz	1236.5 - 1278.7 MHz
PRF [Hz]	1650-2100 Hz	1500 - 3000 Hz
Polarización	VV, HH, VH, HV (quad)	VV, HH, VH, HV (quad)
Ángulo de incidencia β [°]	15-45	8-70

Tabla 3.2: Características misiones ENVISAT y ALOS [39][42][43][44]

3.3. Constelaciones satelitales SAR

3.3.1. COSMO-Skymed: la primera constelación SAR

COSMO-Skymed (*COnstellation of small Satellites for Mediterranean basin Observation*) es una misión italiana formada por una constelación de 4 satélites SAR operando en banda X, lanzados entre 2007 y 2010, y constituye la primera constelación cuya plataforma está dedicada fundamentalmente al sensor SAR.

Esta misión se concibe como dual (civil y militar), con aplicaciones muy variadas en campos diversos: gestión de emergencias, vigilancia estratégica, gestión de recursos naturales, control de costas, topografía, así como la atención a las necesidades científicas, institucionales, o incluso de órganos comerciales [45]. Las principales características principales, que se describen a continuación, se presentan en la Tabla 3.3:

COSMO-Skymed		
Fecha de lanzamiento	2007-2010	Modos de operación y características Adquisición en una única polarización: Spotlight: Res: <1m Área: 10x10 km HIMAGE (Stripmap): Res: 3-15 m Ancho de barrido: 40 km WideRegion (ScanSAR) Res: 30 m A. barrido: 100 km HugeRegion (ScanSAR): Res: 100 m A. barrido: 200 km Adquisición en dos polarizaciones: Ping Pong (Stripmap): Res: 30 m A. barrido: 30 km
Organización	ASI (Italia)	
Nº satélites	4	
Nº órbitas	1	
Tipo de órbita	Polar, heliosíncrona	
Periodo [min]	97	
Altura [km]	619	
Tiempo de revisita	1-4 días (constelación completa)	
Duración de la misión	14 años (Extendida: 2 ^a gen)	
Tamaño de antena SAR [m]	5.7 x 1.4	
Banda de operación	X	
Frecuencia	9.6	
PRF [Hz]	Variable	
Polarización	HH, VV, HV y VH (quad)	
Ángulo de incidencia β [°]	Right looking (nominal): 25-50 Extended mode: 20-59.5	

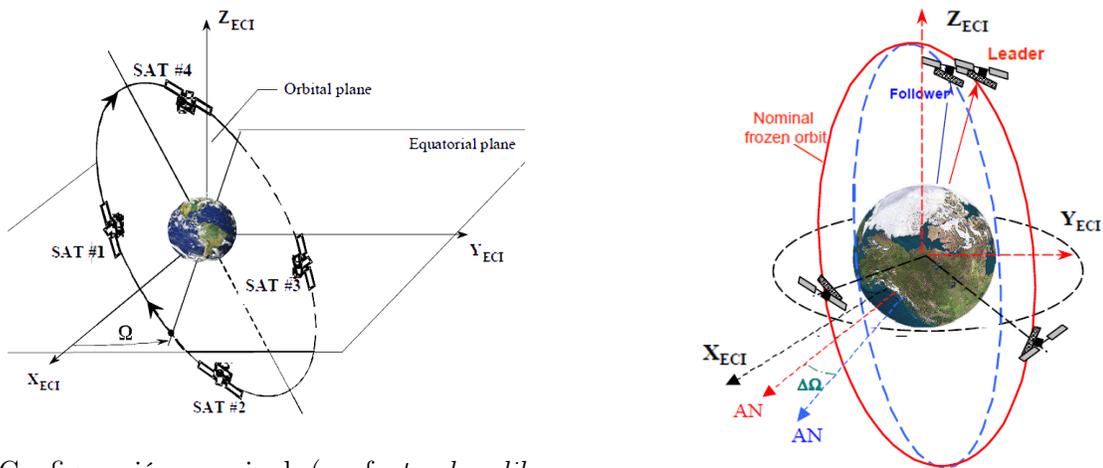
Tabla 3.3: Características constelación COSMO-Skymed [48][49]

3.3. CONSTELACIONES SATELITALES SAR

La antena, de 5.7 x 1.4 m, está formada por 40 *tiles*, con completa capacidad radiante y receptora en polarización vertical y horizontal, con un control digital de la forma del haz independiente del resto [49]. Esta configuración conforma una antena SAR eléctricamente orientable que permite diversos modos de adquisición en Stripmap, ScanSAR y Spotlight. Dentro de la adquisición Stripmap, introduce el modo *pingpong*, que permite, realizar una misma adquisición en dos polarizaciones de entre las cuatro disponibles (HH, HV, VV, VH).

En cuanto a la configuración orbital, esta constelación ofrece dos posibilidades, representadas gráficamente en la Figura 3.6 [47][48]:

- Configuración nominal: los cuatro satélites se encuentran equiespaciados en la misma órbita, con una fase orbital de 0° , 90° , 180° y 270° respectivamente. Es el mejor compromiso entre coste y rendimiento, y permite captar un determinado objetivo (con diferentes ángulos de incidencia) al menos dos veces al día.
- Configuración interferométrica (*interferometric constellation orbiting configuration*), que permite obtener adquisiciones del mismo objetivo con distintos ángulos de incidencia, con lo que se consiguen observaciones SAR en 3-D y realizar un análisis temporal de mayor calidad con adquisiciones menos separadas en el tiempo. [47]:
 1. Configuración *tandem*, desviando ligeramente la órbita de uno de los satélites (0.08°), que comienza a seguir de cerca a otro de los satélites (154 km), consiguiendo el par interferométrico de un objetivo casi al mismo tiempo
 2. Configuración *tandem-like*, modificando la fase orbital de uno de los satélites, para que se encuentre a 67.5° de otro, reduciendo el tiempo de revisita entre ambos satélites a 1 día (el tiempo de revisita de cada satélite es de 16 días), obteniendo un par interferométrico muy cercano en el tiempo.



(a) Configuración nominal (conf. *tandem-like* se consigue modificando la fase orbital del satélite #3)

(b) Configuración tandem

Figura 3.6: Diagrama de las posibles configuraciones orbitales de la constelación COSMO-SkyMed [47].

3.3. CONSTELACIONES SATELITALES SAR

Su naturaleza dual, y la multitud de partes a las que sirve este programa, exige una planificación detallada para evitar conflictos en el desarrollo de su operación. De este modo, el llamado *Centro Pianificazione e Controllo Missione* (CPCM) recibe las diferentes solicitudes o *Programming Requests*, que organiza dependiendo de las limitaciones vigentes, el modo operativo (*routine, crisis, very urgent*) o la configuración del sistema. A partir de esto se conciben tres niveles para la planificación de la misión [46][47]:

- Plan a largo plazo (16 días, frecuencia de revisita de 1 solo satélite), que cubre operaciones rutinarias o de baja prioridad, teniendo en cuenta maniobras orbitales, como la reconfiguración interferométrica.
- Plan a medio plazo (4 días, frecuencia de revisita de la constelación), donde se ubican en el tiempo las diferentes *Programming Requests*.
- Plan a corto plazo (24 horas), se extrae del plan a medio plazo, refinando la programación de actividades y se envía a la constelación. Aun así, esta programación está sujeta a la entrada de solicitudes de carácter *crisis*, que son enviadas a la constelación cada 12 horas o *very urgent*, que se envían de forma asíncrona.

Actualmente, el programa COSMO-SkyMed se encuentra activo y su continuidad está garantizada por una segunda generación, de otros 4 satélites en el mismo plano orbital que la primera. Dos de los primeros satélites han sido lanzados en 2019 y 2022, mientras que los otros dos están programados para 2024 y 2025 [50].

Esta nueva generación ofrecerá resoluciones de hasta 0,8 m y un nuevo modo experimental, QuadPol, que transmite en ambas polarizaciones y es capaz de registrar las componentes vertical y horizontal del eco simultáneamente, duplicando la PRF y alternando la polarización de la transmisión [50].

3.3.2. TerraSAR-X y TanDEM-X

Otra misión muy interesante por la configuración y objetivos que propone es la que en 2007 comienza la agencia espacial alemana, DLR. Esta misión está compuesta por el satélite TerraSAR-X, lanzado en 2007, y TanDEM-X (TerraSAR-X Add on for Digital Elevation Measurements), lanzado en 2010.

Su objetivo principal es especialmente concreto, pues propone la elaboración de un modelo digital de elevaciones (DEM) de cobertura global y de alta precisión, de acuerdo al estándar HRTI/DTED-3 (Tabla 3.4), estándar que hasta entonces solo era de alcanzar a nivel local mediante SAR aéreo o LiDAR [54].

Especificación	HRTI/DTED-3
Precisión vertical relativa	<2 m (pendiente <20 %) <4 m (pendiente >20 %)
Precisión vertical absoluta	<10 m
Precisión horizontal relativa	<3 m
Precisión horizontal absoluta	<10 m
Resolución espacial	12 m (1 arc sec)

Tabla 3.4: Especificación estándar HRTI/DTED-3 para la generación de DEM [54]

Este DEM se caracterizaría por ser homogéneo, con un sistema de referencia geodésico consistente a nivel global, sin problemas de decorrelación temporal (por el tiempo entre adquisiciones del par interferométrico) y con múltiples mejoras en aplicaciones científicas, comerciales, de vigilancia o de gestión de emergencias. De hecho, la comunidad científica reclamaba un producto de estas características, del que poder derivar nuevos parámetros bio y geofísicos, y también despertó el interés de otros programas internacionales [51].

Un escenario operacional como este exige una configuración orbital particular, que consiste en dos satélites orbitando manteniendo una formación cercana. En este caso se consigue combinando el desplazamiento orbital (modificando el nodo ascendente) y la separación radial (con diferente excentricidad) en la órbita de TanDEM-X respecto a la de TerraSAR-X (Figura 3.7a). Esto produce un movimiento relativo helicoidal entre ambos satélites a lo largo de la órbita. A este tipo de formación se le conoce como HELIX [52].

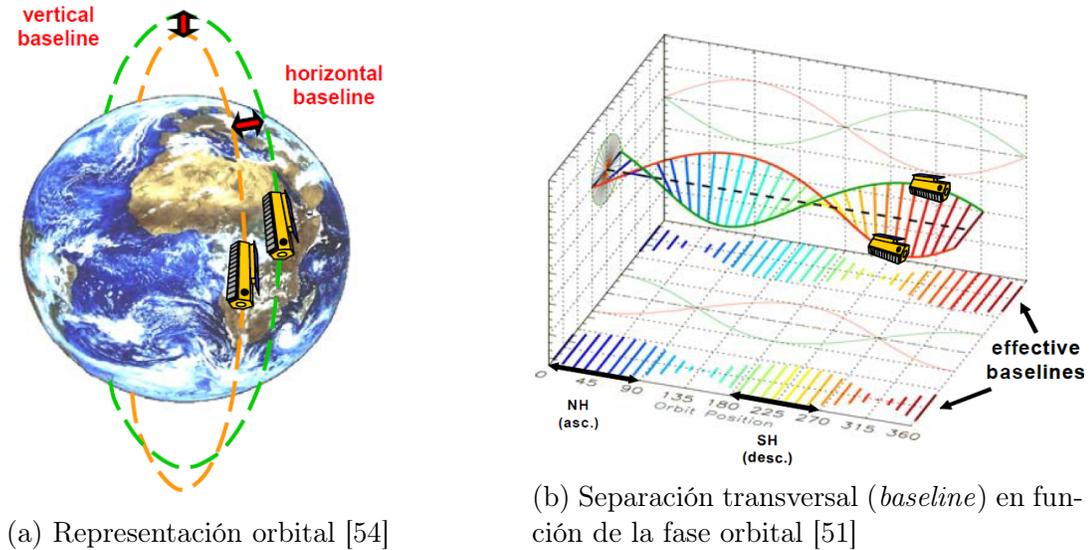


Figura 3.7: Detalles de la formación HELIX

Con esta configuración, capaz de garantizar además que los satélites no chocarán en los polos, podemos obtener un mapeo completo de la tierra con en 1 año. Como la misión conjunta de estos dos satélites está planeada para 3 años, se pueden obtener varios mapeos de las mismas zonas con diferentes *baselines*, facilitando el *phase unwrapping* posterior y por tanto garantizando una mayor precisión. Para enero de 2012 ya se había mapeado completamente toda la superficie terrestre.

Estos dispositivos pueden operar de forma independiente en los modos monoestáticos ya presentados en el Apartado 2.2 (Figura 3.8a) [52]:

- Modo biestático, en el que la superficie es iluminada por uno de los dos satélites y el eco es registrado por ambos (Figura 3.8b).
- Modo biestático alternante: como el modo biestático, la superficie es iluminada por uno de los satélites, y registrada por los dos. El satélite que envía la radiación va alternando (Figura 3.8c).

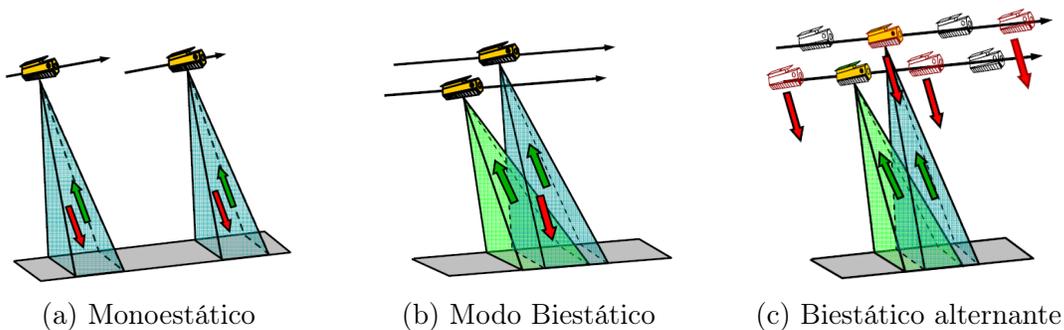


Figura 3.8: Modos de adquisición de TerraSAR-X y TanDEM-X

3.4. COPÉRNICUS: EL PROGRAMA EUROPEO DE OBSERVACIÓN TERRESTRE Y LOS SATÉLITES SENTINEL

Por último, en la Tabla 3.5 se completan especificaciones técnicas.

	TerraSAR-X y TanDEM-X
Fecha de lanzamiento	TerraSAR-X: 2007 TanDEM-X: 2010
Organización	DLR (Alemania)
Nº satélites	2
Nº órbitas	2 (HELIX)
Tipo de órbita	Polar, heliosíncrona
Periodo [min]	94.8 min
Altura [km]	514.8
Tiempo de revisita	11 días
Duración de la misión	Activa
Tamaño de antena SAR [m]	5 x 0.8
Banda de operación	X
Frecuencia	9.65 GHz
PRF [Hz]	Variable: 3000-6500
Polarización	HH, VV, HV, VH (quad)
Ángulo de incidencia β [°]	20-55

Tabla 3.5: Características constelación TerraSAR-X y TanDEM-X [53]

3.4. Copérnicus: el programa europeo de observación terrestre y los satélites Sentinel

Del desarrollo de la tecnología SAR espacial y sus aplicaciones, germina en 1998 el Manifiesto de Baveno. En este texto, la Comisión Europea, algunas agencias espaciales nacionales, la ESA y otros organismos proponen la creación de un programa de monitorización terrestre, con el objetivo de que Europa juegue un mayor papel en la gestión de cuestiones medioambientales [56].

De este manifiesto nace GMES (*Global Monitoring for Environmental Security*), que un año después cambia a *Global Monitoring for Environment **and** Security*, incorporando también así la prevención de riesgos naturales, prevención de conflictos, tareas de gestión de emergencias, rescate y ayuda humanitaria o la vigilancia de las fronteras Europeas [56].

En 2004, la ESA y la Comisión Europea acuerdan el desarrollo de un segmento espacial para GMES, a través de los satélites Sentinel. Sin embargo, no es hasta 2011 cuando la GMES inicia su actividad operacional. En 2012, cambia su nombre a Copernicus, que bajo el lema “*Europe’s eyes on Earth*”, lanza estos primeros satélites en 2014.

3.4. COPÉRNICUS: EL PROGRAMA EUROPEO DE OBSERVACIÓN TERRESTRE Y LOS SATÉLITES SENTINEL

El programa Copernicus ofrece 6 servicios principales[57]:

- *Copernicus Atmosphere Monitoring Service* (CAMS), que proporciona información continua y predicciones de la composición atmosférica, calidad del aire y radiación solar.
- *Copernicus Climate Change Service* (C3S), con una labor centrada en ofrecer información de calidad sobre el cambio climático, para ayudar a gobiernos, científicos y empresas a mitigar y combatir sus efectos.
- *Copernicus Marine Environment Monitoring Service* (CMEMS), que ofrece nuevas herramientas para observar, entender y anticipar las dinámicas del medio marino.
- *Emergency Management Service* (EMS), con una misión basada en apoyar a los actores implicados en la gestión de crisis, ayuda humanitaria y reducción de daños en catástrofes naturales o humanas.
- *Copernicus Land Monitoring Service* (CLMS), que proporciona acceso a información actualizada acerca del uso del suelo y variables relacionadas.
- *Copernicus Service for Security applications*, para apoyar las políticas europeas de seguridad.

Estos servicios se encuentran respaldados por un segmento espacial compuesto por las siguientes misiones [57] [55]:

- Sentinel-1, equipado con un sensor SAR en banda C para imaginería radar con aplicaciones terrestres, oceánicas y de gestión de emergencias.
- Sentinel-2, con un sensor óptico multiespectral (trece bandas).
- Sentinel-3, equipado con una serie de instrumentos (radar, altímetro, sensor óptico) a medir diferentes dedicados al análisis oceánico y seguimiento climático y medioambiental.
- Sentinel-4, 5 y 5P, dedicados al análisis de la composición atmosférica.
- Sentinel-6, enfocado, mediante altímetro radar, al análisis preciso de la topografía oceánica global.

Así, el Programa Copérnicus cuenta con la instrumentación necesaria para el desarrollo de productos a medida de las necesidades de sus usuarios. Además, múltiples convenios con otras agencias europeas e internacionales, permiten al programa usar los productos generados por otras misiones en el desarrollo de sus servicios.

Pasando a Sentinel-1, equipado con un sensor SAR, se trata de la primera constelación de este programa y está formada por dos satélites, Sentinel-1A y Sentinel 1-B. Más información relativa a esta constelación se presenta en la Tabla 3.6

3.4. COPÉRNICUS: EL PROGRAMA EUROPEO DE OBSERVACIÓN TERRESTRE Y LOS SATÉLITES SENTINEL

		Sentinel-1	
Fecha de lanzamiento	Sentinel-1A: 2014 Sentinel-1B: 2016	Modos de operación y características Stripmode (SM): Res: 5 m x 5 m Ancho barrido: 80 km Poalarización dual Interferometric Wide Swath (IW): Res: 5 x 20 m Ancho barrido: 250 km Polarización dual Extra Wide Swath (EW): Res: 25 x 100 m Ancho barrido: 400 km Polarización dual Wave mode (WV): Res: 5 x 20 m Adquisiciones de 20 x 20 m cada 100 km Polarización única	
Organización	ESA (Europa)		
Nº satélites	2		
Nº órbitas	1		
Tipo de órbita	Polar, heliosíncrona		
Periodo [min]	98.7		
Altura [km]	693		
Tiempo de revisita	12 días		
Duración de la misión	Activa		
Tamaño de antena SAR [m]	12.3 x 0.82		
Banda de operación	C		
Frecuencia	5.405 GHz		
PRF [Hz]	1000 - 3000		
Polarización	HH, VV, HV, VH (quad)		
Ángulo de incidencia β [°]	20 - 46		

Tabla 3.6: Características constelación Sentinel -1 [60]

Además, el segmento terrestre de Copérnicus genera 3 niveles de productos para los cuatro modos de operación [60]:

- **Level-0**, que consiste en la adquisición SAR “cruda” (*raw*), comprimida y sin enfocar. Para poder emplearse debe ser descomprimida y procesada con un procesador SAR.
- **Level-1**, que son los productos dirigidos al público general, con cierto grado de preprocesado. Son los que se han empleado para este proyecto y pueden ser:
 1. **Level-1 Single Look Complex (SLC)**: adquisición SAR enfocada y georeferenciada a partir de datos orbitales y de actitud, no han sido sometidos a *multi-look* y los píxeles conservan la información de amplitud y fase.
 2. **Level-1 Ground Range Detected (GRD)**: adquisición SAR también enfocada y georeferenciada y además sometida a *multi-look* y proyectada a partir de un modelo elipsoidal de la Tierra. Como consecuencia, existe una degradación en la resolución y se pierde la información de fase de los píxeles.

