



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA
BARCELONATECH

Escola Tècnica Superior d'Enginyeria
de Telecomunicació de Barcelona



Application of the sharpening technique to the L-band using higher spatial resolution radiometric observations in preparation for CIMR

Trabajo final de Grado
presentado por la Escola Tècnica Superior
d'Enginyeria de Telecomunicació de Barcelona
de la Universitat Politècnica de Catalunya
por
Marc Lucena González

En cumplimiento parcial
de los requisitos para la obtención del
**GRADO EN INGENIERÍA DE TECNOLOGÍAS Y SERVICIOS DE
TELECOMUNICACIÓN**

Director/a: Mercè Vall-llossera y Miriam Pablos

Barcelona, junio de 2024

Resumen

Los satélites de observación de la Tierra desempeñan una función fundamental en el proceso de proporcionar medidas globales y periódicas a cerca de los parámetros geofísicos. En el año 2028 se lanzará la misión CIMR (Copernicus Imaging Microwave Radiometer) de la ESA, la cual llevará embarcado un radiómetro de microondas multifrecuencia con el objetivo principal de proporcionar observaciones de la temperatura del mar, concentración del hielo marino y salinidad de la superficie del mar. Además, también tomará medidas sobre la tierra y proporcionará productos como la temperatura y la humedad superficial.

El objetivo principal de este proyecto es aplicar y validar la técnica de *pansharpening* a imágenes de radiometría de microondas de dos bandas de frecuencia diferentes. Esta técnica se podrá utilizar con los datos de CIMR para mejorar la resolución espacial de la banda L con los datos de la banda X medidos con el radiómetro multifrecuencia que llevará embarcado. Para este estudio se han utilizado datos de sensores a estas frecuencias que estuvieran en órbita simultáneamente y con características similares a las del instrumento que llevará embarcado en un futuro la misión CIMR. Se ha trabajado con medidas de temperatura de brillo de SMAP para las medidas en banda L. Mientras que, para los datos en banda X se ha elegido el radiómetro AMSR2.

Resum

Els satèl·lits d'observació de la Terra exerceixen una funció fonamental en el procés de proporcionar mesures globals i periòdiques sobre els paràmetres geofísics. L'any 2028 es llançarà la missió CIMR (Copernicus Imaging Microwave Radiometer) de l'ESA, la qual portarà embarcat un radiòmetre de microones multifreqüència amb l'objectiu principal de proporcionar observacions de la temperatura del mar, concentració del gel marí i salinitat de la superfície del mar. A més, també prendrà mesures sobre la terra i proporcionarà productes com la temperatura i la humitat superficial.

L'objectiu principal d'aquest projecte és aplicar i validar la tècnica de *pansharpening* a imatges de radiometria de microones de dues bandes de freqüència diferents. Aquesta tècnica es podrà utilitzar amb les dades de CIMR per millorar la resolució espacial de la banda L amb les dades de la banda X mesurades amb el radiòmetre multifreqüència que portarà embarcat. Per a aquest estudi s'han utilitzat dades de sensors a aquestes freqüències que estiguessin en òrbita simultàniament i amb característiques similars a les de l'instrument que portarà embarcat en un futur la missió CIMR. S'ha treballat amb mesures de temperatura de brillantor de SMAP per a les mesures en banda L. Mentre que, per a les dades en banda X s'ha escollit el radiòmetre AMSR2.

Summary

Earth observation satellites play a fundamental role in the process of providing global and periodic measurements of geophysical parameters. In 2028, the ESA's CIMR (Copernicus Imaging Microwave Radiometer) mission will be launched, which will carry a multi-frequency microwave radiometer with the primary objective of providing observations of sea surface temperature, sea ice concentration, and sea surface salinity. Additionally, it will also take measurements over land and provide products such as surface temperature and humidity.

The main objective of this project is to apply and validate the pansharpener technique to microwave radiometry images of two different frequency bands. This technique can be used with CIMR data to improve the spatial resolution of the L-band with the X-band data measured with the multi-frequency radiometer it will carry. For this study, data from sensors at these frequencies that were in orbit simultaneously and with similar characteristics to those of the instrument that the CIMR mission will carry in the future have been used. Brightness temperature measurements from SMAP have been used for the L-band measurements. Meanwhile, the AMSR2 radiometer was chosen for the X-band data.

Agradecimientos

Me gustaría agradecer a Mercè Vall-llossera por darme la oportunidad de realizar este TFG cuando acepto ser mi tutora, por facilitarme todo el material que he necesitado, guiarme y ayudarme cuando lo he necesitado. También, quiero agradecer a Miriam Pablos por su ayuda incansable, su dedicación y su claridad a la hora de simplificar todos los conceptos, a nivel teórico y sobre todo en el código. Además, quiero agradecer la rapidez en las respuestas de los correos electrónicos y la disposición para llevar a cabo reuniones.

Gracias a Mercè y Miriam este TFG se ha desarrollado de manera satisfactoria.

Historial de revisión y aprobación

Revisión	Fecha	Objetivo
0	25/03/2024	Creación del documento
1	15/04/2024	Revisión de la introducción y estado del arte
2	06/05/2024	Primera revisión metodología
3	20/05/2024	Segunda revisión estado del arte y metodología
4	03/05/2024	Primera revisión resultados
5	10/06/2024	Segunda revisión resultados
6	15/06/2024	Revisión conclusiones
7	18/06/2024	Revisión final

Lista de distribución del documento

Nombre	E-Mail
Marc Lucena González	marc.lucena@estudiantat.upc.edu
Mercè Vall-llossera Ferran	merce.vall-llossera@upc.edu
Miriam Pablos Hernández	miriam.pablos@upc.edu

Escrito por:		Revisado y aprobado por:	
Fecha	25/03/2024	Fecha	18/06/2024
Nombre	Marc Lucena	Nombre	Mercè Vall-llossera
Posición	Autor del proyecto	Posición	Supervisor del proyecto

Tabla de contenidos

Resumen	1
Resum.....	2
Summary.....	3
Agradecimientos	4
Historial de revisión y aprobación	5
Tabla de contenidos	6
Lista de figuras.....	8
Lista de tablas	10
Lista de acrónimos y siglas	11
1. Introducción	12
1.1. Objetivos	13
1.2. Requerimientos.....	13
1.3. Metodología.....	13
1.4. Plan de trabajo	14
1.5. Incidencias	17
2. Estado del arte	18
2.1. Conceptos de teledetección y radiometría	18
2.1.1. Teledetección.....	18
2.1.2. Teledetección por microondas. Radiómetro de microondas	19
2.1.2.1 Radar y LIDAR.....	21
2.2. Contexto y componentes del Programa Espacial Europeo de Observación de la Tierra	23
2.2.1. Agencia Espacial Europea (ESA)	23
2.2.1.1. Misión y funciones	23
2.2.2. Programa Copernicus	23
2.2.2.1. Objetivos y alcance.....	23
2.2.2.2. Sentinel	24
2.2.2.3. CIMR.....	25
2.3. Satélites de observación de la Tierra	26
2.3.1. Misión SMAP	26



2.3.2.	AMSR2.....	28
2.4.	Medidas de Temperatura de Brillo (TB)	29
2.5.	Técnicas de procesamiento de datos	30
2.5.1.	Agregación.....	30
2.5.2.	Muestreo	30
2.5.3.	Interpolación	30
2.5.4.	Pansharpning	31
3.	Metodología/Desarrollo del proyecto	32
3.1.	Agregación de los datos a 108 km	34
3.2.	Muestreo de los datos a 36km	39
3.3.	Regresión lineal.....	40
4.	Resultados	41
4.1.	Métodos de muestreo.....	41
4.2.	Comparación mapas con promediado del año entero	43
4.3.	Comparación mapas con ventana de 15 días	47
5.	Análisis de sostenibilidad e implicaciones éticas	51
5.1.	Impacto medioambiental.....	51
5.2.	Presupuesto.....	53
6.	Conclusiones y líneas futuras.....	54
6.1.	Conclusiones.....	54
6.2.	Líneas futuras	55
	Bibliografía	56

Lista de figuras

Figura 1. Espectro electromagnético: tipo de radiación, longitud de onda, frecuencia y temperatura en la que la radiación es más intensa para cada frecuencia [20].	19
Figura 2. Radiómetro de microondas diseñado en el laboratorio CommSensLab, toma medidas desde tierra. Está situado encima módulo D3 Campus Nord [21].	20
Figura 3. Imagen artística del satélite SMOS que lleva embarcado el radiómetro interferométrico MIRAS (Microwave Imaging Radiometer by Aperture Synthesis) [22].	21
Figura 4. Imagen artística de PAZ, primer radar español en orbitar la Tierra [23].	22
Figura 5. Imagen artística de ICESAT-2 utilizando LIDAR [24].	22
Figura 6. Imagen artística de los satélites Sentinel en órbita [25].	24
Figura 7. Imagen artística del prototipo del satélite CIMR [26].	25
Figura 8. Imagen artística del satélite SMAP de la NASA [27].	27
Figura 9. Imagen artística del satélite AMSR2 de la JAXA [28].	28
Figura 10. Mapa conceptual del proceso seguido en este estudio para la validación de la técnica de pansharpeneing en la mejora de la resolución espacial de los mapas de Temperatura de brillo de la banda L con datos de la banda X.	32
Figura 11. Comparaciones de la huella de campo de visión instantánea en km para las bandas L y X de CIMR con los canales de banda de este estudio: SMAP agregado (banda L) y AMSR2 (banda X).	33
Figura 12. La imagen superior presenta las temperaturas de brillo medidas por AMSR2 en un día. La imagen inferior son las TBs de AMSR2 promedio de un año. Ambas imágenes en T(K).	34
Figura 13. Imagen de las proyecciones de la malla EASE2 [17].	35
Figura 14. Formato malla EASE 2 Grid utilizada respecto la longitud y la latitud.	36
Figura 15. Mapa de las TBs de SMAP antes de la agregación (malla de 36 km) en T(K).	36
Figura 16. Mapa de las TBs de SMAP después de aplicar agregación (malla de 108 km) en T(K).	37
Figura 17. Mapa de las TBs de AMSR2 antes de la agregación (malla de 25 km) en T(K).	38
Figura 18. Mapa de las TBs de AMSR2 después de la agregación (malla de 108 km) en T(K).	38
Figura 19. Mapa de TBs de SMAP con la máscara de mar aplicada en T(K).	40
Figura 20. Mapa de TBs de SMAP a la resolución de 36 km a partir de la resolución de 108 km aplicando interpolación lineal (linear).	41
Figura 21. Mapa de TBs de SMAP a la resolución de 36 km a partir de la resolución de 108 km aplicando interpolación al vecino más cercano (nearest).	42
Figura 22. Mapa en T(K) del término independiente 'a' de la ecuación (3).	43
Figura 23. Mapa en T(K) del término 'b' de la ecuación (3).	44

Figura 24. Comparación del mapa SMAP original (malla de 36 km), en la imagen superior, y el mapa obtenido aplicando la ecuación (3) con los términos 'a' y 'b' calculados, en la imagen inferior. Valores en T(K).	45
Figura 25. Mapa de correlación al cuadrado en T(K).	46
Figura 26. Mapa de error cuadrático medio en T(K).	46
Figura 27. Mapa en T(K) del término 'a' de la ecuación (3) con ventana de 15 días. ..	47
Figura 28. Mapa en T(K) del término 'b' de la ecuación (3) con ventana de 15 días. ..	48
Figura 29. Comparación mapa SMAP original (malla de 36 km) con ventana, en la imagen superior, y el mapa obtenido aplicando la ecuación (3) con los términos 'a' y 'b' con ventana de 15 días en T(K).	49
Figura 30. Mapa de correlación al cuadrado con ventana de 15 días en T(K).	50
Figura 31. Mapa de error cuadrático medio con ventana de 15 días en T(K).	50



Lista de tablas

Tabla 1. Work package 1.	14
Tabla 2. Work package 2.	15
Tabla 3. Work package 3.	16
Tabla 4. Work package 4.	16
Tabla 5. Hitos de cada work package.....	17
Tabla 6. Tabla de bandas de frecuencia de microondas.....	19
Tabla 7. Tablas resumen de características de CIMR, AMSR2 y SMAP.	29
Tabla 8. Tabla de costes del personal.	53
Tabla 9. Tabla de costes de material.....	53
Tabla 10. Tabla de presupuesto total.....	53

Lista de acrónimos y siglas

AMSR2	Advanced Microwave Scanning Radiometer 2
CCI	Climate Change Initiative
CIMR	Copernicus Imaging Microwave Radiometer
CNSA	China National Space Administration
ESA	European Space Agency
EASE2	Equal-Area Scalable Earth Grid 2
GMES	Global Monitoring for Environment and Security
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
ISRO	Indian Space Research Organisation
JAXA	Japan Aerospace eXploration Agency
LIDAR	Light Detection and Ranging
LST	Land Surface Temperature
MIRAS	Microwave Imaging Radiometer by Aperture Synthesis
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index
RADAR	Radio Detection and Ranging
ROSAC	Centro de Investigaciones Espaciales Rusas
SM	Soil Moisture
SMAP	Soil Moisture Active and Passive
SMOS	Soil Moisture and Ocean Salinity
TB	Brightness Temperature
UE	Unión Europea
VOD	Vegetation Optical Depth

1. Introducción

La observación de la tierra desde el espacio ha revolucionado la comprensión de nuestro planeta desde hace más de 65 años [13]. Los satélites de observación de la Tierra permiten monitorizar parámetros geofísicos y desempeñan una función crucial en el proceso de proporcionar medidas globales y periódicas de dichos parámetros. Estas medidas ayudan a entender mejor una gran variedad de fenómenos ambientales y climáticos. Actualmente, además, predecir y paliar algunos efectos del cambio climático. Estos satélites llevan embarcados sensores con distintas tecnologías: lídars, radiómetros de microondas y radares, a distintas frecuencias. Según la aplicación o parámetro a recuperar, serán más adecuadas unas u otras tecnologías y frecuencias. Actualmente, también, se ha demostrado que es conveniente utilizar sinergias de medidas obtenidas con varias tecnologías y/o frecuencias.

En este proyecto se han utilizado medidas obtenidas con radiómetros de microondas. Estos sensores miden la TB (temperatura de brillo), que es la emisión electromagnética espontánea de los objetos, por el hecho de estar a una temperatura física distinta del cero absoluto.

El objetivo principal de este proyecto ha sido aplicar y validar la técnica de nitidez (en inglés, *pansharpening*) a imágenes de radiometría de microondas de dos bandas de frecuencia diferentes y así mejorar la resolución espacial de los mapas obtenidos a baja frecuencia; concretamente, se ha aplicado esta técnica para mejorar la resolución espacial de los mapas de TB obtenidos con medidas del radiómetro en banda L (1-2 GHz) del satélite SMAP (*Soil Moisture Active-Passive*) de la NASA (*National Aeronautics and Space Administration*). Para ello, se ha aplicado la técnica *pansharpening* con datos en banda X (8-12 GHz) obtenidos con el radiómetro AMSR2 (*Advanced Microwave Scanning Radiometer 2*) de la JAXA (*Japan Aerospace eXploration Agency*). La razón del uso concreto de estas bandas de frecuencias es porque este trabajo está enmarcado dentro de los estudios preparatorios de la futura misión CIMR (*Copernicus Imaging Microwave Radiometer*) de la ESA (Agencia Espacial Europea). Esta misión llevará embarcado un radiómetro de microondas multifrecuencia de barrido cónico de amplia franja para proporcionar observaciones de la temperatura de la superficie del mar, la concentración de hielo marino y la salinidad de la superficie del mar. Excepcionalmente, también observará una amplia gama de otros parámetros del hielo marino. CIMR responde a requisitos de alta prioridad de comunidades clave de usuarios del Ártico. Sin embargo, también tomará medidas sobre tierra y proporcionará productos como la temperatura y la humedad superficiales.

Este trabajo, dirigido por las doctoras Mercè Vall-Ilossera y Miriam Pablos, se ha realizado en el departamento de Teoría de Señal y Comunicaciones de la UPC (Universitat Politècnica de Catalunya BarcelonaTech), específicamente en la unidad de CommSensLab. Este laboratorio lleva años trabajando en teledetección activa y pasiva.

1.1. Objetivos

A continuación, se enumeran los objetivos intermedios del proyecto:

- Acceder a las páginas web de las misiones SMAP y AMSR2 para visualizar y bajar los mapas globales de TB de los satélites en sus resoluciones espaciales originales (y cuadrículas).
- Preprocesar los datos: agregar los datos para pasar de mayor a menor resolución espacial, aplicar una interpolación lineal, y/o sobre muestreo para tener todos los mapas muestreados en la misma cuadrícula, pero manteniendo las diferentes resoluciones espaciales.
- Implementación y aplicación de la técnica de *pansharpening*.
- Validación de los mapas obtenidos utilizando el *pansharpening* y cálculo del error en diferentes zonas del mundo.

1.2. Requerimientos

Para este proyecto se requiere:

- Conocimientos de informática en lenguaje MATLAB (o Python) para el desarrollo de subrutinas, análisis de datos y presentación de resultados
- Análisis y tratamiento de datos. Concretamente TB de SMAP y AMSR2.
- Conocimientos de muestreo de mapas de datos (agregación por promediado, interpolación lineal y remuestreo).
- Conocimientos de estadística básica (regresión lineal, estimación de errores, etc.).

1.3. Metodología

La metodología que se ha seguido ha sido la que se describe a continuación. Primero se buscó la mejor manera de acceder y descargar los datos de temperatura de brillo de las dos misiones de interés. Los datos de SMAP se han descargado de la página web de la NASA [12], mientras que para los datos de AMSR2 se ha utilizado el software gratuito WinSCP que funciona como servidor. Este proceso ha permitido la familiarización en la manipulación de mapas de datos obtenidos a partir de datos de satélites de observación de la Tierra. Una vez se comprobó que los datos se descargaban bien y estaban en el formato requerido, se adaptó un código para descargar y visualizar todos los mapas que se iban a utilizar en el proyecto. El periodo de estudio elegido es el año 2017 entero, se requiere disponibilidad de datos simultáneamente de SMAP y AMSR2.

