

## **Trabajo de Fin de Grado Grado en Ingeniería de Sistemas de Telecomunicación**

### **Nuevos Productos Humedad de Nivel L4 de SMOS**

**Autor:**

**Khalid Aabouch Azougarh**

**Directores:**

**Dr. Mercedes Vall-Ilossera Ferrán**

**Dr. Núria Duffo Úbeda**

**Mr. Gerard Portal Gonzalez**

Departamento de teoría de la señal y comunicaciones

Enero 2018. C/Jordi Girona 1-3, D3-116 Campus Nord, 08034 Barcelona

**Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Telecomunicació  
de Barcelona**

**Universitat Politècnica de Catalunya**

## Agradecimientos

Quiero agradecer en primer lugar y muy especialmente a la Dr. Mercè Vall-llossera Ferrán, gracias a su dedicación, ayuda y paciencia en este trabajo final de grado. También a Gerard Portal por su ayuda y sin su aportación este proyecto nunca hubiera sido posible y como no agradecer la Dr. Nuria Duffo Úbeda por darme la oportunidad de formar parte de esta gran familia.

También me gustaría expresar mi más sincero agradecimiento a mi familia y a mis amigos tanto fuera como dentro de la universidad, quienes han supuesto un apoyo constante durante estos duros años de la carrera. Por último, un especial agradecimiento a mi madre por su apoyo y amor incondicional durante toda mi vida.

# ÍNDICE

ÍNDICE.....	3
RESUMEN .....	5
CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN.....	6
1.1 ESTADO DEL ARTE .....	6
1.2 OBJETIVO .....	7
1.3 ESTRUCTURA DEL PROYECTO .....	8
CAPÍTULO 2: RADIOMETRIA Y TELEDETECCIÓN .....	9
2.1 CONCEPTOS BÁSICOS DE RADIOMETRÍA.....	9
2.1.1 Brillo .....	10
2.1.2 Radiación de un cuerpo negro .....	11
2.1.2 Radiación de un cuerpo gris .....	14
2.1.3 Potencia de ruido captada por una antena y temperatura de antena .....	14
2.2 Emisión en banda L .....	15
2.2.1 Radiación térmica y emisión de la superficie terrestre.....	15
2.2.2 Propiedades dieléctricas del suelo .....	16
2.2.3 Humedad del suelo .....	17
2.2.4 Efecto de la rugosidad de la superficie .....	18
2.2.6 Efectos de la vegetación.....	19
2.3 TELEDETECCIÓN .....	20
CAPÍTULO 3: RECUPERACIÓN DE HUMEDAD CON RADIOMETRIA DE MICROONDAS Y MISIONES ESPACIALES.....	21
3.1 MISIÓN SMOS.....	22
3.1.1 Medidas de la misión SMOS.....	23
3.1.2 El instrumento MIRAS .....	25
3.1.3 Algoritmo de recuperación de humedad a partir de datos de SMOS .....	26
3.1.4 Productos de la misión SMOS .....	27
3.2 MISIONES TERRA Y AQUA .....	28
3.2.1 Misión Aqua .....	28
3.2.2 Misión Terra .....	29
3.2.3 Instrumento MODIS .....	30
3.2.3.1 Efecto de las nubes a frecuencias de infrarrojo .....	30
3.3 MISIÓN PROBA-V.....	31
3.3.1 Instrumento ‘Vegetation’ .....	32
3.4 DATOS DE RE ANÁLISIS ECMWF .....	33

3.4.1 ERA-Interim .....	33
3.4.2 ERA5 .....	34
3.5 MEDIDAS IN-SITU .....	34
CAPITULO 4: ALGORITMO DOWNSCALLING .....	36
4.1 CONCEPTO DEL TRIANGULO UNIVERSAL.....	37
4.2 METODOLOGIA.....	38
4.2.1 Enhanced L3 .....	40
4.2.2 Humedad del suelo a alta resolución .....	41
4.3 DATOS REMOTOS .....	42
4.3.1 Datos SMOS.....	42
4.3.1.1 TB Nivel L1C.....	42
4.3.1.2 SM Nivel L3.....	43
4.3.2 Datos MODIS .....	43
4.3.3 Datos PROBA-V.....	43
4.3.4 Datos ERA5 .....	43
CAPÍTULO 5: RESULTADOS Y VALIDACIÓN .....	45
5.1 MAPAS DE LAS VARIABLES DE ENTRADA .....	45
5.1.1 LST y Skin temperature .....	45
5.1.2 NDVI .....	46
5.1.3 Humedad del Suelo SMOS.....	47
5.2 COMPARACION ENTRE LOS RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES .....	48
5.2.1 Producto 1: SM HR (MODIS).....	48
5.2.2 Producto 2: SM HR (ERA5) .....	49
5.2.3 Producto 3: SM UHR (PROBA-V).....	49
5.3 PROMEDIOS MENSUALES.....	51
5.4 ANÁLISIS DE LA CONSERVACION DE ENERGIA .....	52
5.5 VALIDACION EN LA ZONA DE REMEDHUS.....	54
5.5.1 Procedimiento de validación.....	55
PRESUPUESTO .....	56
CAPITULO 6: CONCLUSIONES Y LÍNEAS DE FUTURO .....	57
Referencias.....	59
ANEXO I: DESCARGAR DATOS ERA5 .....	62
ANEXO II: VALORES ESTADÍSTICOS.....	67

# RESUMEN

La misión SMOS (Soil Moisture and Ocean Salinity), en órbita desde el 2 de noviembre de 2009, proporciona datos de salinidad superficial del mar y datos de humedad del suelo a partir de medidas radiométricas de banda L. La resolución espacial de SMOS está entorno a los 30km – 50km, la cual es apropiada para aplicaciones globales. Sin embargo, para aplicaciones regionales y locales, tales como agrícolas, y prevención de incendios, es demasiado baja. Por ello, se han desarrollado distintos métodos que mejoran la resolución de SMOS.

El departamento de Teoría de la Señal y Comunicaciones ha desarrollado un método para mejorar la resolución espacial de SMOS de ~40km a 1km, se basa en un concepto llamado “Triángulo universal” [1], que relaciona las predicciones de humedad obtenidas con SMOS en banda L, con datos de temperatura superficial (LST, Land Surface Temperature) e índices de vegetación (NDVI, Normalised Difference Vegetation Index), del instrumento MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) de las misiones AQUA y el TERRA.

MODIS trabaja en otras bandas de frecuencias tales como el infrarrojo térmico y cercano para obtener la LST y el NDVI, por lo que se consiguen mejores resoluciones espaciales de 1km. Sin embargo, estas bandas de frecuencias se ven afectadas por distintas condiciones climatológicas como las nubes y la niebla y por la vegetación.

El objetivo principal de este proyecto fin de grado es aplicar este nuevo modelo de mejora de resolución espacial, haciendo sinergias de los datos de SMOS con bases de datos distintos a las de MODIS, para:

- mejorar todavía más la resolución espacial consiguiendo mapas a 300m de resolución. Sustituyendo el NDVI de MODIS a 1km por el que proporciona el satélite Proba V a 300m.
- obtener mapas a alta resolución independientemente de las condiciones climatológicas. Falta de datos en las zonas cubiertas por nubes o niebla. Sustituyendo la LST de MODIS por el producto ER5, datos de reanálisis de temperatura superficial que proporciona ECMWF.

Finalmente se ha hecho un trabajo de validación de estos productos con datos in situ de la red de medidas instalada en Zamora REMEDHUS, gestionada por el CIALE de la Universidad de Salamanca. Para ello se han analizado varias métricas estadísticas (correlación, RMSE, URMSE).

# CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

## 1.1 ESTADO DEL ARTE

El grado de humedad del suelo está determinado sobre todo por la evaporación y las precipitaciones. Una sequía prolongada, por ejemplo, puede provocar un suelo duro, seco y cuarteado, por otro lado, las inundaciones y los corrimientos de tierra pueden ser consecuencia de lluvias muy intensas. Por este motivo tener datos globales de la humedad del suelo es el santo grial para el conocimiento del ciclo hidrológico.

Actualmente se están utilizando dos tipos de tecnologías para medir la humedad del suelo, por un lado, los sensores in-situ que permiten tomar medidas de humedad exactamente en el lugar donde se encuentra el sensor, entre este tipo de sensores una de las tecnologías más usadas hoy en día se conoce como TDR (Time Domain Reflectometry) que hace uso del electromagnetismo para realizar sus mediciones con muy buena resolución temporal y espacial. Por otro lado, la teledetección desde torres, aeronaves y satélites, hace uso de radiómetros de microondas, escaterómetros, radares de apertura sintética y combinaciones de radar-radiómetros, que permiten hacer un seguimiento de la humedad a escalas mayores, desde local, regional y hasta global desde satélite.

En 2009, la Agencia Espacial Europea (ESA) en su segunda misión de oportunidad de exploración de la Tierra, lanzó el satélite SMOS (Soil Moisture and Ocean Salinity), también conocida como la misión del agua. Su objetivo principal era, realizar observaciones globales de la humedad del suelo y de la salinidad de los océanos y así entender mejor el ciclo del agua y los procesos de intercambio de energía entre la superficie de la tierra y la atmósfera. Los datos recuperados han permitido mejorar modelos meteorológicos, climatológicos, y actualmente, gracias a sinergias con datos de otros sensores se están desarrollando productos de valor añadido que amplían el ámbito de aplicaciones, como la agricultura y la administración de recursos hídricos.

Desde el momento en que SMOS se puso en órbita y comenzó a proporcionar medidas, se han ido mejorando los algoritmos de procesado de datos y de recuperación de parámetros geofísicos, así como se han incrementado las aplicaciones. La resolución espacial de SMOS es de unos ~40km, la cual es útil para aplicaciones globales. Sin embargo, para aplicaciones regionales, tales como agrícolas, prevención de incendios y propagación de plagas son necesarias resoluciones mucho mejores, del orden de 1km. Para que las medidas de humedad sean útiles a escala regional hay que mejorar la resolución espacial de hasta 1km como mínimo.

SMOS lleva a bordo el radiómetro interferométrico MIRAS (Microwave Imaging radiometer) en la banda L (1.4GHz) que tiene la ventaja respecto del uso de frecuencias más altas de que es insensible al efecto de las nubes, niebla y se atenúa

menos por la vegetación. Sin embargo, la resolución espacial desde el espacio es peor (~40km) que los radiómetros que trabajan a frecuencias más altas térmico infrarrojo por ejemplo.

Para mejorar esta resolución espacial de SMOS se han desarrollado diversos algoritmos, denominados “Downscaling”. En el departamento de Teoría de la Señal y Comunicaciones ha estado trabajando en la misión SMOS desde el inicio del diseño del instrumento y la demostración y su idoneidad en la recuperación de la humedad. También se trabajó en el desarrollo de algoritmos de recuperación, primero de la salinidad y después de la humedad. Además, se ha desarrollado un algoritmo de downscaling basado en una técnica llamada “universal triangle” [1] que relaciona la humedad del suelo (SM) con la temperatura superficial de la tierra (LST) y el índice de vegetación normalizado (NDVI) [2]. Estos datos auxiliares se obtienen de sensores o bases de datos a mayor resolución (1km, por ejemplo), con lo que aplicando sinergias entre los datos de SMOS (40km de resolución) y la LST (1km) y el NDVI (a 1km) se pueden obtener mapas de SM a 1km.

Como resultado de aplicar el algoritmo “Downscaling” se obtiene mapas de humedad a 1km de resolución. Barcelona Expert Center (BEC) [3] distribuye mapas a 1km de resolución obtenidos mediante este algoritmo (producto de nivel 4) de la península Ibérica y de Ghana y Sudáfrica de forma operacional. Asimismo, el BEC también distribuye mapas de humedad en una malla de 25 km, obtenidos directamente de las temperaturas de brillo de SMOS.

Recientemente, se ha mejorado este algoritmo aplicando, además del concepto del triángulo Universal una ventana adaptativa móvil. El artículo [4] que explica este nuevo método está en revisión. En un futuro próximo está previsto que se sustituya los mapas L4 del BEC actuales por los obtenidos con esta nueva versión del algoritmo

## 1.2 OBJETIVO

Los dos objetivos principales de este proyecto son, por un lado, obtener mapas de humedad a escala local, regional e incluso global con una resolución de centenares de metros y, por otro, que el algoritmo pueda obtener predicciones de humedad sin depender de la meteorología del momento. Muchos de los algoritmos al depender de datos obtenidos a frecuencias altas visible, infrarrojo térmico o cercano al infrarrojo, no obtienen datos en presencia de nubes o niebla, por ejemplo y se ven muy afectadas por la vegetación.

Para ello se ha utilizado el algoritmo de downscaling desarrollado por Gerard Portal [4]. Dicho programa se ha validado sobre distintas zonas donde hay medidas in situ, REMEDHUS en España, CEMADEN en Brasil y Yanco en Australia. Dicho algoritmo utiliza sinergias de los datos de SMOS (~40km resolución) con los datos de MODIS de LST y de NDVI, ambos a 1km de resolución, para obtener mapas de humedad a 1km. Sin embargo, esta versión del algoritmo tiene el inconveniente de

que los datos de LST de MODIS son inexistentes en las áreas cubiertas de nubes.

Para resolver este problema, en este proyecto proponemos utilizar datos de temperatura superficial de modelos de reanálisis. Concretamente se han utilizado los datos ERA5 de ECMWF. ERA5 se está desarrollando a través del Servicio de Cambio Climático de Copérnico (C3S) [5].

El segundo objetivo se ha conseguido sustituyendo los datos de NDVI a 1km de MODIS por los datos de la misión PROBO-V, proporcionados a través de los servicios de tierra de Copérnico [6].

Por último, para ambos productos se ha hecho un trabajo de comparación con los mapas que se obtenían con los datos de MODIS y por otro lado, de validación respecto de medidas in-situ registradas en la red de medidas REMEDHUS situada en Zamora (España) mediante un análisis estadístico (correlación, RMSE, UMRSE).

### 1.3 ESTRUCTURA DEL PROYECTO

Tal como se indica en el índice de la memoria del proyecto se ha dividido en seis capítulos. En este primer capítulo de introducción, se hace hincapié en la necesidad de tener medidas globales y regulares de humedad de la tierra, para mejorar la comprensión de los efectos del cambio climático. Además, es importante tener medidas a alta resolución para aplicaciones locales de agricultura, predicción de incendios, control de plagas de insectos, entre otras. También se presentan los objetivos del proyecto, así como su estructura.

El capítulo 2, se introducen los conceptos teóricos en los que se basa la teledetección y en particular, la radiometría para obtener parámetros geofísicos. Mientras que, en el capítulo 3 se describe el modelo de recuperación de la humedad a partir de medidas radiométricas en banda L. Actualmente existen dos misiones espaciales específicamente diseñadas para recuperación de humedad SMOS de la ESA y SMAP de la NASA. En este capítulo se explica en detalle la misión SMOS, puesto que sus datos son lo que hemos utilizado en el proyecto.

También se presentan en este capítulo las demás fuentes de datos utilizadas en el proyecto para hacer sinergias con los datos de SMOS: Los satélites AQUA y TERRA de la NASA que llevan embarcado el instrumento MODIS, las bases de datos ERA-interim y ERA5, que proporciona ECMWF y el satélite PROBA V, cuyos datos obtenemos a través de la web de Copérnicus. Finalmente, también se describe la red de medidas in situ REMEDHUS en Zamora, utilizada para la validación. El capítulo 4 se dedica a la descripción del algoritmo de downscaling y las variantes que se han desarrollado en este proyecto; mientras que el capítulo 5 se dedica a la presentación de los resultados, la validación y la comparación de los distintos productos. Finalmente, en el capítulo 6 se presentan las conclusiones y las líneas de futuro de este trabajo.

# CAPÍTULO 2: RADIOMETRIA Y TELEDETECCIÓN

## 2.1 CONCEPTOS BÁSICOS DE RADIOMETRÍA

La radiación solar electromagnética incide sobre la tierra, donde una parte de su energía es absorbida por la atmosfera y el resto se transmite a la superficie. A su vez una parte de esta energía se dispersa y el resto se absorbe por la superficie de la tierra. De acuerdo con los principios termodinámicos, la absorción de energía electromagnética por un medio material se transforma en energía térmica lo que implica un incremento en la temperatura del material. El proceso opuesto, emisión térmica, es necesario para llegar a un equilibrio entre la radiación solar absorbida y la radiación emitida por la superficie y la atmósfera terrestre.

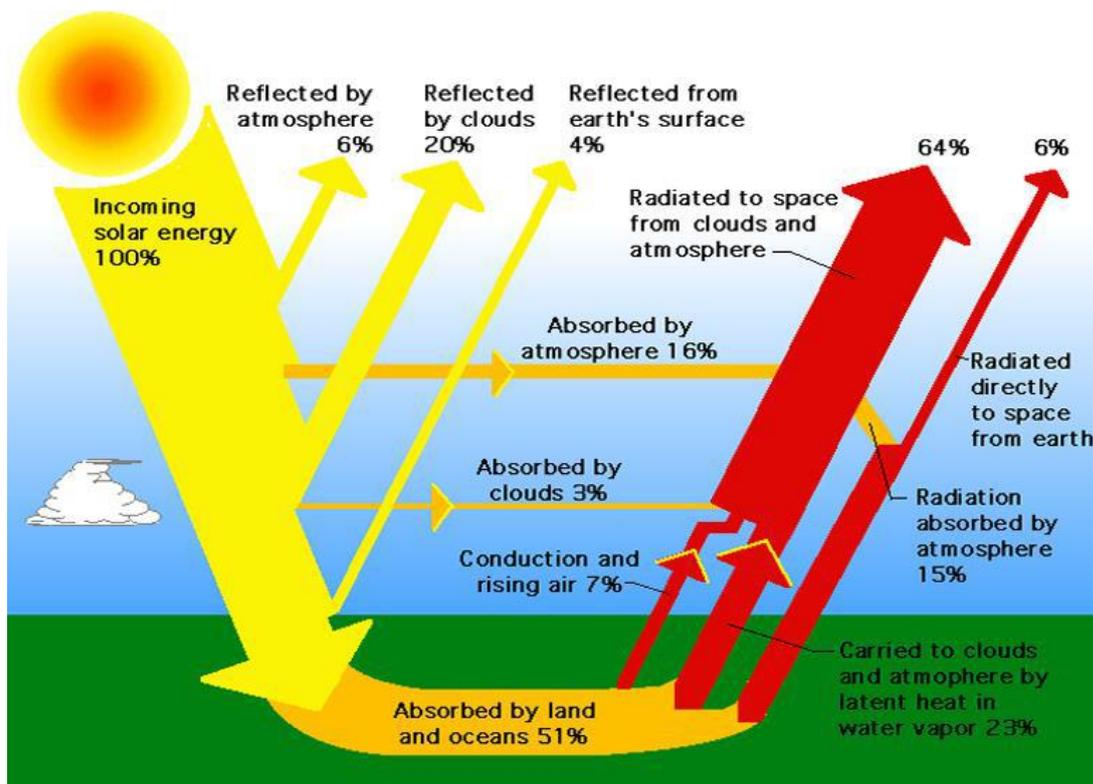


Figura 2.1 Ciclo de la radiación solar electromagnética recibida por la tierra.

La figura 2.1 muestra el ciclo de la radiación solar electromagnética, solo parte de la energía solar llega a la superficie terrestre, donde una pequeña parte de esta energía se disipa a la atmósfera. puesto, que parte se refleja en la atmósfera, las nubes, otra parte

se atenúa al pasar por las distintas partes de la atmósfera y solamente entorno al 51% es absorbida por la tierra y los océanos. Cuando se llega al equilibrio térmico, esta energía absorbida se radia de nuevo hacia la atmósfera (componente de color rojo en la figura).