3.5. EL DESARROLLO DE CONSTELACIONES COMERCIALES Y RETOS FUTUROS

- **Level-2:** com información relacionada con corrientes marinas y campos de viento sobre la superficie marina.

Los productos generados por el segmento espacial de Copernicus se distribuyen al público general a través de una política de datos completa, abierta y gratuita (“*full, free and open data policy*”) introducida en 2013 [61]. De este modo, los productos generados por la agencia son accesibles para operadores tanto públicos como privados. En esta línea, la ESA ha desarrollado productos de software para facilitar las tareas de los usuarios en la apertura y manipulación de los productos. Este es el caso de la plataforma SNAP, con más de 500 mil descargas [58] y que ha sido la herramienta empleada en la parte experimental de este proyecto.

3.5. El desarrollo de constelaciones comerciales y retos futuros

En los últimos años, la industria espacial ha sido testigo de la proliferación de los microsátélites. Estas nuevas plataformas, con su menor peso y tamaño, permiten reducir costes tanto en su producción como en la logística asociada a su lanzamiento. Esto ha favorecido la introducción del sector privado en la industria, así como en el campo de la observación terrestre.

En este contexto, se han desarrollado múltiples misiones comerciales dispuestas a ofrecer nuevos servicios y también a colaborar con las agencias espaciales de todo el mundo. Un ejemplo de éxito es ICEYE, una empresa finlandesa que desde su fundación, ha puesto en órbita 26 satélites (hasta 2022) y planea otros 24 entre 2023 y 2024 [62].

Esta constelación es la más grande hasta la fecha en observación terrestre, y está formada por satélites de 85 kg con un instrumento SAR a bordo. Estos satélites operan en banda X, con polarización vertical y capacidad para ofrecer un periodo de revisita inferior a un día, ofreciendo seguimiento casi en tiempo real. El resto de características se presentan en la Tabla 3.7.

3.5. EL DESARROLLO DE CONSTELACIONES COMERCIALES Y RETOS FUTUROS

		ICEYE
Fecha de lanzamiento	2018 -	Modos de operación y características Stripmap: Res: 0.5 x 3 m Tamaño adquisición: 30 x 50 km Spot: Res: 0.5 x 0.25 m Tamaño adquisición 5x5 km Spot Extended Area: Res: 10 x 0.5 m Tamaño adquisición: 15 x 15 km Scan: Res: 15 x 15 m Tamaño adquisición: 100 x 100 km
Organización	ICEYE (Finlandia)	
Nº satélites	26 (Feb. 2023)	
Nº órbitas	-	
Tipo de órbita	Polar, heliosíncrona	
Periodo [min]	89	
Altura [km]	560 - 580	
Tiempo de revisita	1 día	
Duración de la misión	Activa	
Tamaño de antena SAR [m]	3.2 x 0.4	
Banda de operación	X	
Frecuencia	9.65	
PRF [Hz]	2000 - 10000	
Polarización	VV	
Ángulo de incidencia β [°]	15-35	

Tabla 3.7: Características constelación ICEYE [62]

ICEYE plantea un modelo de negocio en el cual los clientes pueden, según sus necesidades, elegir entre dos opciones: o bien adquirir capacidad operativa de una parte de la constelación, desarrollada para este fin, o bien comprar satélites propios, con capacidad operativa dedicada exclusivamente a las operaciones del cliente .

Esto abre la puerta al uso de la capacidad SAR por nuevos mercados, como el de los seguros, al que ofrecen soluciones personalizadas para la cuantificación de riesgos y daños (Figura 3.9). Además, esta empresa también ha firmado acuerdos de colaboración con instituciones y agencias espaciales de todo el mundo, también con el programa Copernicus en 2021 [63] .

3.5. EL DESARROLLO DE CONSTELACIONES COMERCIALES Y RETOS FUTUROS

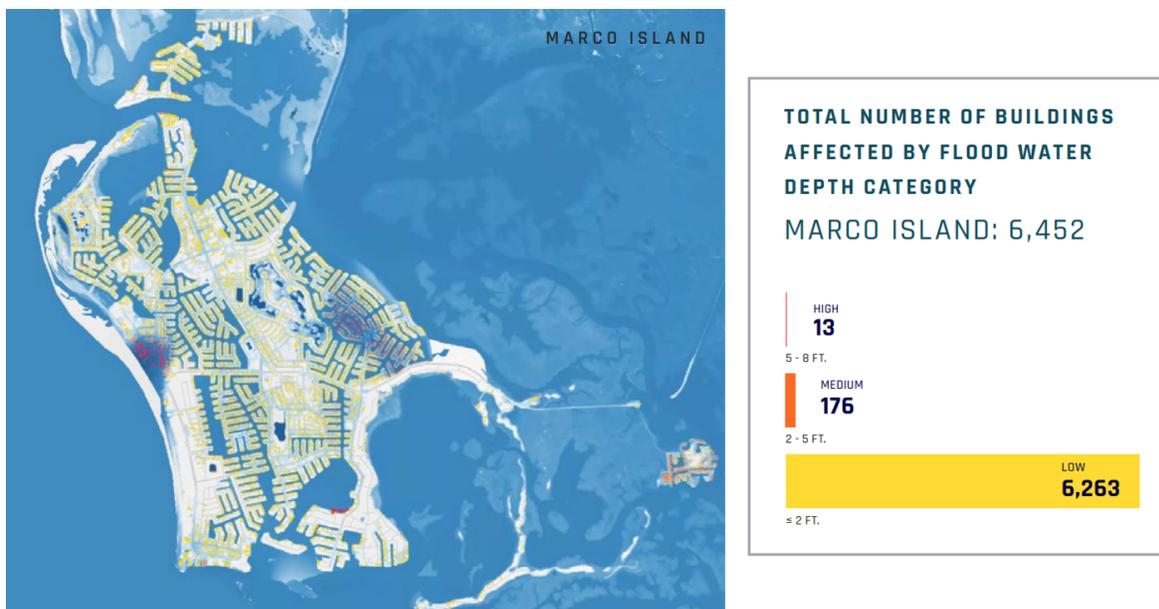


Figura 3.9: Cuantificación de daños en Marco Island (Florida, USA) ante las inundaciones provocadas por el huracán Ian (2022), a partir de imaginería SAR [64]

De este modo, es fácil concluir que el futuro de la observación terrestre satélites estará marcado, sin duda, por la colaboración público-privada, el desarrollo de nuevas aplicaciones y el empleo de su potencial por nuevos mercados.

Otros retos planteados por las agencias espaciales son [65]:

1. La unificación de formatos en la distribución de datos SAR, para lograr un cierto nivel de armonización entre agencias que permita la interoperabilidad de productos SAR.
2. En consecuencia con el anterior, el desarrollo de mecanismos que permita la planificación conjunta de misiones, cubriendo así las necesidades operacionales y evitando la superposición de misiones con el mismo objetivo.
3. Coordinación conjunta de los segmentos terrestres, compartiendo así capacidad operacional y facilitando tareas como calibración, validación o incluso recepción de datos.

Capítulo 4. Aplicación práctica

4.1. Descarga de los datos

El primer paso para la realización de los estudios que se abordan en este capítulo es la descarga de los datos necesarios para los distintos análisis y la presentación de resultados.

De este modo, se descargan los productos Sentinel-1 generados en el periodo a estudiar, y que se encuentran a disposición de los usuarios a través del Copernicus Open Access Hub (<https://scihub.copernicus.eu/>).

Esta aplicación, a través de su interfaz gráfica (Figura 4.1), permite realizar búsquedas avanzadas según localización, fecha de detección, tipo de producto, satélite, número de órbita relativa, polarización y modo de funcionamiento del sensor.

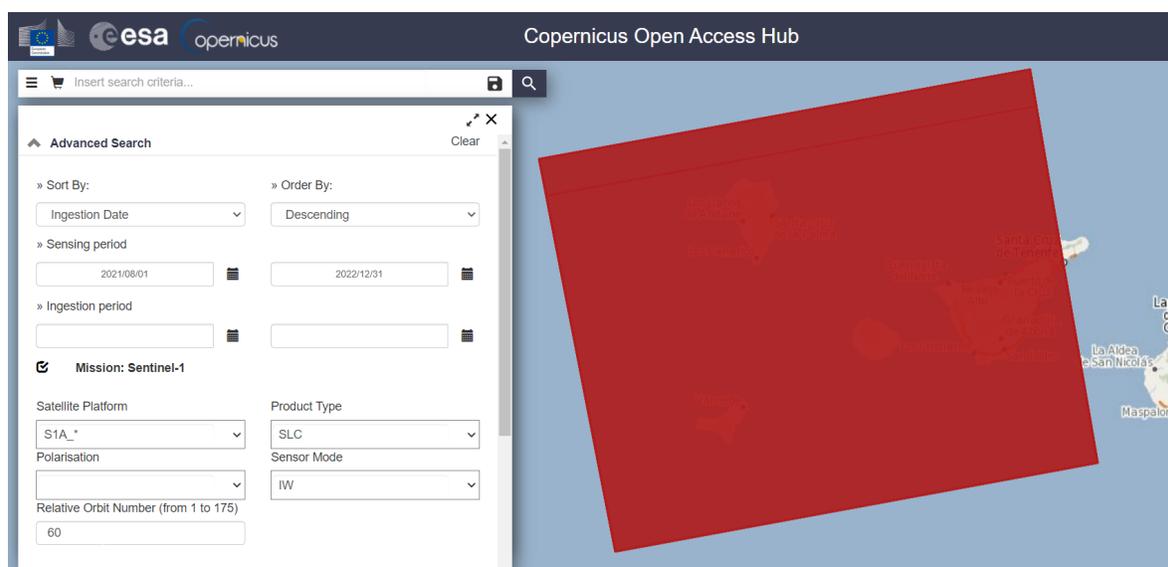


Figura 4.1: Interfaz gráfica y búsqueda avanzada Copernicus Open Access Hub

De este modo, para estos dos estudios se han escogido productos SLC y GRD producidos entre 01/08/2021 y 31/12/2021 a partir de las adquisiciones tomadas por la plataforma Sentinel-1 A en su órbita relativa número 60 con una configuración del sensor Interferometric Wide Swath (IW) (Tabla 4.1). Se emplean productos de una misma órbita y satélite para facilitar el procesado en cuanto a corrección geométrica, para garantizar que la escena es siempre observada con el mismo ángulo y evitar así inexactitudes.

4.2. ANÁLISIS DEL DESPLAZAMIENTO TERRESTRE

Fecha de detección (YYYY/MM/DD)	Tipo de producto	Nombre del fichero
2021-08-21	SLC	S1A_IW_SLC__1SDV_20210821T191349_20210821T191419_039332_04A529_6EC7
2021-09-14	SLC	S1A_IW_SLC__1SDV_20210914T191350_20210914T191420_039682_04B134_7407
2021-09-26	SLC	S1A_IW_SLC__1SDV_20210926T191350_20210926T191420_039857_04B716_885D
2021-10-08	SLC	S1A_IW_SLC__1SDV_20211008T191350_20211008T191420_040032_04BD28_CAE8
2021-10-20	SLC	S1A_IW_SLC__1SDV_20211020T191351_20211020T191420_040207_04C343_1935
2021-11-01	SLC	S1A_IW_SLC__1SDV_20211101T191350_20211101T191420_040382_04C94F_0F93
2021-11-13	SLC	S1A_IW_SLC__1SDV_20211113T191350_20211113T191420_040557_04CF6C_1DB8
2021-12-19	SLC	S1A_IW_SLC__1SDV_20211219T191349_20211219T191419_041082_04E179_123E
2021-12-31	SLC	S1A_IW_SLC__1SDV_20211231T191348_20211231T191418_041257_04E743_2B9F
2021-09-14	GRDH	S1A_IW_GRDH_1SDV_20210914T191350_20210914T191420_039682_04B134_91C1
2021-09-26	GRDH	S1A_IW_GRDH_1SDV_20210926T191350_20210926T191420_039857_04B716_2327
2021-10-08	GRDH	S1A_IW_GRDH_1SDV_20211008T191350_20211008T191420_040032_04BD28_25D2
2021-10-20	GRDH	S1A_IW_GRDH_1SDV_20211020T191351_20211020T191420_040207_04C343_BD6A
2021-11-01	GRDH	S1A_IW_GRDH_1SDV_20211101T191350_20211101T191420_040382_04C94F_DF2E
2021-11-13	GRDH	S1A_IW_GRDH_1SDV_20211113T191350_20211113T191420_040557_04CF6C_D9F5
2021-12-19	GRDH	S1A_IW_GRDH_1SDV_20211219T191349_20211219T191419_041082_04E179_8FC5

Tabla 4.1: Productos empleados en la elaboración de los estudios.

Una vez realizados los análisis, para la presentación de los resultados se van a emplear datos del centro de descargas del Instituto Geográfico Nacional (<https://centrodedescargas.cnig.es/>), así como algunos productos generados por el *Emergency Management Service* del programa Copernicus durante la erupción (<https://emergency.copernicus.eu/mapping/list-of-components/EMSR546>). Concretamente se van a emplear los datos siguientes:

- Red de carreteras nacional
- Modelo digital de elevaciones de la isla de La Palma con paso de malla de 25 metros (MDT25) en formato Raster
- Ortofoto de la isla de La Palma
- Focos volcánicos activos durante la erupción

4.2. Análisis del desplazamiento terrestre

En este primer análisis se estudiará la deformación terrestre previa a la erupción volcánica y la deformación total tras el evento. De este modo, se analizarán archivos SLC, captados por el satélite en su paso sobre la isla de La Palma Sentinel-1A los días 21 de Agosto, 14 de septiembre y 31 de diciembre de 2021.

En la Figura 4.2 se presenta el algoritmo empleado para este análisis. Los pasos seguidos se describen a continuación, tomando los datos de los días 21 de Agosto y 31 de diciembre, para después analizar los resultados obtenidos en ambos casos.



Figura 4.2: Algoritmo desarrollado en el análisis del desplazamiento terrestre estudiado

4.2.1. Descripción del algoritmo empleado

1. Preparación de la escena

El primer paso una vez se han cargado los archivos SLC en la aplicación SNAP, es recortar la superficie de interés para el estudio. Esto nos permite reducir el tamaño del archivo y agilizar todo el procesado posterior.

En el modo de adquisición con el que se han obtenido los productos a procesar (Interferometric Swath Wide), la antena emplea la técnica TOPSAR (Terrain Observation with Progressive Scans). En esta técnica, el terreno es observado por la antena mediante ráfagas (*bursts*), conmutando el haz de la antena entre los tres sub-barridos (*sub-swaths*) en los que se divide la imagen [66]. De este modo, la antena modifica la dirección del haz tanto en rango como en azimut, lo que resulta en una imagen más homogénea a lo largo del barrido [67]. Los tres *sub-swaths*, divididos en los distintos *bursts* pueden apreciarse en la Figura 4.3.

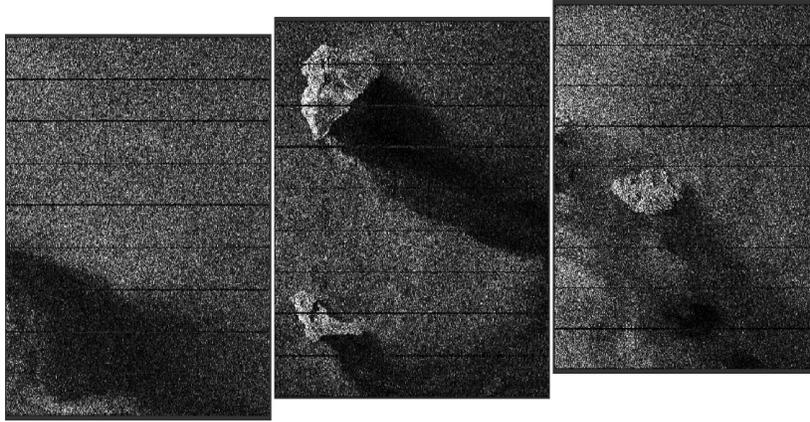


Figura 4.3: Imagen capturada por el satélite Sentinel-1A sin procesar

De este modo, mediante la herramienta SENTINEL-1 TOPSAR Split (Radar \rightarrow Sentinel-1 TOPS \rightarrow S-1 TOPS Split), podemos escoger el sub-swath y bursts necesarios para trabajar. La configuración de la herramienta se presenta en la Figura 4.4. Para este caso, en el que se estudiará la superficie completa de la isla de La Palma, se escogerán los *bursts* 7-9 del *subswath* 2 (IW2)

2. Corrección orbital

Como parte del preprocesado del producto, también es necesario hacer una corrección de la información orbital del satélite durante la adquisición.

Para el estudio interferométrico, se requiere un control estricto de la órbita, así como es necesario tener una información precisa de los vectores de estado orbital del satélite. Conocer con precisión la posición de la plataforma en el momento de la adquisición es fundamental para asegurar la sincronización temporal y espacial entre los píxeles cuya información de fase se va a comparar [68], y evitar errores radiométricos o geométricos entre adquisiciones separadas en el tiempo.

El Copernicus POD (Precise Orbit Determination) Service, desarrollado por la empresa GMV y operado en Tres Cantos, Madrid [71], genera los productos con la información de órbita, con distinta periodicidad según la precisión requerida [69].

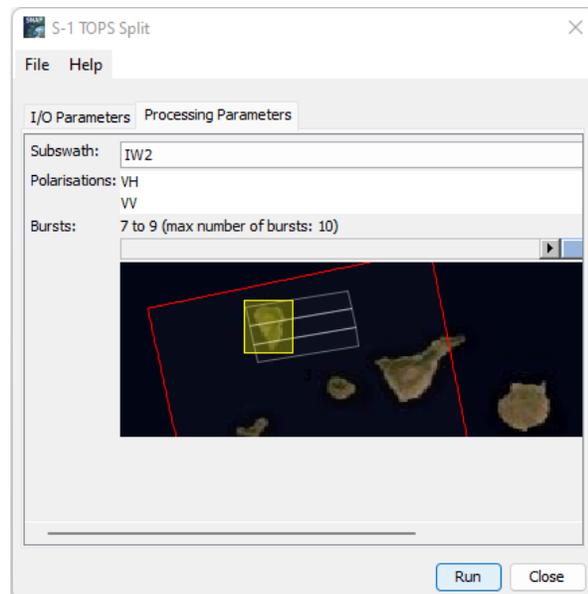


Figura 4.4: Configuración herramienta S-1 TOPS Split

De este modo, cada 30 minutos y a partir de la recepción de información GNSS del satélite, se genera un fichero preliminar (AUX_PREORB) con la información de órbita que alcanza una precisión 2D (acimut y rango) de 1 metro. Cada 3 horas se libera otro fichero, el *Restituted Orbit File*, (AUX_RESORB), con la que la precisión se aumenta hasta los 10 cm. Finalmente a los 20 días de la adquisición de los datos se genera el *Precise Orbit Ephemerides* (AUX_POEORB) que permite una precisión 3D de hasta 5 cm [70].

Con la herramienta Apply Orbit File, (Radar → Apply Orbit File), se actualizan los vectores de estado en los metadatos del fichero SLC, obteniendo información de posición y velocidad precisa [72].

3. Corrección

Una vez los productos tienen información precisa de posición y velocidad con la que han sido adquiridos, lo siguiente en el proceso interferométrico entre dos adquisiciones es la corrección.

Mediante la corrección se alinean los píxeles entre un par de imágenes SAR adquiridas con una separación espacial y/o temporal, lo que permite la determinación precisa de la diferencia de fase y la reducción de ruido [73].