Después, dado que la resolución espacial de las TB de SMAP a 1.4 GHz (banda L) y de AMSR2 a 10.65 GHz (banda X) son de un orden de magnitud similar (decenas de km), se decide agregar previamente los mapas de TB de SMAP desde una malla de 36 km a una de 108 km para después poder aplicar el *pansharpening* y así poder demostrar la viabilidad del uso de esta técnica en la mejora de la resolución espacial. De esta manera,

se dispone de una referencia (TB de SMAP a 36 km) con la que poder comparar los resultados obtenidos. Sin embargo, los cálculos necesarios para hacer el *pansharpening* deben hacerse con mapas que tengan el mismo número de muestras, aunque puedan tener resoluciones espaciales diferentes, por lo que también ha sido necesario muestrear las TB de SMAP de 108 km a 36 km con dos métodos diferentes (interpolación al vecino más cercano e interpolación lineal). En el caso de AMSR2, se ha tenido que agregar la TB de una malla de 0.25 (~25 km) a la de 108 km. También, se ha hecho el muestreo de las TBs de 108 km a 36 km, y de 25 km a 36 km con ambos métodos de interpolación. Todo ello, ha derivado en el desarrollo de varios códigos para hacer todos los procesos de cambio de malla de los mapas de los dos satélites. Es importante asegurarse de que de todos los mapas están exactamente en la misma malla, así como las matrices de latitud y longitud tienen exactamente las mismas dimensiones.

Una vez aplicado todo el procedimiento, se ha realizado el análisis estadístico de los resultados, error cuadrático medio y correlación. De esta forma se pueden extraer conclusiones de la aplicación del *pansharpening* para la mejora de la resolución espacial, con datos obtenidos simultáneamente a dos frecuencias (banda L y banda X) y, por tanto, a dos resoluciones.

1.4. Plan de trabajo

El proyecto se ha dividido de la siguiente manera:

Proyecto: Aprender acerca de SMAP y AMSR2	WP ref: (WP#1)	
<p>Descripción:</p> <p>Lectura de bibliografía (artículos de revistas e informes técnicos) para conocer las misiones SMAP y AMSR2, incluidas sus características orbitales, las bandas de frecuencia de los radiómetros y las resoluciones espaciales. Registro en las bases de datos de la NASA y JAXA para obtener mapas de TB de SMAP y AMSR2 durante todo un año.</p>	<p>Fecha de inicio prevista:</p> <p>12/02/2024</p> <p>Fecha de finalización prevista:</p> <p>03/03/2024</p> <hr/> <p>Inicio: 12/02/2024</p> <p>Final: 03/03/2024</p>	
<p>Tarea interna T1: Saber trabajar con mapas de datos terrestres de satélites y archivos h5.</p> <p>Tarea interna T2: Descargar todos los mapas e intentar abrirlos con Panoply, una herramienta utilizada para ver la estructura de datos de los archivos.</p>	<p>Entregables:</p> <p>Project proposal and Workplan.</p>	<p>Fechas:</p> <p>10/03/2024</p>

Tabla 1. Work package 1.

Proyecto: Implementar y aplicar el <i>pansharpening</i> .	WP ref: (WP#2)	
<p>Descripción:</p> <p>Implementar <i>pansharpening</i> para ser utilizado con SMAP de banda L y AMSR2 TB de banda X que permita mejorar la resolución de los mapas.</p>	<p>Fecha de inicio prevista: 03/03/2024</p> <p>Fecha de finalización prevista: 05/05/2024</p> <hr/> <p>Inicio: 03/03/2024</p> <p>Final: 05/05/2024</p>	
<p>Tarea interna T1: Crear un script para visualizar correctamente los mapas SMAP y AMSR2.</p> <p>Tarea interna T2: Crear scripts para agregar y remuestrear los diferentes mapas en las diferentes cuadrículas (25km, 36km y 108km).</p> <p>Tarea interna T3: Crear un script para calcular los coeficientes del algoritmo de <i>pansharpening</i> mediante una regresión lineal entre los datos SMAP y AMSR2 para cada píxel sobre tierra, con una ventana deslizante de 15 días.</p> <p>Tarea interna T4: Crear un script para aplicar los coeficientes para cada píxel y día para estimar los mapas con <i>pansharpening</i>.</p>	<p>Entregables: Critical Review.</p> <p>Mapas de TB con el algoritmo de <i>pansharpening</i> aplicado.</p>	<p>Fechas: 14/04/2024</p> <p>05/05/2024</p>

Tabla 2. Work package 2.

Proyecto: Evaluación de los mapas obtenidos.	WP ref: (WP#3)	
<p>Descripción:</p> <p>A partir de los resultados obtenidos con el algoritmo <i>pansharpening</i>, analizar los resultados y comprobar si son correctos.</p>	<p>Fecha de inicio prevista:</p> <p>21/04/2024</p> <p>Fecha de finalización prevista:</p> <p>19/05/2024</p> <hr/> <p>Inicio: 21/04/2024</p> <p>Final: 19/05/2024</p>	
<p>Tarea interna T1: Validar los mapas obtenidos.</p>	<p>Entregables:</p> <p>Tabla con estadísticas de validación.</p>	<p>Fechas:</p> <p>19/05/2024</p>

Tabla 3. Work package 3.

Proyecto: Explicación final y defensa.	WP ref: (WP#4)	
<p>Descripción:</p> <p>Redactar e ilustrar todos los pasos de la metodología seguida para alcanzar los resultados y conclusiones y realizar el informe final del proyecto. Defensa del proyecto.</p>	<p>Fecha de inicio prevista:</p> <p>20/05/2024</p> <p>Fecha de finalización prevista:</p> <p>14/06/2024</p> <hr/> <p>Inicio: 20/05/2024</p> <p>Final: 14/06/2024</p>	
<p>Tarea interna T1: Redactar el informe.</p> <p>Tarea interna T2: Defensa del trabajo.</p>	<p>Entregables:</p> <p>Final Project.</p> <p>Defensa del proyecto.</p>	<p>Fechas:</p> <p>19/06/2024</p> <p>01/07/2024</p>

Tabla 4. Work package 4.

A continuación, se muestran los hitos que resumen todos los *work packages* y que han tenido gran importancia para el correcto desarrollo del trabajo.

WP#	Tarea#	Título	Hito/Entrega	Fecha (Semanas)
#1	T1	Aprender a cerca de SMAP y AMSR2.	Trabajar con los mapas de datos terrestres de los satélites.	3
#1	T2	Aprender a cerca de SMAP y AMSR2.	Descargar todos los mapas.	6
#2	T1	Crear un script.	Crear un script para visualizar los mapas de SMAP i AMSR2.	7
#2	T2	Crear los scripts para agregar y remuestrear.	Agregar y remuestrear.	9
#2	T3	Calcular los coeficientes del algoritmo de <i>pansharpening</i> .	Calcular los coeficientes de la regresión lineal entre los datos SMAP y AMSR2 para cada píxel sobre la tierra.	12
#2	T4	Crear un script para aplicar los coeficientes.	Crear un script para aplicar los coeficientes para cada píxel y día para estimar los mapas con <i>pansharpening</i> .	13
#3	T1	Evaluar los mapas obtenidos	Validar los mapas.	14
#4	T1	Explicación final	Escribir la memoria.	18
#4	T2	Explicación final	Defensa del trabajo.	20

Tabla 5. Hitos de cada *work package*.

1.5. Incidencias

Al inicio del proyecto, se decidió cambiar la idea original en la que se combinaban los datos del satélite SMAP (banda L) con datos AMSR2 en banda C. Finalmente, se decidió sustituir la banda C de AMSR2 por la banda X de AMSR2.

2. Estado del arte

2.1. Conceptos de teledetección y radiometría

2.1.1. Teledetección

La teledetección es una técnica de adquisición de información que consiste en obtener información a distancia de objetos o fenómenos sin tener contacto directo (no perturba dicho medio), mediante la detección y medición de la energía electromagnética que emite, refleja o irradia el objeto. Esto se mide a través de sensores que pueden estar instalados en drones, globos aerostáticos, aviones, satélites, torres, etc.

En el ámbito de la observación de la Tierra, la teledetección se utiliza en campos muy diversos como son:

- Agricultura: gestión de cultivos o predicción de la producción agrícola.
- Ciencias ambientales: para monitorear la vegetación, humedad del suelo, calidad del suelo o del aire.
- Geología: detección de los recursos minerales.
- Urbanismo: evaluación de crecimiento urbano o detección de cambios en infraestructuras.

Los instrumentos (sensores) de teledetección se pueden clasificar dependiendo de donde procede la potencia que recibida:

- Activos: funcionan con su propia fuente de emisión, de manera que emiten una señal, se propaga y llega al objeto de estudio, se refleja parte de la potencia que se recibe esta reflexión. Según el tiempo entre emisión y recepción y el cociente de potencias emitida y recibida se deducen diferentes aspectos, como distancia del blanco radar y algunas de sus características. Ejemplos de sensores activos son el radar (*Radio Detection and Ranging*) y los sistemas LIDAR (*Light Detection and Ranging*).
- Pasivos: el instrumento capta la emisión espontánea, reflejada o emitida por el objeto de estudio al estar a una temperatura física más alta del 0 absoluto (0 K). Ejemplos de sensores pasivos son los radiómetros, las cámaras térmicas o las cámaras fotográficas.

2.1.2. Teledetección por microondas. Radiómetro de microondas

Las microondas cubren un rango de frecuencias dentro del espectro electromagnético entre las frecuencias de radio y las infrarrojas, como se muestra en la figura 1. Este rango de frecuencias normalmente se extiende desde 300 MHz a 300 GHz (en términos de longitud de onda entre 1 m y 1 mm). Existen otras definiciones como la de la IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*), que define la banda de frecuencias desde 1 GHz hasta 300 GHz (entre 30 cm y 1 mm). En la tabla 6, se indican las bandas en las que se dividen las frecuencias de microondas. Además, la frecuencia máxima y mínima de cada banda, y sus correspondientes longitudes de onda mínima y máxima.

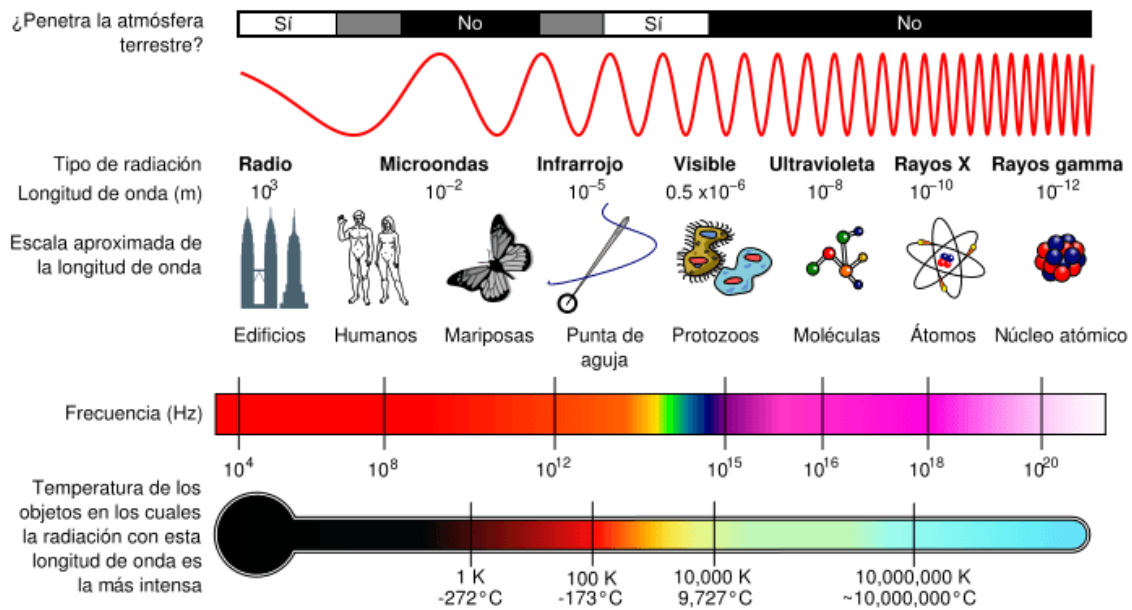


Figura 1. Espectro electromagnético: tipo de radiación, longitud de onda, frecuencia y temperatura en la que la radiación es más intensa para cada frecuencia [20].

Banda	P	L	S	C	X	Ku	K	Ka	Q	U	V	E	W	F	D
Frec. Mínima (GHz)	0,2	1	2	4	8	12	18	27	30	40	50	60	75	90	110
Frec. Máxima (GHz)	1	2	4	8	12	18	27	40	50	60	75	90	110	140	170

Tabla 6. Tabla de bandas de frecuencia de microondas.

La razón fundamental por la que se utiliza la teledetección por microondas para la observación de la Tierra es que las señales a frecuencias de microondas, especialmente las bandas de microondas bajas (L, S, C y X), tienen la capacidad de penetrar la atmósfera terrestre, incluyendo nubes y lluvia. Además, en el caso de la banda L, esta capacidad de penetración permite la observación de la superficie terrestre bajo la cobertura vegetal baja o moderada (hasta contenidos de agua de la vegetación $\leq 5 \text{ kg/m}^2$). Así mismo,

otra ventaja del uso de las microondas es su independencia a la iluminación solar: se pueden obtener observaciones de día y de noche. Estas son algunas de las razones por las que actualmente existen varias misiones con radiómetros de microondas en órbita. Por ejemplo, las misiones SMOS (*Soil Moisture and Ocean Salinity*) de la ESA (Agencia Espacial Europea) y SMAP de la NASA, dedicadas principalmente a la medida de la humedad del suelo y, en el caso de SMOS también a la salinidad de los océanos, llevan embarcado un radiómetro de microondas en banda L (1.4 GHz).

Existen tanto radares como radiómetros trabajando a la frecuencia de microondas. En este proyecto se describe en detalle el funcionamiento de los radiómetros de microondas, porque los datos que se utilizan han sido captados por este tipo de instrumentos embarcados en satélites.

Estos radiómetros, como anteriormente se ha mencionado, se pueden diseñar para tomar medidas en tierra, como es el caso del radiómetro que se muestra en la figura 2 y también se pueden desarrollar para ser una carga útil en satélites, como se puede ver en la figura 3. Los radiómetros pueden ser embarcados en satélites geoestacionarios o de órbita baja, normalmente. Los geoestacionarios (órbita a 36.000 km) permiten un monitoreo continuo y en áreas muy amplias, pero tienen menor resolución espacial. En cambio, los satélites de órbita baja (normalmente en torno a los 700 km-800 km) tienen alta resolución espacial, pero una cobertura temporal limitada. Por otra parte, ambos pueden proporcionar datos regulares a escala global.



Figura 2. Radiómetro de microondas diseñado en el laboratorio CommSensLab, toma medidas desde tierra. Está situado encima módulo D3 Campus Nord [21].



Figura 3. Imagen artística del satélite SMOS que lleva embarcado el radiómetro interferométrico MIRAS (Microwave Imaging Radiometer by Aperture Synthesis) [22].

2.1.2.1 Radar y LIDAR

En los instrumentos activos se distingue entre los que generan imágenes y los que no, el radar y el LIDAR respectivamente. El radar es un sistema de detección remota que usa las ondas electromagnéticas para detectar la presencia de objetos o formaciones meteorológicas y proporcionar distintas informaciones. Trabaja en el margen de las microondas, concretamente en la banda del espectro entre 1mm y un 1m.

El LIDAR es un sistema de detección remota pero que, a diferencia del radar, utiliza pulsos de luz laser. Estos pulsos son enviados al objeto y la luz reflejada es la que vuelve al instrumento midiendo el tiempo que tarda en regresar para determinar la distancia de las partículas detectadas. También, puede analizar los cambios de frecuencia, velocidad y dirección del objeto en movimiento. Trabaja en longitudes de onda desde ultravioleta a infrarrojo cercano, 10 nm y 700-1400 nm respectivamente.

Estos sensores, a partir de sus propiedades de microondas, pueden operar de manera eficiente en cualquier condición meteorológica, aunque sus capacidades y limitaciones puedan diferir. En la imagen 4 se puede ver imagen artística de la misión PAZ, que lleva embarcado el primer radar español en orbitar la Tierra y, en la figura 5, el satélite ICESAT-2, que lleva embarcado un LIDAR.

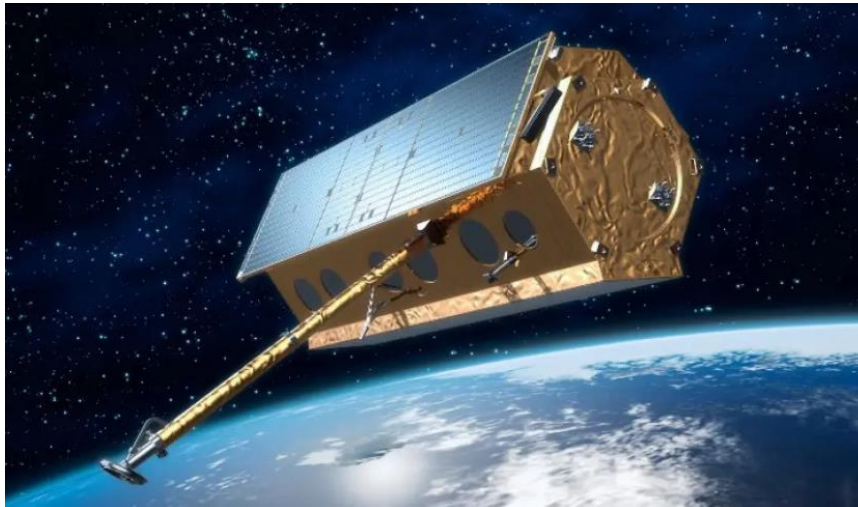


Figura 4. Imagen artística de PAZ, primer radar español en orbitar la Tierra [23].

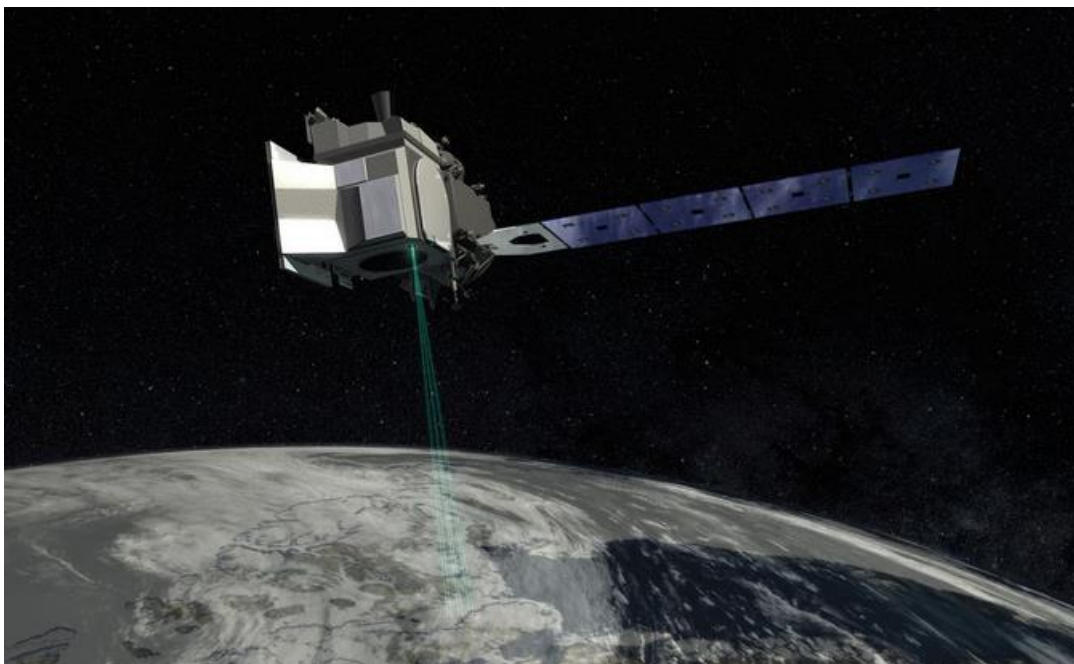


Figura 5. Imagen artística de ICESAT-2 utilizando LIDAR [24].