La radiometría es el campo de la ciencia y la ingeniería que se ocupa del estudio de la radiación electromagnética de un cuerpo. A continuación, se introducen los conceptos básicos de la radiometría que se han utilizado en este proyecto.

### 2.1.1 Brillo

El brillo  $B(\theta, \phi)$  [ $W \cdot sr^{-1} \cdot m^{-2}$ ] se define como la potencia radiada por un cuerpo en un ángulo sólido  $\Omega$  por unidad de superficie:

$$B(\theta, \phi) = Ft(\theta, \phi)At \quad (2.1)$$

$Ft(\theta, \phi)$  es el diagrama de radiación normalizado y  $At$  es el área de radiación.

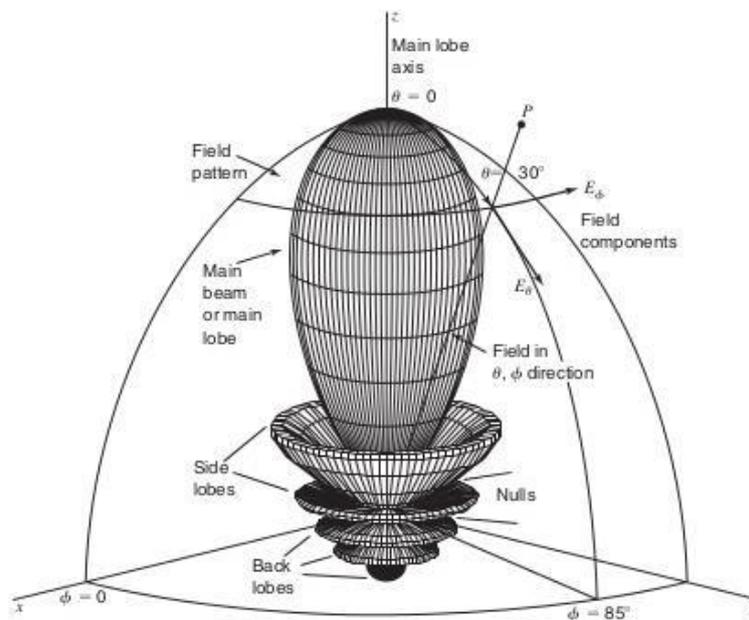


Figura 2.2 Ejemplo de un diagrama de radiación de una antena [6]

La Potencia total recibida por una antena con área efectiva  $A_r$  y diagrama de radiación normalizado  $F_n(\theta, \phi)$  de una fuente extendida es:

$$P = \frac{A_r}{2} \int_f^{f+\Delta f} \iint_{4\pi} B_f(\theta, \phi) F_n(\theta, \phi) d\Omega df \quad (2.2)$$

donde  $B_f(\theta, \phi)$  es el brillo espectral que se define como el brillo por unidad de ancho de banda ( $df$ ). Si  $B_f(\theta, \phi)$  no está polarizado (es el caso para la emisión atmosférica), como la antena receptora si tiene una polarización sólo se detectará la mitad de la potencia incidente total sobre su superficie, razón por la cual aparece en la ecuación (2.2) el factor  $\frac{1}{2}$ .  $\Delta f$  es el ancho de banda de la antena receptora y  $d\Omega$  es el diferencial del ángulo sólido.

### 2.1.2 Radiación de un cuerpo negro

Todos los cuerpos a una temperatura física por encima del  $0k$ , emite radiación electromagnética. Según la teoría cuántica cada línea espectral se corresponde a la transición de un electrón de un nivel energético  $E_1$  a otro  $E_2$ . La frecuencia a la que se produce la radiación puede calcularse mediante la ecuación de Bohr [7]

$$f = \frac{E_1 - E_2}{h} \quad (2.3)$$

La emisión atómica se origina por la interacción entre varios átomos o partículas. La probabilidad de emisión es mayor cuanto mayor sea la densidad atómica y la energía cinética (temperatura). El incremento de la energía radiada por un cuerpo es proporcional al incremento de su temperatura absoluta.

Un cuerpo negro es un objeto ideal, que absorbe toda la energía que incida sobre él a cualquier frecuencia, dirección o polarización, sin reflejar nada de esta radiación incidente. Un cuerpo negro es también un emisor perfecto, por tanto, cuando se encuentra en equilibrio térmico, toda la energía absorbida la reemite isotrópicamente. Teniendo en cuenta las consideraciones anteriores, la energía radiada por un cuerpo negro sigue la ley de Planck, que relaciona la intensidad de la radiación emitida con la temperatura del cuerpo y la frecuencia:

$$B_f = \frac{2hf^3}{c^2} \left( \frac{1}{e^{hf/kT} - 1} \right) \quad (2.4)$$

donde  $f$  [Hz] es la frecuencia,  $T$  [K] es la temperatura absoluta,  $h=6.63 \cdot 10^{-34}$  [J·s] es la constante de Planck,  $k=1.38 \cdot 10^{-23}$  [JK<sup>-1</sup>] es la constante de Boltzmann y  $c=3 \cdot 10^8$  [ms<sup>-1</sup>] es la velocidad de la luz.

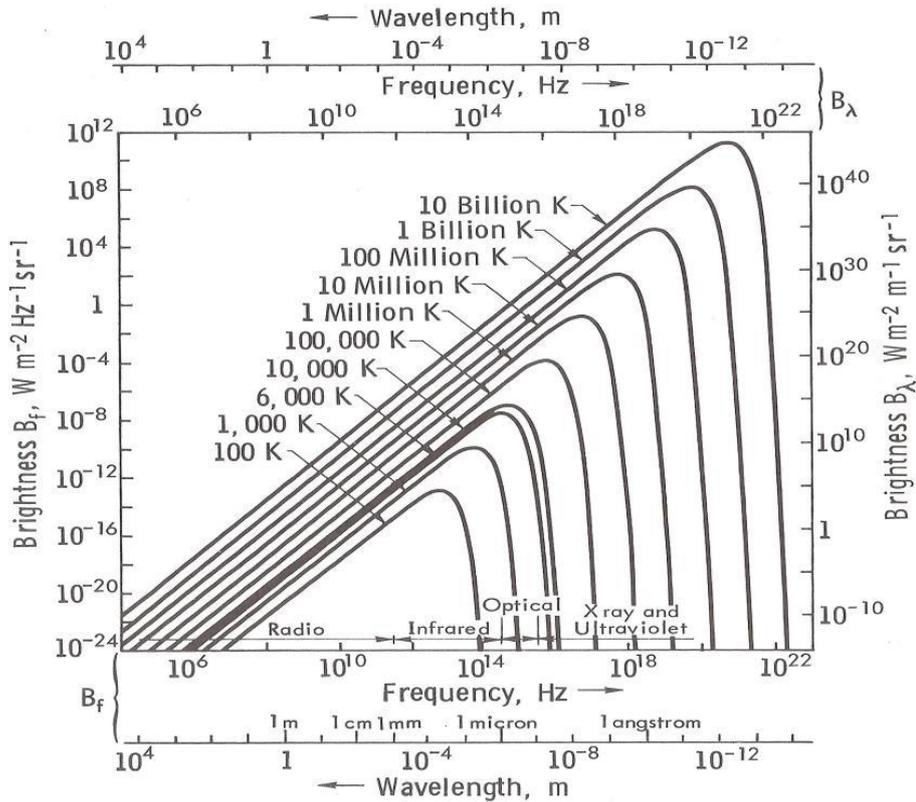


Figura 2.3 Densidad espectral de brillo en función de la frecuencia para diferentes valores de temperatura [7].

En la figura 2.3 se presentan las gráficas de la dependencia del brillo con la frecuencia para distintas temperaturas. Se observa que el brillo aumenta de forma proporcional a la temperatura y la frecuencia a la que el valor del brillo es máximo, aumenta con la temperatura  $T$  [7].

Para bajas frecuencias (Caso de los radiómetros de microondas en banda L, entre 1 y 2 GHz), se puede aproximar la ley de Planck por la siguiente expresión (2.5), conocida como la ley de Rayleigh-Jeans, mucho más sencilla y con dependencia lineal con la temperatura.

$$B_f = \frac{2f^2 kT}{c^2} = \frac{2kT}{\lambda^2} \quad (2.5)$$

donde  $\lambda = c/f$  [m] es la longitud de onda.

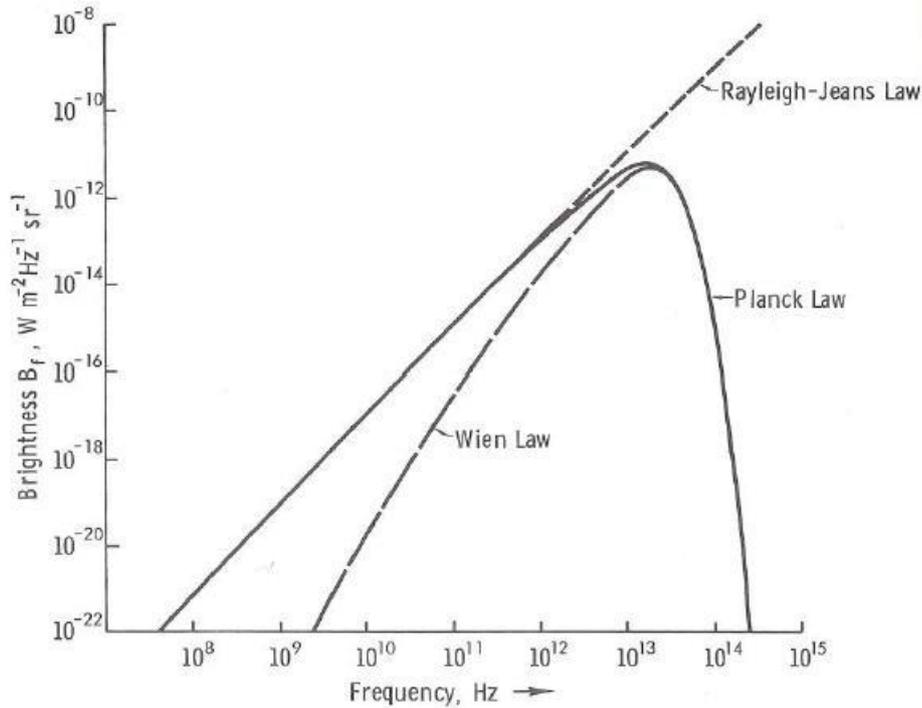


Figura 2.4 se comparación con la ley de Planck a baja frecuencia para  $T=300$  [7]

La figura 2.4 muestra una comparación de la ley de Planck con ley de Rayleigh-Jeans (aproximación a bajas frecuencias). En radiometría de microondas es común usar la ley de Rayleigh-Jeans debido a su simplicidad matemática respecto a la ley de Planck y a su error de desviación inferior al 1% para  $f < 117 \text{ GHz}$  y  $T = 300 \text{ K}$ .

Por lo tanto, el brillo de un cuerpo negro (Black body, en inglés  $B_{bb}$ ) a una temperatura física  $T$  y un ancho de banda  $\Delta f$  para banda L de microondas se puede aproximar por:

$$B_{bb} = B_f \cdot \Delta f = \frac{2kT}{\lambda^2} \cdot \Delta f \quad (2.6)$$

Asumiendo que el ancho de banda es lo suficiente pequeño como para considerar  $B_f$  y sustituyendo la ecuación (2.6) en la (2.2) la potencia emitida por el cuerpo negro resulta:

$$P_{bb} = \frac{kT A_r}{\lambda^2} \cdot \Delta f \cdot \iint_{4\pi} F_n(\theta, \phi) d\Omega \quad (2.7)$$

Teniendo en cuenta que la integral de la ecuación anterior es el ángulo sólido equivalente de la antena, la expresión anterior quedaría:

$$\Omega_p = \iint_{4\pi} F_n(\theta, \phi) d\Omega = \frac{\lambda^2}{A_r} \quad (2.8)$$

$$P_{bb} = KT \cdot \Delta f \quad (2.9)$$

Esta expresión es la potencia captada por una antena con la temperatura de un cuerpo negro ideal a su alrededor.

### 2.1.2 Radiación de un cuerpo gris

Un cuerpo negro es un cuerpo ideal que se utiliza como concepto teórico para describir los principios de radiación. Los cuerpos reales absorben parte de la energía recibida y reflejan la otra parte. A este tipo de cuerpos se les llama cuerpos grises. La intensidad de brillo emitida por un cuerpo gris es:

$$B(\theta, \phi) = \frac{2k}{\lambda^2} \cdot T_B(\theta, \phi) \cdot \Delta f \quad (2.10)$$

donde  $T_B(\theta, \phi)$  es la temperatura efectiva de brillo y es la temperatura que tendría un cuerpo negro para producir el mismo brillo  $B(\theta, \phi)$  que el cuerpo real. por lo que no se trata de la temperatura real del objeto.

La emisividad, se define como el cociente entre el brillo  $B(\theta, \phi)$  de un material en relación al que emitiría un cuerpo negro a la misma temperatura:

$$e(\theta, \phi) = \frac{B(\theta, \phi)}{B_{bb}} = \frac{T_B(\theta, \phi)}{T} \quad (2.11)$$

Así el rango de valores posibles para la emisividad está comprendido entre 0 y 1 ( $0 \leq e(\theta, \phi) \leq 1$ ) puesto que el brillo de material real siempre es menor o igual al brillo emitido por un cuerpo negro a la misma temperatura  $T$ . De manera que la temperatura de brillo de un material  $T_B(\theta, \phi)$  siempre será menor o igual que su temperatura física  $T$ .

### 2.1.3 Potencia de ruido captada por una antena y temperatura de antena

La temperatura radiométrica aparente ( $T_{ap}$ ) es equivalente a la distribución de la temperatura de un cuerpo negro, pero hace referencia a la distribución de brillo de la energía que incide sobre la antena:

$$B_i(\theta, \phi) = \frac{2k}{\lambda^2} \cdot T_{AP}(\theta, \phi) \cdot \Delta f \quad (2.12)$$

Por tanto, la potencia captada por una antena con diagrama de radiación normalizado  $F_n(\theta, \phi)$  sobre la cual incide el brillo de los cuerpos grises que tiene a su alrededor se expresa de la siguiente manera:

$$P = \frac{A_r}{2} \int_f^{f+\Delta f} \iint_{4\pi} \frac{2k}{\lambda^2} T_{AP}(\theta, \phi) F_n(\theta, \phi) d\Omega df \quad (2.13)$$

Procediendo tal como se hizo con la ecuación (2.9), la potencia captada por una antena sobre la que incide la emisión de un cuerpo gris se puede reescribir como:

$$P = kT_A \Delta f \quad (2.14)$$

En la cual,  $T_A$  se conoce como temperatura de antena y es la temperatura a la que debería estar una resistencia para que radiara la misma potencia. La temperatura de la antena se define a partir de las ecuaciones (2.13 y 2.14):

$$T_A = \frac{A_r}{\lambda^2} \iint_{4\pi} T_{AP}(\theta, \phi) F_n(\theta, \phi) d\Omega df \quad (2.15)$$

En los satélites de observación de la tierra se usa la teledetección para obtener distintos parámetros. Algunos de ellos llevan embarcados radiómetros (teledetección pasiva). Estos instrumentos captan la radiación que emite, en este caso, la superficie terrestre afectada por la vegetación y la atmósfera, así como la propia emisión de estas últimas. La  $T_{ap}$  se expresa como:

$$T_{Ap}(\theta, \phi) = T_{up} + (T_B + T_{sc}) \cdot \frac{1}{L_a} \quad (2.16)$$

donde  $T_B$  es la temperatura de brillo del escenario observado,  $T_{up}$  es la emisión atmosférica hacia arriba,  $T_{sc}$  es la emisión atmosférica hacia abajo dispersada por la superficie terrestre en dirección a la antena y  $L_a$  representa la atenuación de la atmósfera.

## 2.2 Emisión en banda L

La emisión de la superficie terrestre depende de su constante dieléctrica, que está relacionada con el contenido de humedad y el tipo del suelo, también depende de la densidad de vegetación, la temperatura y la rugosidad del suelo. A continuación, se presentan estos parámetros y se analiza su efecto en la radiación emitida

### 2.2.1 Radiación térmica y emisión de la superficie terrestre

La radiación térmica o temperatura de brillo de la superficie de la Tierra ( $T_{Bp}$ ) se determina por su temperatura física ( $T$ ) y su emisividad ( $e_p$ ).

$$T_{Bp} = e_p \cdot T \quad (2.17)$$

El subíndice p hace referencia al tipo de polarización: vertical (v), horizontal (h). La emisividad es el complementario a la reflectividad:

$$e_p = 1 - \Gamma_{S,P} \quad (2.18)$$

Las expresiones de la reflectividad ( $\Gamma_{S,P}$ ) tanto en polarización vertical como horizontal, para un suelo descubierto, plano y poco rugoso se puede aproximar por los coeficientes de reflexión de Fresnel ( $\Gamma_{S,P} \cong \Gamma_{O,P}$ ):

$$\Gamma_{ov} = \left| \frac{\epsilon_s \cos \theta - \sqrt{\epsilon_s - \sin^2 \theta}}{\epsilon_s \cos \theta + \sqrt{\epsilon_s - \sin^2 \theta}} \right| \quad (2.19)$$

$$\Gamma_{oh} = \left| \frac{\cos \theta - \sqrt{\epsilon_s - \sin^2 \theta}}{\cos \theta + \sqrt{\epsilon_s - \sin^2 \theta}} \right| \quad (2.20)$$

donde  $\theta$  hace referencia al ángulo de incidencia y  $\epsilon_s$  es la constante dieléctrica compleja del suelo, que se rige a su vez por el tipo de suelo y su contenido de humedad.

La figura 2.5 ilustra la dependencia de la temperatura de brillo con la polarización y con el ángulo de incidencia, considerando tres condiciones de humedad diferentes:

diferentes (suelo seco ( $sm=0.02$ ), humedad moderada ( $sm=0.2$ ) y muy húmedo ( $sm=0.4$ )). Se observa como la temperatura de brillo y por tanto, también la emisividad disminuyen con la humedad. Por otro lado, se observa que la componente vertical de la emisividad aumenta con el ángulo de incidencia, mientras que la componente horizontal disminuye. Ambas polarizaciones coinciden para ángulo de incidencia 0.