De este modo, se remuestrea una de las imágenes (*slave*) en el marco de la segunda (*master*), demodulando la señal del *slave* y realizando una interpolación *sinc*, después la señal se vuelve a modular [74].

Para llevar a cabo este proceso, se emplea la herramienta de SNAP Sentinel-1 Back Geocoding (Radar → Corrección → S1 TOPS Corrección → S-1 Back Geocoding), que emplea la información orbital precisa de ambos productos y un modelo digital de elevaciones para alinear las imágenes.

Esta herramienta (Figura 4.5), una vez seleccionados los productos a corregir, permite seleccionar el modelo digital de elevaciones (MDE) así como el tipo de interpolación realizado en el remuestreo. En este caso se va a emplear un MDE con paso de malla de 1 segundo de arco (≈ 30 m) y una interpolación *sinc* truncada de 21 puntos para conseguir una mayor precisión.

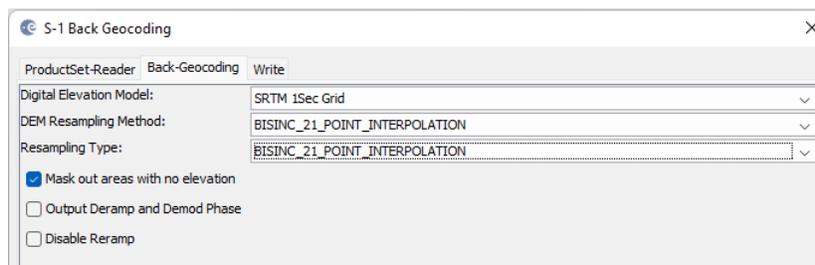


Figura 4.5: Configuración herramienta Back-Geocoding

4. Fusión de la imagen

Como se ha comentado en pasos anteriores, la técnica TOPSAR con la que la antena adquiere las imágenes SAR genera tres *sub-swaths* divididos en 10 *bursts* (productos IW), los cuales se procesan como imágenes SLC distintas.

Entre *bursts* adyacentes, existe un solapamiento de entre 50 y 100 muestras. La fusión en rango se realiza tomando la mitad del solapamiento de cada *burst* [76]. Para la fusión entre *sub-swaths* (en acimut) se realiza según la posición *zero-Doppler*.

Este proceso se realiza mediante la herramienta S-1 TOPS Deburst (Radar → Sentinel-1 TOPS → S-1 TOPS Deburst). El resultado (antes de realizar el interferograma) puede apreciarse en la Figura 4.6

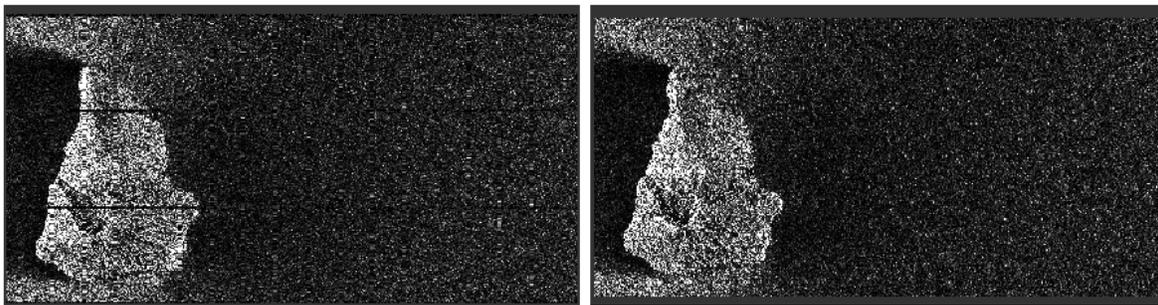


Figura 4.6: Imagen SAR antes y después de aplicar la herramienta S-1 TOPS Deburst

5. Creación del interferograma

Una vez realizado lo que se puede considerar como preprocesado, el producto resultante (Figura 4.7) contiene las bandas I, Q y de intensidad para las dos adquisiciones.

Es a partir de este producto que se computa el interferograma. Para ello, se emplea el operador Interferogram Formation (InSAR Operator) (Radar → Interferometric → Products → Interferogram Formation) [79].

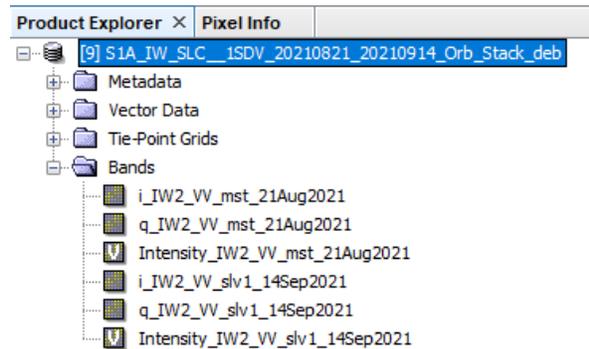


Figura 4.7: Producto después del preprocesado

Además, mediante este operador (Figura 4.8) también se realiza la sustracción de la componente de tierra plana (fase inducida por la curvatura de la tierra en la adquisición [77]) y de la componente topográfica de la fase (fase producida por la topografía natural del terreno, extraída de un DEM [78]). De este modo el interferograma únicamente muestra la diferencia de fase propia de la deformación entre las dos escenas estudiadas.

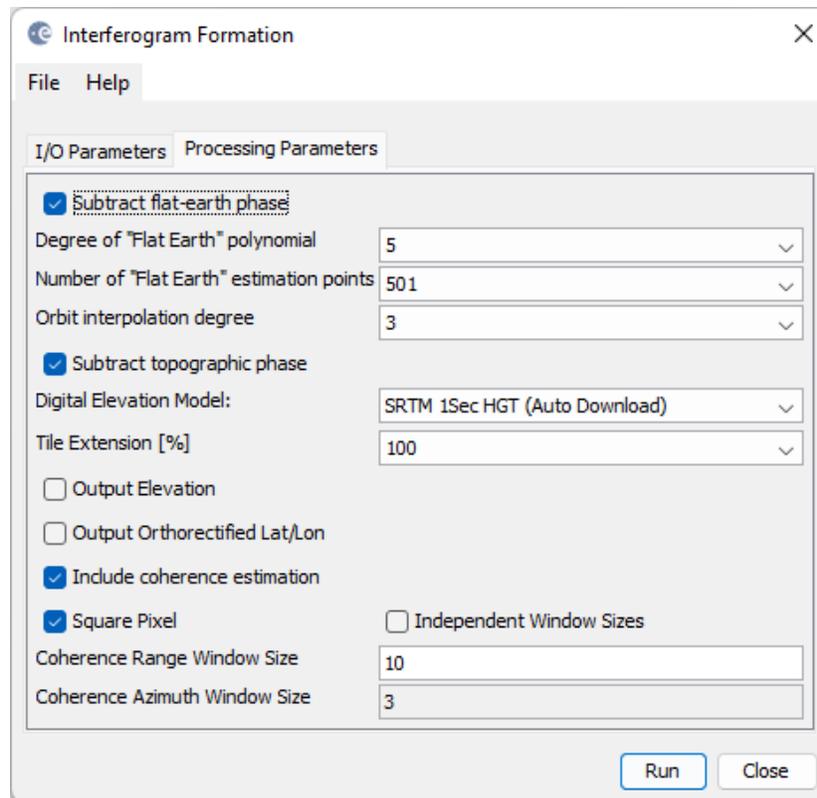


Figura 4.8: Herramienta Interferogram Formation para la creación del interferograma y la sustracción de la componente topográfica y de tierra plana de la fase.

6. Filtro Goldstein

Una vez creado el interferograma, para mejorar la precisión de este, se emplea el filtro Goldstein, presentado por Richard M. Goldstein y Charles L. Werner en 1998. Este algoritmo de filtrado adaptativo consigue reducir el ruido de fase de forma drástica [80].

El ruido de fase puede tener diversas fuentes:

- **Contribución atmosférica:** la variación de las condiciones de humedad, temperatura y presión entre dos adquisiciones separadas en el tiempo pueden alterar el trayecto de la onda, provocando imprecisiones en la medición de altitud y deformación [82].
- **Diferente ángulo de adquisición:** dependiendo de la resolución del pixel p_g , existe una distancia crítica entre adquisiciones (*critical baseline*) a partir de la cual la fase es completamente ruidosa [82]. Es por esto que para este estudio se han elegido adquisiciones procedentes de la misma órbita y satélite.
- **Decorrelación temporal de la escena:** cambios relacionados con variaciones del suelo (cultivos) o del follaje en bosques puede suponer una seria limitación a las aplicaciones del interferograma [80].

En la Figura 4.9 se observa el resultado de este filtrado.

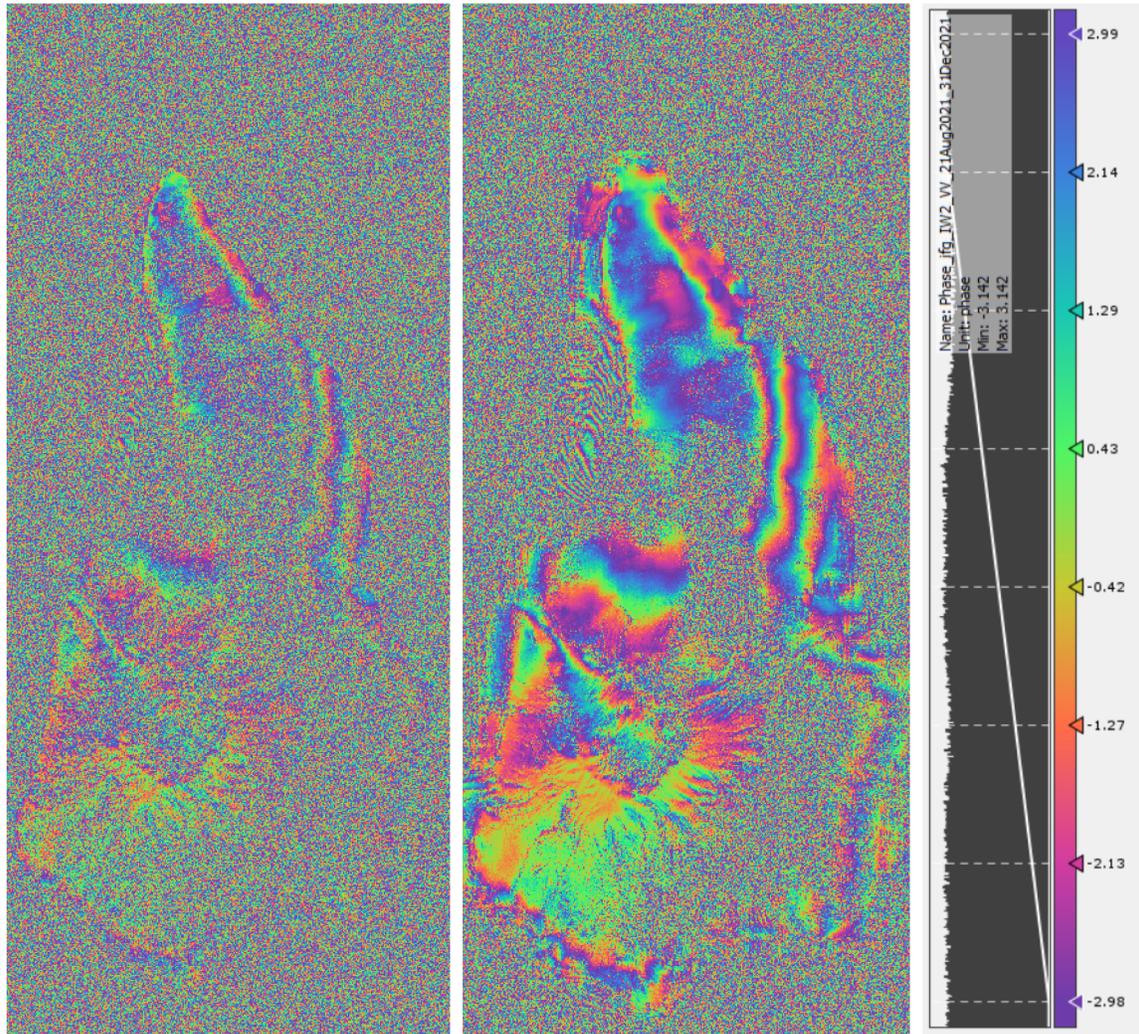


Figura 4.9: Interferograma antes (izquierda) y después (derecha) de aplicar el filtrado Goldstein al interferograma

7. Tratamiento de fase

Como se puede observar en la leyenda del interferograma de la Figura 4.9, este proporciona una medida ambigua de la fase, ya que esta solo es observable en un espacio cíclico (2π rad) [84].

Por lo tanto, denominando ϕ^w a esta fase ambigua, el valor de la fase real vendrá dado por [85]:

$$\phi = \phi^w + 2\pi k \quad (4.1)$$

El desenrollado de fase o *unwrapping* es el proceso por el cual se estima el valor de k [85]. Es decir, es trasladada a un rango completo de números reales [84].

4.2. ANÁLISIS DEL DESPLAZAMIENTO TERRESTRE

Para llevar a cabo esta labor, se va a emplear la herramienta SNAPHU, una implementación del algoritmo estadístico de flujo de red desarrollado por Chen y Zebker en la universidad de Stanford. Este algoritmo plantea el *unwrapping* como un problema de optimización que resuelve de forma iterativa a través de tres modelos estadísticos diferentes [86].

De este modo, en la aplicación SNAP, este proceso se lleva a cabo en tres pasos:

- SNAPHU Data Export (Radar → Interferometric → Unwrapping → Snaphu Export): exporta las bandas a procesar (interferograma) y un fichero de configuración con los parámetros necesarios en la ejecución del algoritmo.
- SNAPHU Unwrapping (Radar → Interferometric → Unwrapping → Snaphu Unwrapping): desarrolla el algoritmo propiamente dicho, dividiendo la banda en una cuadrícula (*tiles*) que procesa separadamente. Después, detecta y corrige los posibles desfases entre regiones en un segundo problema de optimización para asegurar que la solución final es la más probable [83].
- SNAPHU Import (Radar → Interferometric → Unwrapping → Snaphu Import): importa al producto la banda del interferograma procesada, con la información absoluta de fase para cada píxel.

En la Figura 4.10 se puede observar el interferograma después de ser procesado por el algoritmo.

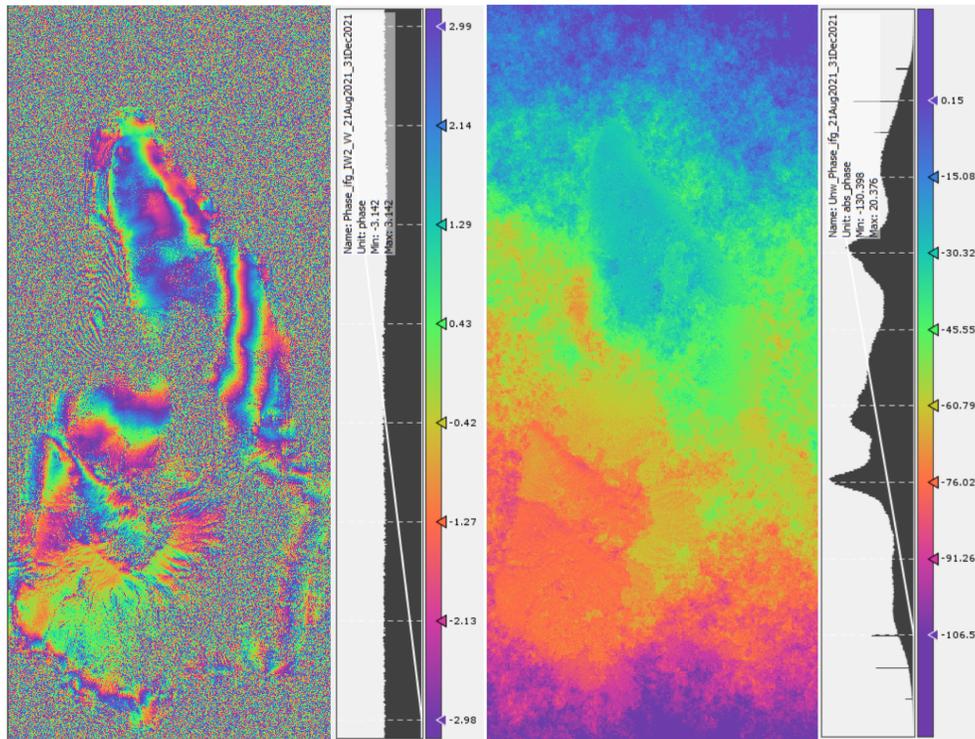


Figura 4.10: Interferograma antes (izquierda) y después (derecha) de aplicar el proceso de *Unwrapping*

8. Conversión de fase a desplazamiento

Durante la creación del interferograma se eliminó la fase debida a la topografía del terreno a través de un modelo digital de elevaciones. Es por esto que la fase obtenida a partir del *unwrapping* corresponde únicamente al desplazamiento producido entre ambas adquisiciones como consecuencia de la actividad volcánica en la isla.

De este modo, a través de la herramienta Phase to Displacement (Radar → Interferometric → Products → Phase to Displacement), calcula el desplazamiento d_v a partir de la diferencia de fase absoluta ($\Delta\phi_d$) contenida en cada píxel y la longitud de onda (λ) del sistema SAR según:

$$d_v = -\frac{\lambda}{4\pi}\Delta\Phi_d \quad (4.2)$$

El resultado puede observarse en la Figura 4.11.

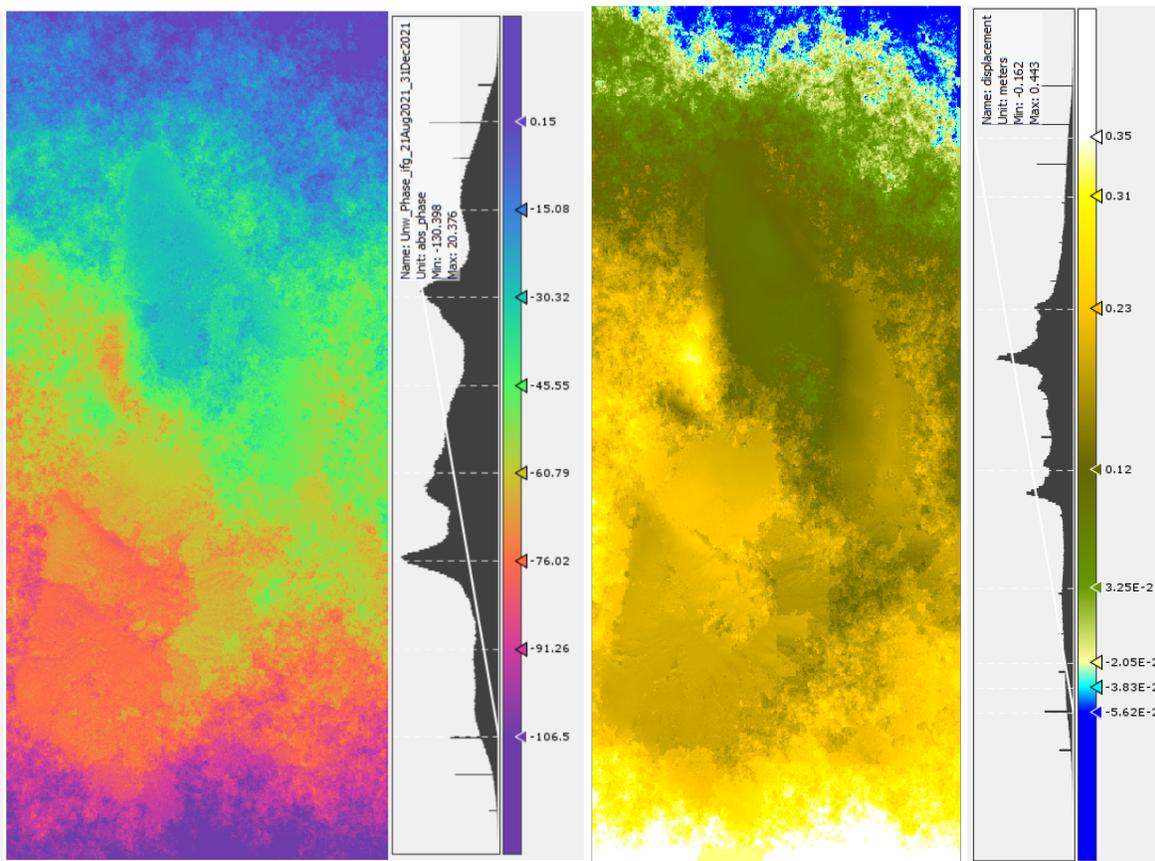


Figura 4.11: Producto antes (izquierda) y después (derecha) de aplicar la conversión de fase a desplazamiento

9. Ortorectificación y geocodificación

El último paso consiste en realizar las distorsiones geométricas generadas por la topografía del terreno y el ángulo de incidencia, lo que se conoce como ortorectificación, para que la representación geométrica de la imagen sea lo más similar posible a la realidad. También se ha de realizar una geocodificación para pasar la imagen a coordenadas geográficas [87].