Por último, mencionar también que los sistemas de microondas activos tienden a ser los instrumentos más pesados y con mayor consumo de energía, además de que la interpretación de sus datos no suele ser simple. Estos instrumentos como poseen una resolución espacial significativamente mayor que los radiómetros pasivos, manejan y almacenan volúmenes de datos inmensamente superiores.

2.2. Contexto y componentes del Programa Espacial Europeo de Observación de la Tierra

2.2.1. Agencia Espacial Europea (ESA)

La ESA (Agencia Espacial Europea), creada en 1975, es una organización internacional dedicada a la exploración de la Tierra y el Universo. La ESA propiamente se define como la puerta de acceso al espacio del continente europeo [1].

2.2.1.1. Misión y funciones

La ESA se encarga del diseño y lanzamiento de satélites para la observación de la Tierra, navegación, astronomía y las telecomunicaciones, enviando sondas en el sistema solar y colaborando en la exploración del espacio con otras organizaciones como la NASA o la JAXA. Su misión principal, aparte de configurar el desarrollo de la capacidad espacial europea, se enfoca en garantizar la inversión en actividades espaciales y que sigan dando beneficios a los ciudadanos europeos.

La ESA está formada por 22 estados miembros, como por ejemplo Alemania, España, Grecia e Italia. La coordinación de los recursos económicos e intelectuales entre todos los estados miembro permite llevar a cabo programas y actividades de mayor alcance de los que podría realizar cualquier país europeo individualmente.

Lleva a cabo una variedad de misiones espaciales que se pueden clasificar en varias categorías:

- Observación de la Tierra: tienen como objetivo monitorear tanto la superficie como la atmosfera terrestre, por ejemplo, los satélites Sentinel [5].
- Científicas: diseñadas para responder preguntas fundamentales sobre el universo, el sistema solar y la física.
- Exploración humana: misiones tripuladas e investigación para la futura exploración humana del espacio.
- Astronomía: se centran en observar el universo y estudiar fenómenos astronómicos.

2.2.2. Programa Copernicus

2.2.2.1. Objetivos y alcance

Copernicus es el programa creado por la UE (Unión Europea), que sustituye al programa GMES (*Global Monitoring for Environment and Security*) del 2001 y que empieza en 2012. El objetivo principal es observar y monitorizar la Tierra para proporcionar medidas de forma gratuita, para desarrollar aplicaciones que permitan, entre otros objetivos, entender mejor el planeta, predecir y paliar los efectos del cambio climático y gestionar de forma sostenible el medio ambiente [2][3].

Junto a este programa también se ha generado la iniciativa CCI (*Climate Change Initiative*) con el objetivo de determinar y combatir los efectos del cambio climático. La ESA, como la NASA, dispone de registros históricos de datos medidos con los instrumentos embarcados en sus satélites que están a disposición de los usuarios de forma gratuita. Además, con el programa Copernicus se pretende dar continuidad temporal a los datos para que las aplicaciones desarrolladas tengan garantizado su adquisición en un periodo largo de tiempo. Los satélites operacionales Sentinel forman parte del programa Copernicus.

2.2.2.2. Sentinel

Sentinel es una serie de satélites desarrollados desde el programa Copernicus con el fin de proporcionar una amplia gama de datos sobre la Tierra, incluyendo información de la atmósfera, océanos y superficie terrestre. Los datos recogidos por los satélites Sentinel son de acceso gratuito y disponibles para usos informativos o académicos.

Esta serie de satélites ha desencadenado más de 6 lanzamientos, el primero fue Sentinel-1 el 3 de abril de 2014 para proporcionar imágenes de radar diurnas y nocturnas en cualquier condición meteorológica para los servicios terrestres y oceánicos [5]. En años posteriores se han seguido enviando satélites con otras funciones, como se puede ver en la figura 6, y están previstas más misiones hasta el año 2025.

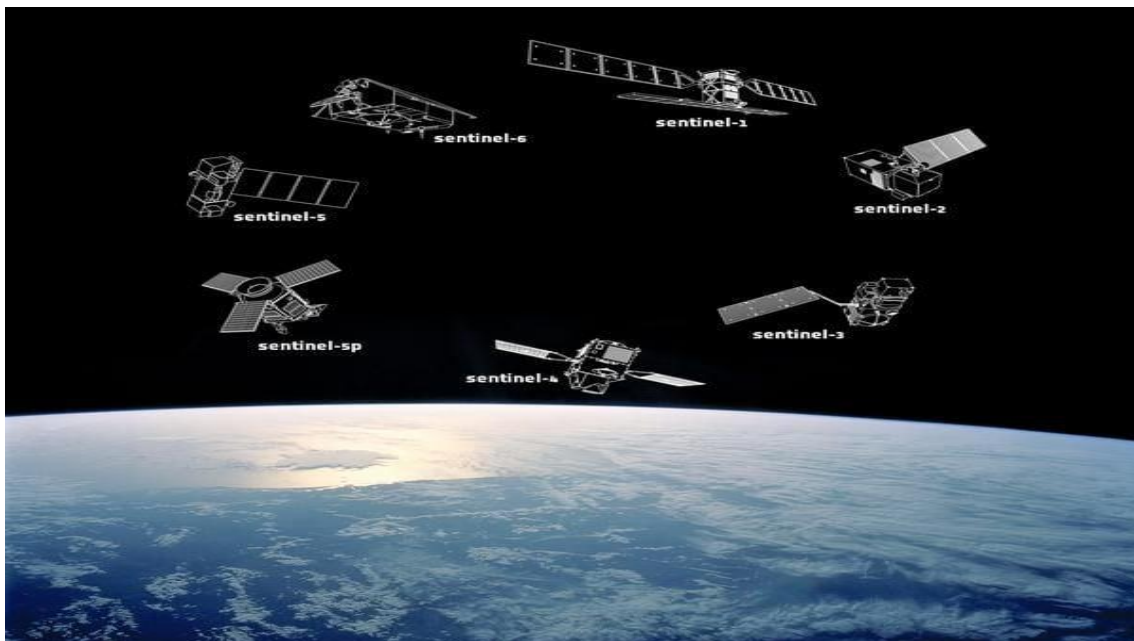


Figura 6. Imagen artística de los satélites Sentinel en órbita [25].

Con un único satélite se suelen tener tiempos de revisita de unos 12 días. Para mejorar este tiempo se suelen utilizar dos satélites idénticos separados media órbita, consiguiendo revisitas de unos 6 días.

2.2.2.3. CIMR

El CIMR (Copernicus Imaging Microwave Radiometer) es un proyecto para una futura misión de observación de la Tierra que pertenece al programa Copernicus. Se estima que la misión pueda ser lanzada el año 2028. Este proyecto tiene el objetivo principal de mejorar la cobertura espacial y temporal del hielo marino y el entorno Ártico. También proporcionará datos sobre el mar, como la temperatura superficial y la salinidad de los océanos. Sobre tierra está previsto obtener datos de humedad, temperatura superficial y también la fracción de agua.

CIMR operará en 6 frecuencias, desde 1,4 GHz a 36,5 GHz. Estas frecuencias están en las bandas L, C, X, Ku y Ka, con un ángulo cenital de observación de 52° para la banda L y de 55° para las bandas C, X, Ku y Ka. Los tiempos de paso serán a las 6 am/6 pm. El satélite proporcionará diariamente muestras de mediciones globales de los cuatro parámetros de Stokes en huellas de diferentes tamaños en función de la frecuencia de la banda. Para las bandas L y C, la resolución espacial prevista es de <60 km y <15 km, respectivamente [8].

Los datos medidos se distribuirán en abierto para la comunidad científica y académica. En la figura 7 se puede ver una imagen artística del prototipo del CIMR una vez esté en órbita. En este caso incorpora una única antena parabólica, que se desplegará una vez ya esté en órbita, como SMAP.

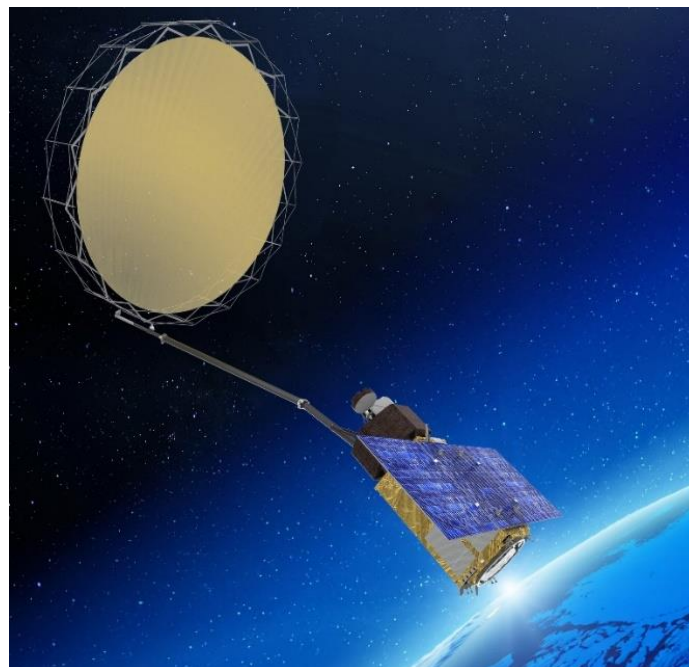


Figura 7. Imagen artística del prototipo del satélite CIMR [26].

Los objetivos de este proyecto forman parte del estudio en la fase de preparación de esta misión; puesto que se explora el uso de la técnica *pansharpening* para mejorar la

resolución espacial de la banda L. Está previsto utilizar medidas en banda X para combinarlas con las medidas simultáneas de banda L y conseguir dicha mejora. Como actualmente, CIMR no está en órbita, en este estudio se utilizan datos de medidas de otros satélites. En el capítulo de resultados se hace un análisis de viabilidad de esta técnica.

2.3. Satélites de observación de la Tierra

Además de la ESA, existen diferentes organizaciones internacionales que se dedican a la exploración de la Tierra y el Universo. Una de las más importantes es la NASA, que es la agencia espacial de los Estados Unidos y tiene satélites como los Landsat o el programa MODIS. Otra agencia espacial es la JAXA que es la agencia espacial japonesa. Otras organizaciones que también trabajan en el lanzamiento de satélites o la creación de programas de gran importancia para el estudio del planeta desde el espacio, pueden ser la CNSA (*China National Space Administration*), el ROSAC (Centro de Investigaciones Espaciales Rusas) o la ISRO (*Indian Space Research Organisation*).

Estas organizaciones tienen objetivos en común, como pueden ser la investigación científica y el desarrollo tecnológico para la observación de la Tierra; pese a esos objetivos, suelen ser entidades que trabajan de manera independiente. Cada una tiene su agenda, sus proyectos y su financiación, pero ocasionalmente pueden colaborar en proyectos específicos.

A continuación, se describen las misiones SMAP y AMSR2 de NASA y JAXA, respectivamente. Puesto que los datos utilizados en este proyecto, como ya se ha comentado, son medidas adquiridas por estas dos misiones. Al no disponer de datos de CIMR, en esta fase preparatoria se utilizan datos de otras misiones. Se intenta que las características de estos sean lo más similar posible a los datos de CIMR: frecuencia (banda L y banda X) y ángulo de visión similar.

2.3.1. Misión SMAP

SMAP (*Soil Moisture Active Passive*) es una misión lanzada por la NASA en 2015. El SMAP mide y cartografía la humedad del suelo terrestre y su estado de congelación/descongelación con el fin de comprender mejor los ciclos terrestres del agua, el carbono y la energía. El satélite pasa por el ecuador en órbita ascendente a las 6:00 p.m. y en órbita descendente a las 6:00 a.m. Proporciona una cobertura completa de datos de la Tierra cada 2-3 días y solo opera a frecuencia de 1,41 GHz en banda L y con un ángulo de incidencia de 40 grados. Para mejorar la resolución espacial del radiómetro, SMAP llevaba embarcado un radar en banda L, pero dejó de funcionar al cabo de tres meses de estar orbitando. La resolución nativa del radiómetro está en torno a los 36 km, pero han desarrollado algoritmos para obtener datos a mejor resolución espacial (producto a 9 km) [8][9]. En la figura 8 se puede ver una imagen artística del satélite SMAP orbitando la Tierra.

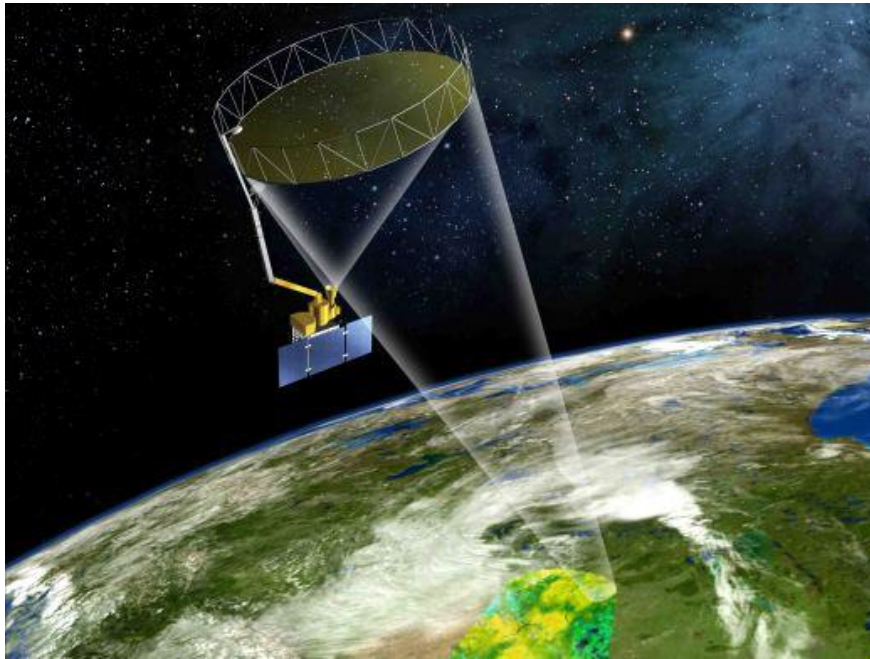


Figura 8. Imagen artística del satélite SMAP de la NASA [27].

Los productos de la misión SMAP se dividen en productos de diferentes niveles, una vez agrupados nos quedan cinco categorías [14]:

Productos nivel 0 (L0): son los datos SMAP sin procesar, reconstruidos cronológicamente.

Productos nivel 1 (L1): todos los datos reconstruidos y sin procesar de radar y radiometría.

Productos nivel 2 (L2): datos de humedad del suelo y congelación/descongelación derivados de datos de L1. Se obtienen en el mismo momento y contienen información corregida

Productos nivel 3 (L3): datos de humedad del suelo y congelación/descongelación mapeados a una cuadrícula global diaria. Estos datos se obtienen den distintas fechas, y aplican interpolación y correcciones para perturbaciones.

Productos nivel 4 (L4): productos que combinan observaciones SMAP con modelos de superficie terrestre para proporcionar variables derivadas como la humedad del suelo. Estos productos son derivados de observaciones y modelado.

2.3.2. AMSR2

El AMSR2 (*Advanced Microwave Scanning Radiometer 2*) es un instrumento a bordo del satélite japonés GCOM-W1, lanzado por la JAXA en 2012. AMSR2 proporciona datos sobre precipitaciones globales, velocidad del viento oceánico, vapor de agua, concentración de hielo marino, temperatura de la luminosidad y humedad del suelo.

Pasa por el ecuador en órbita ascendente a la 1:30 p.m. y, en órbita descendente, a la 1:30 a.m. El satélite opera en frecuencias comprendidas entre 6,925 GHz a 89 GHz en las bandas (C, X, Ku, Ka) y en un ángulo de incidencia de 55 grados, idéntico al de CIMR. Proporciona estimaciones globales de TB en polarizaciones vertical y horizontal cada dos días en su resolución fija [8][10].

En la figura 9 se muestra una imagen artística del satélite AMSR2 orbitando la Tierra.



Figura 9. Imagen artística del satélite AMSR2 de la JAXA [28].

A continuación, en la tabla 7, se puede ver el cuadro resumen de las características de las misiones CIMR, SMAP y AMSR2, donde se tienen en cuenta las bandas de frecuencia con las correspondientes frecuencias y longitudes de onda centrales, el ángulo de observación y las horas de paso por el ecuador.

CIMR	Frecuencias (GHz)	Longitud de onda	Ángulo observación	Horas de paso
Banda L	1.4	21 cm	52°	6 am/6 pm
Banda C	6.9	4.3 cm	55°	6 am/6 pm
Banda X	10.65	2.8 cm	55°	6 am/6 pm
Banda Ku	18.7	1.6 cm	55°	6 am/6 pm
Banda Ka	36.5	8.2 mm	55°	6 am/6 pm

AMSR2	Frecuencias (GHz)	Longitud de onda	Ángulo observación	Horas de paso
Banda L	X	X	X	X
Banda C	6.9-7.3	~4.3 cm	55°	1.:30 am/1:30 pm
Banda X	10.25-10.75	~2.9 cm	55°	1.:30 am/1:30 pm
Banda Ku	18.6-18.8, 23.6-24	~1.4 cm	55°	1.:30 am/1:30 pm
Banda Ka	36.5-36.7	~8.2 mm	55°	1.:30 am/1:30 pm

SMAP	Frecuencias (GHz)	Longitud de onda	Ángulo observación	Horas de paso
Banda L	1.4	21 cm	40°	6.:00 am/6:00 pm

Tabla 7. Tablas resumen de características de CIMR, AMSR2 y SMAP.