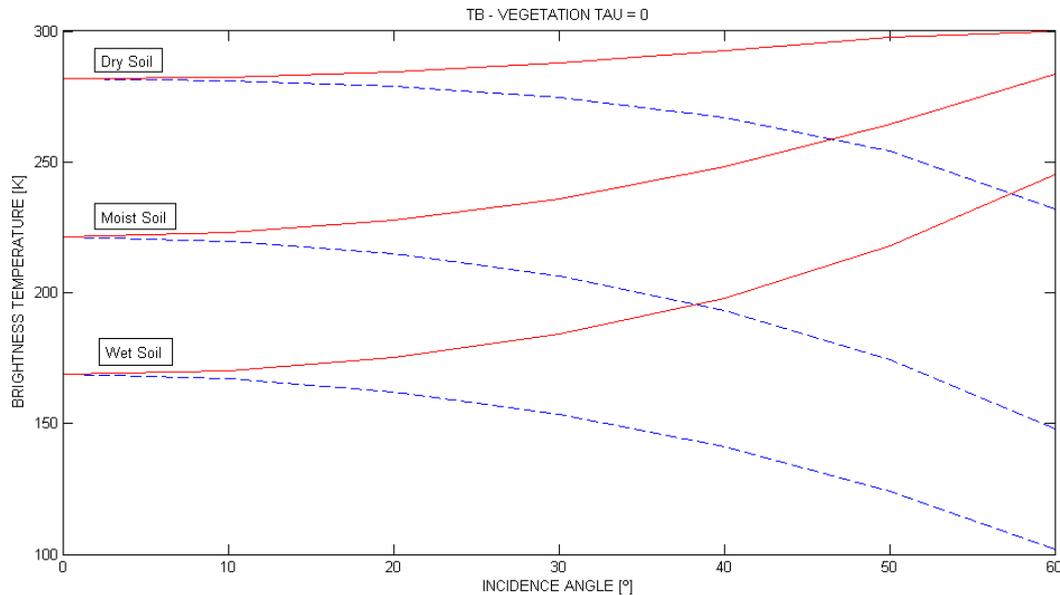


Figura 2.5 Dependencia de la temperatura de brillo con la polarización y con el ángulo de incidencia, considerando tres condiciones de humedad (muy seco ( $sm=0.02$ ), humedad moderada ( $sm=0.2$ ) y muy húmedo ( $sm=0.4$ )). La polarización horizontal se representa en azul y la vertical en vertical.:

### 2.2.2 Propiedades dieléctricas del suelo

La constante dieléctrica del suelo ( $\epsilon_s$ ) se define como un número complejo (ecuación 2.21) y es la respuesta de éste a una onda electromagnética. A frecuencias de microondas, la emisión del suelo, depende, entre otros parámetros, de la cantidad de agua que contiene

$$\epsilon_s = \epsilon_s' + j \epsilon_s'' \quad (2.21)$$

Donde la parte real determina las características de propagación de la energía cuando atraviesa el suelo y la parte imaginaria determina las pérdidas de energía. Como el suelo no es un medio homogéneo, la constante dieléctrica compleja resulta de una combinación de partes individuales como: aire, agua, roca... Otros factores que afectan a la constante dieléctrica pueden ser: la textura del suelo, la temperatura, la salinidad en el caso del océano y la longitud de onda.

La humedad del suelo, debido a su relación con la parte real e imaginaria de la constante dieléctrica, afecta a la profundidad de penetración de la onda electromagnética en el suelo. La profundidad de penetración se expresa como:

$$\gamma_D = \frac{\lambda \sqrt{\epsilon_s''}}{2\pi \epsilon_s'} \quad (2.22)$$

### 2.2.3 Humedad del suelo

Se denomina humedad del suelo a la cantidad de agua que hay en un terreno. la porosidad del suelo determina el volumen total de agua que es capaz de retener el mismo. Los suelos con poros pequeños retendrán más agua que los suelos con poros mayores. Además, los poros de los suelos secos estarán llenos de aire, mientras que los poros de los suelos húmedos estarán llenos de agua. La humedad, agua en el suelo, se expresa como un ratio. Normalmente se puede expresar en tanto por ciento y se puede determinar de dos maneras:

- Humedad del suelo Gravimétrica,  $m_g$ : se define como la masa de agua,  $m_a$  por unidad de masa de suelo seco,  $m_{ss}$ :

$$m_g = \frac{m_a}{m_{ss}} \quad (2.23)$$

- Humedad del suelo Volumétrica  $m_v$ , se define como el volumen de agua,  $v_a$  por el volumen total,  $v_T$  (volumen del agua + volumen del suelo + espacio vacío):

$$m_v = \frac{v_a}{v_T} \quad (2.24)$$

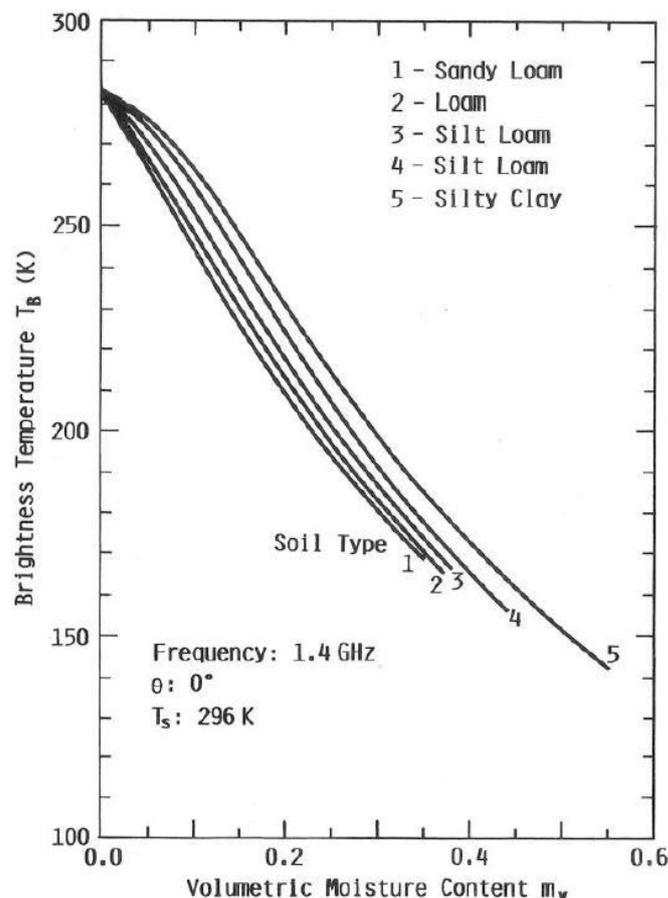


Figura 2.6 Efecto de la humedad del suelo en la temperatura de brillo a la frecuencia de 1.4GHz.

En la Figura 2.6 Se puede observar que, a mayor cantidad de humedad menor es la temperatura de brillo del suelo.

### 2.2.4 Efecto de la rugosidad de la superficie

La rugosidad del terreno provoca variaciones en las medidas de la temperatura de brillo, para un mismo tipo de terreno al aumentar la rugosidad aumenta la emisividad a medida que se incrementa el ángulo de incidencia (debido al incremento del área que está en contacto con la atmósfera) y se reducen las diferencias entre las polarizaciones verticales y horizontales. Por otra parte, la sensibilidad a variaciones de humedad se reduce cuando la rugosidad de la superficie aumenta.

Choudhury en su publicación [8] obtiene una fórmula semi-empírica simple para incluir el efecto de la rugosidad en la reflectividad de una superficie:

$$\Gamma_{SP} = \Gamma_{op} \cdot e^{-h_s \cos(\theta)^2} \quad (2.25)$$

donde  $\Gamma_{op}$  es la reflectividad de una superficie plana con polarización p (ecuaciones (2.19), (2.20)),  $\theta$  es el ángulo de incidencia y  $h_s$  es el parámetro de rugosidad que se define de la siguiente manera:

$$h_s = 4 \cdot k^2 \cdot \sigma_s^2 \quad (2.26)$$

con  $k$  el número de onda y  $\sigma_s$  es la desviación estándar de la altura de la superficie. Posteriormente, se propuso una formulación más elaborada [9]:

$$\Gamma_{sp}(\theta) = [(1 - Q_s) \cdot \Gamma_{op}(\theta) + Q_s \cdot \Gamma_{op}(\theta)] \cdot e^{-h_s \cdot \cos(\theta)^n} \quad (2.27)$$

donde  $Q_s$  modela el efecto de la mezcla de polarizaciones y  $n$  expresa la dependencia angular de la rugosidad. Más adelante, en el análisis que hace [10] para el satélite SMOS concluye que los efectos de la rugosidad del suelo que en banda-L, se pueden normalmente modelar con los parámetros  $Q_s$ , y  $n$  iguales a cero y que el parámetro de rugosidad  $h_s$  se podía estimar semi-empíricamente.

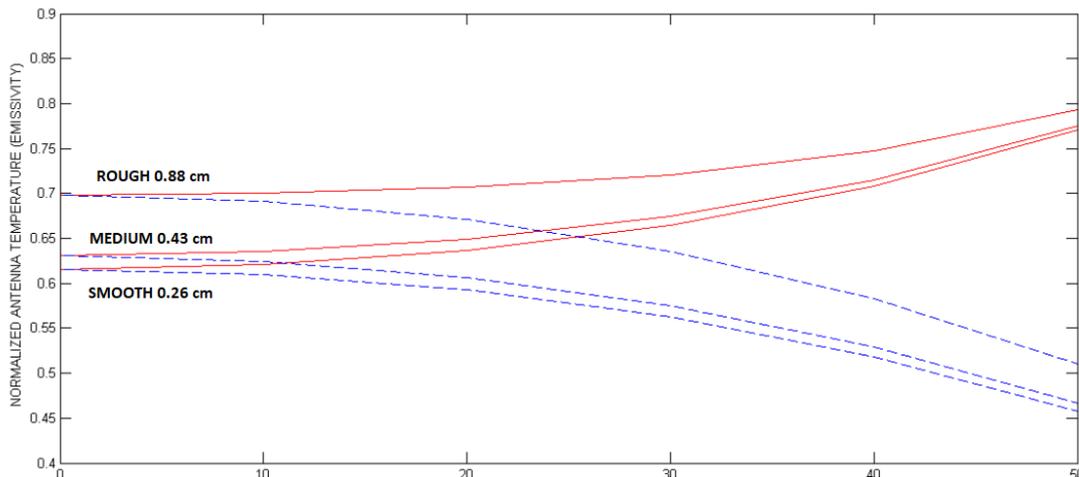


Figura 2.7 Representación de la emisión del suelo en función del ángulo de incidencia para tres desviaciones estándares de altura de las superficies diferentes. La polarización horizontal se representa en azul y la vertical en vertical.

La figura 2.7 muestra los efectos que tiene la rugosidad de la superficie en la emisión de radiación [11]. También podemos observar que aumenta la emisión a medida que aumenta la rugosidad del terreno, y disminuye con superficies más lisas. Así mismo se observa la decencia angular de las dos polarizaciones: la horizontal (azul) disminuye con el ángulo de incidencia y la vertical (en rojo) aumenta siempre con el mismo. Ambas polarizaciones coinciden para ángulo de incidencia igual a 0.

### 2.2.6 Efectos de la vegetación

Cuando el suelo está cubierto de vegetación, la emisión se ve afectada por esta capa de vegetación, que absorbe y refleja parte de la radiación emitida por el suelo y además puede contribuir con una energía radiada propia. La absorción de la radiación dependerá de la longitud de onda y del contenido de agua de la vegetación.

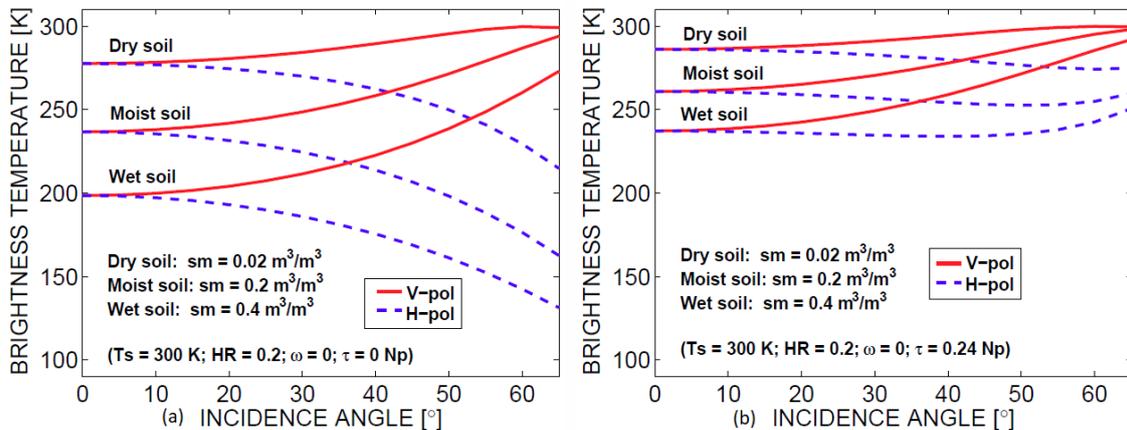
La temperatura de brillo del suelo cubierto por vegetación [12] se puede estimar a partir de la contribución de tres términos:

- la radiación del suelo que queda atenuada por la vegetación.
- la radiación que emite la vegetación hacia arriba.
- la radiación emitida por la vegetación en dirección al suelo, que será reflejada por este, y volverá a ser atenuada por la capa de vegetación:

$$T_{Bp} = \left(1 + \frac{1 - e_{sp}}{L_{veg}}\right) \left(1 - \frac{1}{L_{veg}}\right) (1 - \omega) T_{veg} + \frac{e_{sp}}{L_{veg}} \cdot T_s \quad (2.28)$$

Donde  $T_{veg}$  y  $T_s$  son las temperaturas físicas de la vegetación y el suelo, respectivamente,  $L_{veg} = \exp(\tau / \cos(\theta))$  es la atenuación debido a la capa de vegetación,  $\tau = b \cdot VWC$  es la opacidad de la vegetación,  $b$  es un factor que depende del tipo de vegetación y de la frecuencia,  $VWC [kg/m^2]$  es el contenido de agua de la vegetación,  $\omega$  es el albedo (emisividad del suelo reflejada por la vegetación) que depende de la polarización y del ángulo de incidencia. Finalmente, la emisividad del suelo  $e_{sp}$  se define como:

$$e_{sp} = 1 + \Gamma_{sp} \quad (2.29)$$



*Figura 2.10. Dependencia de las temperaturas de brillo con el ángulo de incidencia, para el suelo desnudo (izquierda) y cubierto de vegetación (derecha), teniendo en cuenta diferentes niveles de humedad del suelo [13].*

Figura 2.10 representa la dependencia de la temperatura de brillo con el ángulo de incidencia y la polarización. Para el escenario de suelo descubierto (Figura 2.10 a), en el caso de la polarización vertical a medida que aumenta el ángulo de incidencia aumenta la temperatura de brillo, ocurre lo contrario cuando la polarización es horizontal, a medida que aumentan los valores del ángulo incidente, la temperatura de brillo disminuye. Por otro lado, la emisividad aumenta al disminuir la humedad en ambos casos, sin embargo, en el escenario de suelo con vegetación (figura 2.10 b), se aprecia como su presencia reduce la diferencia entre las temperaturas de brillo para distintas condiciones de humedad y, además, la dependencia con el ángulo de incidencia de ambas polarizaciones, vertical y horizontal. Con lo que, la presencia de vegetación disminuye la sensibilidad a la humedad del suelo.

## 2.3 TELEDETECCIÓN

La teledetección o detección remota es la adquisición de información a pequeña o gran escala de un objeto o fenómeno, ya sea usando instrumentos de grabación o instrumentos de escaneo en tiempo real que no están en contacto directo con el objeto. Se instalan por ejemplo en: Aviones satélites, boyas o barcos. Algunas de las ventajas de la detección remota son, que agiliza la recogida de información y, además, asegura que durante el proceso las zonas u objetos de estudio no se ven alterados.

La teledetección desde satélite es la única manera viable de obtener medidas de parámetros geofísicos, como la humedad, a escala global y de forma regular.

Por tanto, en un sistema de teledetección se distinguen tres elementos esenciales:

- Plataforma: que sostiene el instrumento de medida.
- Objeto: que se va a observar.
- Instrumento o sensor: para observar el objetivo.

Se distinguen dos tipos de teledetección:

- Pasiva: los sensores detectan la radiación natural emitida o reflejada por el objeto o área que está siendo observada. Algunos ejemplos de sensores pasivos pueden ser: las cámaras fotográficas, de infrarrojos y los radiómetros de microondas.
- Activa: estos sensores emiten energía para escanear objetos y áreas con lo que el receptor del sensor mide parte de la potencia reflejada por el objetivo. Los radares son un ejemplo.

En este trabajo se ha hecho uso de datos del radiómetro de microondas en banda L (1.4 GHz) MIRAS, embarcado en el satélite SMOS. La calidad de las medidas de los radiómetros se determina a partir de los siguientes parámetros:

- Resolución espacial: tamaño del píxel de la imagen rasterizada.
- Resolución espectral: se refiere al número y ancho de las bandas espectrales registradas por el sensor.
- Resolución radiométrica: considera la variabilidad en la radiación que un sistema es capaz de detectar.
- Resolución temporal: es la periodicidad con la que el sensor toma imágenes de la misma posición de la superficie terrestre.

El capítulo 3 se dedica a describir la manera de recuperar parámetros geofísicos a partir de datos radiométricos, así como, las misiones espaciales y los instrumentos embarcados cuyas medidas se han utilizado en este proyecto para obtener mapas de humedad de alta resolución para aplicaciones locales y regionales.

## **CAPÍTULO 3: RECUPERACIÓN DE HUMEDAD CON RADIOMETRIA DE MICROONDAS Y MISIONES ESPACIALES**

La humedad del suelo se define como el agua retenida en los espacios entre las partículas del suelo. Es un componente importante del ciclo del agua debido a la función que desarrolla en la regulación de los intercambios de agua y energía entre la tierra y la atmósfera baja, por tanto, es una variable del sistema meteorológico y climático. De hecho, se agrupa dentro de las denominadas variables climáticas esenciales.

En este capítulo se describe como recuperar la humedad a partir de medidas con radiómetros en banda L, es decir, teledetección pasiva. Como los datos que se han utilizado en este proyecto provienen de las medidas del radiómetro MIRAS (Microwave Imaging Radiometer using Aperture Synthesis, embarcado en la misión SMOS (Soil Moisture and Ocean Salinity), de la ESA (European Space Agency). El objetivo de esa misión era obtener mapas de humedad y salinidad globales de forma regular. La resolución espacial que se obtienen es de ~40km.

Por otro lado, para aplicaciones regionales, como agrícolas o de predicción de riesgos de incendios se requieren resoluciones espaciales mucho mejores y, para ello, se han desarrollado algoritmos de “downscaling” que mejoran la resolución. La mayoría de estos algoritmos se basan en sinergias con distintos sensores a distintas escalas de resolución, obtenidos con distintas frecuencias, como en el óptico y el infrarrojo térmico. Por ello, también se hace una breve descripción de las misiones Aqua y Terra de la NASA cuyos productos medidos con el sensor MODIS se utilizan para obtener mapas de humedad de resolución espacial de 1km, cuando se combinan con los datos de SMOS.

Sin embargo, los sensores a frecuencias altas (como ópticas e infrarrojo térmico, tienen el inconveniente de que sus medidas se ven muy afectadas por los agentes meteorológicos, tales como las nubes, niebla, así como por las cubiertas de vegetación y por tanto, sus mapas no proporcionan datos en los píxeles cubiertos de nubes por ejemplo. Por lo tanto, para tener mapas independientemente de las condiciones climáticas, en este proyecto se recurre a los datos proporcionados por Centro Europeo de Previsiones Meteorológicas a Plazo Medio (ECMWF). Estos datos se obtienen a partir de un modelo de re-análisis que se va actualizando en tiempo real. Tiene la ventaja de que siempre obtiene predicción, independientemente de la meteorología. En este proyecto se ha utilizado la base de datos nueva ERA5 de ECMWF y como se demuestra las predicciones de humedad son mucho mejores que si se utiliza la base de datos ERA-interim.

Finalmente, para poder validar las predicciones de humedad se comparan los mapas obtenidos con medidas in-situ. Concretamente se ha utilizado las medidas obtenidas por la red REMEDHUS, situada en Zamora y dedicada a la calibración y validación de SMOS.

### 3.1 MISIÓN SMOS

La misión SMOS es la segunda misión de la familia de “Earth Explorer Opportunity”, que forma parte del programa “Living Planet” de la ESA. Su lanzamiento fue el 2 de noviembre de 2009 y tras unos meses de calibración se puso en operaciones en mayo del 2010.