Esto se realiza a través de la herramienta Range Doppler Terrain Correction (Radar → Geometric → Range-Doppler Terrain Correction), que a partir de los metadatos de la imagen (condiciones de la adquisición, vectores orbitales de estado) aplica un algoritmo de ortorectificación Range-Doppler para estimar la geolocalización precisa de los píxeles [87].

El resultado final, el cual será exportado a la aplicación ArcMap para su presentación en forma de mapa, puede observarse en la Figura 4.12

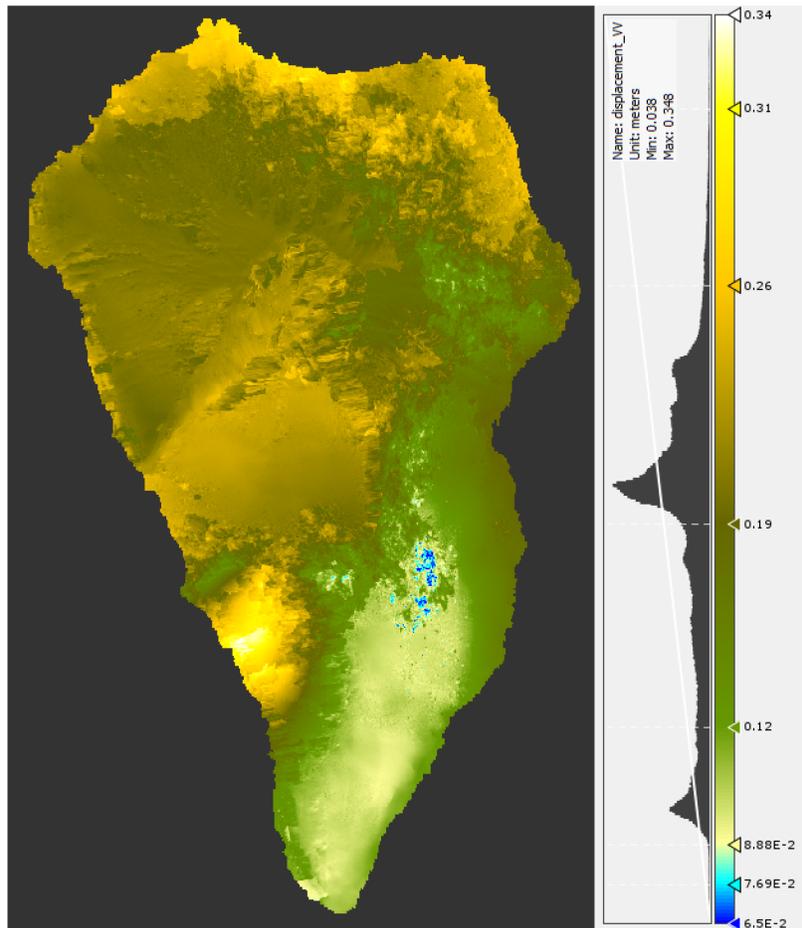


Figura 4.12: Producto final tras realizar la ortorectificación y geocodificación.

4.2.2. Resultados

Para presentar los resultados en formato mapa, se emplea el software ArcMap. Para ello, es necesario exportar la banda con la información de desplazamiento en formato GeoTiff (.tif).

Una vez importada la capa en ArcMap, se establece la forma en la que se representa la información (colores y rango) en las propiedades de capa, como se presenta en la Figura 4.13

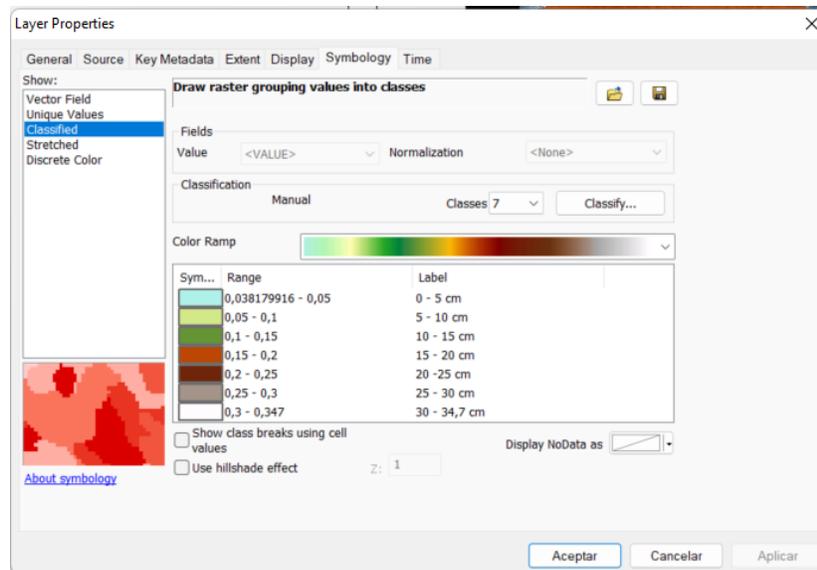
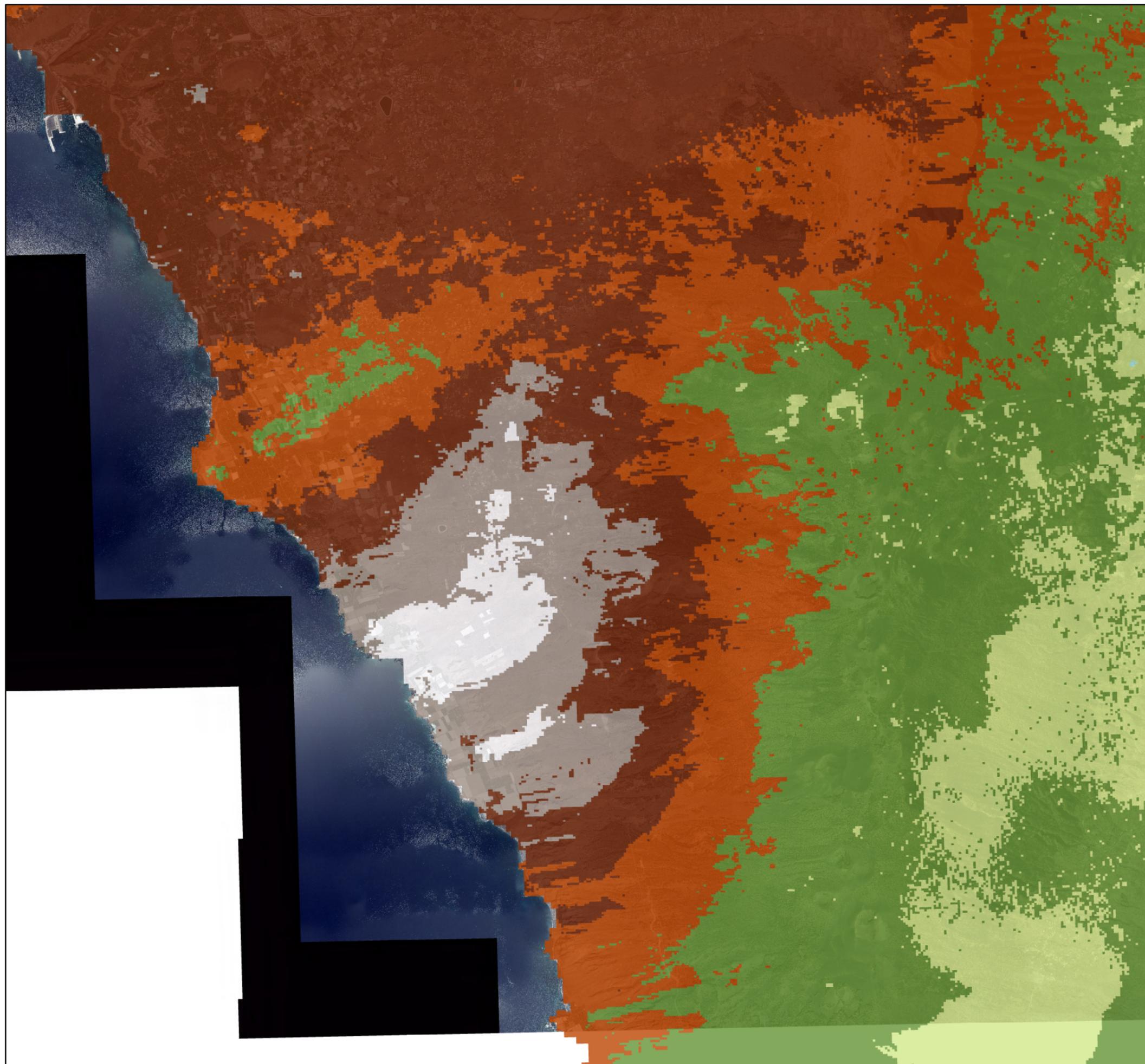


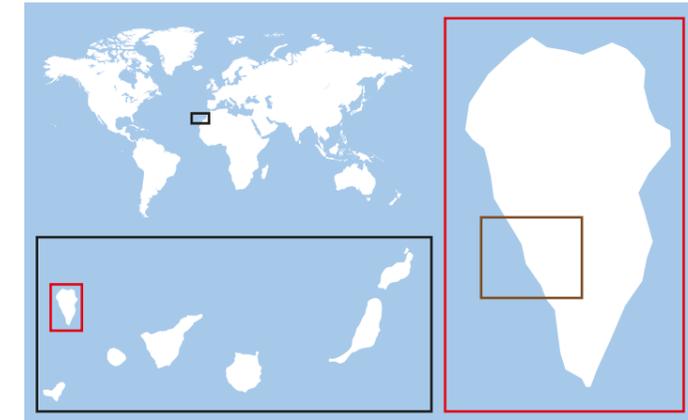
Figura 4.13: Representación de la información de desplazamiento terrestre en ArcMap

Para la generación del mapa, se superpone esta capa sobre la ortofoto de la isla, y se emplea el asistente de ArcMap para añadir el resto de elementos (escala, leyenda, indicación del norte geográfico). El resultado final se presenta a continuación:

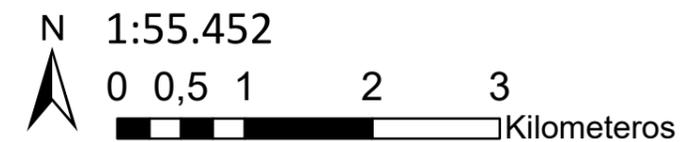


**Evolución del desplazamiento terrestre
(21 agosto - 31 diciembre 2021)
mediante interferometría SAR
Erupción volcánica de la isla de La Palma**

LA PALMA (ISLAS CANARIAS)- ESPAÑA



Información cartográfica



Sistema de coordenadas:
REGCAN95 UTM Zona 28N

Leyenda

-  0 - 5 cm
-  5 - 10 cm
-  10 - 15 cm
-  15 - 20 cm
-  20 - 25 cm
-  25 - 30 cm
-  30 - 34,7 cm



TFG- Grado en Ingeniería Aeroespacial
**SATÉLITES DE OBSERVACIÓN DE LA
TIERRA. EVOLUCIÓN DE LA ERUPCIÓN
VOLCÁNICA DE LA PALMA**

García Ruiz, Pedro José

4.3. Identificación de la superficie cubierta por lava y análisis de daños

En este segundo análisis se va a analizar la evolución de la erupción en cuanto a superficie cubierta por la lava durante la emergencia. A partir de la delimitación de las zonas afectadas se realizará una cuantificación de daños.

Para esta labor se analizarán productos GRD y SLC obtenidos por el satélite Sentinel-1A en su paso sobre la isla de La Palma en el periodo comprendido entre el 14 de septiembre y el 19 de diciembre de 2021.

El método para este análisis será el *Multitemporal Coherence Analysis* (MTC). El MTC consiste en una composición de color RGB en la que se combina un análisis de la coherencia y de la amplitud entre dos adquisiciones separadas en el tiempo [89].

De este modo, en un MTC se realiza un análisis de la coherencia, que consiste en la comparación de amplitud y fase entre los píxeles de dos adquisiciones. Este análisis, que se representa en azul, se combina con amplitud detectada en la primera adquisición (verde) y en la segunda (rojo). Por lo tanto, aquellas zonas donde se ha producido un cambio significativo y la coherencia es baja

A continuación se presenta el algoritmo seguido para el tratamiento de los productos y la generación del MTC en la aplicación SNAP. Este algoritmo se ha realizado para 7 pares de adquisiciones cuya fecha de adquisición se presenta en la Tabla 4.2

Pares analizados mediante MTC		
Nº	Fecha adquisición 1	Fecha adquisición 2
1	14/09/2021	26/09/2021
2	26/09/2021	08/10/2021
3	08/10/2021	20/10/2021
4	20/10/2021	01/11/2021
5	01/11/2021	13/11/2021
6	13/11/2021	19/12/2021

Tabla 4.2: Información temporal de los pares analizados para la creación de los MTC

4.3.1. Descripción del algoritmo empleado

En este procesado, se tratarán de forma paralela los productos SLC y GRD, que en ultima instancia se corregistran para generar el MTC. De este modo, se sigue el esquema de la Figura 4.14.

4.3. IDENTIFICACIÓN DE LA SUPERFICIE CUBIERTA POR LAVA Y ANÁLISIS DE DAÑOS

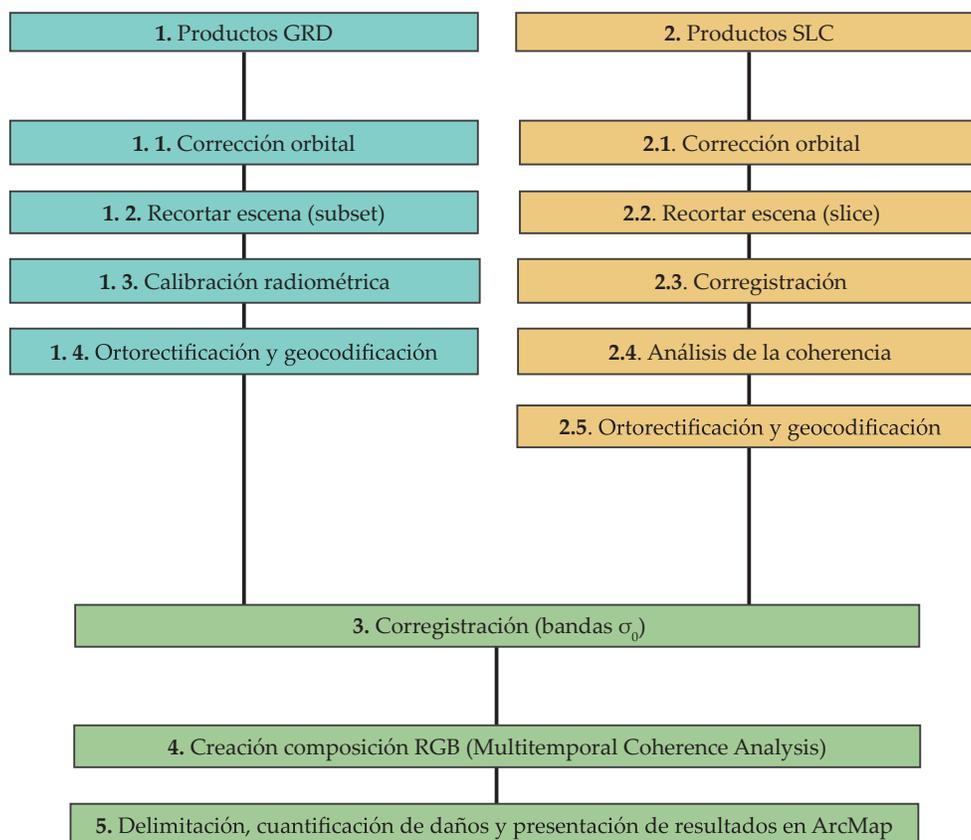


Figura 4.14: Algoritmo desarrollado en la identificación de la superficie cubierta por lava y el análisis de daños

En la descripción se omitirán aquellos pasos cuya razón de ser y funcionamiento se han descrito en el algoritmo anterior, excepto si existe alguna variación en los parámetros o en las herramientas empleadas.

1. Procesado GRD

1.1. Preparación de la escena y calibración radiométrica

Los productos GRDH ya han sido sometidos a un proceso de preprocesado (Figura 4.15), por lo que no es necesario seleccionar determinados *bursts*, si no que podemos realizar un recorte más focalizado sobre la zona de interés, reduciendo así el tamaño y agilizando el procesamiento posterior.

Para esto se utiliza la herramienta Subset (**Raster** \rightarrow **Subset**), a partir de la cual podemos seleccionar las coordenadas geográficas del recorte. Las coordenadas seleccionadas se presentan en la Figura 4.16.

4.3. IDENTIFICACIÓN DE LA SUPERFICIE CUBIERTA POR LAVA Y ANÁLISIS DE DAÑOS

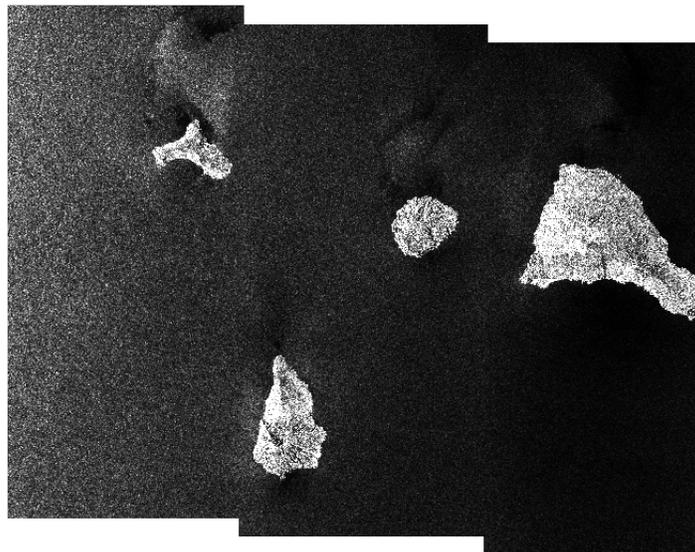


Figura 4.15: Producto GRDH (Banda Intensity_VV)

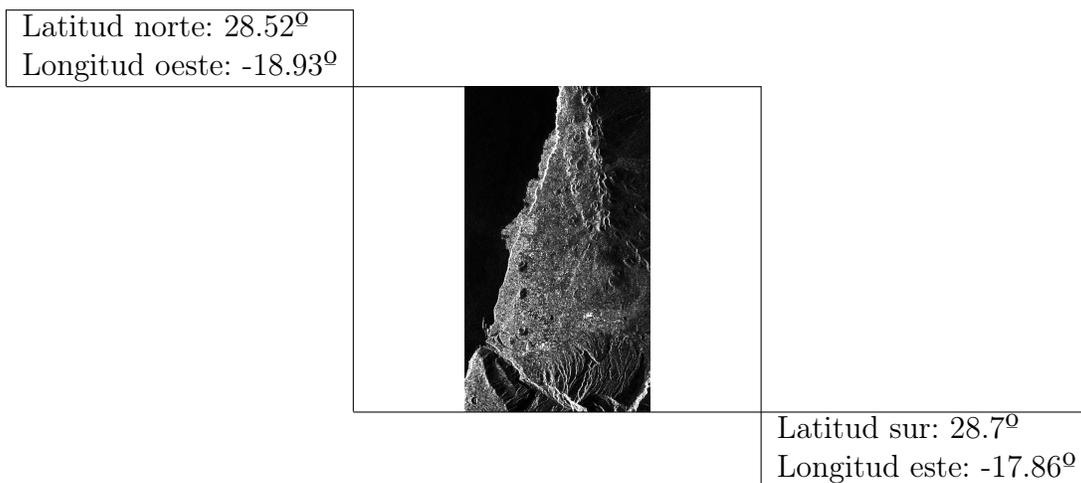


Figura 4.16: Coordenadas geográficas seleccionadas para el recorte del producto

Este proceso se aplica a los 9 productos GRDH que se utilizan en el análisis.