2.4. Medidas de Temperatura de Brillo (TB)

La TB (temperatura de brillo o, en inglés, *Brightness Temperature*), medida en diversos rangos espectrales, es la temperatura que un objeto emite en forma de radiación electromagnética en diferentes longitudes de onda. Revela información valiosa sobre la distribución térmica de la superficie terrestre y sus cambios temporales. Este indicador es especialmente importante para el seguimiento de variables climáticas, como el calentamiento global y los fenómenos meteorológicos extremos. Además, la temperatura de brillo proporciona información esencial sobre las nubes y la composición atmosférica, lo que permite mejorar los modelos climáticos y predecir eventos meteorológicos con mayor precisión. Así mismo, su valor depende tanto de la temperatura ambiente a la que está el objeto, como de la constante dieléctrica del mismo, que a su vez dependen de las características del material. En el caso de medidas sobre tierra, dependerá de la rugosidad, de si el suelo es más o menos poroso y de su composición (calcáreo, arenoso, ...), así como del grado de humedad. Así la TB se obtiene a partir de la ecuación:

$$T_B(\theta, \phi) = T \cdot e(\theta, \phi) \quad (1)$$

donde T es la temperatura física del medio en Kelvins y $e(\theta, \phi) = 1 - \Gamma(\theta, \phi)$ es la emisividad, la parte de energía que el cuerpo ha absorbido (no ha sido reflejada) y, en equilibrio térmico es, después, emitida. $\Gamma(\theta, \phi)$ es el coeficiente de reflexión que depende de la dirección de observación.

Para una zona cubierta de vegetación, la temperatura de brillo se aproxima por la siguiente función de transferencia radiativa:

$$T_{BP} = e_p T_s \gamma + (1 - \omega) T_v (1 - \gamma) + (1 - e_p) (1 - \omega) T_v (1 - \gamma) \gamma \quad (2)$$

Donde T_s y T_v son las temperaturas efectivas del suelo y la vegetación respectivamente, la ' γ ' es la transmisividad de la capa de vegetación, y la ' ω ' el albedo de dispersión única.

En este trabajo, se trabaja con las medidas de satélite que llevan embarcados radiómetros para obtener la parte de la energía absorbida por el suelo y readmitida en equilibrio térmico. Para ello, se utilizan las temperaturas de brillo de los satélites SMAP y AMSR2, pero a partir de las temperaturas de brillo, añadiendo la información de otros datos auxiliares se pueden obtener parámetros geofísicos como las SM (muestras de humedad del suelo o, en inglés, *Soil Moisture*), LST (Temperatura de la superficie terrestre) o el NDVI (Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada).

2.5. Técnicas de procesamiento de datos

2.5.1. Agregación

La agregación es un proceso de promediado de un conjunto de valores o datos de un área o región más grande. En cartografía y análisis de datos espaciales, por ejemplo, este proceso combina valores de distintas celdas o puntos dentro de un área y calcula su promedio.

En este proyecto la temperatura de brillo del suelo representada en una cuadrícula de 25 km se agrega para pasar a un mapa de resolución de 36 km.

La agregación es útil para reducir la resolución espacial de los datos y tener una visión general de las tendencias en una escala más amplia. También puede suavizar los datos y reducir el ruido o la variabilidad espacial, en algunos casos.

2.5.2. Muestreo

El muestreo de datos es un proceso de recopilación y selección de muestras que representan un conjunto más grande de datos para hacer análisis, o entre otros objetivos, el de aumentar el número de muestras. Aumentar el número de muestras es un proceso por el que se generan nuevas muestras a partir de los datos ya existentes. Esto se puede usar para casos en los que se necesita incrementar el tamaño de la muestra original para hacer análisis más precisos o para poder estimar nuevos valores con el cálculo de ecuaciones con técnicas de interpolación. Este proceso puede ser útil cuando se quiere estimar valores en regiones donde no se dispone de datos o si se desea aumentar la resolución espacial de estos valores.

2.5.3. Interpolación

La interpolación es una técnica que se utiliza para agregar nuevos puntos de datos dentro del rango de un conjunto de puntos de datos conocidos. Es posible usar la interpolación para rellenar datos que no existen, suavizar datos existentes y hacer predicciones [11].

En el contexto de datos espaciales, esta técnica se utiliza para estimar valores de una variable en ubicaciones específicas basándose en ubicaciones cercanas.

Existen varios métodos de interpolación:

- Lineal: se estima el valor de un punto intermedio en función de la pendiente de los dos puntos conocidos más cercanos.
- Polinómica: se estiman los valores a partir de un polinomio que se ajusta a los puntos conocidos.
- *Kriging*: se estiman los valores a partir de un modelo de variograma y la información de los puntos conocidos.
- Por *splines*: se estiman los valores a partir de ajustar una función compuesta por segmentos de polinomios.
- Por cercanía: se estiman los valores de los puntos intermedios por asignación del valor del punto conocido más cercano.

2.5.4. Pansharpening

Los instrumentos de teledetección para observación de la Tierra adquieren imágenes multiespectrales y pancromáticas, las primeras incluyen una alta resolución espectral, pero tienen una resolución espacial reducida. En cambio, las imágenes pancromáticas contienen una alta resolución espacial, pero tienen un número reducido de bandas espectrales. La aplicación de imágenes multiespectrales o pancromáticas por sí solas supone descartar parte de la información. Las técnicas de fusión de imágenes se utilizan con frecuencia para combinar dos o más imágenes y producir imágenes mejoradas. El método que fusiona imágenes multiespectrales y pancromáticas de la misma escena adquiridas por el mismo satélite tiene el nombre de *pansharpening*. El objetivo de los métodos de *pansharpening* es producir imágenes multiespectrales sintetizadas que contengan la información espectral y espacial de las imágenes multiespectrales y pancromáticas de entrada [15][16].

Se puede encontrar una taxonomía de los métodos de *pansharpening*. A grandes rasgos, pueden dividirse en cuatro clases [16]:

- Sustitución de componentes (CS): se basa en la sustitución de un componente de la imagen multiespectral por la imagen pancromática.
- Análisis multirresolución (MRA): utiliza detalles espaciales obtenidos al descomponer la imagen pancromática en los datos multiespectrales.
- Bayesiano: se basa en el uso de la distribución posterior de la imagen objetivo de resolución completa dadas las imágenes multiespectrales y pancromáticas observadas.
- Variacional: es un caso particular de la bayesiana, en la que la imagen objetivo se estima maximizando la densidad de probabilidad posterior de la imagen de resolución completa.

3. Metodología/Desarrollo del proyecto

Los satélites de SMAP y AMSR-2 proporcionan datos de las TB a una resolución de 36 km y 25 km, respectivamente. Con el objetivo principal de ver si la técnica de *pansharpening* aplicada a imágenes de radiometría de microondas de dos bandas de frecuencia diferentes, mejora la resolución espacial de la que tiene resolución menor (frecuencia más baja). Para validar esta técnica con datos reales, se han creado unos mapas a la resolución de 108 km con la agregación, para las frecuencias de estudio Después, se muestrean los mapas a una resolución de 36 km para obtener una ecuación de regresión con los datos a las dos frecuencias y después validarlos con el mapa de TBs original de SMAP a 36 km. Con este método se intenta mejorar la resolución espacial de la banda L de SMAP, con los datos de la banda X de AMSR2. Para esta validación, se han utilizado técnicas de procesamiento de datos como la interpolación, la agregación o el muestreo de imágenes. En la figura 10 se puede ver un mapa conceptual del proceso seguido en este trabajo. Se han elegido estos satélites porque miden a las bandas L (SMAP) y X (AMSR2). Ambas bandas de frecuencias se medirán con el radiómetro de la misión CMIR. La figura 11, se puede ver la comparación de huella de campo de visión para las bandas de frecuencia de CIMR y las de este estudio.

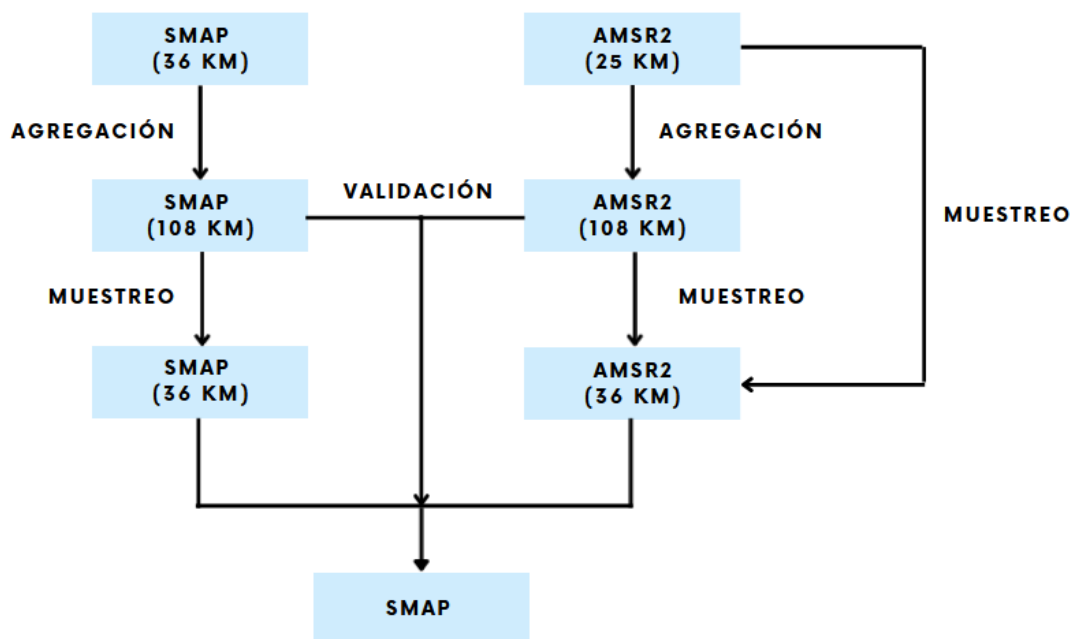


Figura 10. Mapa conceptual del proceso seguido en este estudio para la validación de la técnica de *pansharpening* en la mejora de la resolución espacial de los mapas de Temperatura de brillo de la banda L con datos de la banda X.

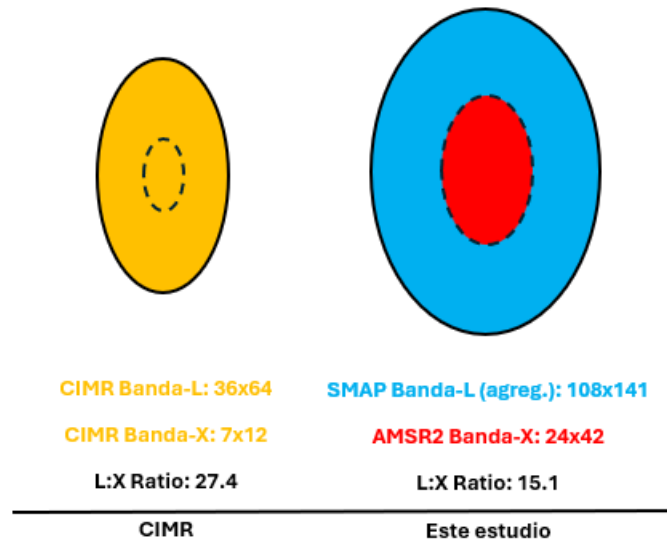


Figura 11. Comparaciones de la huella de campo de visión instantánea en km para las bandas L y X de CIMR con los canales de banda de este estudio: SMAP agregado (banda L) y AMSR2 (banda X).

Los mapas de TB obtenidos de las medidas de un día no cubren todo el mundo, tal como demuestra la imagen superior de la figura 12. En ella se identifican las órbitas en las zonas de paso y las zonas que no se miden en un día concreto. Mientras que la imagen inferior muestra un mapa promedio de todo el año, de manera que se cubre toda la superficie de la Tierra. Estas medidas han sido tomadas con AMSR2.

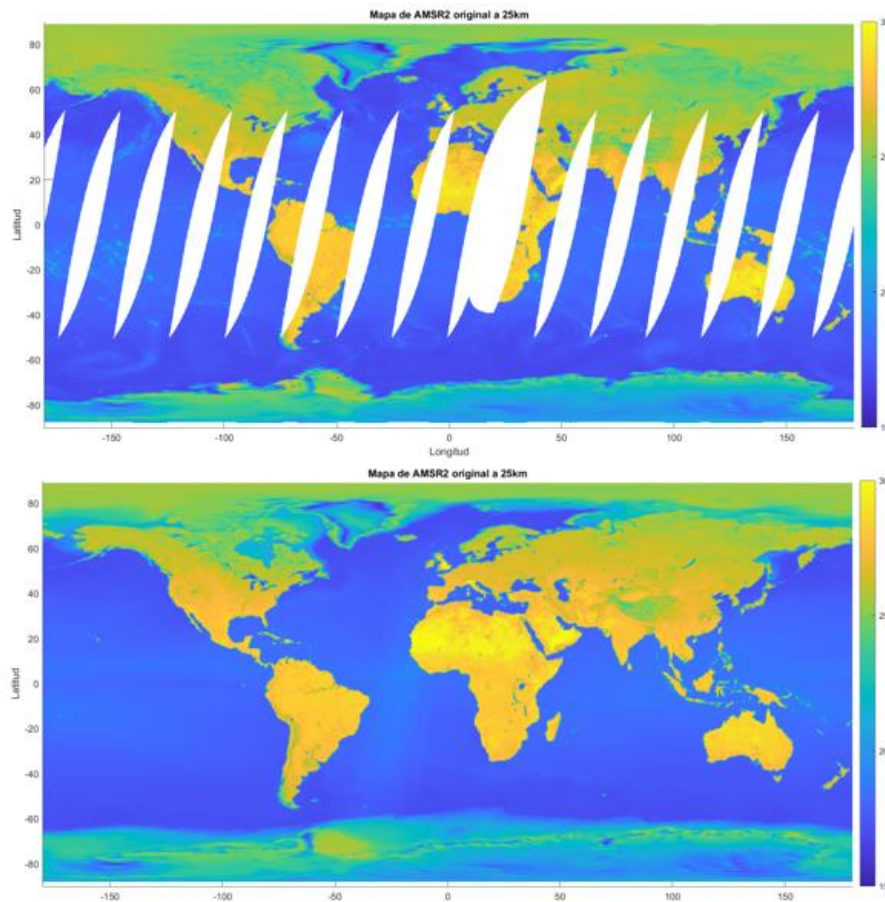


Figura 12. La imagen superior presenta las temperaturas de brillo medidas por AMSR2 en un día. La imagen inferior son las TBs de AMSR2 promedio de un año. Ambas imágenes en T(K).

Como se puede observar, en la imagen superior se identifican las órbitas y las zonas no cubiertas. En cambio, en la imagen inferior no hay datos para cubrir todo el mapa. Lógicamente, las zonas de mar se muestran más frías que las TBs sobre tierra.

3.1. Agregación de los datos a 108 km

Para poder aplicar la técnica del *pansharpening* se requieren medidas a distintas resoluciones. Las frecuencias más bajas tienen longitudes de onda mayores y peores resoluciones. Como CIMR tendrá medidas de una misma zona a varias frecuencias, las frecuencias mayores a mejor resolución, se quiere analizar el uso del *pansharpening* con la combinación de varias medidas. Como se ha explicado en el punto 2.5.1, el método de la agregación ha sido utilizado con el objetivo de ampliar la malla de 36 km y 25 km a 108 km, tanto para SMAP como para AMSR2, respectivamente. Al agregar los mapas a 108 km, la resolución espacial disminuye y los píxeles se hacen más grandes, esto provoca que se vean menos detalles en el mapa porque cada píxel equivale a una zona más grande del terreno. Este procedimiento se ha llevado a cabo a partir de diferentes funciones usadas en conjunto en un mismo código para promediar los píxeles de las celdas contiguas para obtener las TB en una malla más grande.

Para este código se utilizó la malla EASE2 (*Equal-Area Scalable Earth Grid 2*), que es un sistema de mallas creado por la NASA que se utiliza para analizar y ordenar los datos geoespaciales sobre la superficie terrestre. Esta malla ofrece diferentes ventajas:

- Igual tamaño: todas las celdas tienen la misma área y se asegura una representación uniforme de la superficie terrestre.
- Fácil uso: simplifica el análisis y ofrece una estructura coherente y metódica para datos procedentes de distintas fuentes.
- Escalabilidad: puede adaptarse a diferentes resoluciones permitiendo análisis a diferentes escalas.

Como se puede observar en la figura 13, la malla EASE2 tiene cuatro proyecciones que incluyen dos proyecciones azimutales de área igual para los hemisferios Norte y Sur, una proyección global cilíndrica de área igual y una proyección cilíndrica de área igual para la zona templada [17].

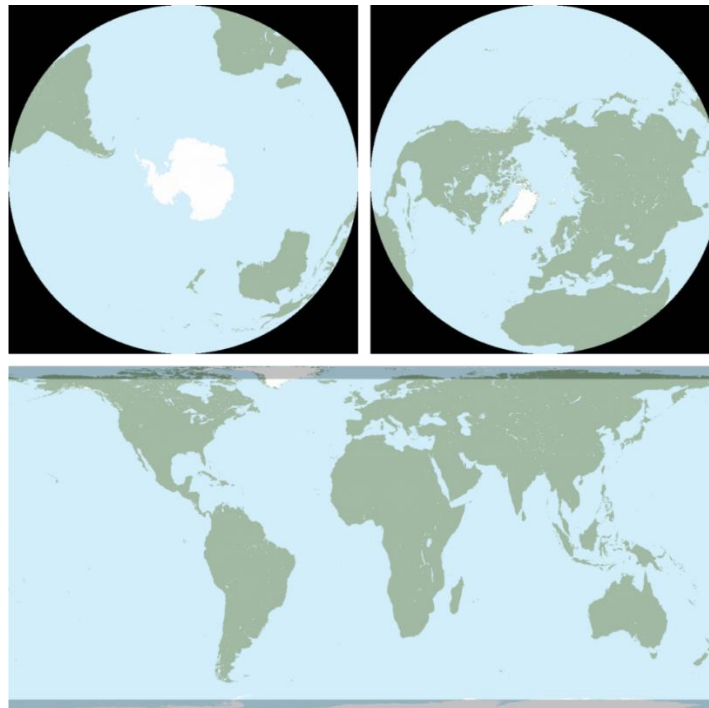


Figura 13. Imagen de las proyecciones de la malla EASE2 [17].

La malla de 25 km tiene un tamaño de 1388x584 píxeles, la de 36 km un tamaño de 964x406 píxeles y la de 108 km un tamaño de 136x322 píxeles. Esta malla tiene la característica de utilizar las coordenadas x e y, porque la malla está equiespaciada en coordenadas x e y (el salto entre un punto y el siguiente siempre es el mismo), pero no está equiespaciada en coordenadas latitud/longitud. Se utiliza el código que corresponde a EASE2 (6933) para calcular las latitudes/longitudes a partir de las x e y. En la figura 14 se puede ver el formato de dicha malla.