La ESA dirige y financia la misión, con contribuciones directas del CDTI (Centro para el Desarrollo Tecnológico Industrial) en España y el CNES (Centre National d’Etudes Spatiales) en Francia. SMOS ha sido la primera misión, cuyo principal objetivo es la medida de la humedad del suelo y la salinidad de los océanos con cobertura global y periodicidad de 3 días y una resolución aproximada de 50 km. Dicha misión lleva embarcado el radiómetro interferométrico MIRAS “Microwave Imaging Radiometer using Aperture Synthesis”. La interferometría aplicada a la radiometría por microondas para observación de la Tierra es una tecnología desarrollada específicamente para este instrumento y por tanto, MIRAS es el primer radiómetro interferométrico 2D embarcado en un satélite de observación de la Tierra. La misión se había propuesto para un mínimo de tres años, extensible a 5 años. Sin embargo, dado los buenos resultados ya lleva más

de 8 años en órbita y ya está aprobado su continuación hasta 2019 y en estos momentos, incluso se habla de extenderla hasta el 2021.



Figura 3.1 Imagen artística satélite SMOS en órbita (ESA, [http://www.esa.int/spaceimages/Images/2012/11/SMOS\\_in\\_orbit](http://www.esa.int/spaceimages/Images/2012/11/SMOS_in_orbit))

<b>Objetivos de la Misión SMOS</b>	
<b><i>Humedad del Suelo</i></b>	<b><i>Salinidad del Océano</i></b>
Mapas de humedad con una precisión del 4% y resolución espacial de ~40km y tiempo de revisita de 1 a 3 días	Precisión de 0,1 psu en un promedio mensual en un área de 2°x2°

Tabla 3.1 Requisitos que los científicos que los científicos han marcado para la misión

En la Tabla 3.1 se muestran los requisitos mínimos establecidos por los científicos para garantizar la utilidad de los datos de la misión SMOS, tanto para la humedad del suelo como para la salinidad del mar.

### 3.1.1 Medidas de la misión SMOS

El radiómetro MIRAS trabaja en banda L, concretamente dentro de la banda protegida alrededor de 1.4GHz. Se ha demostrado que entorno a esta frecuencia se tiene mayor sensibilidad a la humedad que a frecuencias más altas. Además, como la longitud de onda a esta frecuencia es de 21 cm, la profundidad de penetración en tierra es también mayor que a frecuencias ópticas o del infrarrojo térmico, algo más de 3-5cm

(dependiendo de la humedad). Como ventajas adicionales de esta banda, mencionar que la atmósfera es casi transparente y la vegetación es semi-transparente hasta densidades moderadas.

A frecuencias tan bajas como 1.420 MHz, para obtener una resolución espacial mejor de los 50 Km, realizando las medidas desde un satélite orbitando a 800 Km de altura, se requiere una resolución angular de aproximadamente  $2^\circ$ . Para conseguir un haz de apuntamiento tan fino como éste en banda L, el diámetro de la antena parabólica, para un radiómetro de potencia total, debería ser del orden de 10 metros. Situar una antena de semejante tamaño en el espacio es tecnológicamente imposible.

Para solventar estas limitaciones se decidió el uso de un radiómetro interferométrico, el cual utiliza una matriz de muchos receptores pequeños y medir la diferencia de fase de la radiación incidente, entre ellos. La técnica se basa en la correlación cruzada de las observaciones de todas las combinaciones posibles de pares de receptores. Cada 1,2 segundos se capta una imagen bidimensional. Además, a medida que el satélite recorre su órbita, observa un mismo píxel desde distintos ángulos de incidencia (ver figura 3.2). Por tanto, se obtienen varias medidas de cada píxel, con distintos ángulos de incidencia con su correspondiente resolución espacial. Las líneas verdes en la figura 3.2 unen los puntos observados bajo el mismo ángulo de incidencia, mientras que, los puntos azules indican la resolución espacial de cada píxel, la cual depende de su posición dentro del campo de visión. El ángulo de incidencia del campo de visión varía entre  $0^\circ$  y  $65^\circ$  (líneas verdes), y la resolución espacial de los píxeles observados (puntos azules en la figura 3.2) varía entre los 30 km y los 110 km, dependiendo de su posición en la zona de observación.

Desde una altitud de 758 Km, la antena capta simultáneamente una superficie de casi 3.000km de diámetro. Sin embargo, debido al principio de medición por interferometría y a la antena en forma de "Y", el campo visual efectivo se limita a una forma hexagonal de unos 1.000 Km de ancho, denominada "alias-free field of view" o zona sin ambigüedad, tal como se muestra en la figura 3.2.

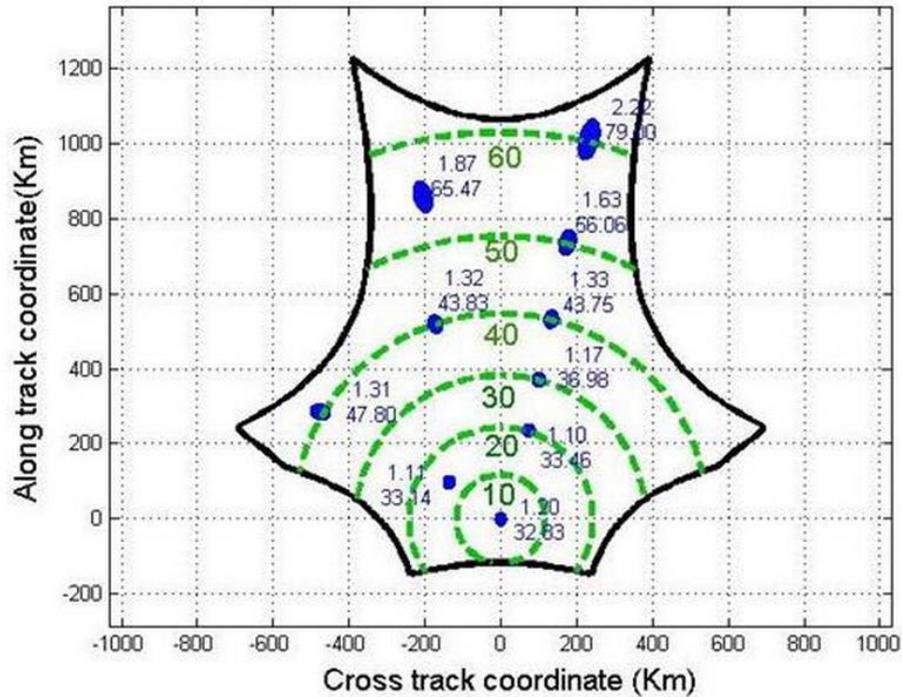


Figura 3.2 Variabilidad de la resolución espacial (puntos azules) y observación multiangular (líneas verdes) de una medida SMOS en la zona libre de alias

### 3.1.2 El instrumento MIRAS

El instrumento de la misión SMOS se denomina MIRAS, "Microwave Imaging Radiometer using Aperture Synthesis". En su desarrollo ha contribuido decisivamente la Universitat Politècnica de Catalunya (UPC) [14] [15] [16], y lo ha implementado la empresa española EADS-CASA.

El instrumento consta de 3 brazos desplegados, poco después de la separación del vehículo de lanzamiento, formando ángulos de  $120^\circ$  entre sí, unidos por un núcleo central, hub. Está compuesto por 69 receptores llamados LICEF (Lightweight Cost Effective Front-end), cada uno de ellos consiste en una antena tipo parche, con un ancho de haz de unos  $70^\circ$  y su correspondiente receptor, capaces de medir la radiación térmica emitidas en banda-L en las polarizaciones horizontal y vertical. Estos receptores se diseñaron y fabricaron en la empresa de L Garriga MIER.

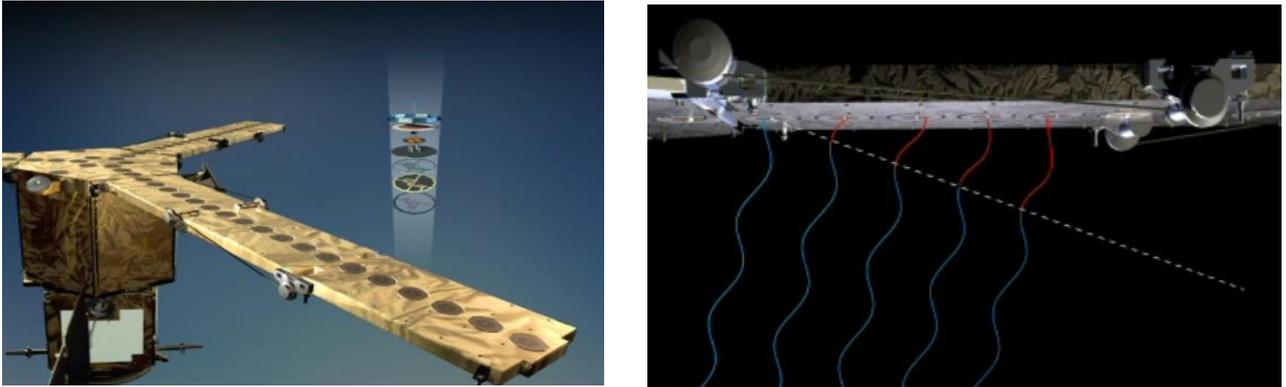


Figura 3.3 imágenes del instrumento MIRAS (ESA, <https://earth.esa.int/web/guest/missions/esa-operational-eo-missions/smos/space-segment/instrument>). Los círculos de color gris indican la posición de cada uno de los receptores en el brazo de la Y.

Las señales se transmiten a una unidad central, que se encarga de realizar las correlaciones cruzadas de las señales de todas las combinaciones de pares de receptores. Para reducir la cantidad de datos que se transmiten a la Tierra, los cálculos de correlaciones se procesan a bordo. Los receptores LICEF son sensibles a la temperatura y al envejecimiento, por lo que es necesario realizar calibraciones periódicamente para garantizar los requisitos de precisión de la misión.

MIRAS puede trabajar en dos modos de medición: modo de doble polarización, en el que las antenas LICEF van alternando las medidas de las componentes vertical y horizontal de la señal de microondas recibida; o en modo totalmente polarimétrico para obtener los 4 parámetros de Stokes.

Para evitar perturbaciones electromagnéticas, todas las señales captadas por los receptores se envían a la unidad central (unidad de control y correlación) por medio de un cableado de fibra óptica. Por otro lado, todos los receptores reciben una señal de un reloj estable como referencia.

El satélite lleva, también un receptor GPS y sensores estelares que permiten conocer su posición y orientación.

Además, los datos se transmiten a tierra de forma automática en banda-X, cada vez que pasa por las estaciones terrestres de recepción.

### 3.1.3 Algoritmo de recuperación de humedad a partir de datos de SMOS

El algoritmo de recuperación de la humedad del suelo que utiliza SMOS se basa en invertir la función del modelo geofísico (similar al descrito en el capítulo 2). Por lo tanto, a partir de una serie de variables, como pueden ser: la estimación de la humedad del suelo, la temperatura del suelo, la rugosidad y algunas características de vegetación, se obtiene la temperatura de brillo que mejor se ajusta a la temperatura de brillo observada por el sensor del satélite.

Si se asume que los errores de las medidas son Gaussianos, la inversión se realiza utilizando una función de coste que minimiza las diferencias entre el modelo y los datos medidos:

$$CF = (\bar{F}_{meas} - \bar{F}_{model})^T CF^{-1} (\bar{F}_{meas} - \bar{F}_{model}) + (p_i - p_{i0})^T C_p^{-1} (p_i - p_{i0}) \quad (3.1)$$

Donde  $\bar{F}_{meas}$  y  $\bar{F}_{model}$  son vectores de longitud  $N$  que contienen las observaciones, captadas por el radiómetro de microondas en diferentes ángulos de incidencia, medidas por el instrumento MIRAS y usando el modelo respectivamente.  $CF$  Es la matriz de covarianza de las observaciones,  $p_i$  representan los parámetros físicos que afectan a la  $T_B$  del modelo,  $p_{i0}$  son las estimaciones de los parámetros  $p_i$  obtenidos mediante otras fuentes y  $Cp$  es la matriz diagonal que contiene las varianzas de los parámetros estimados  $\sigma_{p_i}^2$ .

### 3.1.4 Productos de la misión SMOS

Los productos de la misión SMOS se dividen en cuatro niveles diferentes, según el grado de procesamiento realizado en cada uno de ellos [3]:

- Nivel L0: Conocido como “raw data” (datos crudos), en este nivel los datos están prácticamente sin procesar, únicamente se han eliminado los paquetes duplicados y separado los que pertenecen a la órbita ascendente o descendente. Estos datos han sido reconstruidos en orden cronológico y en secuencia, estos segmentos están relacionados con la localización de la nave espacial y no con la posición de los datos medidos sobre la superficie de la Tierra.
- Nivel L1A: En el nivel L1A se han aplicado las calibraciones internas para corregir las correlaciones (inyección de ruido, auto-correlación y calibración a bordo). Los datos siguen estando ordenados según el tiempo en que han sido adquiridos
- Nivel L1B: Los datos del nivel anterior se convierten a Componentes de Fourier de Temperaturas de Brillo fuera de la Atmósfera y se aplican una serie de correcciones para eliminar interferencias introducidas por el Sol, la Luna y el fondo galáctico.
- Nivel L1C: En el nivel L1C se aplica la transformada inversa de Fourier para convertir las temperaturas de brillo del espacio de Fourier al espacio real. Se geolocalizan estas temperaturas de brillo asignándoles una latitud y una longitud sobre una malla predefinida. La precisión radiométrica y la resolución espacial (tamaño del píxel) se estiman para cada medida de forma individual. Cada uno de los puntos de la malla contiene un conjunto de temperaturas de brillo, que corresponden a los distintos ángulos de visión. Esta información será útil para generar los algoritmos de procesamiento de nivel 2.
- Nivel L2: Los valores de salinidad oceánica y humedad del suelo se calculan usando las medidas de temperatura de brillo para los mismos puntos de malla a diferentes ángulos de vista. También se pueden usar otro tipo de datos, por ejemplo, información meteorológica. Este procesado consta de dos fases:
- Corrección de efectos atmosféricos y otros fenómenos, a modo de ejemplo: rotaciones geométricas y Faraday, eliminación de interferencias introducidas por el Sol, la Luna y la Galaxia, eliminación de atenuaciones, etc.
  - Cálculo de los valores de salinidad y humedad usando modelos geofísicos que relacionan estas magnitudes con las temperaturas de brillo a 1,4 GHz [17].

Los dos siguientes niveles son generados en el centro de procesado y proporcionados por SMOS-BEC [3].

Nivel L3: Para obtener datos de nivel L3 se hace un filtrado y se interpola a una malla regular con un tamaño de cuadrícula de 25km al producto del nivel 2. El filtrado que se aplica permite descartar valores negativos de la humedad, valores que no cumplen el índice de calidad o píxeles de la malla con alta probabilidad de RFI (Radio Frequency Interference).

Nivel L4: Los resultados obtenidos en este proyecto se encuentran en este nivel. Los productos L4 se obtienen mediante sinergias de los productos L1C y L3 con otros sensores. La resolución espacial de SMOS es de ~50 Km, el centro SMOS- BEC ha desarrollado un algoritmo de desagregación de píxel, basado en el triángulo universal [13]. Mas tarde mejorado aplicando una ventana aditiva en movimiento [18].

## 3.2 MISIONES TERRA Y AQUA

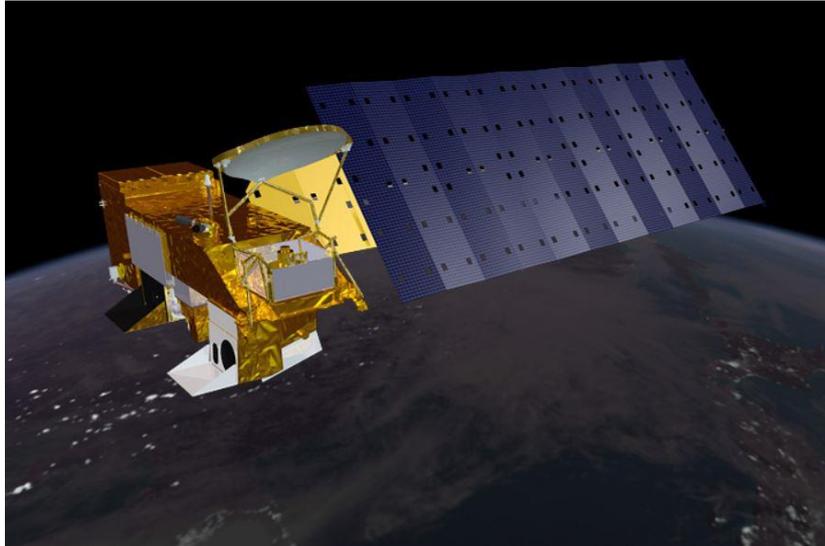
Las misiones Terra y Aqua son dos misiones de la NASA destinadas para la observación de la Tierra (Earth Observing System, EOS). Inicialmente el nombre de la misión Aqua fue EOS PM-1 debido a que el momento de cruce por el ecuador era por la tarde. Mientras que el de la misión Terra cruza el ecuador por la mañana y su nombre inicial fue EOS AM-1.

### 3.2.1 Misión Aqua

La misión Aqua fue lanzada el 04 de mayo de 2002, tiene este nombre por la gran cantidad de información que aporta sobre el ciclo del agua en la Tierra. Las observaciones se centran en la evaporación de los océanos, la cantidad de vapor de agua en la atmósfera, las nubes, las precipitaciones, las capas de hielo, la cantidad de nieve tanto en tierra como en el mar. Las variables adicionales que Aqua mide también incluyen los flujos de radiación del Sol y la Tierra, aerosoles, cubierta de vegetación de la superficie Terrestre, temperaturas del aire, la tierra y el agua. Todas estas medidas contribuyen a entender el efecto del cambio climático.

La misión Aqua tiene seis instrumentos de observación de la Tierra a bordo, que recopilan una variedad de conjuntos de datos globales.

Aqua fue desarrollado originalmente para una vida útil de seis años, a día de hoy ha superado con creces ese objetivo original. Continúa transmitiendo datos de alta calidad de cuatro de sus seis instrumentos, AIRS (Atmospheric Infrared Sounder), AMSU-A (Advanced Microwave Sounding Unit), CERES (Clouds and Earth's Radiant Energy System) y MODIS (Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer). Se siguen recibiendo datos de calidad reducida de un quinto instrumento, AMSR-E (Advanced Microwave Scanning Radiometer), mientras que el sexto instrumento de Aqua, HSB (Humidity Sounder for Brazil), recopiló aproximadamente nueve meses de datos de alta calidad, pero falló en febrero de 2003.



*Figura 3.4 Imagen artística de la misión Aqua*  
[<https://earthobservatory.nasa.gov/IOTD/view.php?id=39863>]

### 3.2.2 Misión Terra

La misión Terra fue lanzada el 18 de diciembre de 1999. Fue concebida como el buque insignia del sistema de observación de la Tierra de la Nasa (Earth Observing System, EOS). Sus observaciones se centran en explorar las conexiones entre la atmósfera de la Tierra, la tierra, la nieve y el hielo, el océano y el equilibrio de energía para entender mejor el clima de la Tierra, el cambio climático y estimar el impacto de la actividad humana y los desastres naturales en las comunidades y los ecosistemas.

Todas estas observaciones son posibles gracias a los 5 sensores que equipan este satélite: ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer), CERES (Clouds and Earth's Radiant Energy System), MISR (Multi-angle Imaging SpectroRadiometer), MODIS (Moderate-resolution Imaging SpectroRadiometer) y Measurements of Pollution in the Troposphere (MOPITT) [19].



Figura 3.4 Imagen artística de la misión Terra [<https://terra.nasa.gov/About>]

### 3.2.3 Instrumento MODIS

Como se ha comentado tanto Terra como Aqua, llevan embarcados el instrumento MODIS. MODIS es un radiómetro espectral que mide la radiación en el espectro visible e infrarrojo. En este proyecto, se han utilizado productos de los satélites Aqua y Terra medidos con el sensor MODIS.