En el análisis comparativo de adquisiciones separadas temporalmente entre sí, es fundamental que el valor de los píxeles de las escenas estén directamente relacionado con la retrodispersión del superficie de forma normalizada [91].

Esto se realiza mediante el operador Calibration (Radar → Radiometric → Calibrate), que deshace el escalado de los píxeles introducido durante la creación del producto y reintroduce un escalado deseado.

4.3. IDENTIFICACIÓN DE LA SUPERFICIE CUBIERTA POR LAVA Y ANÁLISIS DE DAÑOS

Para las imágenes tomadas por Sentinel-1, los productos Level-1, incluyen los *Calibration Annotation Data Set* (CADS) con la información necesaria para realizar la normalización a partir de tablas de consulta (*lookup tables*) [91].

De este modo, se va a realizar una normalización que transforma la reflectividad radar en la sección recta-radar (σ_0) para cada píxel según:

$$\sigma_0(i) = \frac{DN(i)^2}{A(i)_\sigma^2} \quad (4.3)$$

siendo DN(i) o Digital Number la amplitud del píxel para productos GRDH, A(i) el valor de la tabla para un píxel determinado o la interpolación bilineal de esta [90].

De este modo, este operador genera una nueva banda con la información σ_0 para la polarización deseada.

2. Procesado SLC

2.1. Tratamiento de la escena y estimación de la coherencia

Para esta aplicación, el área cubierta por la lava está comprendida dentro de un único *burst*, por lo que no habrá que realizar una fusión de la imagen como en la aplicación anterior. Tras realizar la corrección orbital y corregir las imágenes en pares, como se ha hecho para los productos GRD, se puede proceder a analizar la coherencia entre adquisiciones.

El análisis de la coherencia permite identificar cambios en dos imágenes SAR corregidas procedentes de adquisiciones separadas temporalmente.

Si suponemos dos píxeles procedentes de dos adquisiciones SAR separadas temporalmente del objetivo en la posición (m, n) , la coherencia $C(m, n)$ viene dada por la función de correlación cruzada compleja, que puede expresarse como:

$$C(m, n) = \gamma(m, n) \cdot e^{-j\beta(m, n)} \quad (4.4)$$

donde el módulo $0 \leq \gamma(m, n) \leq 1$ es la medida de la coherencia temporal para el píxel (m, n) . La fase $\beta(m, n)$ indica la diferencia de fase efectiva media entre adquisiciones (sin ruido) [92].

La estimación de coherencia se realiza en SNAP a partir de la herramienta Coherence estimation (Radar \rightarrow Interferometric \rightarrow Products \rightarrow Coherence Estimation). Dando lugar a la Figura 4.17.

Una vez se ha estimado la coherencia, se realiza también una corrección radiométrica para generar otra banda σ_0 , que nos permitirá combinarla con el resultado de los productos GRD

4.3. IDENTIFICACIÓN DE LA SUPERFICIE CUBIERTA POR LAVA Y ANÁLISIS DE DAÑOS

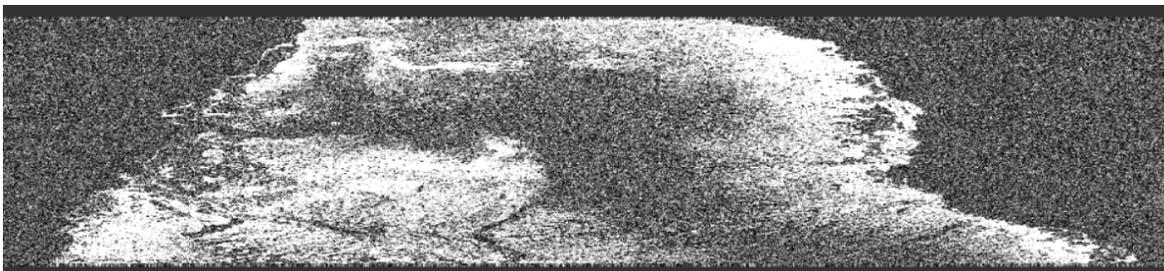


Figura 4.17: Estimación de la coherencia. Los píxeles más blancos indican una mayor coherencia entre el par de adquisiciones SAR.

3. Corrección de productos GRD y SLC

Una vez se han realizado ambos procesados, es necesario unir en un producto las tres bandas generadas: las las bandas σ_0 de las adquisiciones a estudiar y estimación de la coherencia entre ambas. Para ello, se emplea la herramienta Create Stack (Radar \rightarrow Coregistration \rightarrow Stack Tools \rightarrow Create Stack). Las bandas en el producto generado pueden observarse en la Figura 4.18.

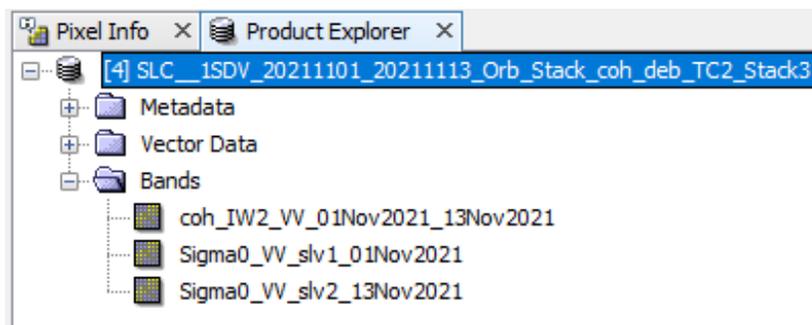


Figura 4.18: Bandas en el producto generado tras la coregistración, a partir del cual se genera el producto MTC

4. Creación composición RGB

A partir del producto generado con las bandas σ_0 y de coherencia por pares temporales, se generan las composiciones RGB a partir de los cuales se realizará la delimitación del área cubierta por la lava. En esta composición, el análisis de coherencia se asigna al canal azul, mientras que las bandas σ_0 se asignan a los canales rojo (adquisición más reciente) y verde (adquisición más antigua).

La composición se crea haciendo clic derecho en el nombre del producto en el explorador y seleccionando **Open RGB Image Window**. La configuración de esta herramienta se presenta en la Figura 4.19.

4.3. IDENTIFICACIÓN DE LA SUPERFICIE CUBIERTA POR LAVA Y ANÁLISIS DE DAÑOS

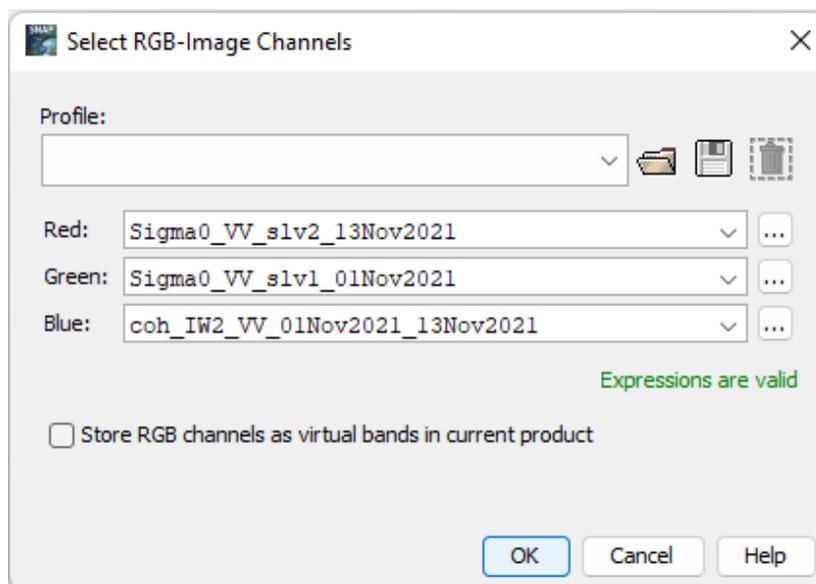


Figura 4.19: Configuración composición RGB

Un recorte del producto generado para las adquisiciones del 1 y 13 de noviembre de 2022 puede observarse en la Figura 4.20

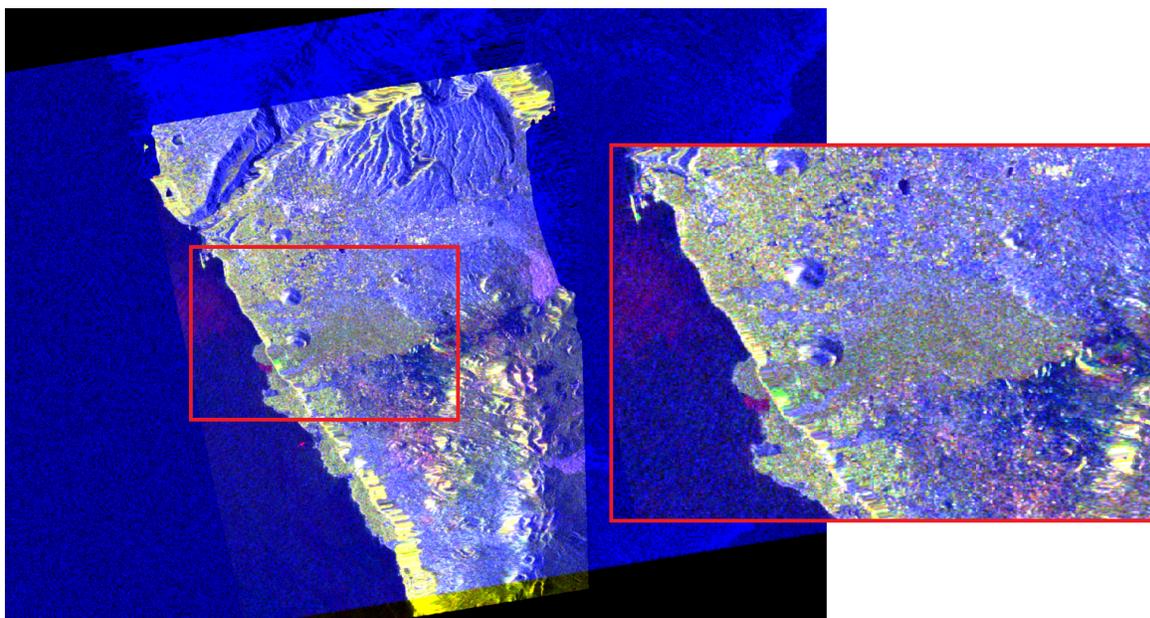


Figura 4.20: *Multitemporal Coherence Analysis* mediante Composición RGB para las adquisiciones del 1 y 13 de Noviembre de 2021.

4.3. IDENTIFICACIÓN DE LA SUPERFICIE CUBIERTA POR LAVA Y ANÁLISIS DE DAÑOS

4.3.2. Resultados

Para realizar la cuantificación de daños y presentar los resultados en formato mapa, se emplea el software ArcMap. Para ello, es necesario exportar las bandas RGB del *MultiTemporal Coherence Analysis* en formato GeoTiff (.tif) desde SNAP.

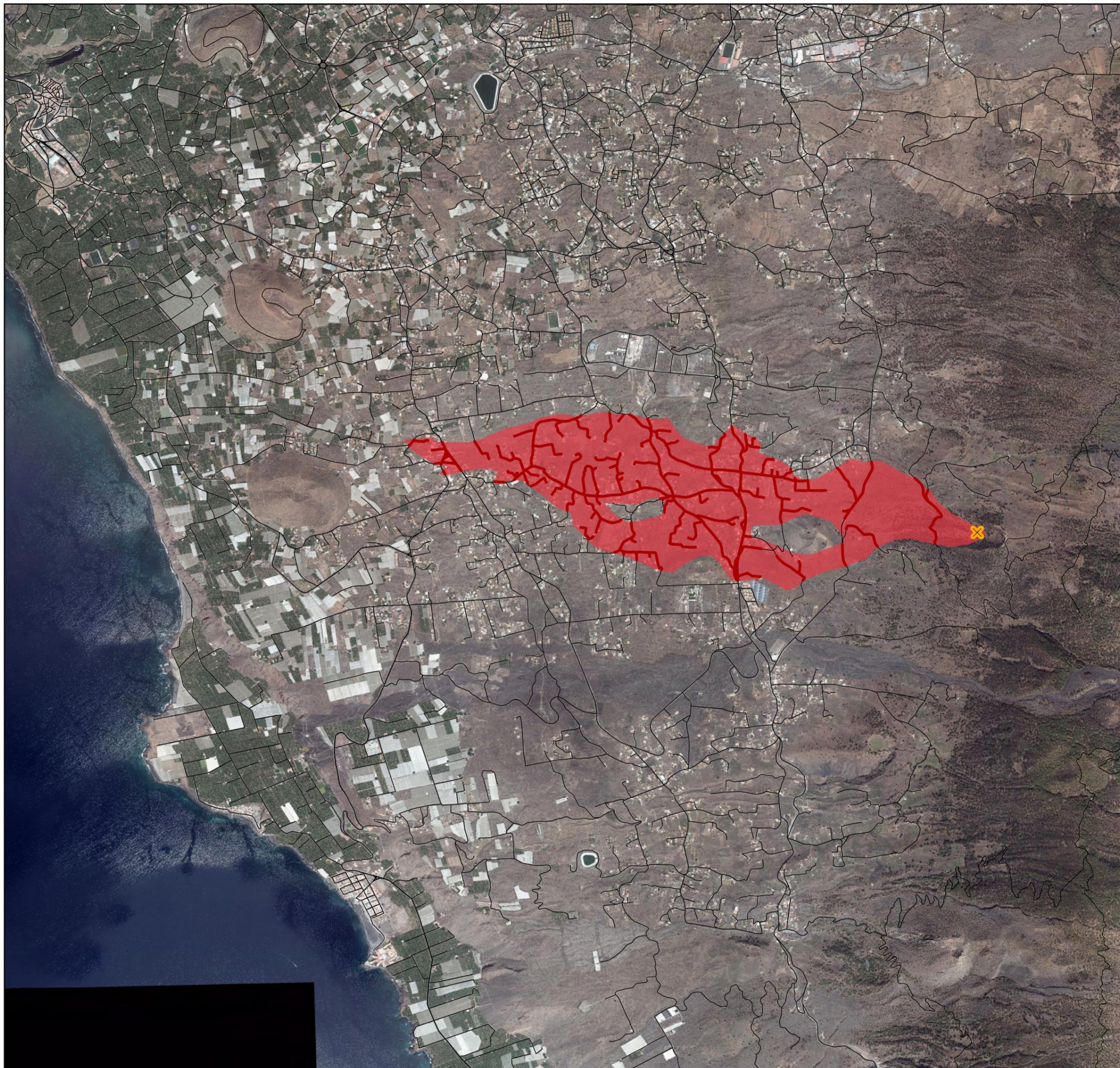
La delimitación de lava se hará a mano para cada composición RGB. Mediante la herramienta **Editor**, se creará un fichero shapefile (.shp) que contendrá la forma de superficie cubierta por lava para cada escena. Una vez creada esta capa, se superpone sobre la red viaria y se emplea la herramienta **Clip** para recortar de la red viaria aquella cubierta por la lava, creando una nueva capa.

Después, desde la tabla de contenidos de cada capa, usando el comando **Calculate Geometry**, se calcula el área y longitud de la superficie terrestre y red viaria cubiertas por la lava.

La cuantificación de daños durante la erupción se presenta en la Tabla 4.3, mientras que los planos desarrollados se presentan a continuación:

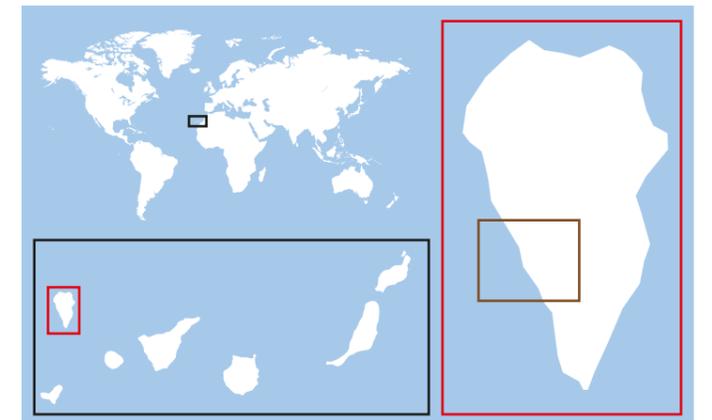
Erupción volcánica La Palma 2021						
Fecha	26-sept	8-oct	20-oct	01-nov	13-nov	19-dic
Superficie cubierta por lava [ha]	266,34	517,14	920,23	1034,73	1149,86	1343,85
Red viaria cubierta por lava [km]	26,28	38,06	71,22	79,26	86,19	100,12

Tabla 4.3: Cuantificación de daños



Cuantificación de daños (26 Septiembre) Erupción volcánica en la isla de La Palma (2021)

LA PALMA (ISLAS CANARIAS)- ESPAÑA



Información cartográfica

N 1:28.945
0 0,3 0,6 1,2 Kilómetros
Sistema de coordenadas:
REGCAN95 UTM Zona 28N

Leyenda

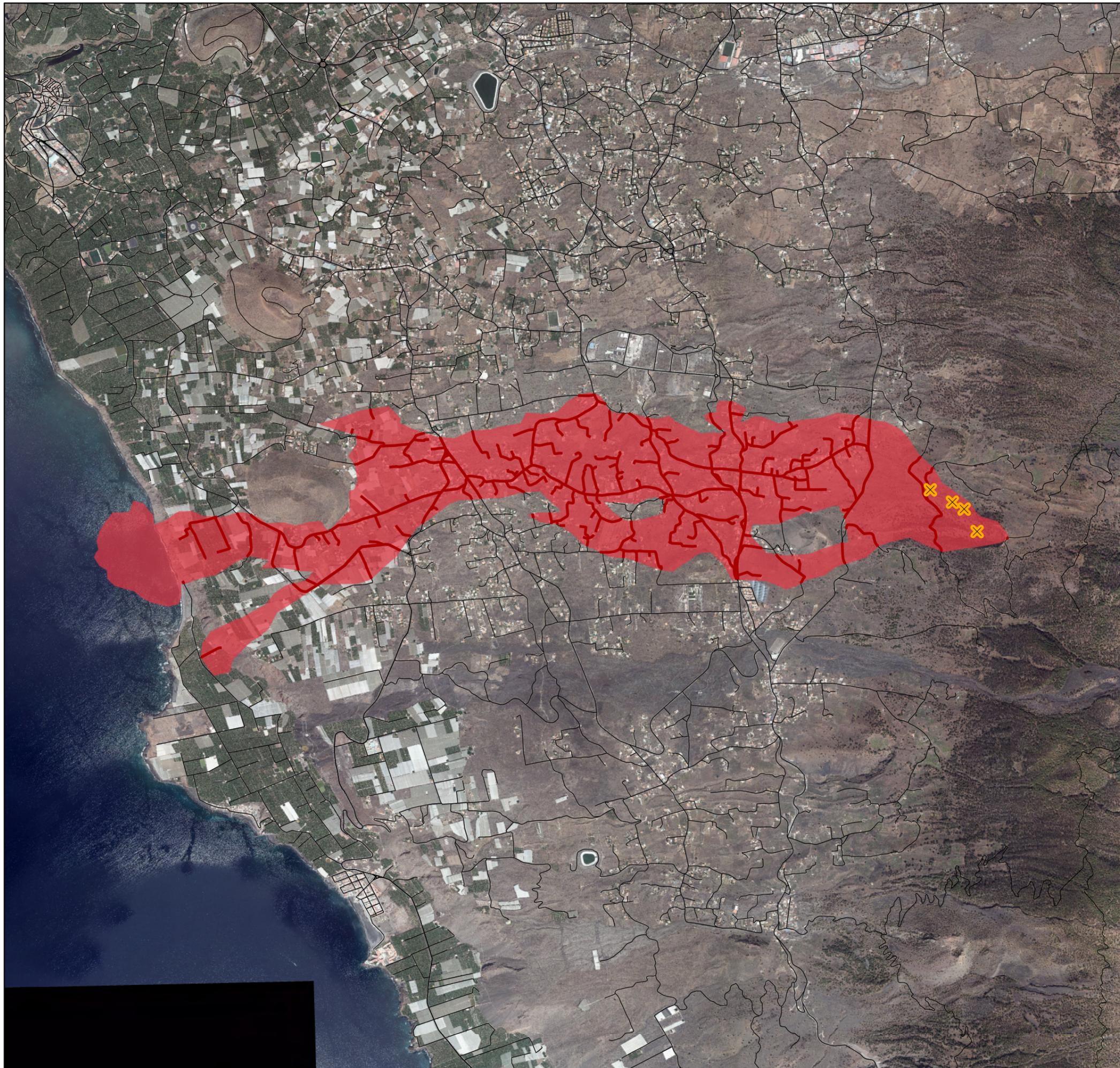
- X Foco volcánico
- Área cubierta por lava
- Red viaria
- Red viaria afectada por la lava