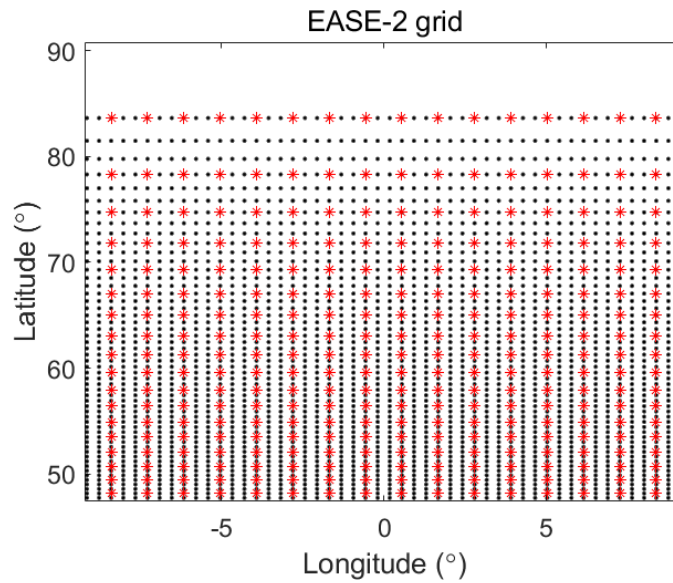


Figura 14. Formato malla EASE 2 Grid utilizada respecto la longitud y la latitud.

En la figura 15 se presenta el mapa de TB a 36 km de SMAP (malla original) y en la figura 16 el mapa agregado a 108 km. Para que se pueda apreciar mejor el cambio de resolución (malla), se ha hecho un zoom a los mapas en la zona de Europa.

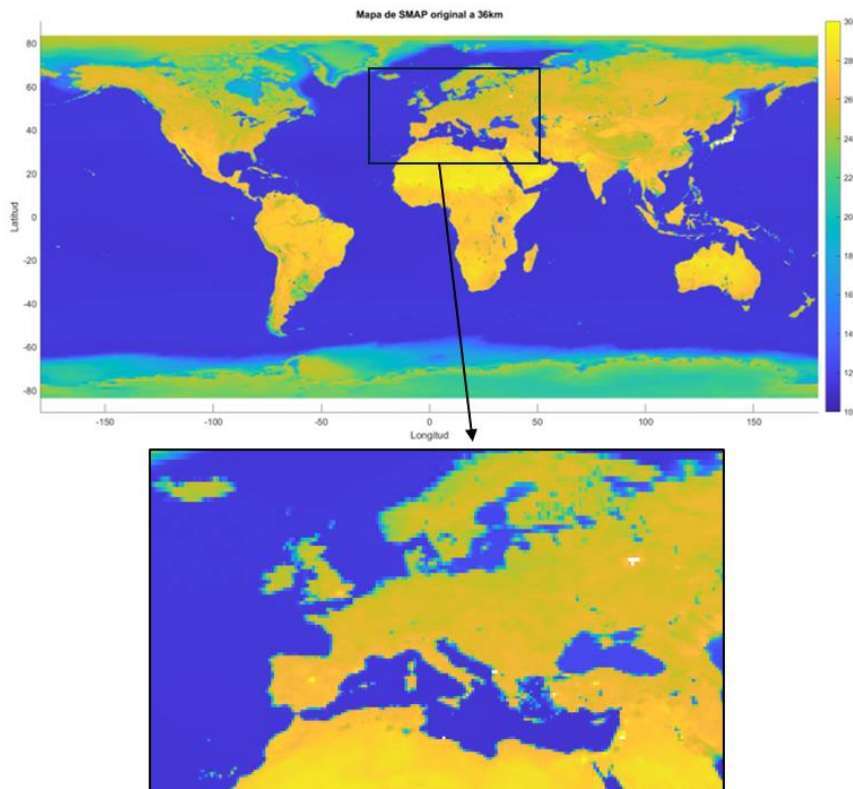


Figura 15. Mapa de las TBs de SMAP antes de la agregación (malla de 36 km) en T(K).

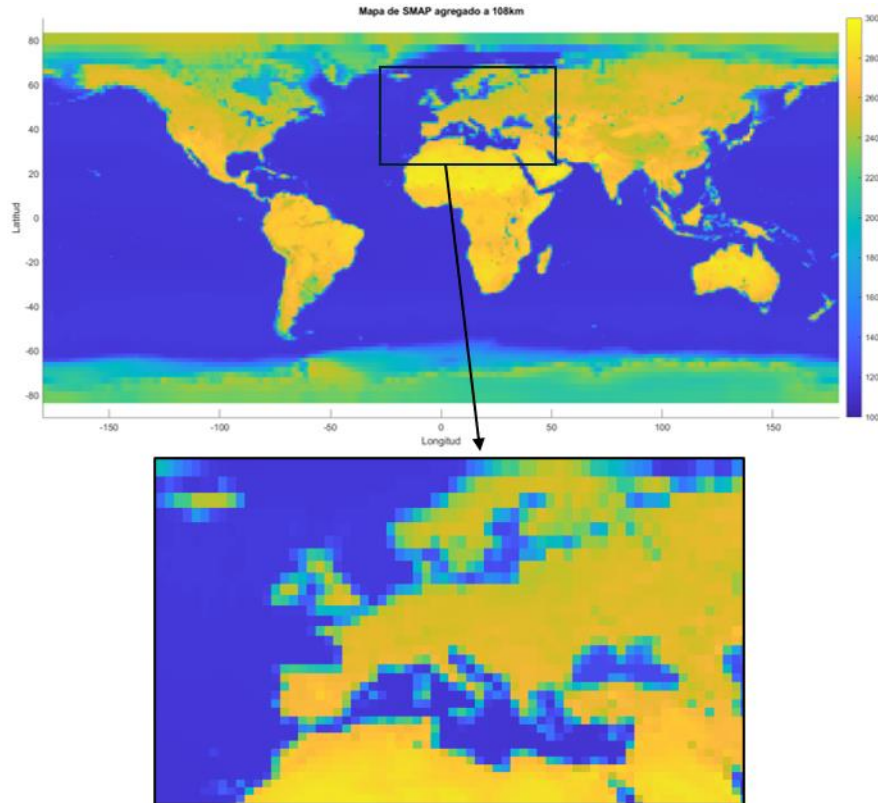


Figura 16. Mapa de las TBs de SMAP después de aplicar agregación (malla de 108 km) en T(K).

Y, en la figura 17 se puede ver el mapa original de TBs AMSR2 a 25 km y en la figura 18 el mapa agregado a 108 km.

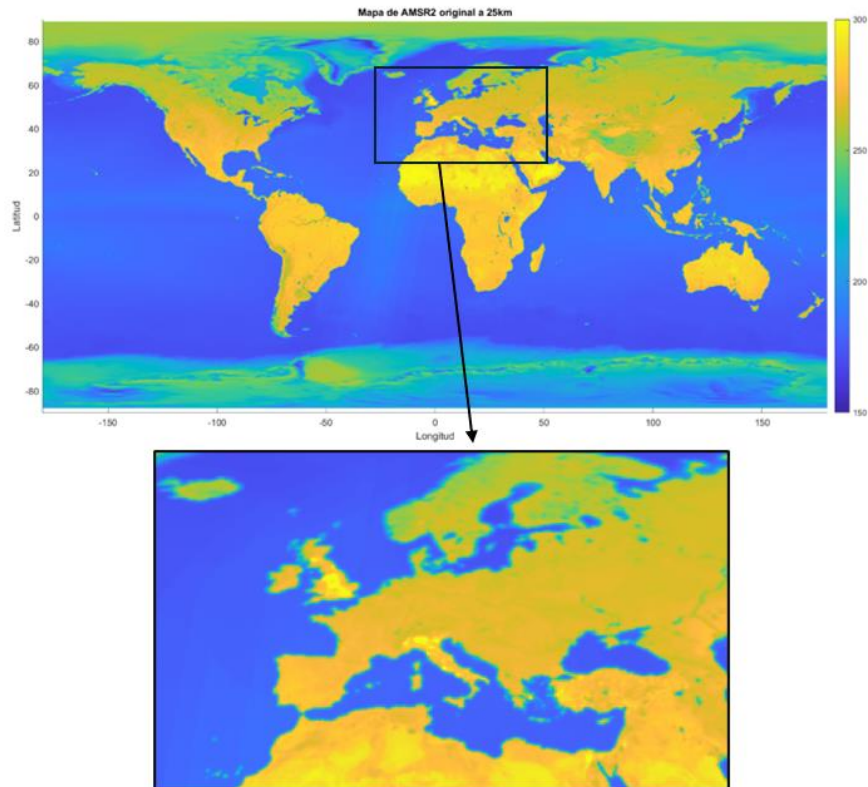


Figura 17. Mapa de las TBs de AMSR2 antes de la agregación (malla de 25 km) en T(K).

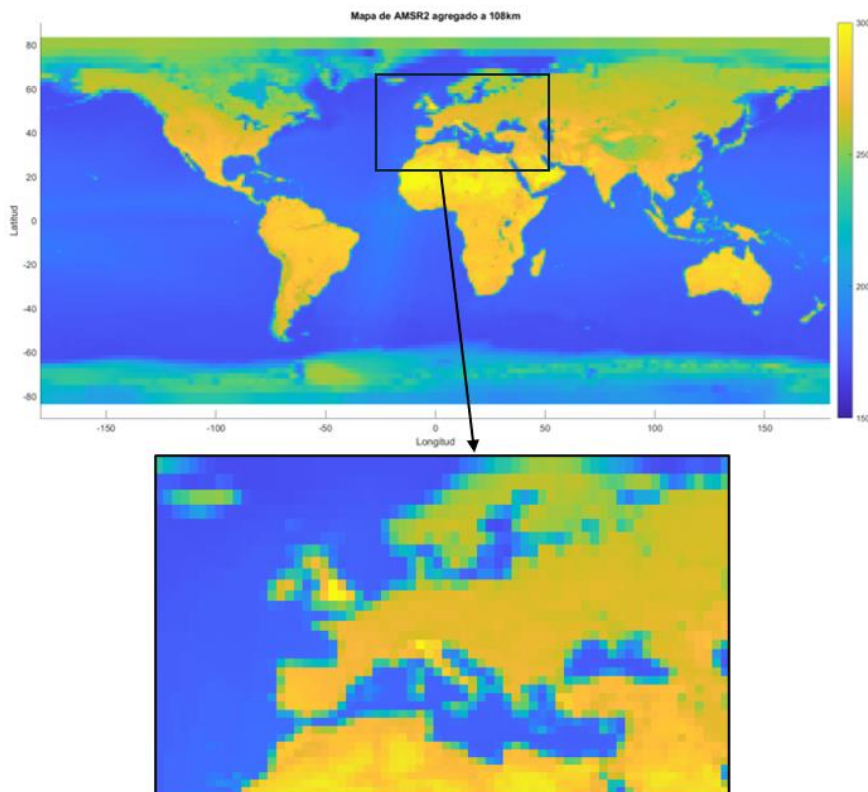


Figura 18. Mapa de las TBs de AMSR2 después de la agregación (malla de 108 km) en T(K).

Como se puede observar en las imágenes, la agregación a una malla de 108 km se pierde mucho detalle porque la resolución espacial disminuye.

Cuando ya tenemos los mapas de los dos satélites agregados a la malla de 108 km, se puede pasar al siguiente paso: el muestreo.

3.2. Muestreo de los datos a 36km

Como se ha explicado en el apartado 2.5.2, el muestreo es útil para aumentar el número de muestras, y en este caso para aplicar la regresión lineal. Interesa tener los máximos datos posibles para hacer la regresión con la máxima precisión. En este paso no se aumenta la resolución espacial, aunque los píxeles del mapa resultante sean más pequeños, es solamente presentar los valores en una malla más estrecha. Es como tener los mismos mapas a 108 km, pero con más muestras para poder hacer el cálculo de la ecuación.

Para este código se ha utilizado la función `interp2`. Esta función realiza una interpolación para encontrar valores intermedios en una matriz de datos que representan una malla. Esta función de Matlab permite elegir entre diferentes métodos de interpolación, pero los utilizados en este proyecto han sido, la interpolación al vecino más cercano (*nearest*) e interpolación lineal (*linear*). La primera da el valor que tiene más cercano sin inventarse ninguno, es decir, los píxeles del mapa de 36 km resultante que caen dentro de un píxel del mapa de 108 km tienen el mismo valor que el píxel de 108 km. Habitualmente, se pueden ver algunos efectos no deseados en algunas zonas de los mapas, como pueden ser los límites de los píxeles grandes. Este efecto puede no desaparecer al aplicar la ecuación de la regresión lineal y puede trasladarse al resultado final. El segundo tipo, hace una interpolación lineal con los valores de los lados y suaviza las transiciones haciendo promedios en valores medios. En el caso de los píxeles grandes de la malla de 108 km, si tienes un valor muy alto y el siguiente muy bajo, la interpolación lineal, lo que hace es que los píxeles de 36 km resultantes no tengan todos el mismo valor, sino que vaya disminuyendo progresivamente.

Después de obtener los mapas muestreados, de 25 km a 36 km del AMSR2 y de 108 km a 36 km de ambos satélites, con los dos tipos de interpolación, se han guardado todos los resultados en una matriz para poder utilizarlos en cualquier momento.

Como los datos importantes para este estudio son los que están en tierra y no las medidas sobre mar, se aplica una máscara que elimina toda la parte de datos del agua. En la figura 19 se puede ver un ejemplo de mapa de TB de SMAP a la malla original de 36 km con la máscara de mar.

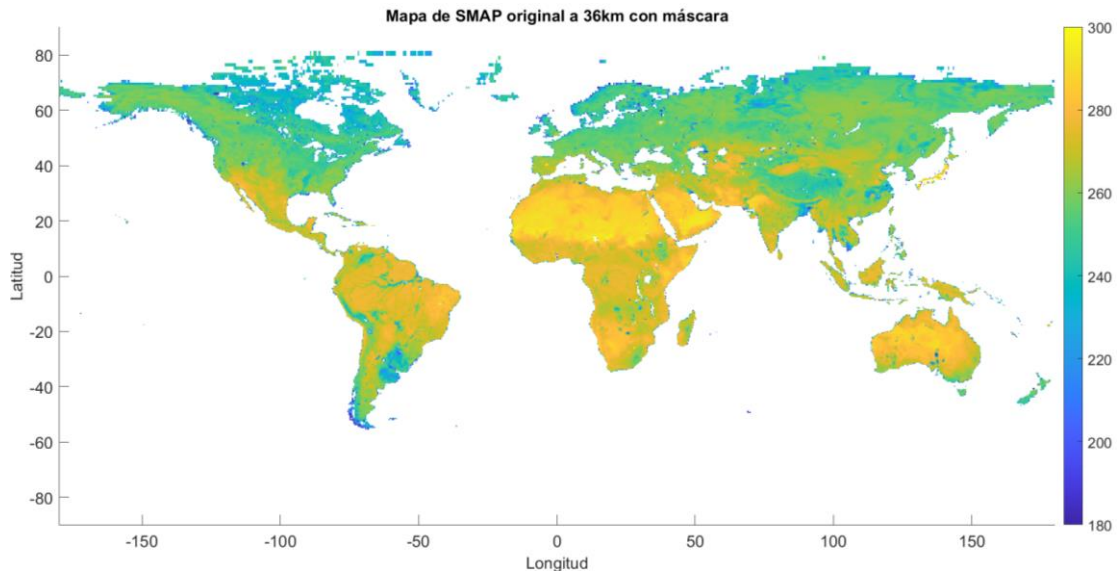


Figura 19. Mapa de TBs de SMAP con la máscara de mar aplicada en T(K).

3.3. Regresión lineal

Una vez se tienen los mapas guardados después del muestreo, se crea un código para aplicar una regresión lineal con la fórmula que se puede ver a continuación. Esta regresión lineal lo que permite es modelar y analizar la relación entre una variable dependiente y una o más independientes.

$$TB_{SMAP,36km} = a + b \times \frac{TB_{SMAP,108km} \times TB_{AMRS2,36km}}{TB_{AMRS2,108km}} \quad (3)$$

El objetivo es calcular los coeficientes a (término independiente) y b (pendiente) de la recta, donde 'a' representa el desplazamiento de la TB en las bandas y 'b' como cambian los valores de TB a resoluciones bastas y medias entre las bandas. Los otros términos son las matrices con todos los mapas del año, dependiendo de su subíndice. A partir de esta fórmula, se crea un código con la función polyfitn para hacer la regresión. La función polyfitn se utiliza, de igual manera que la función de base de MATLAB polyfit, para encontrar los coeficientes del polinomio que mejor se ajusta a los datos proporcionados, pero con la ventaja de poder ver más información que con polyfit. En este estudio se ha tenido en cuenta que SMAP y AMSR2 no pasan por el mismo sitio el mismo día, entonces, para tener datos de ambos satélites, se ha utilizado una ventana de 15 días para tener datos suficientes en el mapa. También, se ha repetido el mismo cálculo, pero sin efectuar el promediado de 15 días, si no que se ha trabajado con el mapa promediado de todo el año. Después se han analizado las diferencias entre ambos Finalmente, se ha hecho el análisis estadístico de los resultados.

4. Resultados

El objetivo principal de este proyecto ha sido aplicar la técnica de *pansharpening* a imágenes de radiometría de microondas de dos bandas de frecuencia diferentes para mejorar la resolución espacial de los mapas obtenidos a baja frecuencia. En este apartado se exponen los resultados relevantes obtenidos con dos métodos de interpolación, *linear* y *nearest*, así como utilizando el promedio de los días de todo el año o utilizando la ventana de 15 días, como se ha explicado en el apartado anterior.

4.1. Métodos de muestreo

Como se ha mencionado en el apartado 3.2, todos los resultados del estudio se han hecho utilizando los métodos de interpolación lineal (*linear*) e interpolación al vecino más cercano (*nearest*). En la figura 20 se presentan las temperaturas de brillo de SMAP en una malla de 36 km, después de aplicar la interpolación lineal (*linear*). En la figura 21 se visualiza también el mapa de temperaturas de brillo en la malla de 36 km, después de aplicar la interpolación del vecino más cercano (*nearest*). Ambas figuras han sido muestreadas desde el mapa de SMAP a 108 km.