Los valores, de temperatura de la superficie Terrestre (Land Surface Temperature, LST) y el índice de diferencia de vegetación normalizado (Normalized Difference Vegetation Index, NDVI), se utilizan para mejorar la resolución espacial de las medidas de humedad del suelo de SMOS pasando de una resolución de unos 40 Km a 1 Km, tal y como se detalla en el artículo [13].

MODIS fue seleccionado entre otros sensores que funcionan en el margen visible-infrarrojo por los siguientes motivos:

- Resolución temporal: 1 o 2 días.
- Resolución espacial: 1 km.
- Disponibilidad de datos en todo el periodo de la misión SMOS

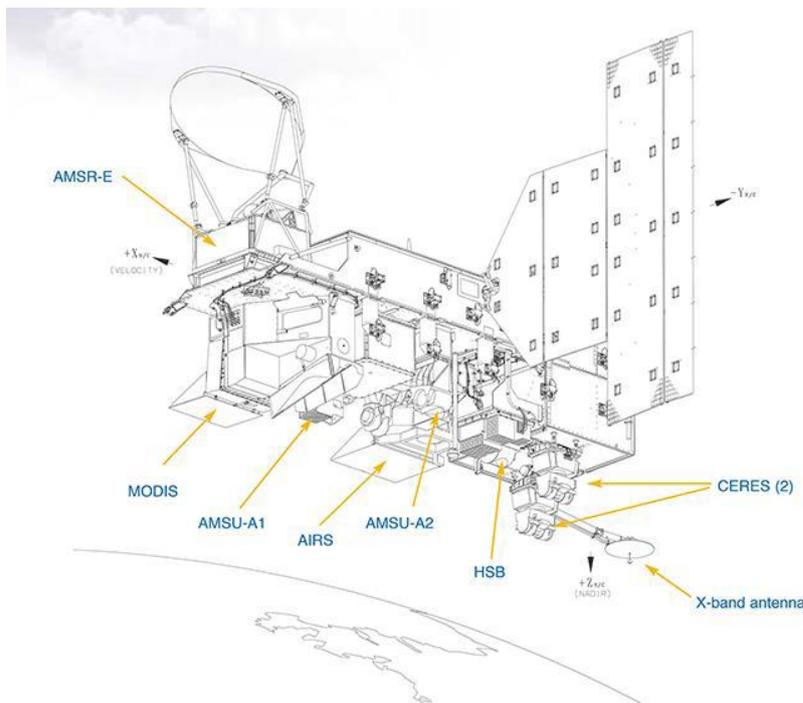


Figura 3.5 Instrumentos del satélite de la misión Aqua [NASA, <https://aqua.nasa.gov/content/instruments>]

El instrumento MODIS opera a las 10:30 A.M. / 10:30 P.M. en la misión Terra y a las 1:30 A.M. / 1:30 P.M. en la misión Aqua. En este proyecto se han utilizado los productos NDVI, MOD13A2 y LST MYD11A1 [20].

#### 3.2.3.1 Efecto de las nubes a frecuencias de infrarrojo

MODIS Capta los datos de LST y NDVI en el espectro infrarrojo en la banda  $0.4\mu\text{m}$  a  $14.4\mu\text{m}$ , concretamente en el ancho de banda de  $(3.929 - 3.989)\mu\text{m}$  [21].

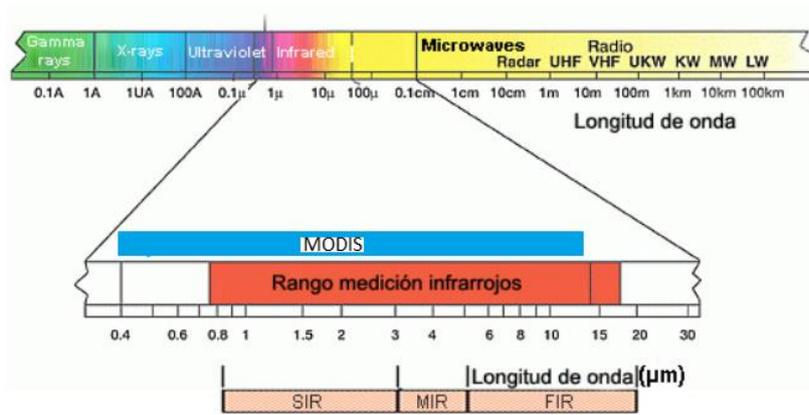


Figura 3.6 Longitudes de onda a las que trabaja el instrumento MODIS

Las radiaciones de la temperatura de brillo a estas frecuencias/Longitudes de onda son absorbidas por el vapor de agua en la atmósfera. Por ello, en condiciones de cielo cubierto de nubes o niebla las medidas sobre la superficie terrestre son inviables. Por tanto, en los mapas de LST diarios, aparecen algunos píxeles sin medida. Los mapas de NDVI proporcionados a través de medidas de MODIS, se han obtenido mediante una media de las medidas durante 16 días. De esta manera estos mapas tienen muy pocos píxeles sin datos. Esta media es viable para las medidas de NDVI, porque este parámetro se mantiene constante durante varios días, pero no se puede aplicar a las medidas de LST.

### 3.3 MISIÓN PROBA-V

PROBA-V es un mini satélite de la ESA, diseñado para monitorizar el crecimiento de la vegetación a escala global (V viene de vegetación). Su lanzamiento fue el 7 de mayo del 2013, tiene una órbita sun-síncrona de 820km de latitud y ha sido diseñado para una vida útil de 5 años. Su principal instrumento llamado “vegetation” es una cámara multispectral con 4 bandas espectrales y una franja de 2285km para garantizar una cobertura diaria superior a los 35º de latitud. A pesar de su reducido volumen, menos de un metro cúbico, Proba-V proporciona cobertura global cada dos días para recoger datos que ayudarán a evaluar el impacto climático, gestionar los recursos hidrológicos, monitorizar las cosechas y estimar la seguridad alimentaria.

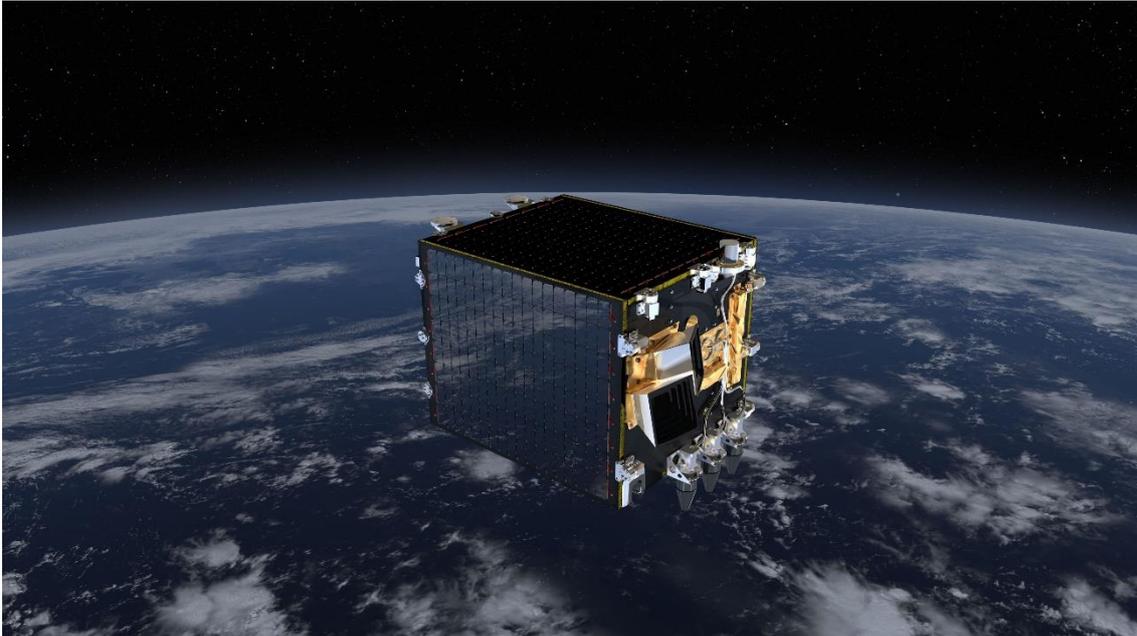


Figura 3.7 Misión Proba-V (V es un índice estándar de vegetación)  
 [<http://www.esa.int/spaceinimages/Images/2013/04/Proba-V2>]

### 3.3.1 Instrumento 'Vegetation'

El instrumento 'vegetation' ya se embarcó en los satélites SPOT-4 y SPOT-5 y lleva 15 años tomando medidas de nuestro planeta. Consta de 3 cámaras idénticas, cada una con un telescopio TMA (Three Mirror Anastigmat) y contiene 4 bandas espectrales: 3 bandas en el rango visible (Azul, Rojo y NIR (Infrarrojo cercano)) y una banda en el rango espectral SWIR (Shortwave Infrared). A bordo de la nave espacial, hay para cada cámara una máscara terrestre que permite eliminar los píxeles que solo contienen mar y dicta cuándo cada cámara debe estar en modo de imagen. Sus principales características son:

- Resolución de 100 metros en el nadir y de 350 metros en todo el campo de visión (mejorado respecto al instrumento 'Vegetation' de los satélites SPOT)
- Campo de visión de 102° con un haz de 2250 kilómetros
- Combinación de tres telescopios de diseño anastigmático de tres espejos (TMA) compacto
- Bandas espectrales equivalentes a las de SPOT Vegetation:
  - VNIR:
    - Azul (438-486 nm)
    - Rojo (615-696 nm)
    - IR Cercano (772-914 nm)
  - SWIR (1564-1634 nm)
- Refrigeración pasiva
- Síntesis de resultados diarias y a 10 días a:
  - 1/3 kilómetros y 1 kilómetro en VNIR
  - 2/3 kilómetros y 1 kilómetro en SWIR

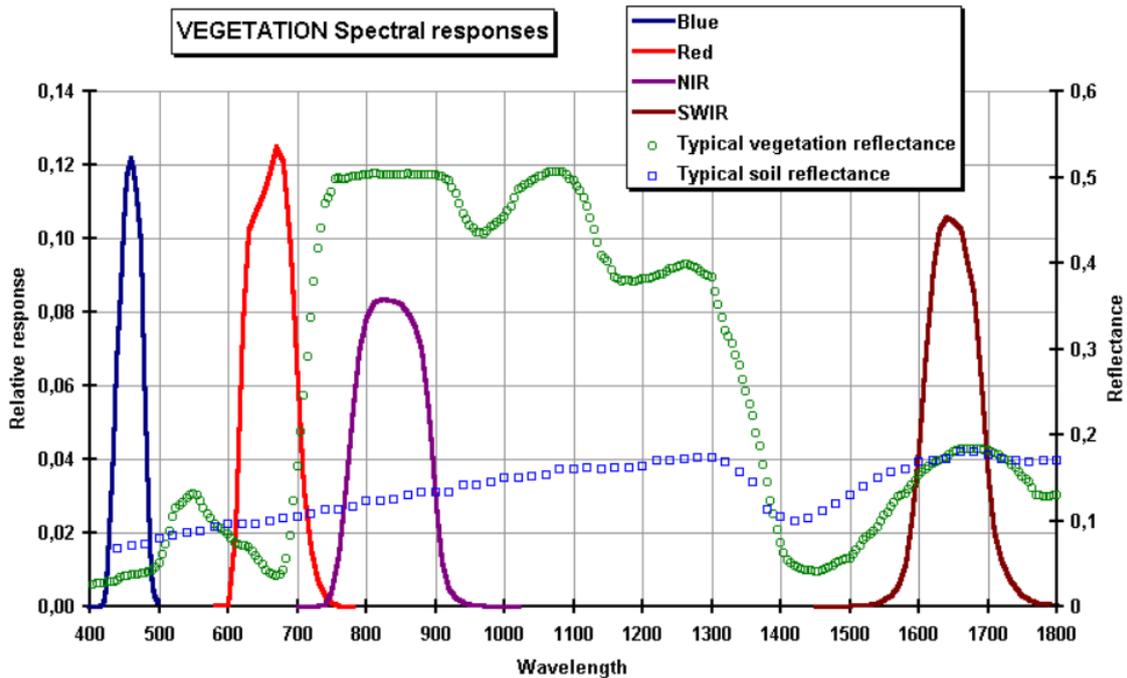


Figura 3.8 Respuesta espectral para las bandas espectrales del instrumento 'vegetation' [22]

En la figura 3.8 representamos cada una de las bandas espectrales del instrumento 'vegetation'. El rojo y el IR cercano están particularmente bien adaptados para describir la actividad de fotosíntesis de la vegetación, mientras el SWIR es un buen detector de la humedad y la vegetación del suelo. El azul, está diseñado en este caso para hacer correcciones atmosféricas [22].

### 3.4 DATOS DE RE ANÁLISIS ECMWF

ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) es un instituto de investigación que produce y difunde periódicamente datos meteorológicos. El centro también cuenta con un catálogo de datos de pronósticos que pueden ser utilizados tanto en investigaciones científicas como en otros usos comerciales.

ECMWF produce análisis y predicciones basados en conjuntos operativos que describen el rango de posibles escenarios y su probabilidad de ocurrencia. Las previsiones del ECMWF cubren plazos que van desde mediano, mensual y estacional, y hasta un año más adelante. Proporciona pronósticos actuales, re-análisis climática y variables climáticas como la humedad del suelo, la temperatura superficial, la densidad de la nieve y la cobertura de nubes, entre otras.

#### 3.4.1 ERA-Interim

ERA-Interim es una base de datos de re-análisis atmosférico global proporcionado por ECMWF, almacena datos desde el 1979 hasta la actualidad, los datos se actualizan periódicamente en tiempo real. La resolución espacial del conjunto de datos es de aproximadamente 80Km en 60 niveles verticales.

Un usuario registrado puede descargar fácilmente los datos de ERA-interim en el catálogo de ECMWF [23] [24]. Seleccionando los tipos de datos, el periodo de tiempo y marcando la latitud y longitud de la zona geográfica.

En el proyecto final de carrera de Xavier Pou [25], se utilizó la variable de temperatura superficial terrestre (SKIN) de ERA-interim, en el algoritmo de “downscaling” desarrollo en la tesis de María [13]. Este algoritmo permite incrementar la resolución espacial de los mapas de humedad obtenidos con SMOS (~50km) a 1km independientemente de las condiciones climáticas. En este proyecto se recalculó los mapas de Xavier Pou con el algoritmo mejorado de “downscaling” [Gerard] y se ha comparado con los obtenidos utilizando como proxy de LST otras bases de datos (MODIS y ERA5).

### 3.4.2 ERA5

ERA5 es un nuevo producto de ECMWF que proporciona estimaciones horarias de un gran número de variables climáticas atmosféricas, terrestres y oceánicas. Los datos están disponibles para uso público desde el 2010 y cubren la Tierra en una malla de 30 km de resolución espacial, alcanzan la atmósfera utilizando 137 niveles desde la superficie hasta una altura de 80 km. ERA5 incluye información sobre incertidumbres para todas las variables a resoluciones espaciales y temporales reducidas. Las versiones posteriores de ERA5 cubrirán las décadas anteriores. Para el 2019 se espera tener un conjunto de datos desde el año 1950 hasta el presente.

ERA5 combina grandes cantidades de observaciones históricas en estimaciones globales utilizando modelado avanzado y sistemas de asimilación de datos. Todos los datos de ERA5 se almacenan en el repositorio principal de datos meteorológicos del ECMWF y MARS (Meteorological Archival and Retrieval System). Actualmente, el acceso público a los datos solo es posible a través del WebAPI del ECMWF.

La descarga de los datos de ERA5 no es tan directa ni inmediata como los de ERA-interim. Para este proyecto utilizamos los datos de la temperatura superficial “Skin temperature”, Al igual que en ERA-interim hay un catálogo ECMWF donde se puede seleccionar la variable que se necesita indicándole la fecha concreta y las coordenadas de la zona a estudiar, además, se utiliza un “script” en el lenguaje de programación “python” para acceder al servidor de ECMWF y así poder descargar los datos (detalles del procedimiento se indican en el Anexo I).

### 3.5 MEDIDAS IN-SITU

Para obtener de forma precisa la medida de la humedad del suelo, se coge una muestra del mismo y se pesa antes y después del secado. Sin embargo, esta metodología es laboriosa y no permite realizar una segunda medida en la misma zona. Por lo que actualmente, para medir el contenido de humedad se utiliza la reflectometría de dominio de tiempo (TDR). La medición implica la inserción de un sensor en el suelo y luego aplicar un análisis estándar de forma de onda para determinar el contenido medio de humedad a lo largo del sensor. Mediante la instalación de varios sensores se consigue la dependencia espacial.

En España, desde 1999, se encuentra instalada la red de medidas in-situ REMEDHUS (Red de Estaciones de Medición de la Humedad del Suelo), del Grupo de Recursos hídricos de la Universidad de Salamanca. La zona de estudio se encuentra al Sureste de la provincia de Zamora (41. 1º 41. 5º N; -5.1 -5. 7º W) y abarca también dos sectores de las provincias de Valladolid y Salamanca.

REMEDHUS está formada por más de 20 estaciones distribuidas por una superficie de unos 1.300 km<sup>2</sup>. La infraestructura originaria contaba con sondas TDR a 5, 25, 50 y 100 cm de profundidad.

Más adelante, en 2005, a cada estación se le incorporó una capacitancia Hidra para medir humedad y temperatura del suelo entre 0-5 cm de profundidad.



Figura 3.8 Mapa de la situación de la zona de monitorización de humedad de España, REMEDHUS [26].

En la figura 3.8 se localiza la red de estaciones de medición de la humedad en la Península Ibérica. Además, en la imagen de la derecha se detalla la posición de cada una de las estaciones que forman la red de medidas REMEDHUS (triángulos) y las estaciones meteorológicas (círculos).

Desde principios del año 2000 se ha utilizado como zona de validación y calibración de sensores de satélites de misiones espaciales como SMOS y SMAP [27].

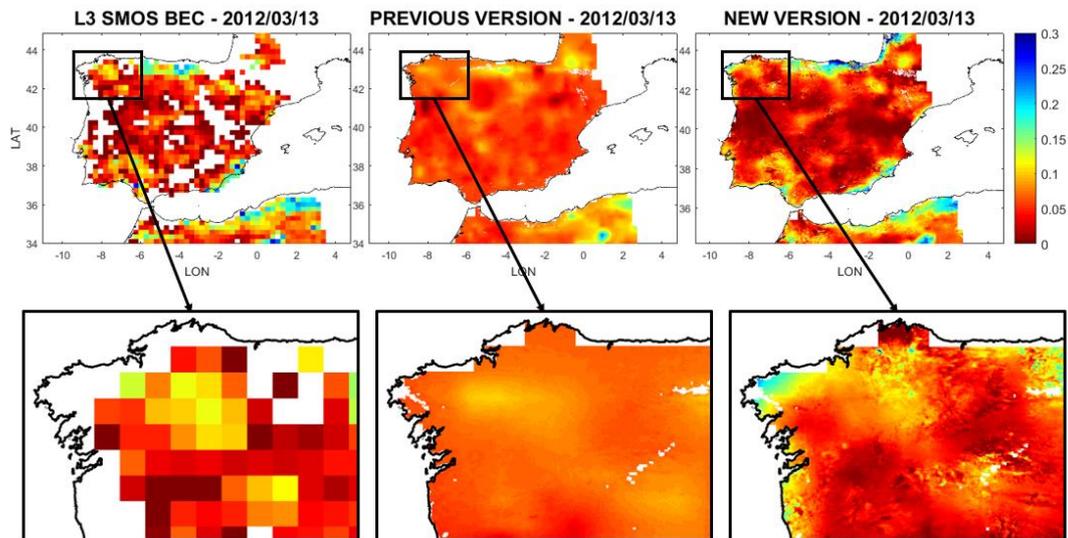
En este proyecto se utilizan las medidas de la humedad del suelo proporcionados por REMEDHUS para la comparación y validación de los valores de humedad obtenidos por el algoritmo de recuperación “downscaling”. Esta red está gestionada por el CIALE, un grupo de investigación de la Universidad de Salamanca, con los que el grupo de radiometría de la “Universitat Politècnica de Catalunya” ha estado colaborando desde hace años.