Cuantificación de daños

Área cubierta por lava: 266,34 ha
Red viaria afectada por la lava: 26,80 km

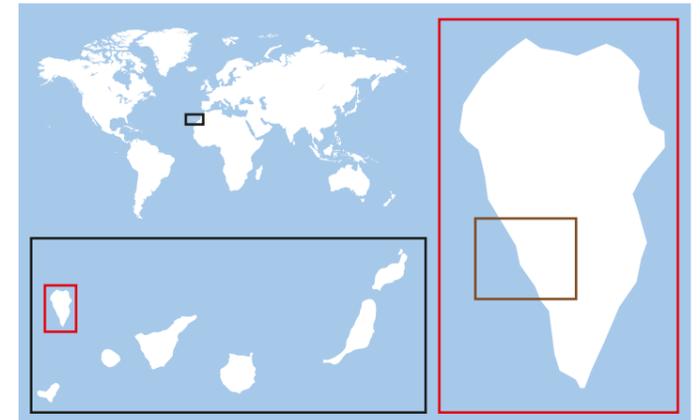


TFG- Grado en Ingeniería Aeroespacial
SATÉLITES DE OBSERVACIÓN DE LA TIERRA. EVOLUCIÓN DE LA ERUPCIÓN VOLCÁNICA DE LA PALMA
García Ruiz, Pedro José



Cuantificación de daños (8 Octubre) Erupción volcánica en la isla de La Palma (2021)

LA PALMA (ISLAS CANARIAS)- ESPAÑA



Información cartográfica

N 1:28.945
0 0,3 0,6 1,2 Kilómetros
Sistema de coordenadas:
REGCAN95 UTM Zona 28N

Leyenda

- Foco volcánico
- Área cubierta por lava
- Red viaria
- Red viaria afectada por la lava

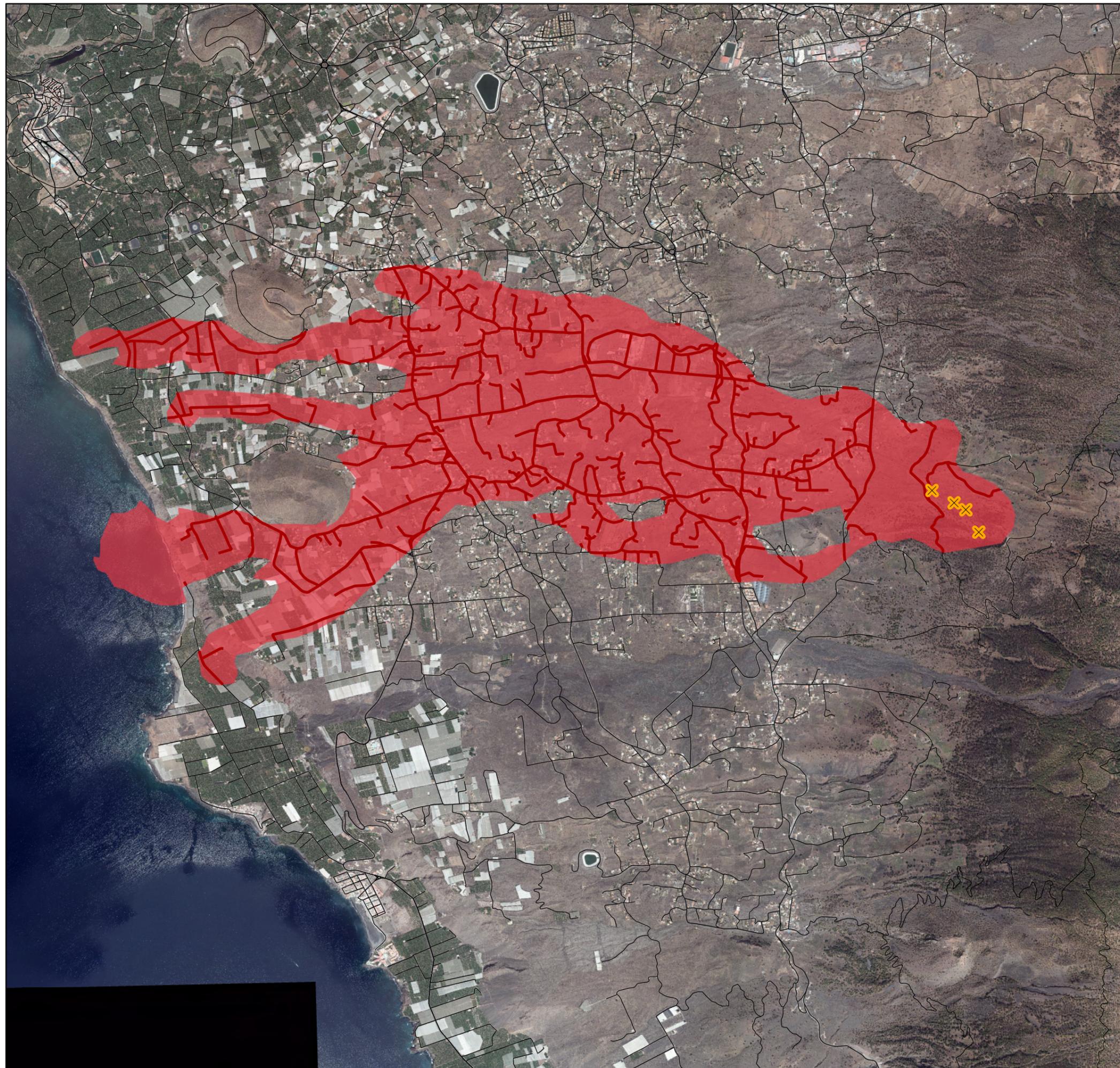
Cuantificación de daños

Área cubierta por lava: 517,14 ha
Red viaria afectada por la lava: 38,06 km



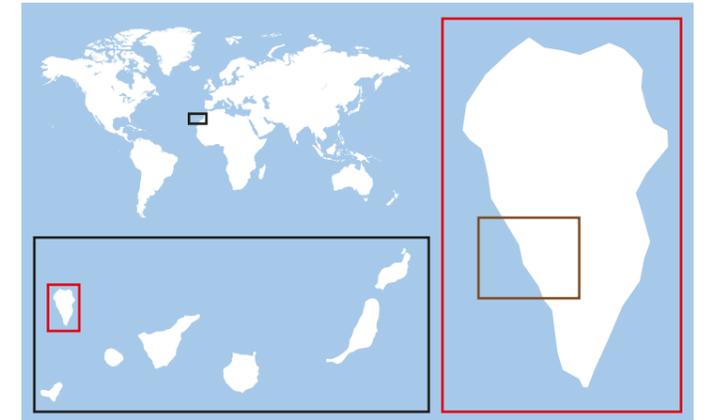
TFG- Grado en Ingeniería Aeroespacial
SATÉLITES DE OBSERVACIÓN DE LA TIERRA. EVOLUCIÓN DE LA ERUPCIÓN VOLCÁNICA DE LA PALMA

García Ruiz, Pedro José



Cuantificación de daños (20 Octubre) Erupción volcánica en la isla de La Palma (2021)

LA PALMA (ISLAS CANARIAS)- ESPAÑA



Información cartográfica



Sistema de coordenadas:
REGCAN95 UTM Zona 28N

Leyenda

- Foco volcánico
- Área cubierta por lava
- Red viaria
- Red viaria afectada por la lava

Cuantificación de daños

Área cubierta por lava: 920,23 ha
Red viaria afectada por la lava: 71,22 km

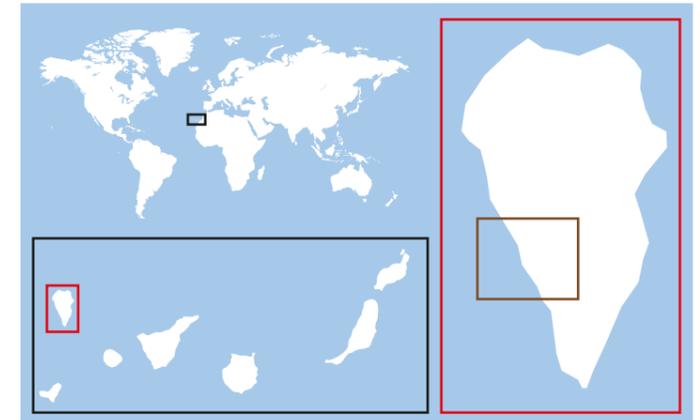


TFG- Grado en Ingeniería Aeroespacial
**SATÉLITES DE OBSERVACIÓN DE LA
TIERRA. EVOLUCIÓN DE LA ERUPCIÓN
VOLCÁNICA DE LA PALMA**

García Ruiz, Pedro José

Cuantificación de daños (1 Noviembre) Erupción volcánica en la isla de La Palma (2021)

LA PALMA (ISLAS CANARIAS)- ESPAÑA



Información cartográfica

N 1:28.945
0 0,3 0,6 1,2 Kilómetros
Sistema de coordenadas:
REGCAN95 UTM Zona 28N

Leyenda

- ✕ Foco volcánico
- Área cubierta por lava
- Red viaria
- Red viaria afectada por la lava

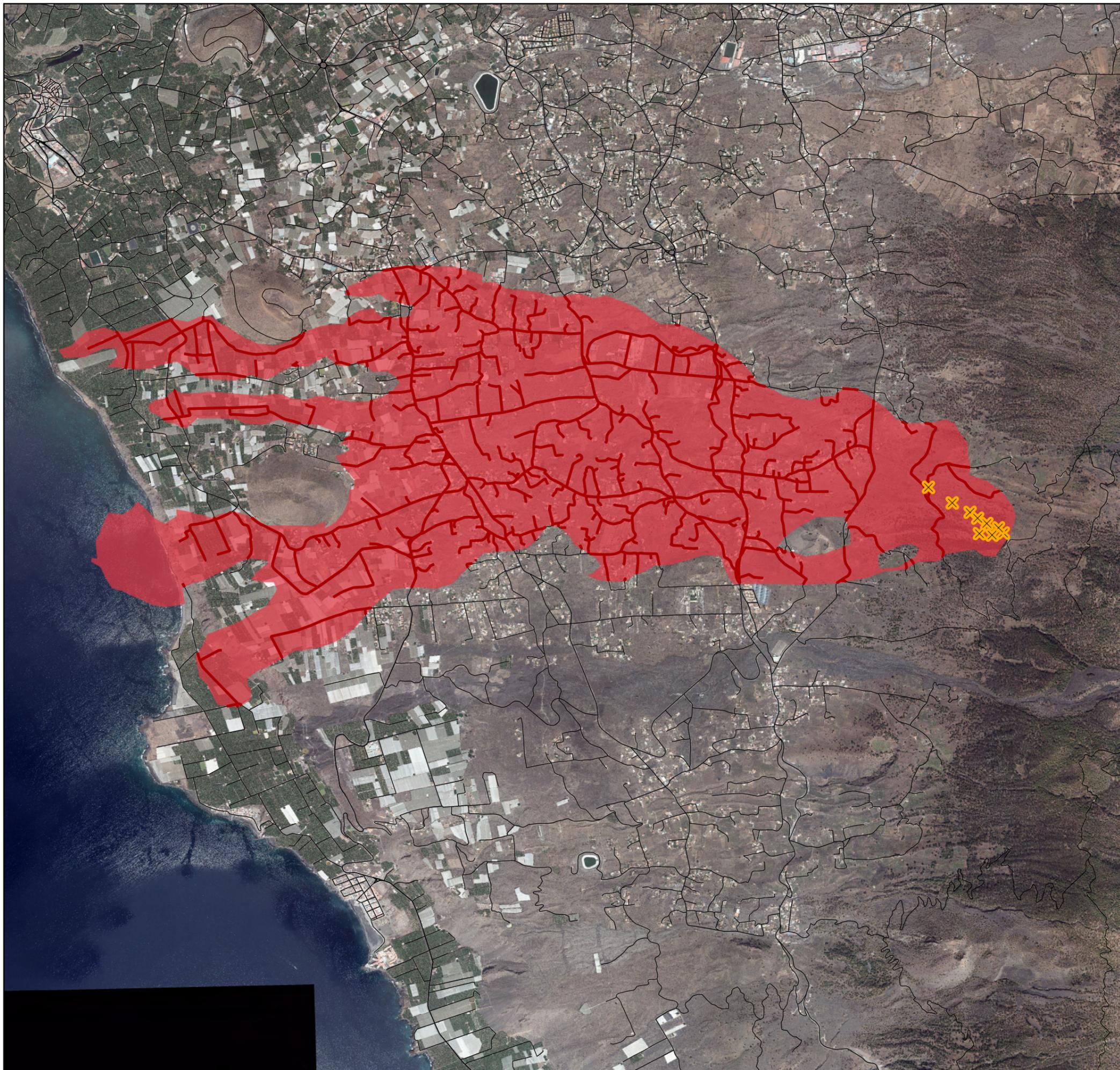
Cuantificación de daños

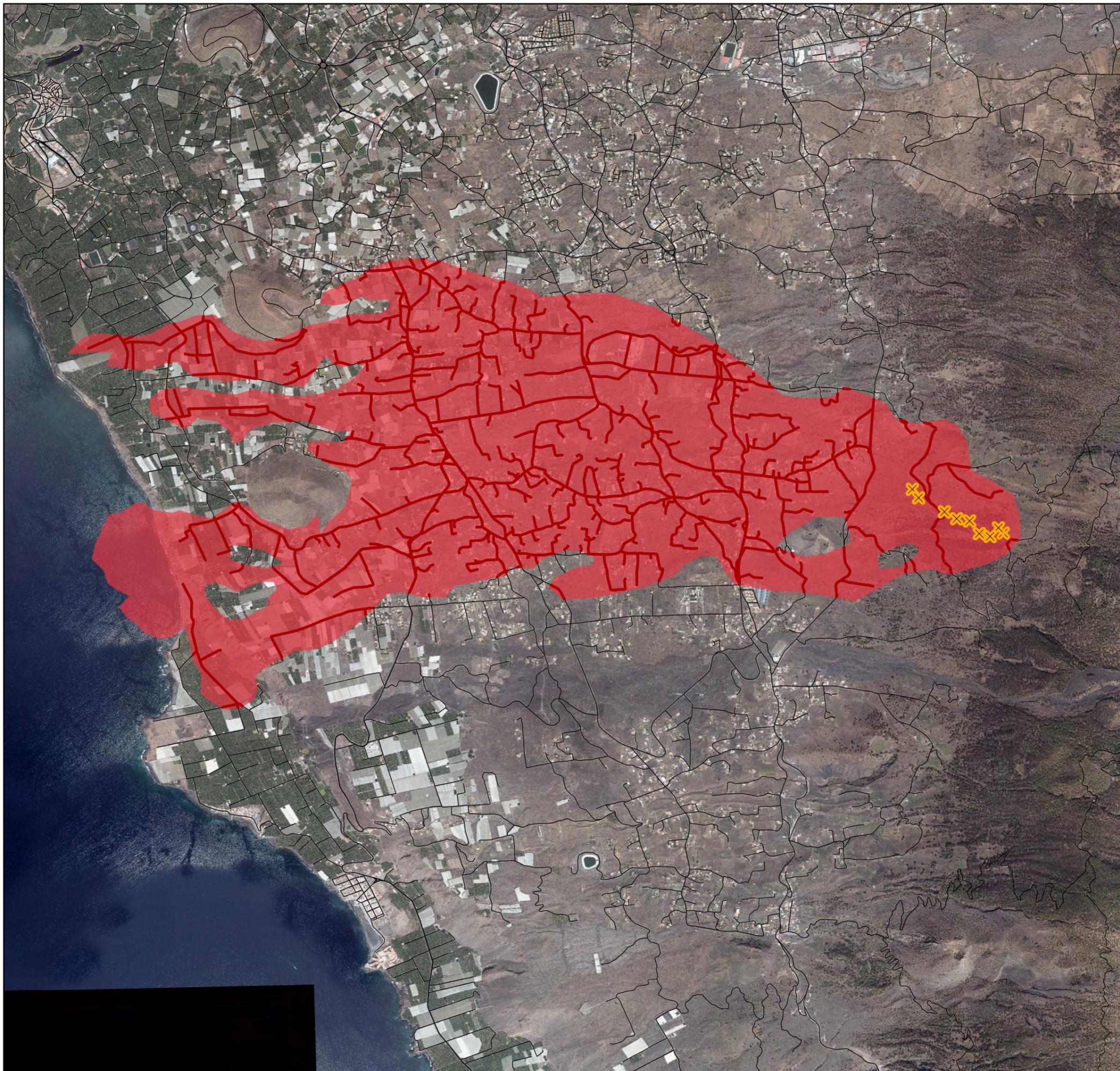
Área cubierta por lava: 1034,73 ha
Red viaria afectada por la lava: 79,26 km



TFG- Grado en Ingeniería Aeroespacial
**SATÉLITES DE OBSERVACIÓN DE LA
TIERRA. EVOLUCIÓN DE LA ERUPCIÓN
VOLCÁNICA DE LA PALMA**

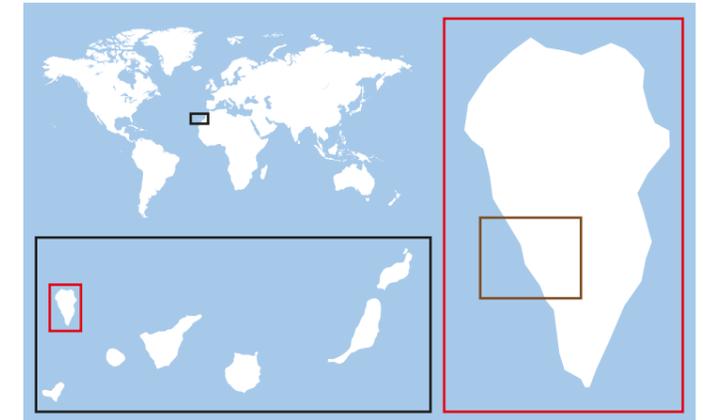
García Ruiz, Pedro José





Cuantificación de daños (13 Noviembre) Erupción volcánica en la isla de La Palma (2021)

LA PALMA (ISLAS CANARIAS)- ESPAÑA



Información cartográfica

N 1:28.945
0 0,3 0,6 1,2 Kilómetros
Sistema de coordenadas:
REGCAN95 UTM Zona 28N

Leyenda

-  Foco volcánico
-  Área cubierta por lava
-  Red viaria
-  Red viaria afectada por la lava