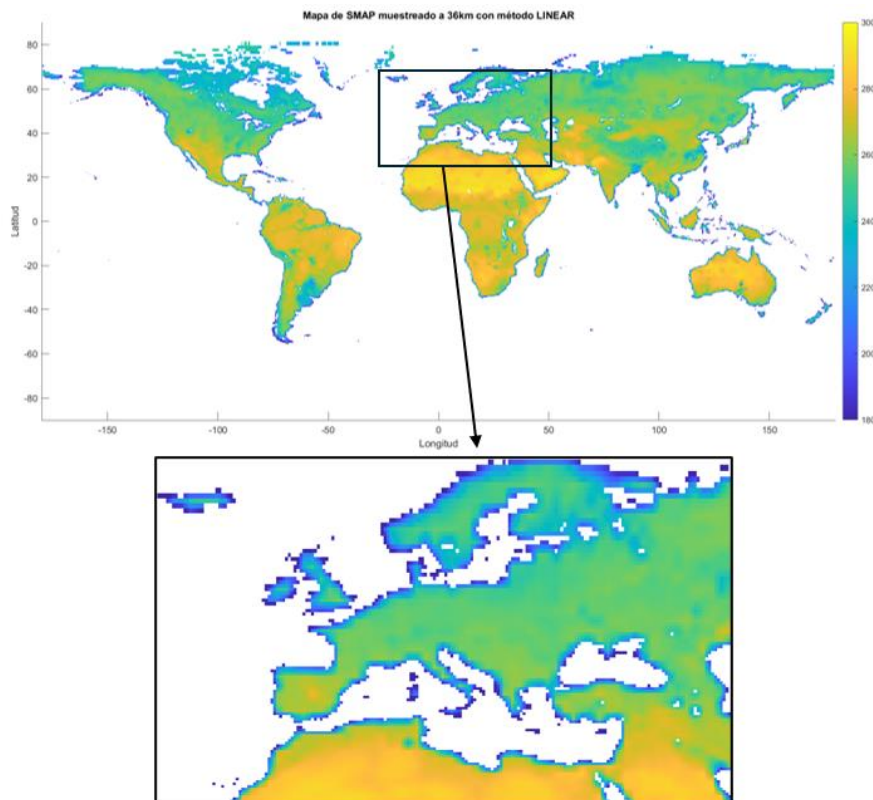


Figura 20. Mapa de TBs de SMAP a la resolución de 36 km a partir de la resolución de 108 km aplicando interpolación lineal (*linear*).

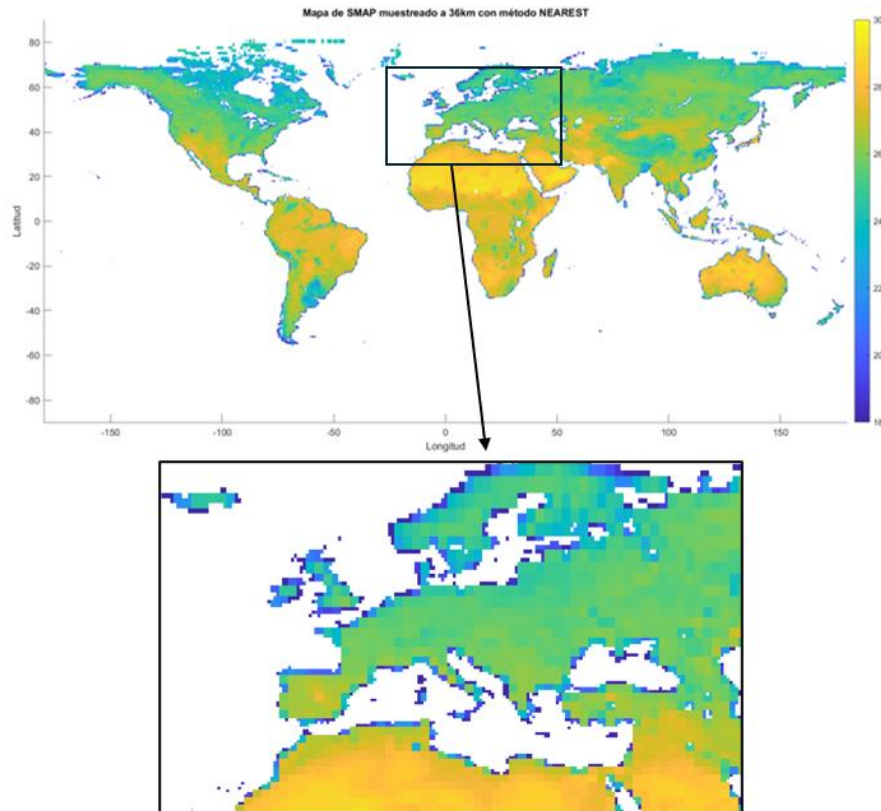


Figura 21. Mapa de TBs de SMAP a la resolució de 36 km a partir de la resolució de 108 km aplicando interpolación al vecino más cercano (nearest).

En el mapa de la figura 21 se puede apreciar el efecto pixelado (*boxing*, en inglés), ya que, al aplicar la interpolación al vecino más cercano, varios píxeles contiguos toman el mismo valor, mientras que, si se aplica la interpolación lineal, cada píxel toma un valor distinto y los mapas quedan más suavizados, variación de color gradual.

A continuación, se utilizan los mapas obtenidos con las dos interpolaciones para aplicar la técnica de *pansharpening* de la ecuación (3). Después, se va a proceder al análisis de los valores que se han obtenido para las variables 'a' y 'b' de dicha ecuación y, el análisis estadístico de los resultados de los nuevos mapas a alta resolución, respecto de los originales. Este estudio sirve para validar la técnica.

4.2. Comparación mapas con promediado del año entero

La técnica del *pansharpening* aplicada a la mejora de resolución espacial de los mapas en banda L, requiere la obtención de los parámetros 'a' y 'b' de la ecuación (3). Por tanto, en esta primera aproximación se ha obtenido un único valor de los parámetros 'a' y 'b' para cada píxel, constante para todos los días del año. Para ello, en este apartado, se ha trabajado con los datos promediados de todo el año 2017 para cada píxel. Se han utilizado los mapas de AMSR2 y de SMAP a la resolución 108 km y el mapa de AMSR2 a la resolución de 36 km. Todos ellos, se han muestreado a la malla de 36 km. Después, se ha hecho el análisis del procedimiento.

Primero, se ha analizado el término 'a' de la ecuación (3) en función de la posición de cada píxel. Este término ayuda a corregir o ajustar cualquier desviación (bias) presente en los datos. En la figura 22 se puede ver el mapa de la variable a con el método *linear*.

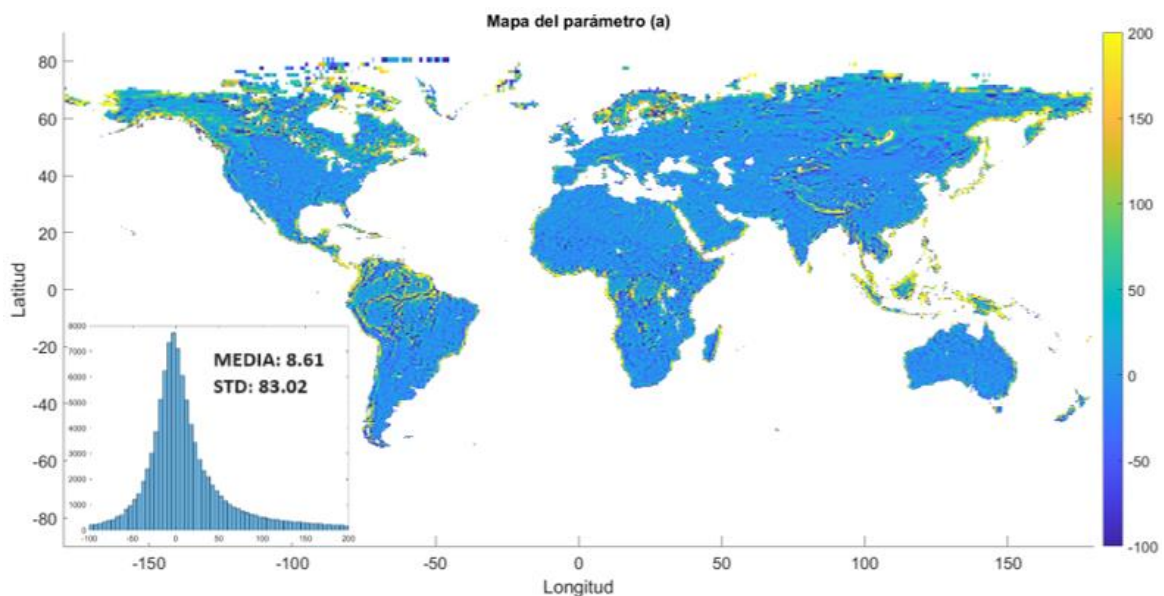


Figura 22. Mapa en T(K) del término independiente 'a' de la ecuación (3).

Se observa en el mapa y en el histograma de la figura 22 que la mayoría de valores de 'a' están cercanos a 0, lo que indica poco bias de la TB entre bandas. Las zonas con vegetación más densa y los píxeles alrededor de cuerpos de área (ríos, lagos y mar) es donde los valores se alejan más del 0, con una dispersión que va desde unos -100 a hasta un máximo de 200. Los valores más altos se sitúan en puntos cercanos a las costas. Así, la media es 8.61 y la desviación típica es 83.02. La desviación es algo elevada, por lo que se puede intuir que hay variación entre los valores de los píxeles (dependencia espacial).

Se ha hecho el mismo estudio con los mapas de 'a' resultantes de aplicar la interpolación *nearest*. Se aprecian cambios un poco más abruptos, pero los patrones son los mismos. Por ello, en esta memoria solo se muestran los mapas del método *linear*.

Los valores obtenidos para el término 'b' de la ecuación (3) en función del píxel se muestran en la figura 23.

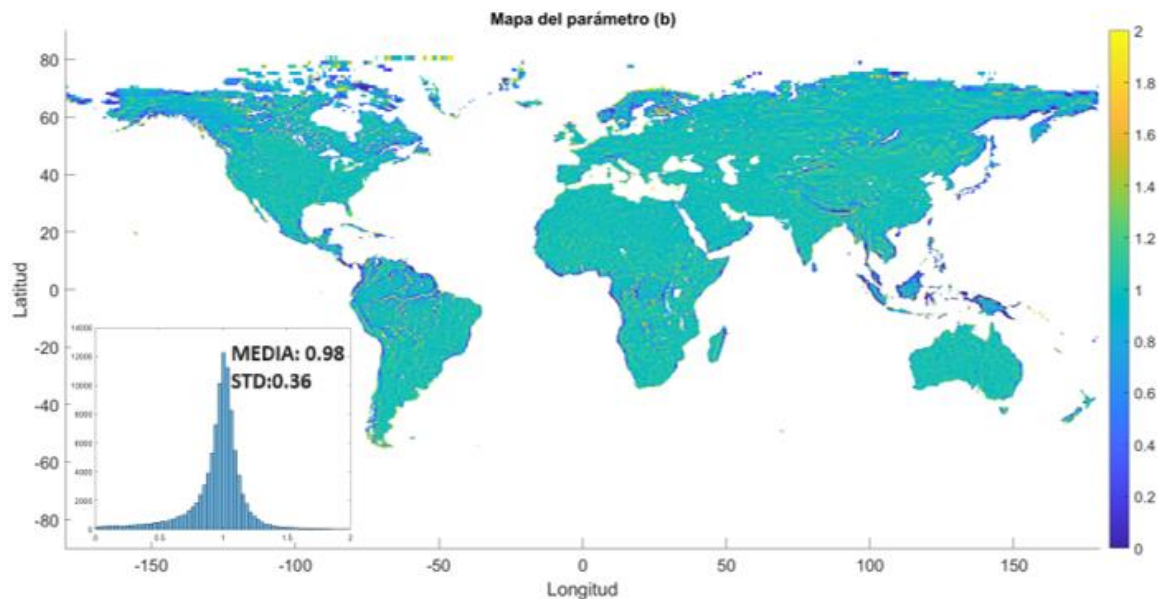


Figura 23. Mapa en T(K) del término 'b' de la ecuación (3).

Analizando los datos, se puede ver que la mayoría valores de 'b', como era de esperar, son próximos a 1, lo que, en principio, indicaría un ajuste adecuado entre las bandas utilizando esta relación lineal. Al igual que para el parámetro 'a', parece que los valores más alejados de 1 estarían situados en píxeles en zonas de vegetación más densa o alrededor de cuerpos de agua (ríos, lagos y mares). La media es 0.98 y la desviación es 0.36.

Estos resultados parecen coherentes con la dependencia medida con la frecuencia. Las frecuencias más bajas penetran más que las más altas y tienen resoluciones espaciales peores. Por tanto, es de esperar que en las zonas de vegetación más densas las medidas de las bandas L y X sean algo distintas. En principio, la banda X estaría midiendo la parte superior de los árboles, mientras que la banda L podría penetrar más y medir la emisión del suelo a través de la vegetación. En las zonas de la costa y alrededor de ríos y lagos, las discrepancias pueden ser debidas a la contaminación mar-tierra. Estos resultados son coherentes con los obtenidos en el artículo Zhang [8].

Una vez analizados los mapas de las variables 'a' y 'b', se ha calculado el mapa de TBs (a la resolución de 36 km) que se obtiene aplicando la ecuación (3) y se ha comparado con el original, para poder validar el método. Así, los mapas de la figura 24 se corresponden al mapa promedio anual original de SMAP a 36 km (mapa superior) y el que se obtiene después de aplicar el *pansharpening* con los valores 'a' y 'b' deducidos (mapa inferior).

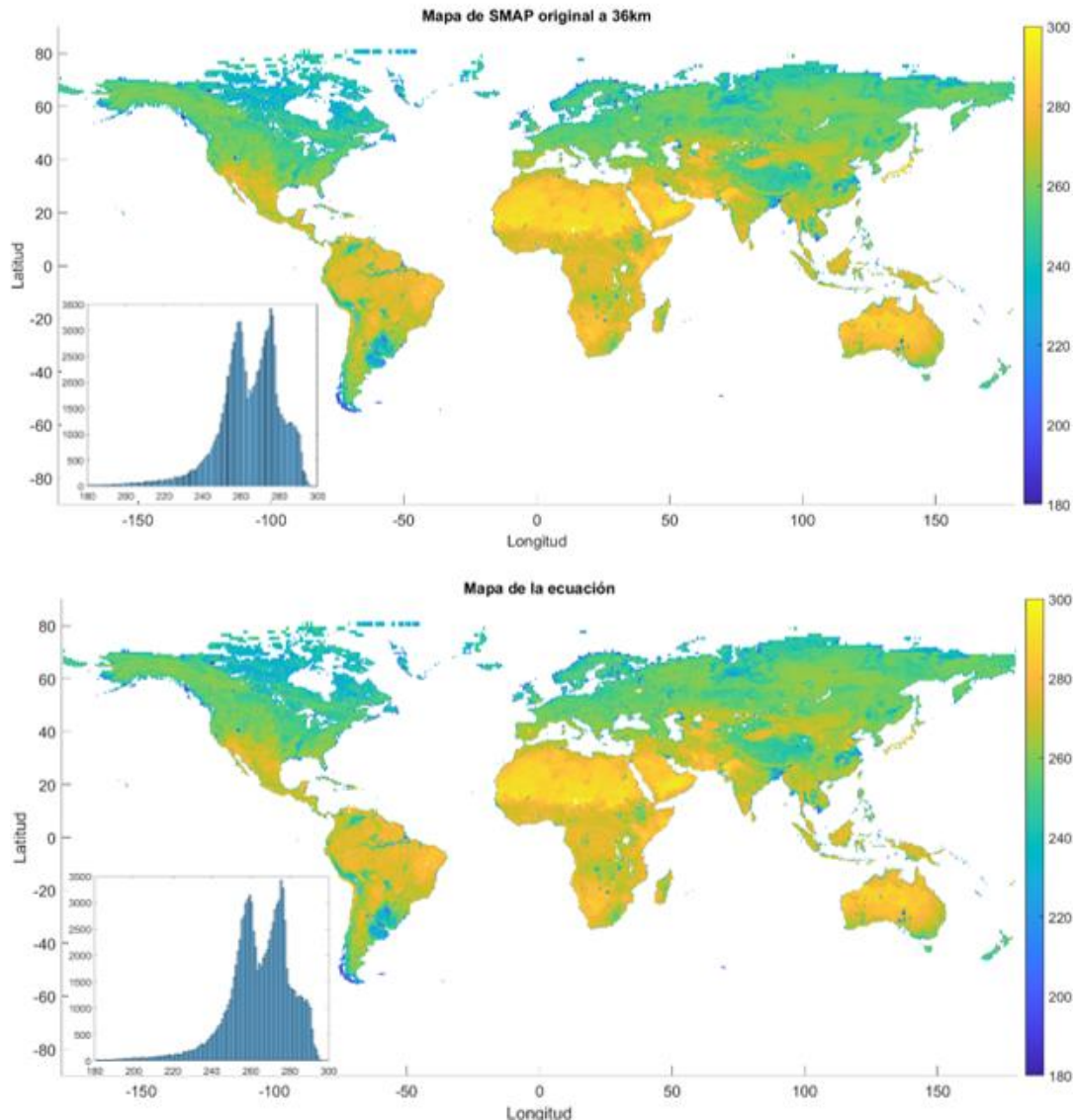


Figura 24. Comparación del mapa SMAP original (malla de 36 km), en la imagen superior, y el mapa obtenido aplicando la ecuación (3) con los términos 'a' y 'b' calculados, en la imagen inferior. Valores en T(K).

Es difícil apreciar las diferencias con estas dos imágenes, incluso los histogramas, son muy similares. Para la validación se ha realizado la correlación entre ambos mapas, que da información del grado de similitud. El mapa de la figura 25, muestra dicha correlación en función de la posición de los píxeles sobre la Tierra. Esta correlación es próxima a 1 en la mayor parte de los píxeles (colores amarillos), sugiere buena consistencia. Sin embargo, algunos píxeles tienen correlaciones bajas. Estos se sitúan, como era de esperar, principalmente en las zonas de la costa y en las zonas de bosque denso.