# CAPITULO 4: ALGORITMO DOWNSCALLING

La misión SMOS proporciona datos de humedad a ~40km de resolución espacial, la cual es adecuada para estudios globales, que ayudan a entender fenómenos climáticos como el niño y la niña. Sin embargo, para estudios locales o regionales, tales como plagas, sequías, aplicaciones agrícolas, su resolución son demasiado baja, ya que se requieren resoluciones como mínimo entorno al kilómetro. De ahí que estos últimos años se hayan propuesto una gran variedad de algoritmos para mejorar la resolución espacial de las estimaciones de la humedad del suelo en banda-L.

Dos técnicas de desagregación basados en sinergias con datos a frecuencias ópticas desarrolladas especialmente para SMOS utilizados son el método físico DISPATCH (Disaggregation based on Physical And Theoretical scale Change) [28] y el enfoque semi empírico basado en el método del triángulo que se utiliza en el BEC para obtener mapas de alta resolución [29]. Este último lo desarrollo Mará Piles en su tesis doctoral, en el grupo de radiometría del departamento de Teoría de la Señal y Comunicaciones de la UPC.

Este último año en el marco de la tesis doctoral de Gerard Portal, se ha mejorado este algoritmo aplicando al mismo una ventana adaptativa móvil. Por tanto, el nuevo algoritmo se conoce como “downscaling adaptive moving window [4]. Al igual que el algoritmo de downscaling anterior, se basa en el concepto del triángulo universal, que relaciona los parámetros índices de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) y la temperatura de la superficie terrestre (LST) con la humedad del suelo. La LST y el NDVI se obtienen a partir de medidas de la superficie terrestre en los márgenes de frecuencia del visible (VIS) y el infrarrojo (IR). Existen distintos satélites Terra, Aqua, Sentinel 2 que obtienen estos parámetros. Dicho algoritmo se ha validado en distintas zonas donde existen estaciones in-situ como son REMEDHUS y Yanco. Las principales ventajas de este algoritmo respecto del anterior son que mantiene la energía, cuando agregamos los píxeles de alta resolución a la malla original, las diferencias son despreciables y además, que puede aplicarse a cualquier zona, independientemente de si se incluyen distintos climas en la misma. Por tanto, puede aplicarse a áreas de tamaño de un continente. En la figura 4.1 se muestran el mapa de SM a baja resolución y el que se obtiene aplicando el algoritmo anterior y el nuevo. Se observa una imagen más nítida en este segundo método.



4.1 Imagen demostrativa del efecto de aplicar el nuevo algoritmo “Downscaling adaptive moving window” para el día 13-03-2012. A la derecha está el mapa original de SMOS-BEC, en el centro el resultado de aplicar el algoritmo anterior y a la derecha la aplicación del nuevo método.

En este proyecto se aplica el nuevo algoritmo “Downscaling adaptive moving window”. Gerard Portal lo ha desarrollado y probado utilizando el SM de SMOS en una malla regular de 25km (producto L4 del BEC en el portal <http://bec.icm.csic.es/data/data-access>. el NDVI obtenido de MODIS (MOD13A2) y LST) y la LST también de MODIS(MYD11A1). Estos dos últimos a 1km de resolución se obtienen a través de [https://lpdaac.usgs.gov/tools/data\\_access/daac2disk\\_web](https://lpdaac.usgs.gov/tools/data_access/daac2disk_web). Con este algoritmo se obtienen mapas a 1km.

En este proyecto se propone utilizar el algoritmo desarrollado por Gerard Portal, pero utilizando bases de datos alternativas a las de MODIS para hacer sinergias con los mapas de SM de SMOS con dos objetivos distintos:

1. Mejorar todavía más la resolución espacial consiguiendo mapas a 300m de resolución. En este caso se sustituye el NDVI de MODIS a 1km por el NDVI de la misión Proba-V a 300m de resolución.
2. Obtener mapas a alta resolución que sean independientes de las condiciones climáticas, es decir que puedan dar valores incluso cuando el cielo está cubierto de nubes. Para ello, hemos sustituido la LST de MODIS por el producto “Skin Temperatura” de ERA5, datos de re-análisis de temperatura superficial que proporciona ECMWF.

En el capítulo 5 se presenta la validación de estos dos productos. En este capítulo nos centraremos en detallar las bases de estos algoritmos.

#### 4.1 CONCEPTO DEL TRIANGULO UNIVERSAL

Existe una relación uncía entre la humedad del suelo (SM), el NDVI y la LST para cada región, que depende de sus condiciones climáticas específicas, aparece una forma

triangular (o trapezoidal) cuando se representa gráficamente la relación entre LST y NDVI [30]. Esta relación en forma de triángulo indica la baja sensibilidad de LST a las variaciones de humedad del suelo en las zonas con alta vegetación y mayor sensibilidad cuando el área bajo estudio de es un suelo desforestado o sin vegetación.

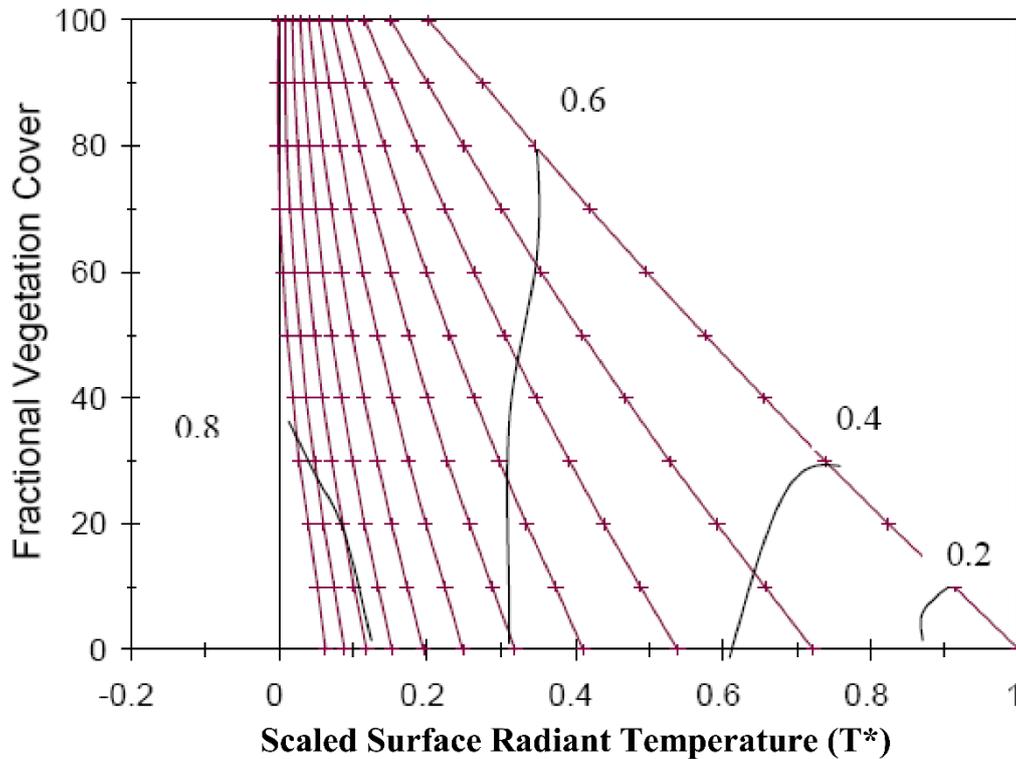


Figura 4.1 Modelo de simulación de triángulo universal

En la figura 4.1 se muestra la cobertura de vegetación fraccional (Fr%) respecto a la temperatura de radiación superficial escalada a 1 ( $T^*$ ) para distintos grados de humedad.

La esquina derecha del triángulo, (dry edge or warm Edge, en inglés) se define por los puntos de temperatura más alta. La esquina izquierda (wet edge or cold Edge, en inglés) hace referencia a los puntos con temperaturas más frías y diferentes cantidades de cubierta vegetal, son puntos con el máximo contenido de agua en el suelo.

#### 4.2 METODOLOGIA

La figura 4.2 muestra el diagrama de flujo las diferentes variables y bloques que interactúan para construir el algoritmo que permite obtener la humedad del suelo a alta resolución a partir de mapas de humedad a baja resolución.

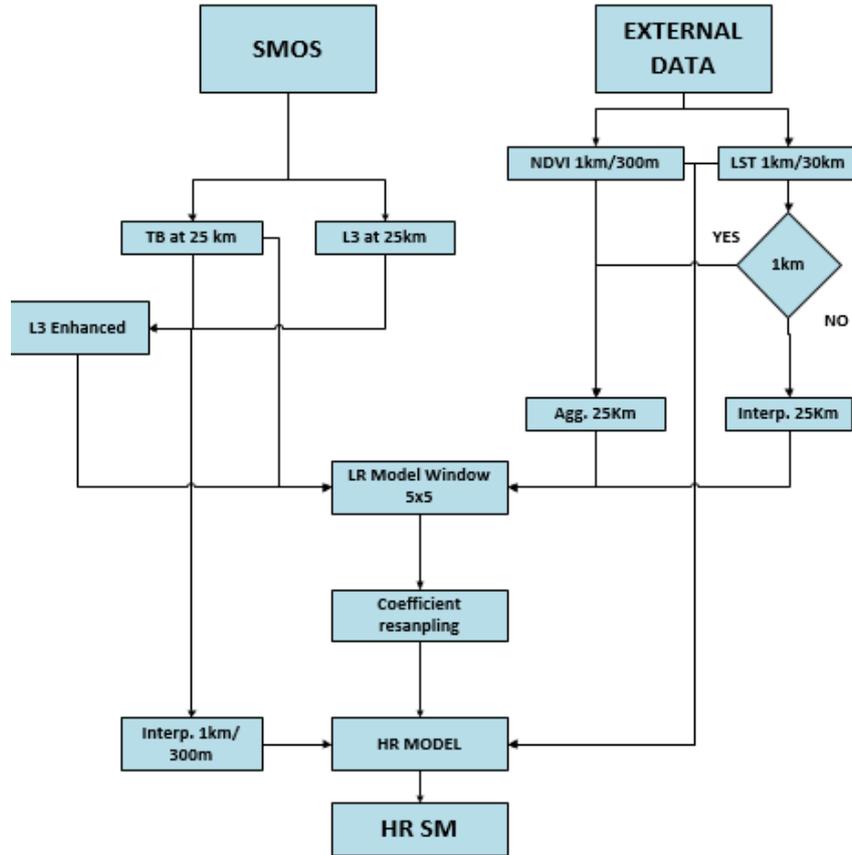


Figura 4.2 Diagrama de flujo para generar la humedad del suelo a alta resolución HR SM

El modelo utiliza, por un lado, las temperaturas de brillo (TB) en sus dos polarizaciones V y H, y los mapas de humedad, obtenidos de las medidas de SMOS y con resoluciones de ~40km en una malla de 25km. Por otro lado, utiliza la temperatura superficial de la tierra (LST) y el índice de vegetación (NDVI). La ecuación (4.1) muestra la relación entre estos parámetros.

$$SM = b_0 + b_1 \cdot LST + b_2 \cdot NDVI + \frac{b_3}{3} \cdot \sum_{i=1}^3 TBv\theta_i + \frac{b_4}{3} \cdot \sum_{i=1}^3 TBh\theta_i \quad (4.1)$$

Donde SM es la humedad del suelo, LST y NDVI son la temperatura superficial de la tierra y el índice de vegetación normalizado,  $TBv\theta_i$  y  $TBh\theta_i$  son la TB normalizadas en las polaridades Vertical y horizontal respectivamente, a un ángulo de incidencia  $\theta_i$  de 32.5°, 42.5° y 52.5°. Cada variable se normaliza previamente usando su valor máximo y mínimo, este puede cambiar dependiendo el área de observada y la órbita del satélite (ascendente o descendente).

$$C_N = \frac{C - C_{min}}{C_{max} - C_{min}} \quad (4.2)$$

Esta ecuación se aplica dos veces:

La primera vez que se utiliza se obtienen los coeficientes  $b_i$ . Para ello, todas las variables se aplican a baja resolución. En este caso, SM, TBH y TBV se dejan en la malla original de 25km, mientras que la LST y el NDVI se agregan para pasar de mallas de 1km a 25km.

La segunda vez se utiliza con todas las variables representadas en la malla de 1km para obtener, aplicado los coeficientes obtenidos en el paso anterior, el mapa de humedad a alta resolución. Se ha explicado para el caso de que se pretenda obtener mapas de 1km a partir de mapas en una malla de 25km, pero la misma metodología se puede aplicar a otras resoluciones.

#### 4.2.1 Enhanced L3

En el diagrama de flujo presentado en la figura (4.2) aparece un paso denominado enhanced L3. Este paso se introduce porque en los mapas originales L3 pueden aparecer algunos píxeles sin valor de SM. Al aplicar este bloque se obtiene una estimación del valor de la humedad del suelo en estos píxeles sin valor a partir de los valores de SM y TBs de los píxeles más cercanos que tienen valor.

$$SM_{LR} = a_1 + \frac{a_2}{3} \cdot \sum_{i=1}^3 TBv\theta_i + \frac{a_3}{3} \cdot \sum_{i=1}^3 TBh\theta_i \quad (4.3)$$

donde  $SM_{LR}$  es la humedad del suelo a baja resolución. Esta ecuación tiene un proceso similar a la ecuación (4.1). Se resuelve un sistema de ecuaciones para obtener los coeficientes  $a_k$ , utilizando  $SM_{LR}$  y los valores de  $TBv\theta_i$  y  $TBh\theta_i$  de los píxeles vecinos, luego se aplica de nuevo la ecuación (4.3) con los coeficientes  $a_k$ , obtenidos y los datos TB un en los píxeles sin valor. La figura 4.3, presenta el resultado de aplicar este paso a la imagen original de SM del producto L3 de SMOS del 29 de diciembre de 2011. Los píxeles L3 sin dato de humedad, pueden aparecer como resultado de aplicar filtro de calidad.

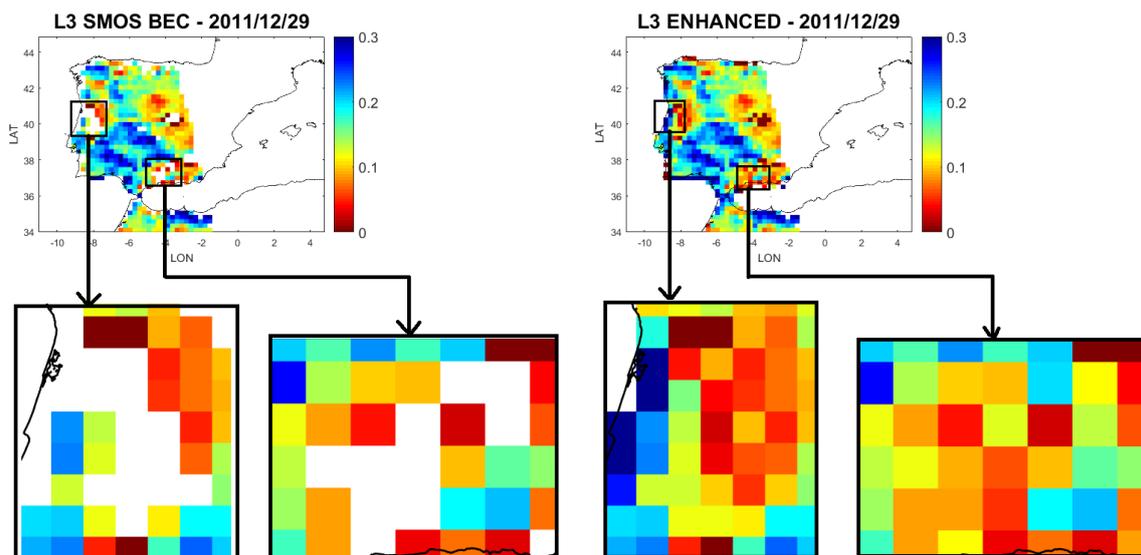


Figura 4.3 ilustración del producto L3 de  $SM_{LR}$  del día 29/02/2011, A la izquierda SM original y a la derecha el efecto de aplicar la ecuación (4.3) [4]

#### 4.2.2 Humedad del suelo a alta resolución

Después de aplicar el bloque “Enhanced L3” al  $SM_{LR}$  se juntan los valores para aplicar la fórmula (4.1), en esta parte las incógnitas de la fórmula son los coeficientes  $b_i$ . Todos los valores de la ecuación tienen que estar a la misma resolución, dado que la resolución original de  $SM_{LR}$ ,  $TBv\theta_i$ ,  $TBh\theta_i$  es de 25km, solamente hay que agregar los mapas de las variables auxiliares LST y NDVI de su resolución a la malla de 25km.

Este algoritmo se aplica píxel a píxel con una ventana móvil adaptativa, por tanto, obtiene un conjunto de coeficientes  $b_i$  para cada píxel. La figura 4.4 muestra un ejemplo de los mapas de coeficientes  $B_0, B_1, B_2$  y  $B_3$  correspondientes al término independiente, al LST, al NDVI y a  $TB_v$ , respectivamente.

En este ejemplo las variables auxiliares utilizadas han sido el producto ERA5 para la temperatura y mientras que el NDVI se ha cogido de las medidas del Proba V.

Este proceso utiliza una ventana adaptativa con nueve píxeles alrededor del píxel de interés. Se resuelve un sistema lineal para obtener los coeficientes  $b_i$ , con las medidas de las variables a 25km de los píxeles dentro de la ventana. Este proceso se aplica a cada uno de los píxeles de la imagen original. Por tanto, la ventana se mueve por toda la escena y adapta su forma para tener píxeles alrededor del píxel de interés con datos. Por ejemplo, los píxeles utilizados en zonas de costa dibujan un área completamente distinta de los que están en el interior. En el artículo [18] se ponen ejemplos que describen el método. En el modelo que se utilizaba hasta ahora, se obtenían un único conjunto de coeficientes para toda la región de interés.