Cuantificación de daños

Área cubierta por lava: 1149,86 ha
Red viaria afectada por la lava: 86,19 km

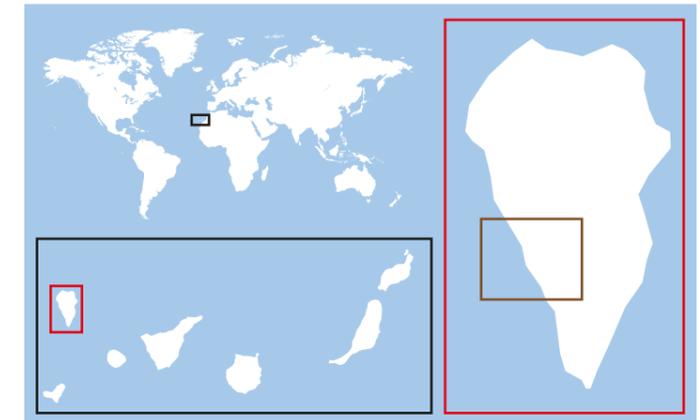


TFG- Grado en Ingeniería Aeroespacial
**SATÉLITES DE OBSERVACIÓN DE LA
TIERRA. EVOLUCIÓN DE LA ERUPCIÓN
VOLCÁNICA DE LA PALMA**

García Ruiz, Pedro José

Cuantificación de daños (19 Diciembre) Erupción volcánica en la isla de La Palma (2021)

LA PALMA (ISLAS CANARIAS)- ESPAÑA



Información cartográfica

N 1:28.945
0 0,3 0,6 1,2 Kilómetros

Sistema de coordenadas:
REGCAN95 UTM Zona 28N

Leyenda

-  Foco volcánico
-  Área cubierta por lava
-  Red viaria
-  Red viaria afectada por la lava

Cuantificación de daños

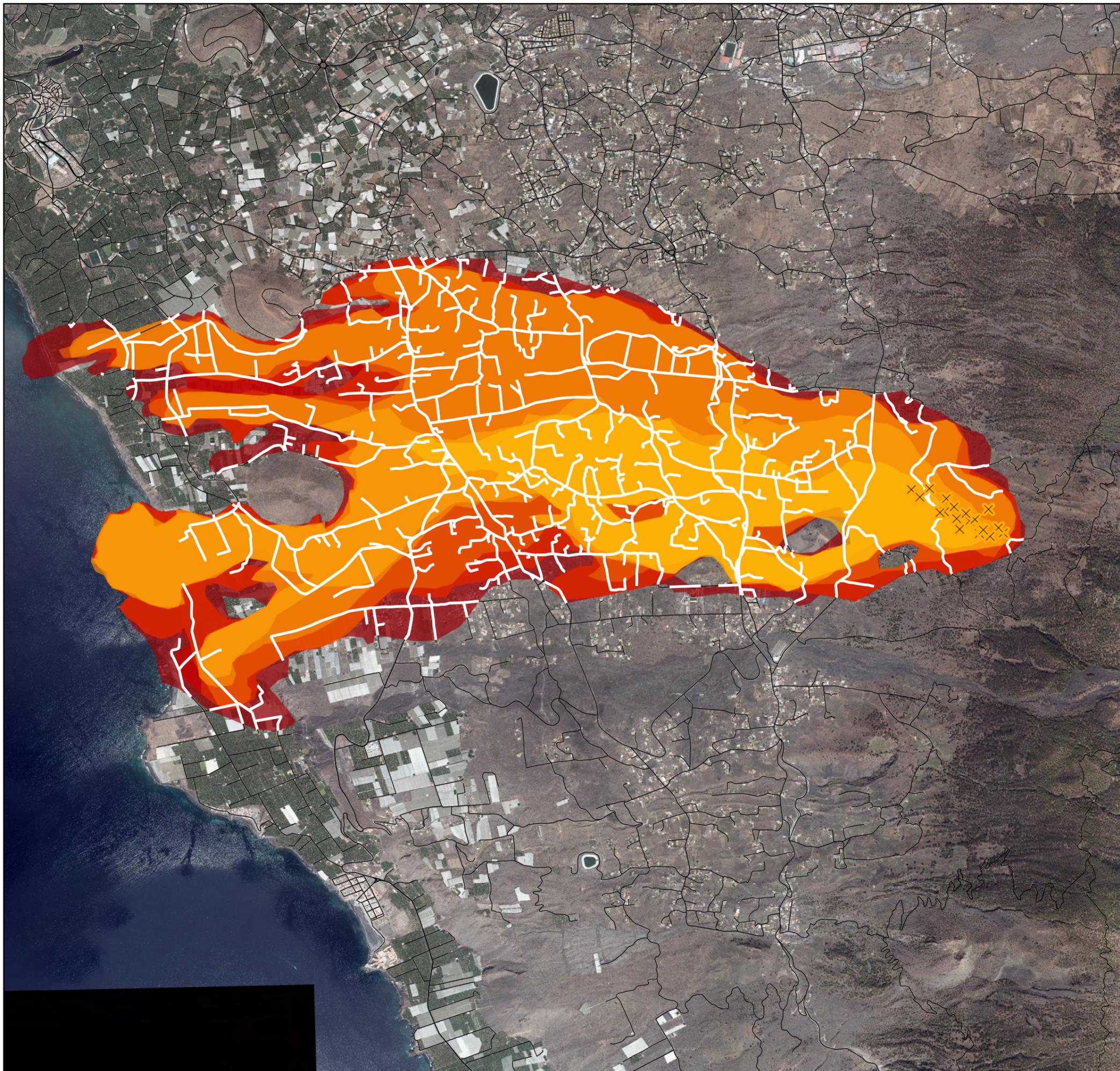
Área cubierta por lava: 1343,85 ha

Red viaria afectada por la lava: 100,12 km



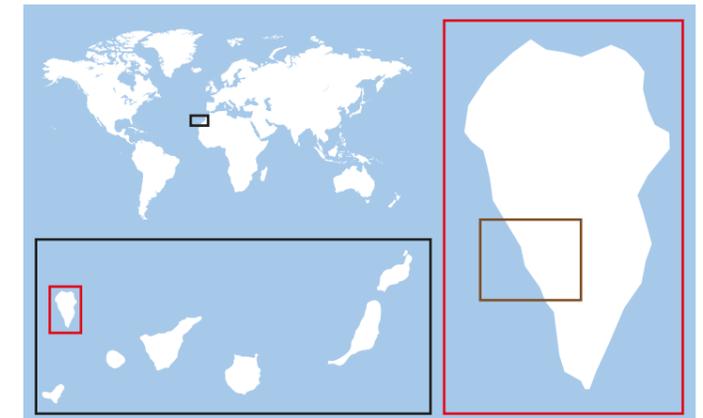
TFG- Grado en Ingeniería Aeroespacial
**SATÉLITES DE OBSERVACIÓN DE LA
TIERRA. EVOLUCIÓN DE LA ERUPCIÓN
VOLCÁNICA DE LA PALMA**

García Ruiz, Pedro José



Cuantificación de daños (histórico)
Erupción volcánica en la isla de La Palma
(2021)

LA PALMA (ISLAS CANARIAS)- ESPAÑA



Información cartográfica



Sistema de coordenadas:
 REGCAN95 UTM Zona 28N

Leyenda

- Foco volcánico
- Área cubierta por lava (26 sept.)
- Área cubierta por lava (08 oct.)
- Área cubierta por lava (20 oct.)
- Área cubierta por lava (01 nov.)
- Área cubierta por lava (13 nov.)
- Área cubierta por lava (19 dic.)
- Red viaria
- Red viaria afectada por la lava

Cuantificación de daños (19 dic.)

Área cubierta por lava: 1343,85 ha

Red viaria afectada por la lava: 100,12 km



TFG- Grado en Ingeniería Aeroespacial
SATÉLITES DE OBSERVACIÓN DE LA TIERRA. EVOLUCIÓN DE LA ERUPCIÓN VOLCÁNICA DE LA PALMA

García Ruiz, Pedro José

Capítulo 5. Pliego de condiciones

En este capítulo se presentan las condiciones de trabajo, desglosadas por naturaleza, requeridas para la realización de este Trabajo de Fin de Grado. Así, se detallan las condiciones relativas al puesto de trabajo, y condiciones técnicas de hardware, software y datos empleados.

5.1. Condiciones del puesto de trabajo

Las condiciones óptimas para el desarrollo de la actividad laboral, en el contexto de la Prevención de Riesgos Laborales, se establecen en España mediante el Real Decreto 486/1997, de 14 de abril, por el que se establecen las disposiciones mínimas de seguridad y salud en los lugares de trabajo.

La calidad del trabajo realizado por el autor está supeditada a las condiciones ambientales del puesto de trabajo. Este proyecto lleva asociado una gran labor de investigación bibliográfica, la mayoría a través de repositorios digitales, y donde también la parte experimental también se ha realizado a través de software informático.

De este modo, este proyecto se ha realizado prácticamente en su totalidad en una posición sentada. Por esto, es fundamental garantizar un lugar de trabajo amplio, debidamente iluminado, con una mesa de dimensiones suficientes para una disposición cómoda de los elementos y con un asiento estable que garantice una ergonomía óptima.

El lugar de trabajo deberá estar debidamente acondicionado, garantizando unos niveles óptimos de temperatura y humedad para maximizar la comodidad y optimizar la concentración. Para asegurar esto último también es fundamental tener en cuenta el ruido, que puede condicionar la labor del autor en cuanto a perturbación de la atención.

5.2. Condiciones técnicas

En cuanto a las condiciones técnicas para el desarrollo de este TFG, están comprendidas por el hardware, software, y los datos empleados en el análisis práctico.

En cuanto al hardware, está compuesto principalmente por el equipo informático, cuyas características se detallan a continuación:

- **Marca y modelo:** MSI Prestige 14 A11SCX
- **Procesador:** 11th Gen Intel(R) Core(TM) i7-1185G7 @ 3.00GHz
- **RAM instalada:** 32,0 GB (31,4 GB usable)
- **Almacenamiento:** 1 Tb SAMSUNG SSD
- **Tipo de sistema:** Sistema operativo de 64 bits, procesador basado en x64
- **Tarjeta gráfica:** Intel Iris Xe Graphics (integrada) + NVIDIA GeForce GTX 1650 (dedicada)
- **Alimentación:** Batería de 52440 mWh

En cuanto a los productos software y *datasets* empleados, información detallada y licencias de uso se especifican a continuación:

- **SNAP versión 8.0**, empleado en el procesamiento de imágenes SAR satelitales. Se trata de un software gratuito desarrollado por la Agencia Espacial Europea, y es descargable y editable bajo los términos de la licencia *GNU General Public License*.
- **ArcGIS 10.3 for Desktop**, empleado para la extracción y presentación de resultados. Desarrollado por Esri, con una licencia de pago de carácter *Advanced* con todos los derechos reservados para la compañía desarrolladora bajo la jurisdicción de los Estados Unidos de América. Empleado mediante licencia de la Universitat Politècnica de València.
- **Overleaf**: editor y compilador de texto en formato LaTeX. Sitio web operado por la empresa británica Digital Science UK Ltd, y utilizada en su plan gratuito.
- **Productos Sentinel-1**: descargados de la web Copérnicus Open Access Hub (<https://scihub.copernicus.eu>) y distribuidos por el programa Copernicus bajo una política de distribución de carácter gratuito, completo y abierto, de acuerdo a la legislación Europea (Copernicus Sentinel Data Policy, ESA/PB-EO(2013)30, rev. 1.).
- **Datasets geográficos**: distribuidos por el centro de descargas del Instituto Geográfico Nacional (<https://centrodedescargas.cnig.es/>) de manera gratuita bajo una licencia Creative Commons CC-BY 4.0, según se dispone en la orden ministerial FOM/2807/2015.

Capítulo 6. Presupuesto

6.1. Coste de personal

El Trabajo de Fin de Grado, en el plan de estudios del Grado en Ingeniería Aeroespacial por la Universitat Politècnica de València, se contabiliza con 12 créditos ECTS ([93]).

Según el Real Decreto 1125/2003 [94], se establece una carga de trabajo de entre 25 y 30 horas por crédito ECTS cursado. Para este proyecto se ha considerado una carga de 30 horas/ECTS, correspondiendo a un total de 360 horas desglosadas del siguiente modo:

- Aprendizaje: 130 horas
- Procesado de datos: 140 horas
- Redacción de la memoria: 90 horas

Según el Consejo de Gobierno de la UPV del 27 de mayo de 2021 [95], se establece la bolsa mínima para el trabajo del alumnado en 4.30€/h.

El computo total del coste de personal se presenta en la Tabla 6.1.

	Coste [€/h]	Tiempo [h]	Coste [€]
Autor	4.3	360	1548

Tabla 6.1: Coste de personal para el desarrollo de este Trabajo de Fin de Grado

6.2. Coste de equipos informáticos, software y datos

El empleo de hardware y software en el desarrollo del proyecto suponen un coste adicional a la mano de obra. El equipo utilizado para el desarrollo del trabajo ha sido el ordenador personal del alumno y se trata de un MSI Prestige 14 A11SCX, con un precio de 2000.00 €. La Agencia Tributaria define un coeficiente lineal máximo de amortización del 26% en equipos para tratamiento de la información y sistemas y programas informáticos. De este modo, el coste de amortización para el equipo se define como:

6.2. COSTE DE EQUIPOS INFORMÁTICOS, SOFTWARE Y DATOS

$$\text{Coste Amortización} = \frac{(100 - \% \text{ amortización}) \cdot \text{Precio}_{\text{ordenador}}}{\text{años}_{\text{uso}}} \quad (6.1)$$

Por lo tanto, para un coste de 2000€, con una tasa de amortización del 26% y una vida útil estimada de 4 años, el coste de amortización anual es de 370 €. Suponiendo un uso anual del equipo de 1300 horas, el coste por hora es de 0.284 €/h

Pasando al uso de software y demás productos, en este trabajo se han empleado principalmente los siguientes elementos:

- Software SNAP
- Software ArcMap
- Software ArcScene
- Editor de texto Overleaf
- Productos Sentinel-1 de la Isla de la Palma
- Datasets geográficos (red de carreteras, MDE, Ortofoto...)

Como se explica en el pliego de condiciones, tanto el Software SNAP, como los productos satelitales y geográficos son distribuidos de forma gratuita. Además, el editor de texto en LATEX Overleaf, se ha usado en su versión gratuita, por lo que su uso no ha supuesto ningún coste adicional a este trabajo.

Para los software ArcMap y ArcScene, integrados dentro de la suite ArcGIS, se ha empleado la licencia de estudiante proporcionada por la UPV. Suponiendo un precio de licencia de 2500 euros y un uso anual nominal por el alumnado de 1000 horas/año se define un precio unitario por hora de 2 €/hora.

Por tanto, el coste total del uso de equipos informáticos, software y datos, se desglosa en la Tabla 6.2

	Coste anual [€]	Uso anual [h]	Coste unitario [€/h]	Horas de trabajo [h]	Coste [€]
Equipo informático	370	1300	0.284	360	102.24
SNAP	0	-	-	90	0
ArcGis	2500	1000	2.5	50	125
Overleaf	0	-	-	90	0
Datasets Sentinel-1	0	-	-	-	0
Datasets geográficos	0	-	-	-	0
Total					227.24

Tabla 6.2: Coste de equipos informáticos, software y datos para el desarrollo de este Trabajo de Fin de Grado

6.3. Presupuesto total

Por último, se presenta en la Tabla 6.3 el presupuesto total para este Trabajo de Fin de Grado, añadiendo un 10 % sobre el precio sin IVA en concepto de gastos indirectos (coste energético, de amortización de equipos adicionales...), un beneficio industrial del 5 % y un 21 % de IVA.

Concepto	Precio [€]	Precio (+21 % IVA) [€]
Costes de personal	1548	1873.08
Coste de equipos informáticos, software y datos	227.24	274.96
Costes indirectos (15 %)	266.29	322.21
Subtotal costes	2041.53	2470.25
Beneficio empresarial (10 %)	204.53	247.02
Total	2246.06	2717.27

Tabla 6.3: Presupuesto total para este Trabajo de Fin de Grado

Capítulo 7. Conclusiones

A lo largo de este trabajo, se ha explorado la tecnología del Radar de Apertura Sintética embarcado en misiones satélites, y sus múltiples aplicaciones científicas. De este modo, tras describir los fundamentos teóricos de esta tecnología, se ha pasado a crear una línea temporal, considerando aquellas misiones caracterizadas por aportar mayor valor al desarrollo de esta tecnología. Después, empleando los productos producidos por una misión determinada, se ha realizado una aplicación práctica en el ámbito de la gestión de emergencias.

Tras realizar los análisis teóricos y prácticos y retomando los objetivos marcados al inicio de este trabajo, se pueden establecer una serie de conclusiones:

1. En los aproximadamente 40 años de vida de la tecnología SAR satelital, esta se ha erigido como un soporte fundamental en la investigación medioambiental. Su capacidad de obtener información en campos tan variados como el terreno, vegetación, océanos o glaciares, lo convierte en una herramienta fundamental para los retos actuales de la comunidad científica en labores como la lucha contra el cambio climático.
2. Las capacidades operacionales del SAR han mejorado a medida que lo hacía la tecnología asociada (algoritmos de procesado, antenas, enlaces de comunicación), hasta alcanzar las resoluciones centimétricas y los bajos periodos de revisita con los que contamos hoy en día.

El futuro de esta tecnología apunta a mantener esta tendencia, y ya se plantean nuevas configuraciones orbitales, como las constelaciones multiorbitales, que permitirían tener una visión completa de la Tierra, como la que tenemos al acceder a *Google Maps*, con información geoespacial de alta resolución actualizada cada pocos minutos. Para alcanzar esto, será fundamental el trabajo conjunto de las diferentes agencias espaciales y la colaboración público-privada, garantizando la interoperabilidad de los datos SAR.

3. Se confirma el empleo del radar de apertura sintética como herramienta útil en la gestión de catástrofes naturales, especialmente en erupciones volcánicas. Los resultados generados son fiables y coinciden con los productos generados durante la erupción por organismos especializados. Aun así, existen ciertas inexactitudes en los resultados producidos, debidos a diversas razones, como una capacidad computacional insuficiente en el tratamiento de fase, o a una delimitación de área cubierta por lava realizada de forma manual en la interpretación del MTC.

En cuanto al trabajo futuro, se plantean dos líneas diferentes:

- **Tecnología SAR y procesado.** Puede ser muy interesante investigar la posibilidad de automatización del procesado, por ejemplo, desarrollando un programa con el toolkit Sentinel-1 que proporciona SNAP. Teniendo la capacidad computacional suficiente, la automatización podría reducir la carga de trabajo de los servicios de mapeo, y facilitar la detección temprana de catástrofes naturales a partir de indicadores derivados de esta tecnología.
- **Ingeniería aeroespacial en la gestión de emergencias.** Se propone un estudio más amplio de la utilidad de la capacidad aeroespacial en el ámbito de la gestión de emergencias, no solo por la integración de sensores en plataformas aéreas o satelitales, si no por la reciente aparición y desarrollo de nuevas plataformas que permiten un acceso más ágil e inmediato a áreas de difícil acceso, como los drones.

Este proyecto ha presentado diversos retos, uno de ellos es la amplitud del tema. Si bien a priori puede parecer un tema específico, realmente existe una muy vasta literatura relacionada con esta tecnología, tanto en la parte teórica como en el ámbito de las misiones y las aplicaciones desarrolladas. Por lo tanto, durante este trabajo se ha realizado ardua labor de indagación en multitud de fuentes documentales y de síntesis de la información con el objetivo de transmitir la información de la forma más concisa posible.

Por otro lado, en la parte práctica el mayor desafío ha sido familiarizarse con las características de los productos SAR y manejo del software SNAP, explorando estudios previos para seleccionar el mejor algoritmo en el tratamiento de los datos, en muchas ocasiones a base de prueba y error.

Pese a los retos enfrentados, se puede concluir que este Trabajo de Fin de Grado cumple con las expectativas generales de esta etapa académica. Este estudio reúne multitud de los temas estudiados durante el Grado en Ingeniería Aeroespacial, como la tecnología satelital, tratamiento de señales, tecnología radar o sistemas de información geográfica. Estos conceptos son aplicados a un tema específico, que lleva asociado una labor mayormente autónoma de aplicación de conocimientos y de aprendizaje de otros conceptos relacionados.