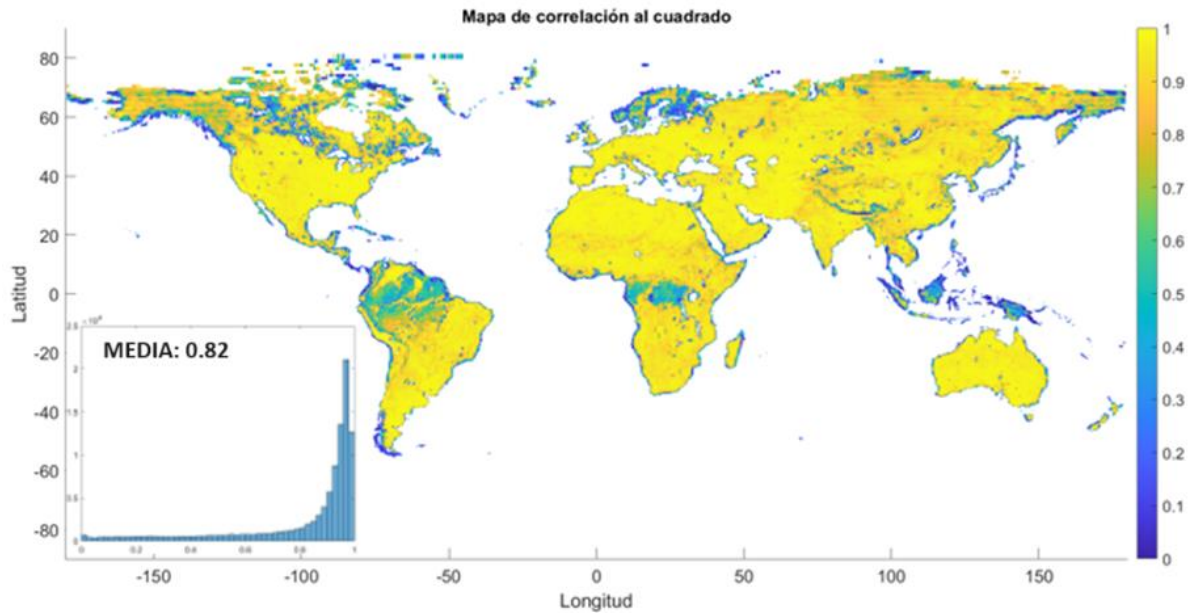


Figura 25. Mapa de correlación al cuadrado en T(K).

También, se ha calculado y analizado el error cuadrático medio, el cual se muestra en la figura 26.

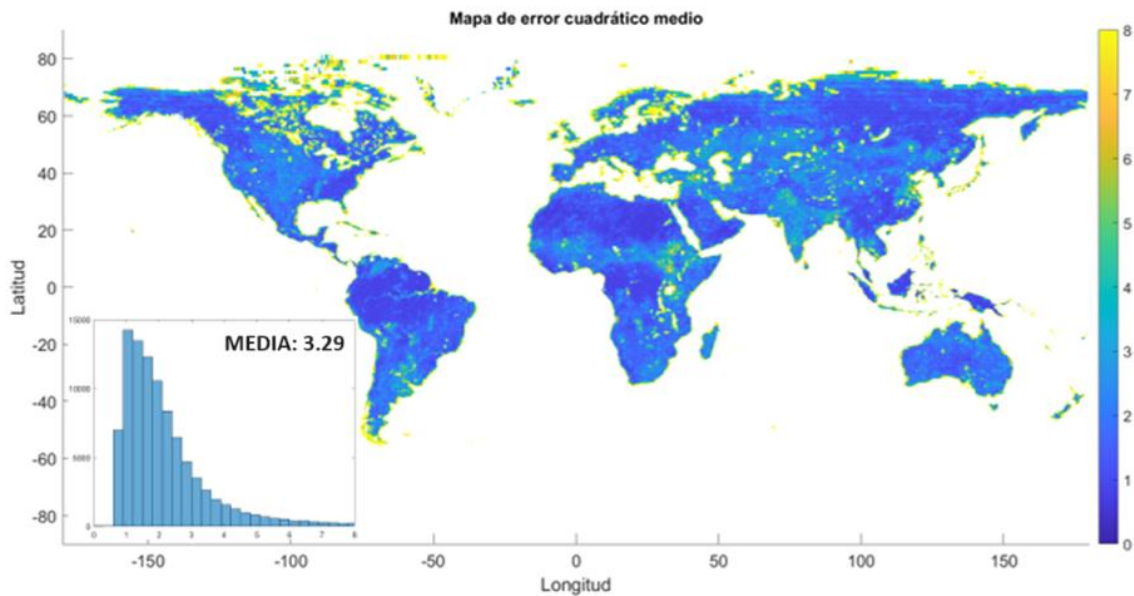


Figura 26. Mapa de error cuadrático medio en T(K).

En general, se puede observar un mayor error en las regiones con más vegetación y a lo largo de la costa. Así, los píxeles con correlaciones más bajas coinciden con los píxeles con error cuadrático medio mayor.

A continuación, se valorarán las mismas variables, pero en los mapas con la ventana de 15 días.

4.3. Comparación mapas con ventana de 15 días

En este apartado, para hacer un análisis temporal de los coeficientes 'a' y 'b' de la ecuación (3), se ha calculado el mapa diario de estos coeficientes, pero al haber poca coincidencia de paso de ambos satélites un mismo día, no había datos suficientes para analizar. Por ello, se ha hecho el estudio realizando mapas promedio con una ventana temporal de 15 días. De esta manera se garantiza la cobertura total.

En la figura 27 se puede ver el mapa de TB del término 'a' de la ecuación (3).

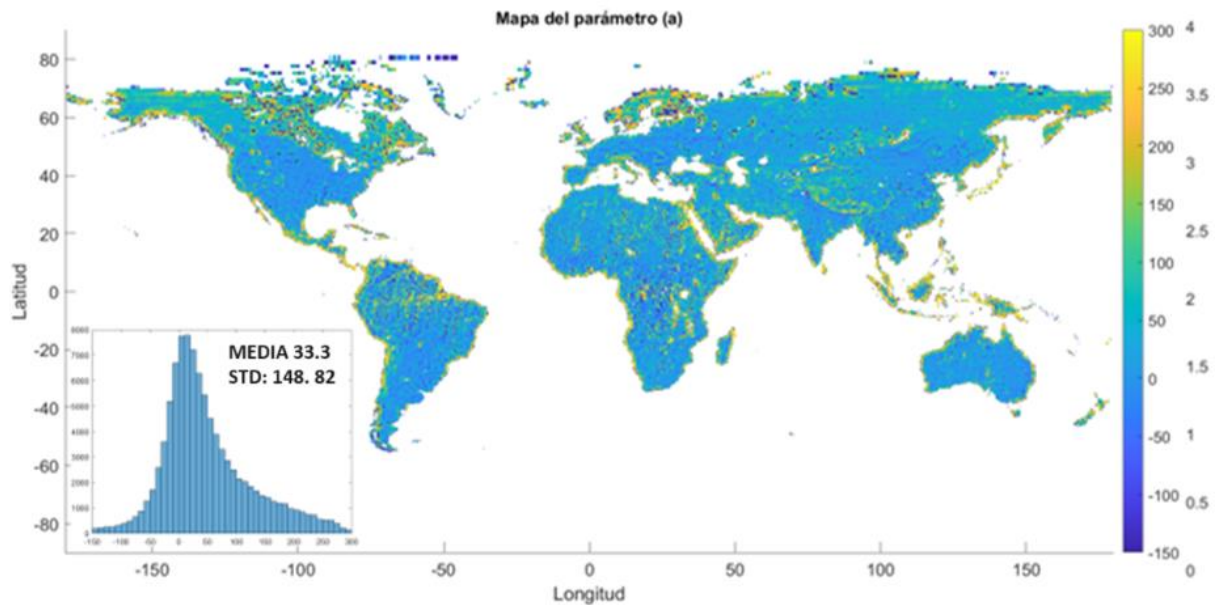


Figura 27. Mapa en T(K) del término 'a' de la ecuación (3) con ventana de 15 días.

Como se puede ver en la imagen, los valores 'a' están cercanos a 0, pero se observa más dispersión y el valor medio es más alto. Ahora los valores oscilan desde -150 K a 300 K y la media y de la desviación son 33.3 y 148.82, respectivamente. En este caso, también coincide que las zonas con valores superiores a 0 son las de vegetación más densa y mayor cantidad de árboles.

Los valores del término 'b' de la ecuación (3) se pueden observar en la figura 28. Los valores son cercanos a 1, tal como se deduce del mapa y el histograma.

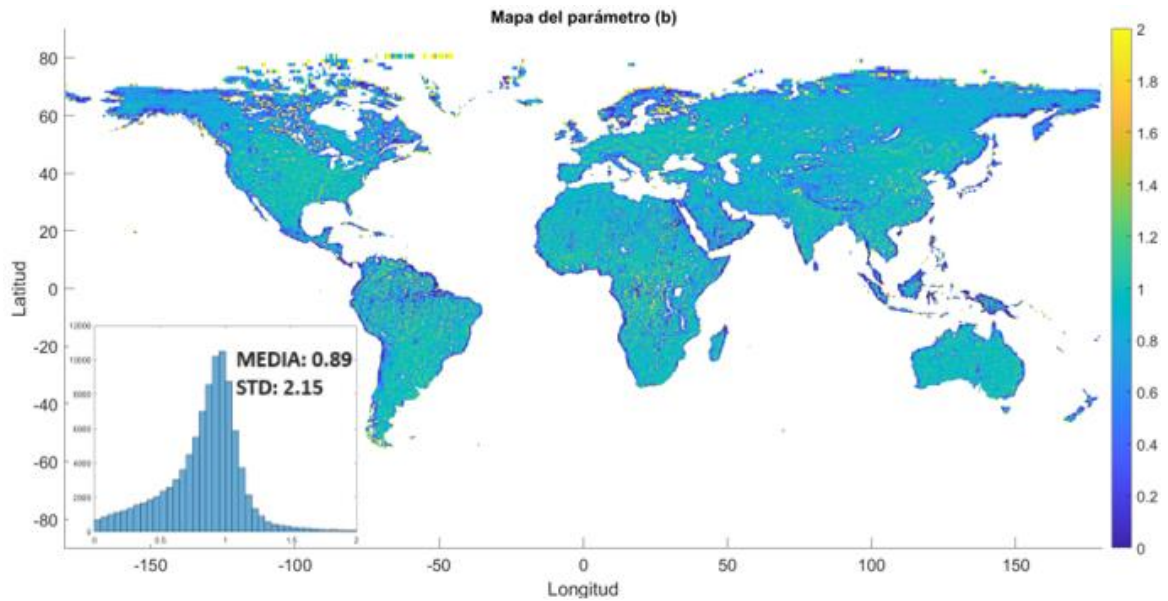


Figura 28. Mapa en T(K) del término 'b' de la ecuación (3) con ventana de 15 días.

Los valores inferiores a 1 se encuentran en las zonas con vegetación más densa y donde hay más árboles. Los valores más bajos (alrededor del 0) también se encuentran en las zonas costeras. La media tiene un valor de 0.89 y la desviación de 2.15.

Después de haber analizado los mapas de los términos 'a' y 'b' de la ecuación (3), se pasa a hacer la comparación de los mapas de TBs de SMAP original a 36 km y el mapa de la ecuación (3) con la ventana de 15 días. En la figura 29, se visualizan los dos mapas.

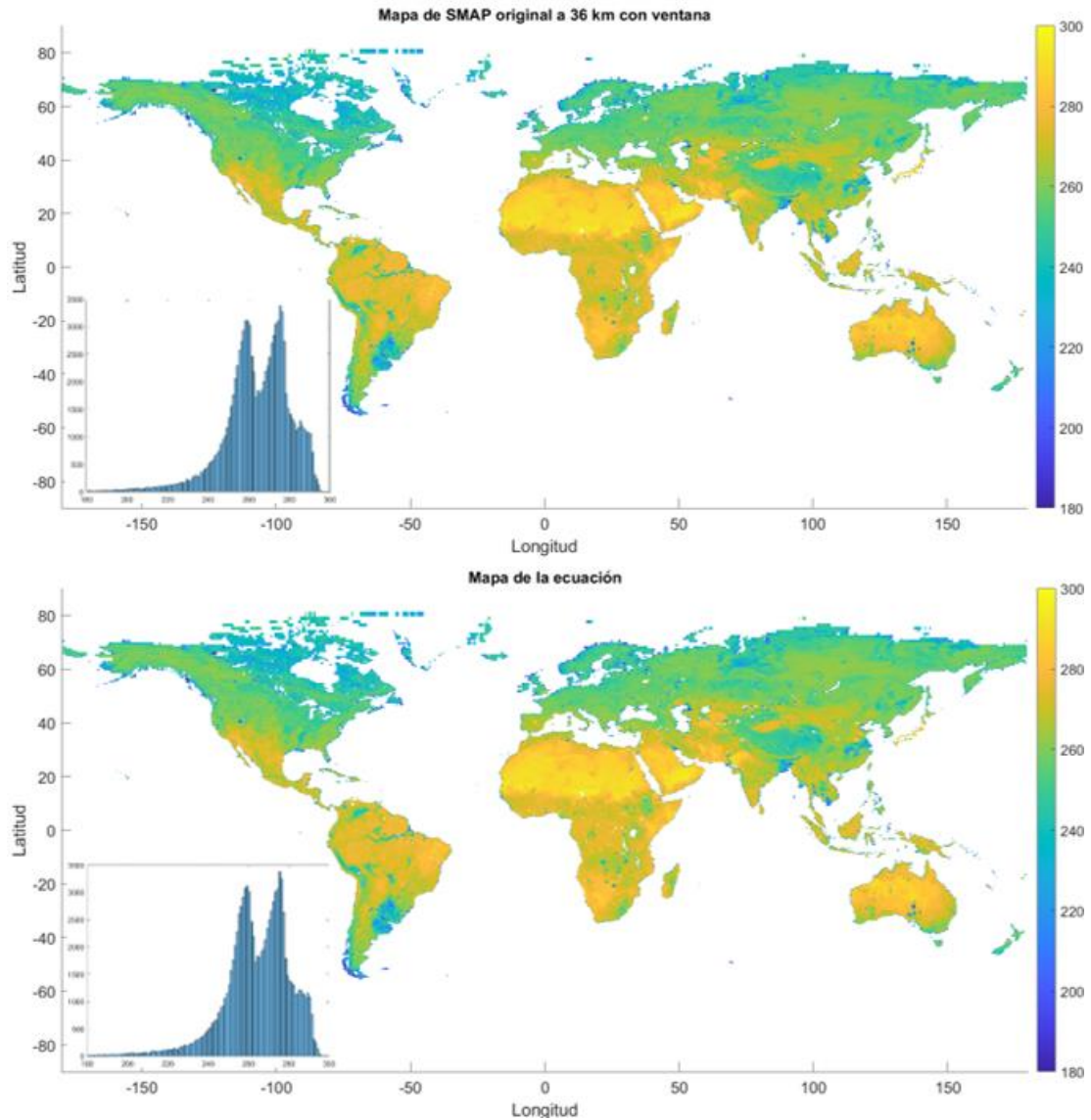


Figura 29. Comparación mapa SMAP original (malla de 36 km) con ventana, en la imagen superior, y el mapa obtenido aplicando la ecuación (3) con los términos 'a' y 'b' con ventana de 15 días en T(K).

Los dos mapas e histogramas son muy parecidos. Para apreciar las diferencias y validar el método se ha calculado la correlación y el error cuadrático medio de dichos valores.

La correlación se muestra en la figura 30.

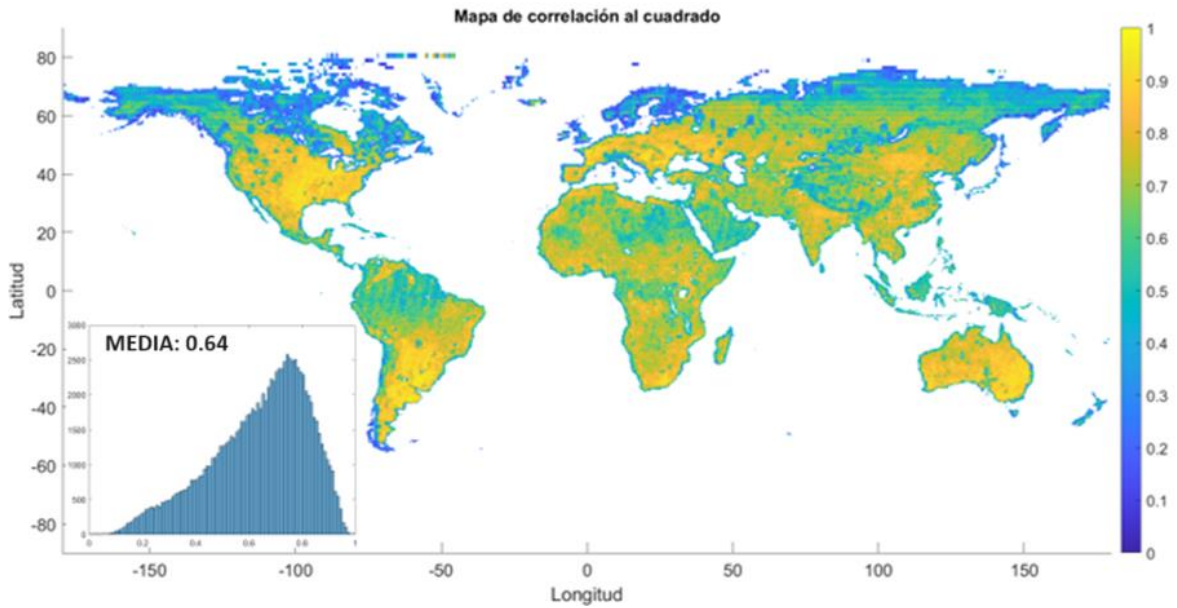


Figura 30. Mapa de correlación al cuadrado con ventana de 15 días en T(K).

Las correlaciones cuando se hace la validación usando la ventana temporal de 15 días no son tan altas en este caso. Esto podría sugerir una dependencia temporal de los parámetros 'a' y 'b' de la ecuación.

Finalmente, se analiza el error cuadrático medio en la figura 31.