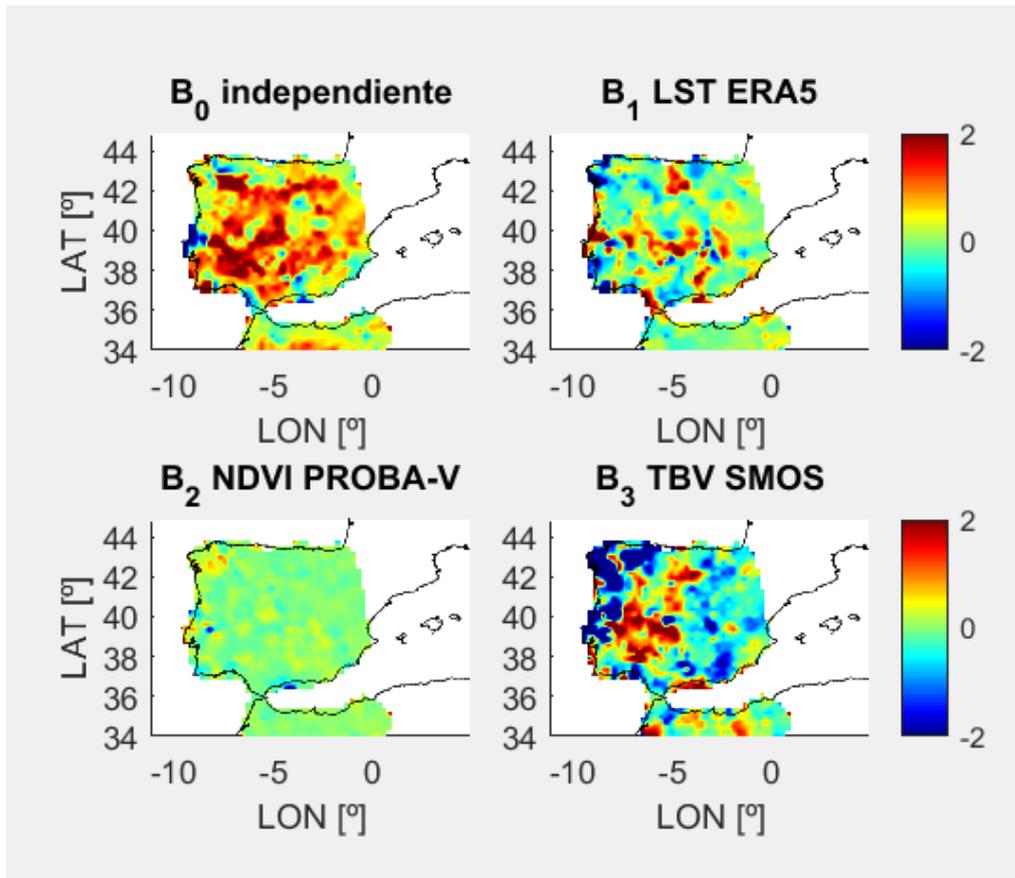


Figure 4.4 Mapas de coeficientes para la Península ibérica para 02-01-2014. Estos coeficientes son los que se utilizan en el algoritmo para obtener los mapas a alta resolución.

### 4.3 DATOS REMOTOS

En este proyecto se ha utilizado el algoritmo de “Downscaling adaptive moving window” en Matlab 2017a. Las entradas de todas las variables es en el formato NECDF (Network Common Data Form). En estos ficheros se indica de forma estructurada una matriz de la variable de interés (por ejemplo NDVI), un factor de calidad o corrección, y sus correspondientes coordenadas latitud y longitud.

#### 4.3.1 Datos SMOS

SMOS tiene una órbita heliosincrónica a una latitud de 758Km, dos pasadas diarias una Ascendente y otra Descendente.

Los Datos de SMOS se clasifican en diferentes niveles (ver Capítulo 3.1.4). El centro de datos Barcelona Expert Center SMOS-BEC proporciona los datos de Temperatura de brillo en el nivel L1C ( $T_{B_v}$  y  $T_{B_h}$ ) a diferentes grados de elevación y los datos de SM<sub>LR</sub> clasificados en un fichero por día y separados por órbitas (Ascendente o Descendente).

##### 4.3.1.1 TB Nivel L1C

El producto de la temperatura de brillo del Nivel L1C tiene las variables de ( $T_{B_v}$  y  $T_{B_h}$ ), que se corresponden a las polarizaciones vertical y horizontal, respectivamente. Se utilizan estas medidas para los ángulos de observación 32. 5°, 42. 5° y 52. 5° para cada

uno de los píxeles. En total son 6 variables, para cada polarización y se aplica un promedio de los valores de los tres ángulos por polarización.

$$TBp = \frac{TBp_{32.5} + TBp_{42.5} + TBp_{52.5}}{N} \quad (4.4)$$

donde el subíndice  $p$  es la polaridad de la temperatura de brillo,  $TBp\theta_i$  se pone a cero si en algún de los ángulos no hay un valor real,  $N$  cambia según la disponibilidad de los valores de  $TBp\theta_i$ ,  $TBp$  se da como nulo si  $N$  es igual a 0.

#### 4.3.1.2 SM Nivel L3

Los productos SM del Nivel L3 se obtienen del Nivel L2 aplicándoles diferentes filtros de calidad y descartando los valores negativos. Se le aplica un valor de índice de calidad SM\_DQX, indica los valores afectados por las interferencias de radiofrecuencia (RFI), aplicando umbrales, por ejemplo. Los valores de SM con índice de calidad (0.07) son eliminados antes de procesarlos. Además, se adaptan a la malla regular de 25km.

#### 4.3.2 Datos MODIS

Del instrumento MODIS a bordo de las naves espaciales Terra y Aqua se obtienen los datos del índice de vegetación normalizado (NDVI, Terra MOD13A2 v.5.0) y de la temperatura superficial de la tierra (LST, Aqua MYD11A1 v.5.0) [16]. Ambos productos tienen una malla de latitud y longitud de 1km de resolución. El producto de LST es diario mientras que el NDVI tiene una periodicidad de 16 días. Antes de introducir estos datos en el algoritmo se eliminan los valores de LST menores a 2K y los de NDVI negativos. Estos datos se utilizaron para desarrollar la primera versión del algoritmo de downscaling con ventana adaptativa móvil.

#### 4.3.3 Datos PROBA-V

El instrumento “Vegetation” de la misión PROBA-V recoge valores de NDVI a una resolución de 300 m desde el año 2014. En marzo del 2016 el servicio de Monitoreo de la tierra CGLS (Copernicus Global Land Service), ofrece una primera versión de este producto a escala global y con una periodicidad de 10 días [22].

En este proyecto se utiliza este producto reemplazando el producto de NDVI de MODIS para poder conseguir mapas de humedad a la resolución espacial de 300m.

#### 4.3.4 Datos ERA5

Los datos ERA5 se han utilizado en este proyecto en sustitución de los datos de temperatura de MODIS. El objetivo es conseguir mapas de humedad a alta resolución en todos los píxeles independientemente de las condiciones meteorológicas. Los datos LST de MODIS se ven afectados por las nubes, niebla y vegetación.

La base de datos ERA5 proporciona datos relacionados con la climatología a una resolución espacial de 30Km desde el 2010 hasta la actualidad. La periodicidad de la entrada de datos es cada tres meses. La variable “skin temperature”, es la que se utiliza en este proyecto reemplazando el valor de LST de MODIS para tener los mapas de alta resolución independientemente de las condiciones meteorológicas (producto cloud-free del BEC).

```

"class": "ea",
"dataset": "era5",
# Se indica la base de datos a la que se quiere conectarse
"date": "2015-03-01/to/2015-03-31",
# El valor a estudiar es diario, en este caso se obtiene una matriz donde el
tercer parámetro es el día
"expver": "1",
"levtype": "sfc",
# Indica a que nivel/altura se recoge el valor, en este caso sfc= superficie
o un solo nivel.
"param": "235.128",
# es un parámetro que indica la variable, en este caso es "skin temperatura"
"stream": "open",
# Indica periodicidad diaria
"time": "12:00:00",
# para cada variable hay una periodicidad de 3 horas, la hora más óptima para
la temperatura de la tierra es a las 12 del medio día
"type": "an",
# Indica en tipo de dato, an= analyses
# Hasta aquí el código propuesto por el catálogo
"grid": "0.3/0.3",
# se añade una malla de separación 0.3 para ajusta la resolución de 30km
"area": "44.8638/-11.0231/33.9863/4.7983",
# seleccionar las coordenadas latitud y longitud N/W/E/S
"grid": "0.3/0.3",
# Dimensionar las coordenadas a la malla de 30km.
"format": "netcdf",
# Seleccionar el formato del archivo
"target": "ERA5_IBE_09_2015.nc",
# por último escoger un nombre para el archivo.
})

```

Figura 4.5 Código en Python que se utiliza para descargar los valores de ERA5

A diferencia de los datos anteriores, la obtención de este producto requiere de unos pasos diferentes. Dado que es una gran cantidad de datos y llevan relativamente poco tiempo disponibles para cualquier usuario. Se tiene que acceder al producto deseado directamente desde el servidor de ECMWF. La figura 4.5 presenta el código desarrollado en Python para descargar los datos de ERA5 y ponerlo en netcdf compatible con Matlab. El Anexo I, proporciona un manual con los detalles de cómo hay que proceder para descargar los datos de ERA5 compatibles con Matlab.

# CAPÍTULO 5: RESULTADOS Y VALIDACIÓN

En este proyecto se ha aplicado el nuevo algoritmo “Downscaling adaptive moving window” para obtener mapas de humedad de alta resolución en la zona de la península ibérica (4. 79º 44. 86º N; -11.02 33. 98º E), en el periodo de tiempo 2013 a 2015. Este capítulo lo dedicamos a mostrar y comparar los mapas que se obtienen con dicho algoritmo al utilizar diferentes bases de datos auxiliares. Se presenta el trabajo de validación realizado utilizando como referencia los datos de la red de medidas in-situ REMEDHUS.

## 5.1 MAPAS DE LAS VARIABLES DE ENTRADA

### 5.1.1 LST y Skin temperature

El dato de temperatura superficial, se puede obtener de distintas fuentes. Los primeros datos utilizados para desarrollar el algoritmo venían de los datos de MODIS a 1km. En este proyecto proponemos también el uso del skin tempere de ERA5, que proporciona ECMWF. En las imágenes de la figura 5.1 se comparan los mapas de temperatura para el día 1 de abril de 2015 de la Península Ibérica. Se comparan el mapa de MODIS a 1km (izquierda), el de ERA 5 a 30km (en el centro) y ERA-interim a 80km (a la derecha)

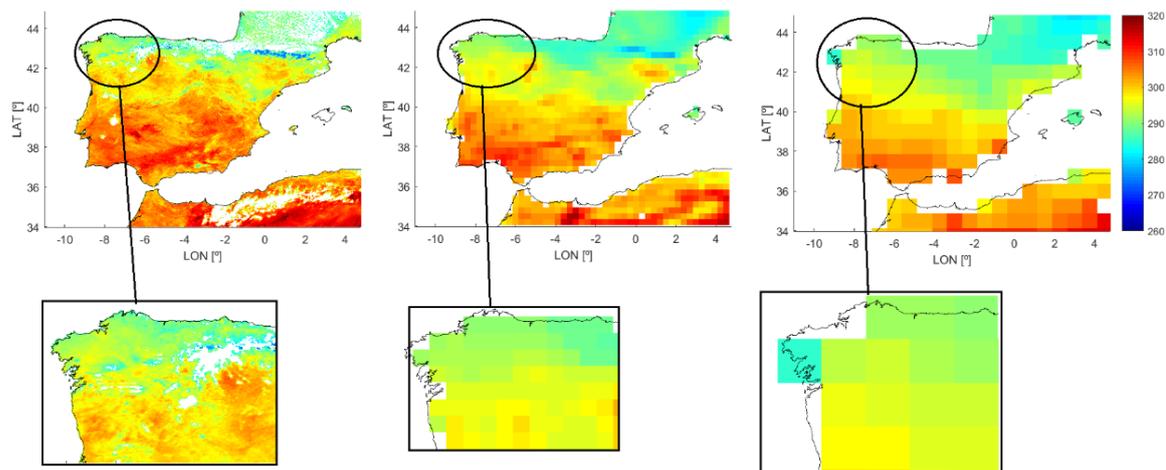


Figura 5.1 Datos de la temperatura superficial de la tierra correspondientes al día 01/04/2015. LST de MODIS (izquierda), ERA5 (Centro) y ERAINTERIM (Derecha), en la península Ibérica.

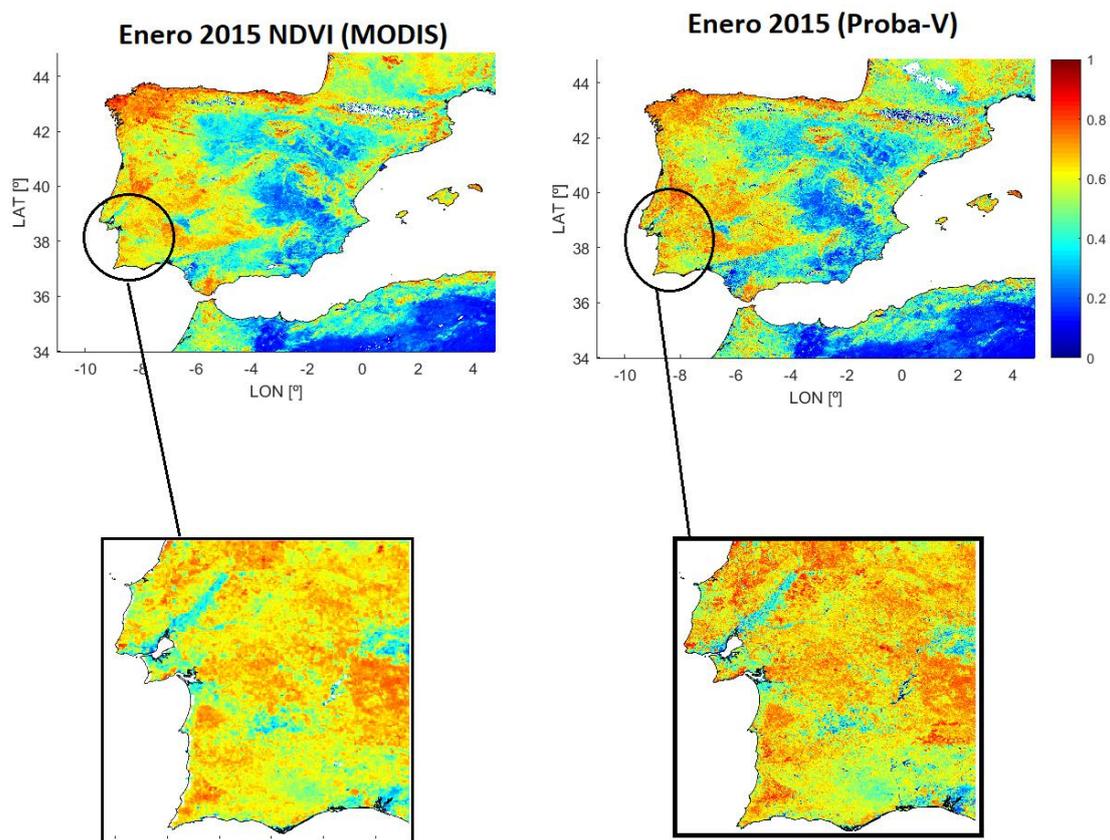
Estas imágenes ponen de manifiesto el mejor detalle de las imágenes de MODIS respecto de las otras dos imágenes. Sin embargo, estas imágenes tienen algunos píxeles sin valor de temperatura, probablemente debido a las nubes. La base de datos ERA-interim proporciona datos de temperatura independientemente de las condiciones meteorológicas, sin embargo, la resolución de estos datos es muy baja, 80 km por píxel

(Figura 5.1 derecha). ECMWF, recientemente, proporciona la base de datos ERA5, mejorando la resolución de la temperatura a unos 30 km por píxel (Figura 5.1 centro).

En el departamento se habían utilizado los datos ERA-interim para desarrollar una primera versión cloud-free de algoritmo de downscaling. Se utilizaba la primera versión del algoritmo con ERA-interim y los datos de NDVI de MODIS. Los resultados presentados en el proyecto fin de carrera de Xavier Pou [25]. La calidad de los mapas obtenidos se veía afectada por la falta de resolución de la LST, aunque, por lo general los mapas daban valores aceptables. Como veremos al cambiar el algoritmo de downscaling por el de las ventanas móviles y los datos ERA5 sustituyendo a ERA-interim, los resultados mejoran considerablemente. Los resultados de validación se presentan en los apartados 5.2 y 5.3

### 5.1.2 NDVI

En este proyecto, otro de los objetivos es mejorar todavía más la resolución espacial y pasar de 1km a 300m. Para ello, se ha sustituido el NDVI de MODIS por el NDVI de PROBA-V.



*Figura 5.2 Datos de NDVI de MODIS promedio de los primeros 15 días de enero del 2015 (Izquierda) y de NDVI de Proba-v de los primeros 10 días (Derecha)*

Los datos de NDVI del instrumento MODIS tienen una periodicidad de 16 días y están a una resolución de 1km por píxel. Mientras que los datos de NDVI del instrumento “Vegetation” de la misión PROBA-V tienen una periodicidad de 10 días y aumentan su

resolución espacial a 300m por pixel. La figura 5.2 compara un mapa de los primeros días de enero de 2015 para ambos productos. La mejora de resolución en este caso es de 3 y por tanto no es tan apreciable como cuando se pasa de 25 a 1km.

### 5.1.3 Humedad del Suelo SMOS

BEC Geophysical data > Surface Soil Moisture > Operational L3 v.2 NRT > Daily > Ascending > Soil moisture (SM)  
Time: 2014-04-21T00:00:00.000Z

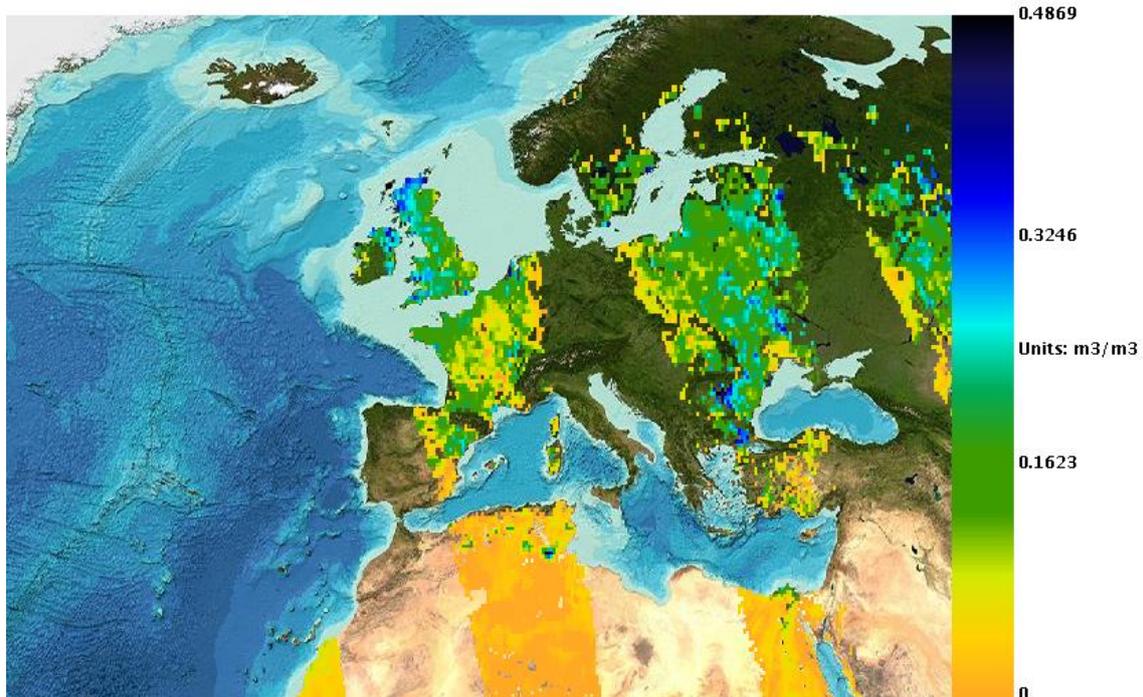


Figura 5.4 Órbita Ascendente con los datos de la humedad del suelo de SMOS del día 21-04-2014[1].

Para hacer el estudio estadístico y las comparaciones con medidas in situ hay que tener en cuenta que el tiempo de revisita es de 3 días, por tanto, para tener cobertura total se requiere combinar imágenes de 3 días. Cada 9 días se repite exactamente la misma órbita. Esta es la razón por la que en el BEC se proporciona productos diarios, cada tres días, cada 9 días, mensuales y anuales. Además, los datos se suelen clasificar como órbita ascendente y descendente. En la figura 5.4 se observa que la órbita ascendente del día 21-04-2014 cubre la parte noreste de la Península Ibérica. En la figura 5.5 se muestra la comparación entre los valores de la humedad del suelo antes (izquierda) y después (derecha) de aplicar el algoritmo de downscaling con los valores de temperatura de ERA5.