Por último, este trabajo cumple con los siguientes Objetivos de Desarrollo Sostenible establecidos por la ONU:

- **9.** Industria, innovación e infraestructura
- **13.** Acción por el clima
- **15.** Vida de ecosistemas terrestres

Bibliografía

- [1] Fernández, J., Escayo, J., Hu, Z. et al. (2021). “Detection of volcanic unrest onset in La Palma, Canary Islands, evolution and implications”. *Sci Rep* 11, 2540 (2021). <https://doi.org/10.1038/s41598-021-82292-3>
- [2] Copernicus Emergency Management Service. (2022). “Information Bulletin 151 - Mobilisation and Response of Copernicus Emergency Management Service for the Volcanic Eruption in La Palma (Spain)”. Disponible en <https://emergency.copernicus.eu/mapping/ems/information-bulletin-151>.
- [3] D. Massonet, J. Souyris. (2008). “Imaging with Synthetic Aperture Radar (1^a ed.)”. EPFL Press.
- [4] K. Tomiyasu. (1974) “Remote sensing of the earth by microwaves,” en *Proceedings of the IEEE*, vol. 62, no. 1, pp. 86-92, enero 1974, doi: 10.1109/PROC.1974.9387.
- [5] K. Tomiyasu. (1978) “Tutorial review of synthetic-aperture radar (SAR) with applications to imaging of the ocean surface,” en *Proceedings of the IEEE*, vol. 66, no. 5, pp. 563-583, mayo 1978, doi: 10.1109/PROC.1978.10961.
- [6] J.C. Curlander, R.N. McDonough. (1991) “Synthetic Aperture Radar Systems and Signal Processing (1^a ed.)”. Wiley.
- [7] C. Oliver, S. Quegan. (2004) “Understanding Synthetic Aperture Radar Images”. Scitech Publishing.
- [8] A. Broquetas y A. Camps. (2000). “4.3. El radar de apertura sintética.” *Transparencias de Teledetección*, Departamento de TSC (Universitat Politècnica de Catalunya).
- [9] Mahafza B.R. (2013). “Radar system analysis and design using MATLAB (3^a ed.)” CRC Press.
- [10] M. Cabedo y M. Ferrando. (2021) “Transparencias de Ondas y Propagación Electromagnética” Departamento de Comunicaciones (Universitat Politècnica de València).
- [11] M.I. Stolnik. (2008). “Radar Handbook (3^a ed.)”. McGraw-Hill.
- [12] J. Lu. (2019). “Design Technology of Synthetic Aperture Radar (1^a ed.)”. Wiley - IEEE Press.

- [13] R. McDonough, B. Raff y J. Kerr. (1985). “Image formation from spaceborne synthetic aperture radar signals”. Johns Hopkins APL Technical Digest, Volumen 6, Número 4, pp. 300-312.
- [14] C. Barber. (1983). “Theory of Digital Imaging from Orbital Synthetic Aperture Radar” Technical Report 83 079, Royal Aircraft Establishment, Farnborough.
- [15] I. G. Cumming, F. H. Wong. (2005). “Digital Processing of Synthetic Aperture Radar Data: Algorithms and Implementation”. Artech House.
- [16] C. Cafforio, C. Prati, y F. Rocca. (1991). “SAR Data Focusing using seismic migration techniques. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 27(2):194–207, marzo 1991.
- [17] K. Patel, U. Neelakantan, S. Gangele, J. Vacchani y N. Desai. (2012). “Linear Frequency Modulation Waveform Synthesis”. IEEE Students’ Conference on Electrical, Electronics and Computer Science. 10.1109/SCEECS.2012.6184744.
- [18] A. Moreira, P. Prats-Iraola, M. Younis, G. Krieger, I. Hajnsek y K. P. Papathanassiou, “A tutorial on synthetic aperture radar,” en IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine, vol. 1, no. 1, pp. 6-43, marzo 2013, doi: 10.1109/MGRS.2013.2248301.
- [19] Bu-Chin Wang. (2008). “Digital Signal Processing Techniques and Applications in Radar Image Processing”. John Wiley Sons
- [20] National Reconnaissance Office of the United States of América. (2012) “Quill desclassification guidelines” Declassified Records of the Major NRO Programs and Projects.
- [21] National Reconnaissance Office of the United States of América. (2004) “Quill - The first imaging radar satellite” Declassified Records of the Major NRO Programs and Projects.
- [22] G.H. Born, J.A. Dunne y D.B. Lame. (1979) “Seasat Mission Overview”, en SCIENCE journal, Vol 204, issue 4400, pp. 1405-1406, doi: 10.1126/science.204.4400.1405.
- [23] R. L. Jordan. (1980) ‘The Seasat-A synthetic aperture radar system’. in IEEE Journal of Oceanic Engineering, vol. 5, no. 2, pp. 154-164, Abril 1980, doi: 10.1109/JOE.1980.1145451.
- [24] Kramer, H. J. (s. f.). ‘SeaSat - eoPortal Directory - Satellite Missions’. eoPortal Directory. Disponible en <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/s/seasat>
- [25] U.S. National Aeronautics and Space Administration (NASA). (1978). “Seasat-A Press Kit”. NASA News, Release no. 78-77. Washington D.C.
- [26] E. F. Prozeller, R. J. Heins, y W. C. Trimble. (1977). “The SEASAT Synthetic Aperture Radar Data Link” Publicado en APL Technical Digest, Volumen 16, Número 4.

- [27] E. P. W. Attema, G. Duchossois y G. Kohlhammer. (1998). “ERS-1/2 SAR land applications: overview and main results,” IGARSS '98. Sensing and Managing the Environment. 1998 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium Proceedings. (Cat. No.98CH36174), Seattle, WA, USA, 1998, pp. 1796-1798 vol.4, doi: 10.1109/IGARSS.1998.703655.
- [28] European Space Agency. “ERS Mission Overview.” Disponible en <https://earth.esa.int/eogateway/missions/ers/description>.
- [29] eoPortal (European Space Agency). “ERS-1”. Satellite Missions Catalogue. Disponible en https://www.eoportal.org/satellite-missions/ers-1?pk_vid=ef36858dcdd0f57816623757630657ac#mission-status
- [30] G. Duchossois y P. Martin. (1995). “ERS-1 and ERS-2 Tandem Operations” ESA Bulletin, No. 83, agosto 1995, pp. 54-60.
- [31] C.R. Francis, G. Graf, P.G. Edwards, M. McCaig, C. McCarthy, A. Lefebvre, B. Pieper, P.-Y. Pouvreau, R. Wall, F. Weschler, J.Louet, W. Schumann y R. Zobl. (1995). “The ERS-2 Spacecraft and its Payload” ESA Directorate for Observation of the Earth and its Environment, ESTEC, Noordwijk, The Netherlands. ESA Bulletin N. 83. agosto 1995.
- [32] R. Petersson y P. Ingvarson. (1998). “The Planar Array Antennas for the European Remote Sensing Satellite ERS-1,” 1988 18th European Microwave Conference, Stockholm, Sweden, 1988, pp. 289-294, doi: 10.1109/EUMA.1988.333830.
- [33] A. Rosenqvist et al. (2004) “An overview of the JERS-1 SAR Global Boreal Forest Mapping (GBFM) project” IGARSS 2004. 2004 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2004, pp. 1033-1036 vol.2, doi: 10.1109/IGARSS.2004.1368587.
- [34] eoPortal (European Space Agency). “JERS-1”. Satellite Missions Catalogue. Disponible en <https://www.eoportal.org/satellite-missions/jers-1#jers-1-japan-earth-resources-satellite--fuyo-1>
- [35] European Space Agency. “JERS-1 Mission Overview.” Disponible en <https://earth.esa.int/eogateway/missions/jers-1>.
- [36] Japan Aerospace Exploration Agency “About Japanese Earth Resources Satellite FUYO-1 (JERS-1)” Disponible en <https://global.jaxa.jp/projects/sat/jers1/index.html>.
- [37] J. Louet y S. Bruzzi. (1999) “ENVISAT mission and system.” IEEE 1999 International Geoscience and Remote Sensing Symposium. IGARSS'99 (Cat. No.99CH36293), 1999, pp. 1680-1682 vol.3, doi: 10.1109/IGARSS.1999.772059.
- [38] Y-L. Desmos, C. Buck, J. Guijarro, J-L. (2000) Suchail, R. Torres y E. Attema. “ASAR-Envisat’s Advanced Syntetic Aperture Radar. Building on ERS Achievements towards Future Earth Watch Missions”. ESA Bulletin 102, mayo 2000.

- [39] European Space Agency. “ASAR Overview” Disponible en <https://earth.esa.int/eogateway/instruments/asar/description>
- [40] ASAR Science Advisory Group (1998). “Envisat ASAR Science and Applications” ESA Publication Division, The Netherlands.
- [41] Neva Ridge Technologies “Sendai Earthquake of March 2011,” , Disponible en: https://web.archive.org/web/20111103140116/http://www.nevaridge.com/Sendai_earthquake.php
- [42] eoPortal (European Space Agency). “ALOS-1”. Satellite Missions Catalogue. Disponible en <https://www.eoportal.org/satellite-missions/alos>
- [43] eoPortal (European Space Agency). “ALOS-2”. Satellite Missions Catalogue. Disponible en <https://www.eoportal.org/satellite-missions/alos-2>
- [44] eoPortal (European Space Agency). “ALOS-3”. Satellite Missions Catalogue. Disponible en <https://www.eoportal.org/satellite-missions/alos-3>
- [45] F. Caltagirone. (2009). “Status, results and perspectives of the Italian Earth Observation SAR COSMO - SkyMed,” 2009 European Radar Conference (EuRAD), Rome, Italy, 2009, pp. 330-334.
- [46] M. Di Lazzaro, G. Angino, M. Piemontese, A. Capuzi y R. Leonardi. (2008). “COSMO-SkyMed: The Dual-Use Component of a Geospatial System for Environment and Security,” 2008 IEEE Aerospace Conference, Big Sky, MT, USA, 2008, pp. 1-10, doi: 10.1109/AERO.2008.4526278.
- [47] Agenzia Spaziale Italiana. (2007) “COSMO-SkyMed System Description and User Guide”. Doc. No: ASI-CSM-ENG-RS-093-A, rev. A.
- [48] eoPortal (European Space Agency). “COSMO-SkyMed”. Satellite Missions Catalogue. Disponible en <https://www.eoportal.org/satellite-missions/cosmo-skymed>
- [49] A. Torre y P. Capece. (2011) “COSMO-SkyMed: The advanced SAR instrument” Proceedings of 5th International Conference on Recent Advances in Space Technologies - RAST2011, Istanbul, Turkey, 2011, pp. 865-868, doi: 10.1109/RAST.2011.5966966.
- [50] eoPortal (European Space Agency). “COSMO-Skymed 2nd gen.”. Satellite Missions Catalogue. Disponible en <https://www.eoportal.org/satellite-missions/cosmo-skymed-second-generation>
- [51] I. Hajnsek y A. Moreira. (2006). “TerraSAR-X and TanDEM-X: Global Mapping in 3D using Radar.”
- [52] J. Böer, H. Fiedler, G. Krieger, M. Zink, M. Bachmann y J. Hueso González. (2008). “TanDEM-X: A Global Mapping Mission.” Proceedings of the Fédération Internationale des Géomètres Conference (FIG).

- [53] eoPortal (European Space Agency). “TerraSAR-X”. Satellite Missions Catalogue. Disponible en <https://www.eoportal.org/satellite-missions/terrasar-x>
- [54] G. Krieger, A. Moreira, I. Hajnsek, M. Werner, H. Fiedler y E. Settelmeier. (2005). “The TanDEM-X Mission Proposal.” ISPRS Workshop High-Resolution Earth Imaging for Geospatial Information.
- [55] S. Jutz y M.P. Milagro-Pérez. (2020) “Copernicus: the European Earth Observation Programme.” Revista de Teledetección Española, N^o 56 - N^o Especial, noviembre 2020, doi: 10.4995/raet.2020.14346
- [56] Programa Copernicus. “OBSERVER: A History of Copernicus”. Copernicus news. Disponible en <https://www.copernicus.eu/en/news/news/observer-history-copernicus>
- [57] European Commission. (2018). ”Copernicus: 20 years of History”. Disponible en https://www.copernicus.eu/sites/default/files/2018-10/History_Factsheet_vf.pdf
- [58] European Space Agency. (2022) “Over 500K downloads for ESA’s SNAP toolbox”. Disponible en https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/Over_500K_downloads_for_ESA_s_SNAP_toolbox
- [59] E. Attema, P. Bargellini, P. Edwards, G. Levrini, S. Lokas, L. Moeller, B. Rosich, P. Secchi, R. Torres, M. Davidson y P. Snoeij. (2007). “The radar mission for GMES operational land and sea services.” ESA Bulletin. 131. 10-17.
- [60] European Space Agency. “Sentinel-1 Data Products”. Disponible en <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/missions/sentinel-1/data-products>
- [61] European Space Agency. (2013) “Free access to Copernicus Sentinel satellite data”. Disponible en https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/Copernicus/Free_access_to_Copernicus_Sentinel_satellite_data
- [62] ICEYE. (2002). “Mission brochure”. Disponible en https://www.iceye.com/hubfs/_DATA_AND_MISSIONS/Missions_Brochure_ICEYE.pdf
- [63] European Space Agency. (2021) “ICEYE commercial satellites join the EU Copernicus programme”. Disponible en https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/Copernicus/ICEYE_commercial_satellites_join_the_EU_Copernicus_programme
- [64] ICEYE. (2022). “ICEYE Flood Briefing from Hurricane Ian, Florida 2022”. Disponible en: <https://www.iceye.com/lp/hurricane-ian-florida-flood-briefing>
- [65] European Space Agency. (2021). “International Coordination for Spaceborne Synthetic Aperture Radar Data Acquisition, Processing and Analysis for Earth Science and Applications” Resultados del workshop online del 16 de julio de 2021 organizado por la ESA. Disponible en: https://www.esa.int/ESA_Media/Workshop/2021/07/16/International_Coordination_for_Spaceborne_Synthetic_Aperture_Radar_Data_Acquisition_Processing_and_Analysis_for_Earth_Science_and_Applications

- //az659834.vo.msecnd.net/eventsairwesteuprod/production-nikal-public/c75cc7b0451e489a9a27c47f95cd9f59
- [66] European Space Agency. “TOPSAR Processing”. Sentinel-1 SAR Technical Guides. Disponible en <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/technical-guides/sentinel-1-sar/products-algorithms/level-1-algorithms/topsar-processing>
- [67] F. De Zan, y A. M. Guarnieri. (2006). “TOPSAR: Terrain Observation by Progressive Scans”. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, 44(9), 2352-2360. doi:10.1109/TGRS.2006.873853
- [68] European Space Agency. “Orbit”. Sentinel-1 Satellite Description. Disponible en <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/missions/sentinel-1/satellite-description/orbit>
- [69] European Space Agency. “Precise Orbit Determination (POD) Products and Requirements”. Sentinel-1 SAR Technical Guides. Disponible en <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/technical-guides/sentinel-1-sar/pod/products-requirements>
- [70] GMV CPOD Team. (2019). “Sentinel-1 POD products performance (Version 1.6)” Copernicus Sentinel-1, -2 and -3 precise orbit determination service (SENTINELS-POD). Disponible en <https://sentinel.esa.int/documents/247904/3455957/Sentinel-1-POD-Products-Performance.pdf>
- [71] GMV. (2013, 5 de abril). “Precise orbit determination for ESA’s Sentinel missions [Comunicado de prensa]” Disponible en <https://www.gmv.com/en-es/communication/news/precise-orbit-determination-esas-sentinel-missions>
- [72] European Space Agency. “Apply Orbit File Operator” SNAP User’s Manual.
- [73] Z. Li y J. Bethel. (2008). Image coregistration in SAR interferometry. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 37, 433-438.
- [74] European Space Agency. “Sentinel S-1 TOPS Corregistration. Back Geocoding” SNAP User’s Manual.
- [75] European Space Agency. “Sentinel-1 TOPSAR Deburst and Merge”. SNAP User’s Manual.
- [76] European Space Agency. “Level-1 Post-Processing Algorithms”. Sentinel-1 SAR Technical Guides. Disponible en <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/level-1-post-processing-algorithms>
- [77] B. Ai, K. Liu, X. Li, D. Li. (2008). “Flat-earth phase removal algorithm improved with frequency information of interferogram.” *Proc SPIE*. 7147. 46-10.1117/12.813247.

- [78] European Space Agency. “Estimation and Subtraction of Topographic Phase (InSAR operator)”. SNAP User’s Manual.
- [79] European Space Agency. “Computation of interferogram and computation/removal of the flat-earth phase (InSAR operator)”. SNAP User’s Manual.
- [80] Goldstein, R.M., y Werner, C.L., (1998) “Radar interferogram phase filtering for geophysical applications.” *Geophysical Research Letters*, 25, 4035 - 4038
- [81] European Space Agency. “Goldstein Phase Filtering Operator”. SNAP User’s Manual.
- [82] Ferretti, A., Monti-Guarnieri, A., Prati C., Rocca, F y Massonnet, D. (2007). “InSAR Principles: Guidelines for SAR Interferometry Processing and Interpretation”. ESA Publications
- [83] C. W. Chen y H. A. Zebker. (2002). “Phase unwrapping for large SAR interferograms: Statistical segmentation and generalized network models”. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 40, pp. 1709-1719.
- [84] Chen, C.W. (2001). “Statistical-cost network-flow approaches to two-dimensional phase unwrapping for radar interferometry”. [Doctoral dissertation, Stanford University] Stanford University Radar Interferometry Group. https://web.stanford.edu/group/radar/people/Curtis_thesis_cpdf_print.pdf
- [85] Hanssen, R. (2002). “Radar Interferometry: Data Interpretation and Error Analysis” Kluwer Academic Publishers. New York.
- [86] European Space Agency. “SNAPHU Unwrapping”. SNAP User’s Manual.
- [87] European Space Agency. “Range Doppler Terrain Correction Operator”. SNAP User’s Manual.
- [88] P. Boccardo, V. Gentile, F. G. Tonolo, D. Grandoni y M. Vassileva. (2015) “Multitemporal SAR coherence analysis: Lava flow monitoring case study,” 2015 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2015, pp. 2699-2702, doi: 10.1109/IGARSS.2015.7326370.
- [89] Donezar, U., De Blas, T., Larrañaga, A., Ros, F., Albizua, L., Steel, A., Broglia, M. (2019). “Applicability of the MultiTemporal Coherence Approach to Sentinel-1 for the Detection and Delineation of Burnt Areas in the Context of the Copernicus Emergency Management Service”. *Remote Sensing*. 11. 2607. [10.3390/rs11222607](https://doi.org/10.3390/rs11222607).
- [90] Miranda, N. y Meadows, P.J. (2015) “Radiometric Calibration of S-1 Level-1 Products Generated by the S-1 IPF” ESA Technical Note (Ref. ESA-EOPG-CSCOP-TN-0002)
- [91] European Space Agency. “Level-1 Radiometric Calibration”. Sentinel-1 SAR Technical Guides. Disponible en <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/radiometric-calibration-of-level-1-products>

- [92] B. Aiazzi, L. Alparone, S. Baronti y A. Garzelli, “Coherence estimation from multilook incoherent SAR imagery,” in *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 41, no. 11, pp. 2531-2539, Nov. 2003, doi: 10.1109/TGRS.2003.818813.
- [93] Resolución de 23 de marzo de 2011, de la Universidad Politécnica de Valencia, por la que se publica el plan de estudios de Graduado en Ingeniería Aeroespacial. Boletín Oficial del Estado. Número 91, de 16 de abril de 2011. https://www.boe.es/diario_boe/txt.php?id=BOE-A-2011-6907
- [94] Real Decreto 1125/2003, de 5 de septiembre, por el que se establece el sistema europeo de créditos y el sistema de calificaciones en las titulaciones universitarias de carácter oficial y validez en todo el territorio nacional. Boletín Oficial del Estado. Número 224, de 18 de septiembre de 2003. <https://www.boe.es/eli/es/rd/2003/09/05/1125>
- [95] Universitat Politècnica de València. “Bolsa Mínima - Acuerdo del consejo de gobierno UPV del 27 de mayo del 2021”. Normativa UPV de Prácticas en Empresa. http://www.upv.es/contenidos/SIEPRACT/menu_urlc.html?/contenidos/SIEPRACT/infoweb/siepract/info/BolsaPracticas.pdf