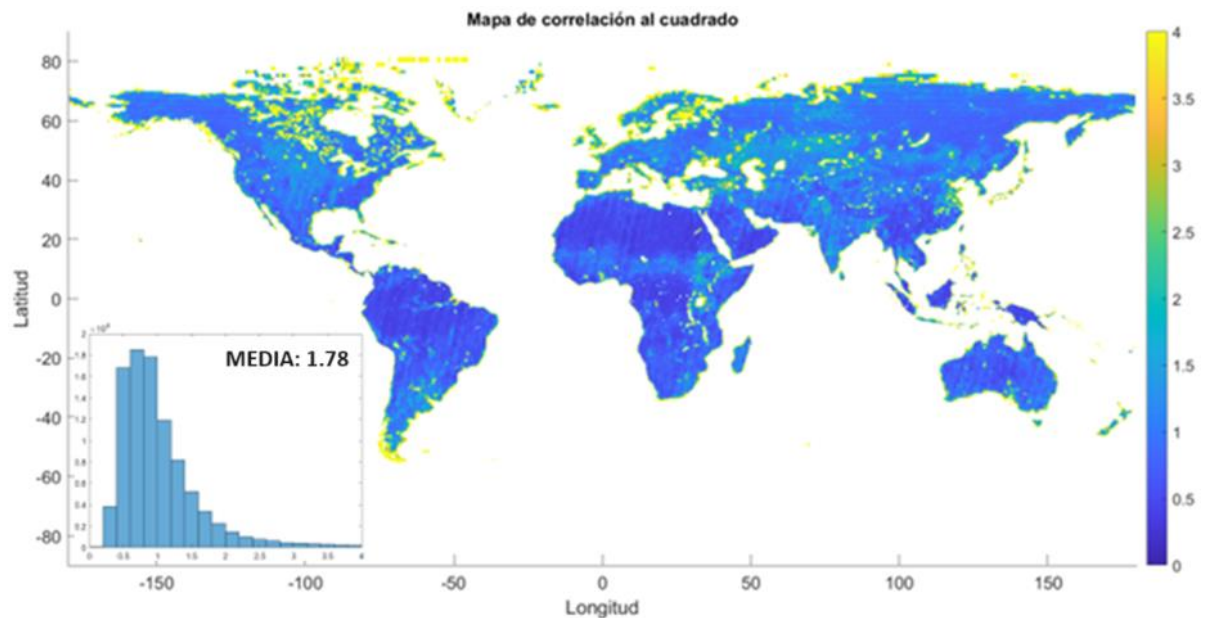


Figura 31. Mapa de error cuadrático medio con ventana de 15 días en T(K).

El mapa del error cuadrático también sigue el mismo patrón. En las zonas costeras y densidades más altas se obtienen errores mayores.

5. Análisis de sostenibilidad e implicaciones éticas

5.1. Impacto medioambiental

A continuación, se realiza el estudio sobre el impacto medioambiental que ha supuesto la realización de este TFG. Se tiene en cuenta todas las posibles emisiones que han podido tener los correos electrónicos, el uso del portátil y el transporte a la universidad para las reuniones de seguimiento. También, se menciona el impacto positivo que tiene este trabajo.

Emisiones por el uso del portátil:

Para la realización de este trabajo, el ordenador portátil se ha utilizado una media de 35 horas semanales durante las 20 semanas de trabajo. Este uso da un total de 700 horas.

El ordenador portátil tiene un consumo medio de 50 W o 0,05 kW, por lo tanto:

- Consumo semanal de energía:
 $0.05 \text{ kW} \times 35 \text{ h/semana} = 1.75 \text{ kWh/semana}$
- Consumo total durante las 20 semanas:
 $1.75 \text{ kWh/semana} \times 20 \text{ semanas} = 35 \text{ kWh}$

La cantidad de CO₂ emitida por kWh puede variar, pero un promedio global es de aproximadamente 0.5 kg de CO₂ por kWh.

- Emisión durante las 20 semanas:
 $35 \text{ kWh} \times 0.5 \text{ kg CO}_2/\text{kWh} = 17.5 \text{ kg CO}_2$

El impacto estimado para el uso del portátil para este proyecto es de 17.5 kg CO₂.

Emisiones de correos electrónicos:

En relación con este TFG, el impacto causado por los correos electrónicos es el siguiente. Se han enviado un total de 266 correos electrónicos, de los cuales 80 llevan archivos adjuntos. Según el estudio del investigador Mike Berners-Lee [19], se estiman los siguientes factores de emisión para los correos electrónicos:

- Correos sin archivos adjuntos: 0.3 g CO₂eq/correo
- Correos con archivos adjuntos: 50 g CO₂eq/correo

Por tanto, las emisiones totales causadas por el envío de correos electrónicos es el siguiente:

- Sin archivos: $186 \text{ correos} \times 0.3 \text{ g CO}_2\text{eq/correo} = 55.8 \text{ g CO}_2\text{eq}$
- Con archivos: $80 \text{ correos} \times 50 \text{ g CO}_2\text{eq/correo} = 4000 \text{ g CO}_2\text{eq}$

Con estos cálculos se obtiene un total de 4055.8 CO₂eq o 4.05 kg CO₂eq en emisiones por correos electrónicos.

Emisiones transportes en coche:

Para el desplazamiento del domicilio hasta la universidad, donde tenían lugar las reuniones de seguimiento con las tutoras del trabajo, se ha utilizado el coche. Se tiene en cuenta que desde la localidad del autor del TFG hasta la universidad hay una distancia de 29 km y, se tiene en cuenta el trayecto de ida y vuelta con un Kia Ceed que tiene unas emisiones de 115 g CO₂/km. Por lo tanto, cada viaje genera:

- Emisiones coche: $58 \text{ km} \times 115 \text{ g CO}_2/\text{km} = 6670 \text{ g CO}_2$

En total se han tenido 12 reuniones. Entonces, las emisiones de CO₂ en los desplazamientos ha sido de $6670 \text{ g CO}_2 \times 12 = 80040 \text{ g CO}_2$.

En total, para realizar este TFG, se han generado las siguientes emisiones:

- Emisiones totales: $17.5 \text{ kg CO}_2 + 4.05 \text{ kg CO}_2 + 80.04 \text{ kg CO}_2 = 101,59 \text{ kg CO}_2$
- Emisiones totales: $17.5 \text{ kg CO}_2 + 4.05 \text{ kg CO}_2 + 80.04 \text{ kg CO}_2 = 101,59 \text{ kg CO}_2$

Impacto positivo del proyecto

En el análisis de la sostenibilidad también es importante destacar el impacto positivo del trabajo. A pesar de las emisiones que provoca hacer el estudio, una vez realizado, puede utilizarse para fines positivos como entender mejor los fenómenos geofísicos, predecir fenómenos atmosféricos o estudiar el clima. Todos estos usos pueden ayudar a reducir posibles emisiones en un futuro, analizar y paliar los efectos del cambio climático.

Tal como se ha indicado en la introducción, los satélites de observación de la Tierra al obtener medidas globales y periódicas ayudan a comprender los fenómenos geofísicos. El satélite CIMR tiene como principal objetivo monitorizar los polos y ver el efecto del cambio climático en ellos. Sin embargo, también tomará medidas sobre tierra y se podrán monitorizar distintos parámetros como la humedad, la temperatura superficial, los cuerpos de agua y el estado de la vegetación. Estas variables son muy importantes para entender y paliar los efectos del cambio climático: sequías, inundaciones y grandes incendios cada vez más frecuentes. SMAP y SMOS obtienen, actualmente, medidas de la humedad del suelo y el parámetro VOD (Vegetation Optical Depth) a resoluciones de unos 36 km. Gracias a las medidas multiespectrales de CIMR, se intentará mejorar la resolución espacial de las TBs, con la combinación de las medias en banda L y bandas C y/o X. Mapas de humedad y de VOD a mejores resoluciones son útiles para mejorar el análisis de los efectos del cambio climático y desarrollar aplicaciones a escalas globales, locales y regionales. Además, son datos imprescindibles para la toma de decisión en dirección a paliar los efectos negativos del cambio climático generado por la acción humana.

5.2. Presupuesto

En este apartado se presenta un estudio del presupuesto para realizar este proyecto.

El equipo de trabajo está formado por un ingeniero junior que tiene un salario de 10 €/hora, donde se tiene en cuenta el número de horas totales hasta finalizar el proyecto. Se puede dividir en diferentes etapas, como se puede ver en la tabla 8.

Etapas del proyecto	Horas realizadas	Coste
Aprendizaje	50h	50 €
Investigación	80h	800 €
Desarrollo de los algoritmos	320h	3.200 €
Resultados y conclusiones	70h	700 €
Redacción y defensa	180h	1.800 €
Total	700h	7.000 €

Tabla 8. Tabla de costes del personal.

Respecto a los costes de material, todo el proyecto se ha realizado a partir de la versión R2023b de MATLAB de forma gratuita y, teniendo en cuenta que la duración del proyecto ha sido de 20 semanas, los costes son los de la tabla 9.

Materiales	Precio	Cantidad
Ordenador portátil	550 €	1 €
Licencia MATLAB 2023b	Gratuita	1 €
Licencia Microsoft Office	60 €	1 €
Software WinSCP	Gratuito	1 €
Total	610 €	

Tabla 9. Tabla de costes de material.

Una vez se tienen tanto los costes de material como los costes de personal, se puede calcular el coste total del proyecto, como se puede observar en la tabla 10.

Tipo de coste	Precio
Personal	7.000 €
Material	610 €
Total	7.610 €

Tabla 10. Tabla de presupuesto total.

Por lo tanto, el coste final del proyecto con la duración de 20 semanas es de 7.610 €.

6. Conclusiones y líneas futuras

6.1. Conclusiones

Este proyecto se enmarca en el contexto de la teledetección. Se ha realizado en el grupo CommSensLab del departamento de Teoría de Señal y Comunicaciones de la Universitat Politècnica de Catalunya (UPC). Este grupo de investigación tiene como línea de investigación la teledetección activa y pasiva. El proyecto se ha beneficiado de una base de investigación sólida establecida en el grupo en radiometría de microondas.

El objetivo principal de este trabajo ha sido aplicar y validar la técnica de nitidez (en inglés, *pansharpening*) a imágenes de radiometría de microondas de dos bandas de frecuencia diferentes y así mejorar la resolución espacial de los mapas obtenidos a baja frecuencia. Concretamente, se ha aplicado esta técnica para mejorar la resolución espacial de los mapas de TB obtenidos con medidas del radiómetro en banda L del satélite SMAP de la NASA. Para ello, se ha aplicado la técnica *pansharpening* con datos en banda X obtenidos con el radiómetro AMSR2 de la JAXA. Este estudio será útil para su aplicación a los datos adquiridos por la futura misión CIMR.

Se ha realizado la comparación entre los métodos de interpolación lineal (linear) e interpolación al vecino más cercano (nearest). El método *nearest* introduce el fenómeno *boxing*, donde varios píxeles contiguos asumen el mismo valor, provocando una apariencia menos detallada y más segmentada del mapa. En cambio, el método linear, ofrece una distribución más continua y suave, donde cada píxel toma un valor distinto, logrando una variación de color más gradual y una representación más realista de las transiciones en los datos, aunque, sin embargo, esta graduación sea fruto de la interpolación y pueda no ser exacta.

Por otra parte, se ha realizado el análisis de los resultados de la regresión lineal para ver si la técnica de *pansharpening* ha mejorado la resolución espacial. Se han estudiado de dos maneras, manteniendo los términos 'a' y 'b' constantes durante el año y variando los términos 'a' y 'b' con una ventana de 15 días. Con los términos de la regresión constantes, se muestra que en la zona de vegetación más densa hay mayor discrepancia, lo cual podría ser debido a que las medidas tomadas por ambas bandas discrepan más que en zonas de suelo desnudo. Esta diferencia podría explicarse porque la banda L tiene mayor profundidad de penetración que la banda X y por tanto, penetra más la vegetación que las medias de la banda X. Las diferencias tan altas en la costa podrían deberse a la contaminación mar-tierra.

Por otro lado, que las diferencias sean mayores cuando se utiliza la ventana de 15 días podrían indicar que hay los valores 'a' y 'b' además de tener la dependencia espacial, tengan una dependencia temporal o estacional.

Con los resultados obtenidos, este estudio apoya el valor de las mediciones de microondas multifrecuencia y el uso de la banda X a escalas más finas para la mejora de la resolución de la banda L. Lo cual sugiere que podría ser una técnica útil para utilizarse en CIMR. En dicha misión, las medidas de las dos bandas serán colocadas en tiempo y espacio, y los resultados deberían ser mejores. La mejora de resolución en las temperaturas de brillo derivará en la mejora de resolución de los mapas de humedad y del parámetro relacionado con estado de la vegetación VOD.

6.2. Líneas futuras

A partir de los resultados obtenidos como líneas futuras de trabajo se pueden considerar las siguientes:

- Utilizar un mapa de cubiertas del suelo y analizar la dependencia de los parámetros 'a' y 'b' de la ecuación 3 con respecto a las cubiertas vegetales.
- Analizar la dependencia temporal de los valores 'a' y 'b'.
- Comparar los resultados con el uso de otras bandas.
- Ver si se puede mejorar los errores en las zonas de vegetación más densa y en las zonas costeras.

Bibliografía

- [1] *Datos de la ESA*. (s/f). Esa.int. Recuperado el 21 de abril de 2024, de [https://www.esa.int/Space_in_Member_States/Spain/Datos de la ESA](https://www.esa.int/Space_in_Member_States/Spain/Datos_de_la_ESA)
- [2] *Copernicus en pocas palabras*. (s/f). Copernicus.eu. Recuperado el 21 de abril de 2024, de <https://www.copernicus.eu/es/sobre-copernicus/copernicus-en-pocas-palabras>
- [3] Instituto Geográfico Nacional. (s/f). *Instituto Geográfico Nacional*. Geoportal oficial del Instituto Geográfico Nacional de España. Recuperado el 21 de abril de 2024, de <https://www.ign.es/web/ca/copernicus/presentacion>
- [4] *Estándares de los datos de la CCI*. (s/f). Agencia del clima de la ESA. Recuperado el 21 de abril de 2024, de <https://climate.esa.int/es/data/Estandares-datos-CCI/>
- [5] *Estos son nuestros satélites*. (s/f). Copernicus.eu. Recuperado el 21 de abril de 2024, de <https://www.copernicus.eu/es/sobre-copernicus/infraestructura/estos-son-nuestros-satelites>
- [6] Romar, A. (2010, junio 22). *¿Dónde está SMOS?* SpaceRobotics.EU. <https://www.spacerobotics.eu/donde-esta-smos/>
- [7] *Novel technology*. (s/f). Esa.int. Recuperado el 24 de abril de 2024, de [https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/FutureEO/SMOS/Novel technology](https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/FutureEO/SMOS/Novel_technology)
- [8] Michelle S. Zhang, Faisal Alnassara, Maria Pilesb, Dara Entekhabi. (2023). *L-band Sharpening with C-band using SMAP and AMSR2 Radiometry Data for Future Application to CIMR*. (s/f). Michelle S. Zhang.
- [9] *SMAP*. (s/f). NASA Jet Propulsion Laboratory (JPL). Recuperado el 25 de abril de 2024, de <https://www.jpl.nasa.gov/missions/soil-moisture-active-passive-smap>
- [10] Wong, M. (2015, septiembre 4). *Advanced Microwave Scanning Radiometer 2 (AMSR2)*. Earthdata. <https://www.earthdata.nasa.gov/learn/find-data/near-real-time/amr2>
- [11] *Interpolación*. (s. f.). Mathworks.com. Recuperado 14 de mayo de 2024, de <https://es.mathworks.com/help/matlab/interpolation.html>
- [12] Datos SMAP (S. f.). Nsidc.org. Recuperado 17 de mayo de 2024, de <https://nsidc.org/data/data-access-tool/SPL3SMP/versions/8>
- [13] Milo, A. (2023, junio 5). *Sputnik 1, el primer satélite artificial y el parteaguas de la carrera espacial*. National Geographic en Español. <https://www.ngenespanol.com/el->

[espacio/sputnik-1-su-importancia-para-la-exploracion-del-espacio-primer-satelite-artificial/](#)

[14] Communication Department. (2022, mayo 19). *Observación de los océanos: cómo funciona el procesamiento de datos por satélite*. ALTEN Spain. <https://www.alten.es/observacion-oceanos-procesamiento-datos-satelite/>

[15] Dadrass Javan, F., Samadzadegan, F., Mehravar, S., Toosi, A., Khatami, R., & Stein, A. (2021). A review of image fusion techniques for pan-sharpening of high-resolution satellite imagery. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing: Official Publication of the International Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ISPRS)*, 171, 101-117. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2020.11.001>

[16] Loncan, L., de Almeida, L. B., Bioucas-Dias, J. M., Briottet, X., Chanussot, J., Dobigeon, N., Fabre, S., Liao, W., Licciardi, G. A., Simoes, M., Tourneret, J.-Y., Veganzones, M. A., Vivone, G., Wei, Q., & Yokoya, N. (2015). Hyperspectral Pansharpening: A Review. *IEEE geoscience and remote sensing magazine*, 3(3), 27-46. <https://doi.org/10.1109/mgrs.2015.2440094>

[17] *A guide to EASE grids*. (s. f.). National Snow and Ice Data Center. Recuperado 21 de mayo de 2024, de <https://nsidc.org/data/user-resources/help-center/guide-ease-grids>

[18] *interp2*. (s. f.). Mathworks.com. Recuperado 22 de mayo de 2024, de <https://es.mathworks.com/help/matlab/ref/interp2.html>

[19] Mike Berners-Lee. (2022). *The Carbon Footprint of Everything* de Mike Berners-Lee

[20] Wikipedia contributors. (s. f.). *Espectro electromagnético*. Wikipedia, The Free Encyclopedia. https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Espectro_electromagn%C3%A9tico&oldid=160248315

[21] *Clon de Galería de imágenes de equipamiento*. (s. f.). Grupo de investigación Física de la Atmósfera (RNM119). Recuperado 13 de junio de 2024, de <https://atmosphere.ugr.es/sdfasfd>

[22] *SMOS forma una nueva estrella en el cielo*. (s. f.). Esa.int. Recuperado 13 de junio de 2024,

https://www.esa.int/Space_in_Member_States/Spain/SMOS_forma_una_nueva_estrella_en_el_cielo

[23] PAZ, el primer satélite radar español (S. f.). Heraldo.es. Recuperado 13 de junio de 2024, de <https://www.heraldo.es/noticias/sociedad/2018/01/23/paz-primer-satelite-radar-espanol-1220044-310.html>

- [24] León, F. M. (2020, mayo 25). *El satélite ICESat-2 mide el espesor del hielo marino ártico*. Tiempo.com. <https://www.tiempo.com/ram/el-satelite-icesat-2-mide-el-espesor-del-hielo-marino-artico.html>
- [25] de la RAM, C. (2014, junio 5). *La familia Sentinel: satélites para vigilar*. Tiempo.com | Meteored. <https://www.tiempo.com/ram/71472/la-familia-sentinel-satelites-para-vigilar/>
- [26] CIMR. (s. f.). Esa.int. Recuperado 13 de junio de 2024, de https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2020/11/CIMR
- [27] Yueh, S. (s. f.). *SMAP (Soil Moisture Active/Passive)*. Eoportat.org. Recuperado 13 de junio de 2024, de <https://www.eoportat.org/satellite-missions/smap>
- [28] JAXA Earth Observation Research Center (EORC). (s. f.). *AMSR-related satellite catalog #8211; AMSR2 web at JAXA Earth observation research center (EORC)*. AMSR2 web. Recuperado 13 de junio de 2024, de https://www.eorc.jaxa.jp/AMSR/satellite/gcom-w_en.html