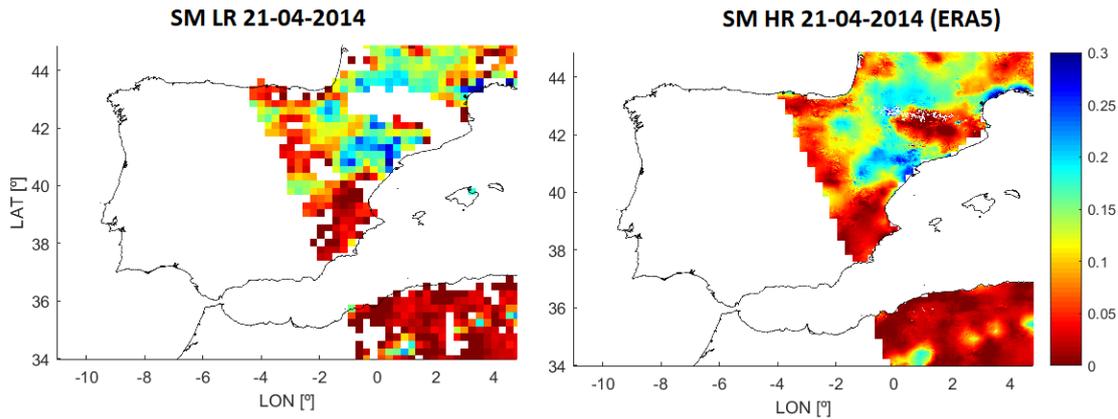


Figura 5.5 humedad del suelo a baja resolución (SM LR Izquierda) y a alta resolución (SM HR Derecha)

## 5.2 COMPARACION ENTRE LOS RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES

En este apartado se presenta la comparación de los distintos productos. En la mayoría de casos hemos aplicado el algoritmo de downscaling con la ventana adaptativa. Distinguiremos distintos productos según las bases de datos utilizadas.

Se ha elegido la órbita ascendente del satélite SMOS del día 2 de enero del 2015, para hacer este estudio de comparación porque cubre gran parte de la península Ibérica.

### 5.2.1 Producto 1: SM HR (MODIS)

Actualmente el BEC proporciona de manera operacional mapas de humedad de alta resolución, producto de nivel L4: diarios, de 3 días, 9 días, mensuales y anuales. Estos productos se obtienen aplicando el algoritmo de downscaling basado en el triángulo universal en la tesis de Maía Piles [13]. En este método se utilizan los datos de MODIS de LST y de NDVI. En este proyecto se ha utilizado el algoritmo mejorado desarrollado por Gerard Portal con las bases de datos de MODIS para LST y NDVI, que a partir de ahora denominaremos producto SM HR MODIS. La figura 5.6 pone de manifiesto, que la resolución obtenida es mucho mejor que la resolución obtenida solamente con las medidas de SMOS. Sin embargo, en la zona norte prácticamente no hay datos, debido a la presencia de las nubes.

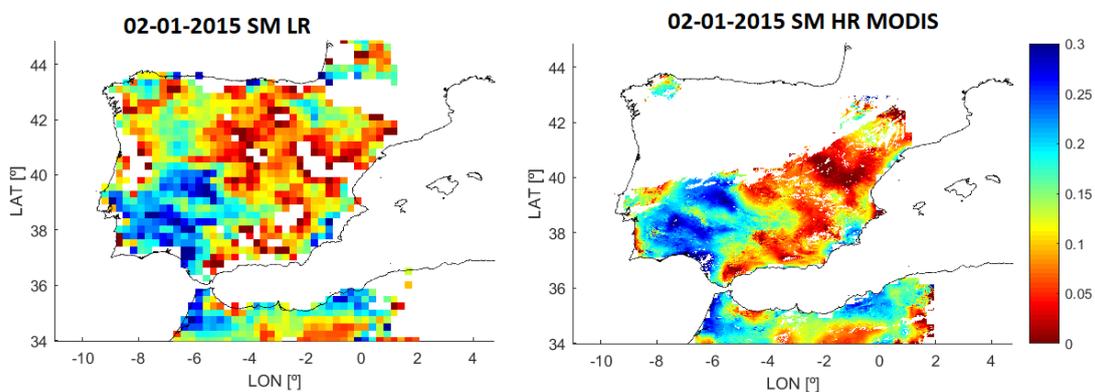


Figura 5.6 Humedad del suelo aplicando el Método SM HR MODIS

### 5.2.2 Producto 2: SM HR (ERA5)

En este método se aplica el algoritmo “Downscaling adaptive moving window” con los datos de “skin temperature” de ERA5 y NDVI de MODIS. En la figura 5.7 se observa la eliminación del efecto climatológico respecto al método anterior.

Para obtener el producto SM HR ERA5, aplicamos el mismo algoritmo, pero en este caso utilizamos como variables auxiliares el “skin temperature” de ERA5 y NDVI de MODIS. En la figura 5.7 se observa que, para el 2 de enero de 2015, aunque el cielo estuviera cubierto de nubes se obtiene dato de humedad. Esto es debido a que el producto ERA5 es un producto de re-análisis y no se obtiene con medidas en el visible o infrarrojo. Podemos observar que para este caso los valores donde hay cobertura los valores son muy similares.

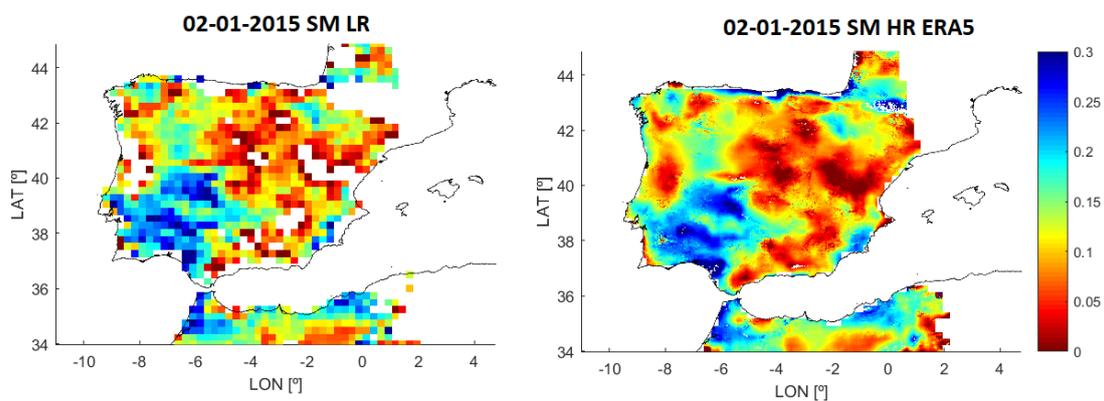


Figura 5.7 Humedad del suelo aplicando el Método SM HR ERA5

### 5.2.3 Producto 3: SM UHR (PROBA-V)

El producto SM UHR, obtiene mapas de humedad con una resolución de 300m. Para ello, utiliza la LST de MODIS a 1km y la NDVI de la misión PROBA-V, cuyos datos se obtienen a partir del portal de Copérnicus. El NDVI de Proba-V tiene una resolución de 300m. También se ha obtenido el producto cloud-free, en este caso utilizamos los datos ERA5.

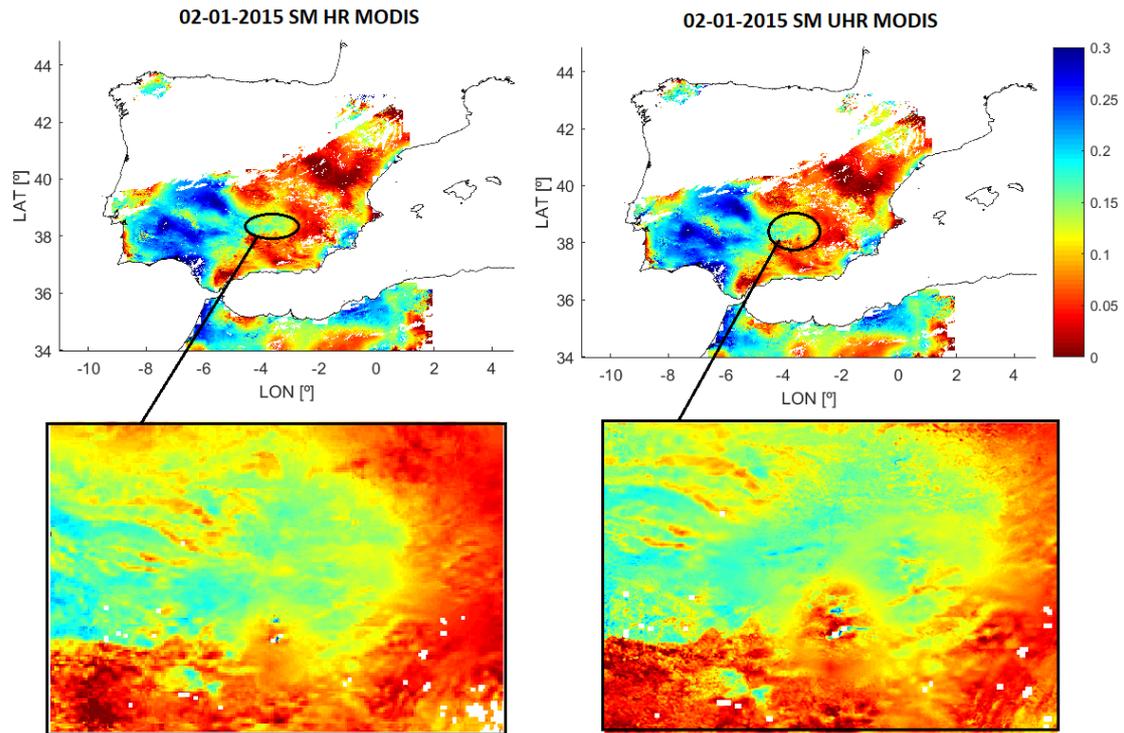


Figura 5.8 Comparación de mapas de alta resolución. Izquierda tanto LST como NDVI son de MODIS. Mientras que en los mapas de la derecha se utilizan la LST de MODIS, pero el NDVI a 300m de PROBA-V

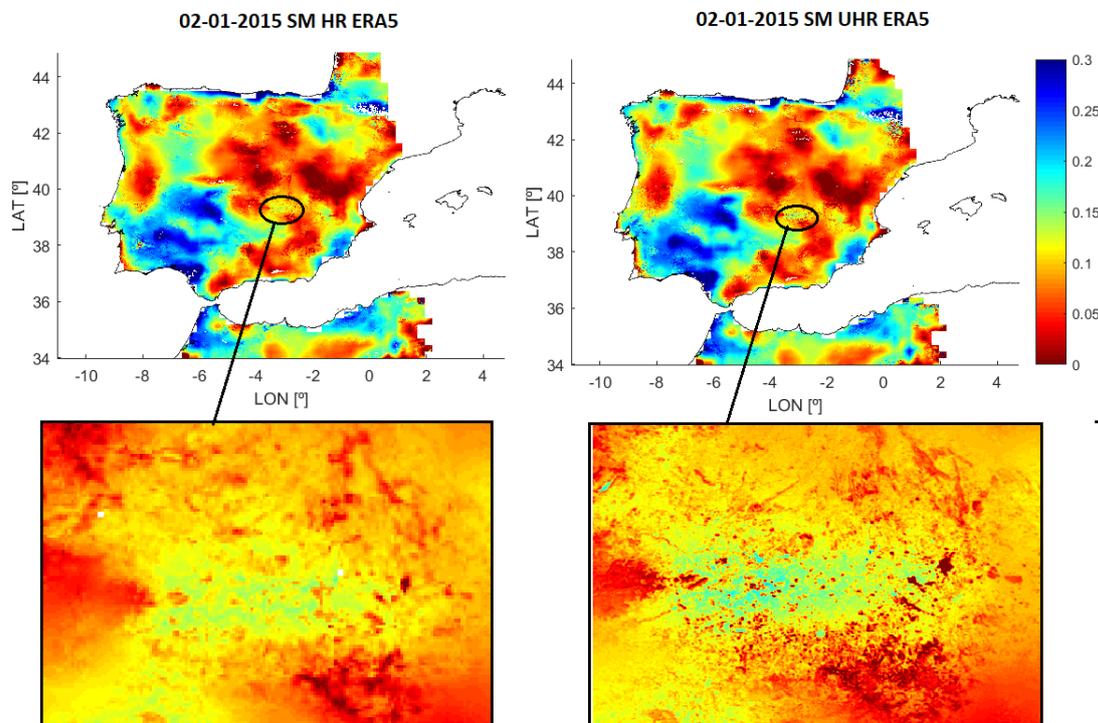


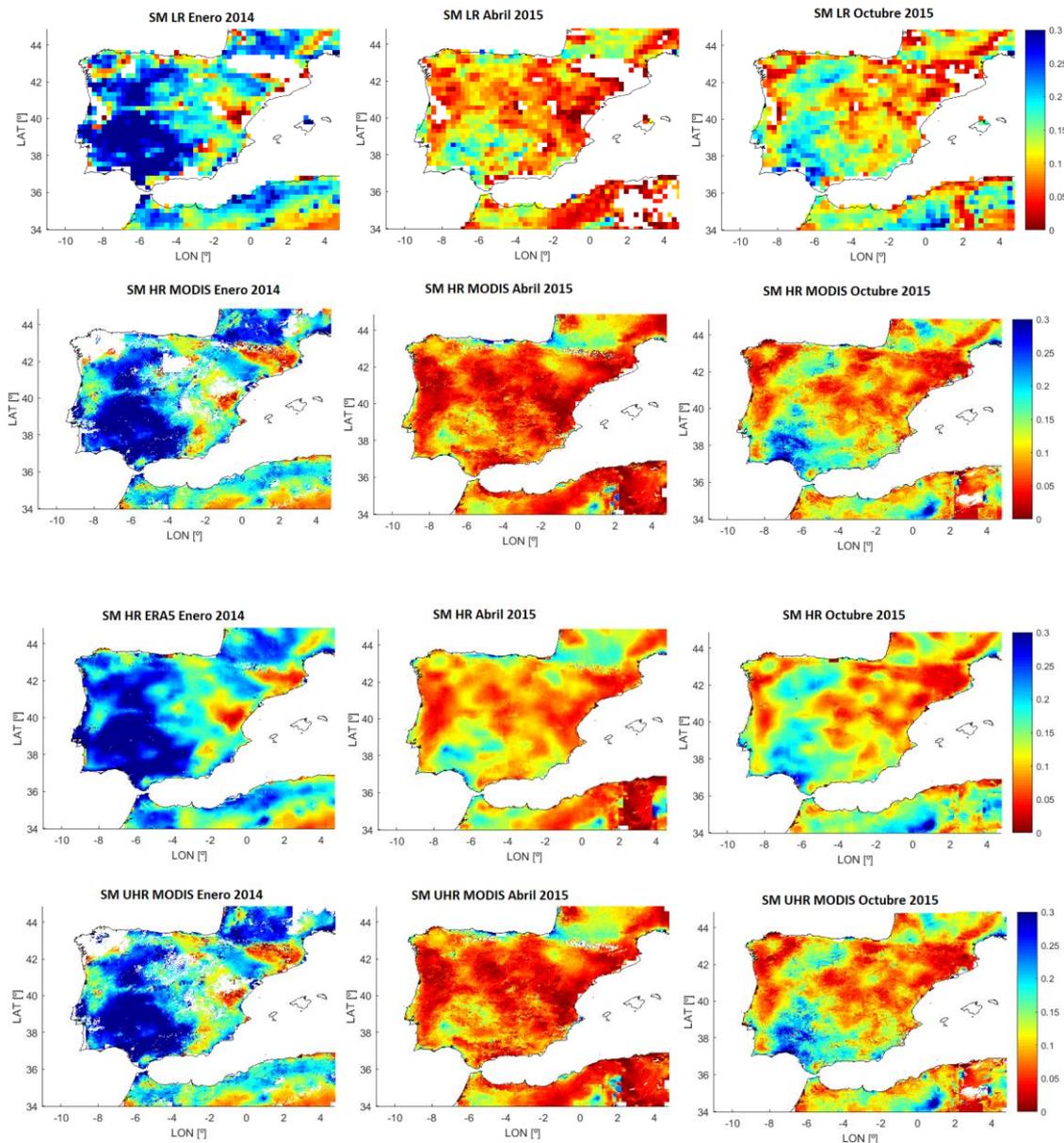
Figura 5.9 Misma comparación que en la figura 5.8 pero utilizando la Skin temperature de ERA5

En las figuras 5.8 y 5.9 se comparan los mapas obtenidos utilizando el algoritmo de Gerard Portal con NDVI a 1km o a 300m, cuando utilizamos la LST de MODIS a 1km (figura 5.8) o la LST de ERA5 (figura 5.9). UHR significa ultra high resolution. Es difícil de

apreciar el cambio de resolución para áreas grandes, pero cuando hacemos un zoom en el área si se aprecia una mejora de resolución.

### 5.3 PROMEDIOS MENSUALES

En los mapas diarios es difícil tener cobertura completa de toda la península. En la figura 10 se comparan los distintos productos que hemos introducido en el apartado anterior pero cuando se ha realizado un promedio mensual los meses de enero 2014 (columna izquierda), abril 2015 (columna central) y octubre 2015 (derecha).



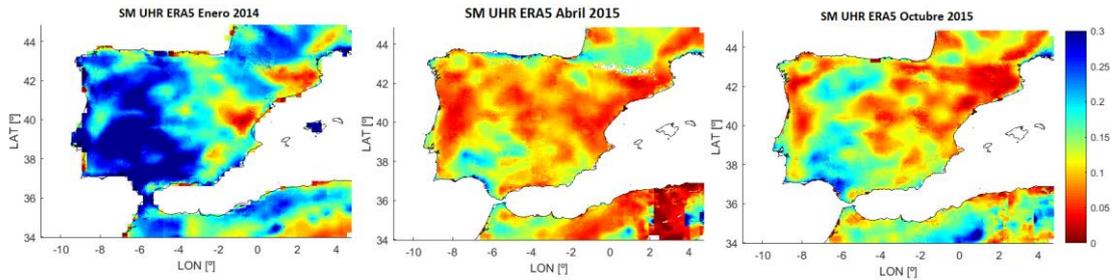


Figura 5.10 Promedios mensuales de diferentes estaciones del año, aplicando los 4 métodos del algoritmo "Downscaling adaptative movind window"

La primera fila corresponde a los mapas originales del SMOS-BEC L3. La segunda y la cuarta fila son los productos SM HR MODIS y el producto SM UHR MODIS respectivamente, ambos con agujeros porque quedan afectados por las condiciones meteorológicas, pero en el promedio de un mes este efecto no es tan notable. Por último, en la tercera y quinta fila se muestran los resultados de los métodos SM HR ERA5 y SM UHR ERA5 respectivamente, los cuales obtienen valor independientemente de las condiciones meteorológicas.

#### 5.4 ANÁLISIS DE LA CONSERVACION DE ENERGIA

En este apartado se analiza si el método de downscaling con la ventana adaptativa móvil conserva la energía. Para ello, el mapa alta resolución L4 se ha agregado a la resolución de muestreo original de 25km y se resta de su correspondiente mapa de SMOS-BEC L3 original. En la figura 5.11 se presenta para el 2 de agosto de 2015, el mapa original L3 a la malla de 25km (izquierda) y el mapa resultante de agregar un mapa HR SM a LR SM (a la derecha), también en la fila de abajo se muestra el mapa de las diferencias y el correspondiente histograma. En la mayoría de píxeles las diferencias son despreciables, por lo que podemos concluir que se conserva la energía de la imagen original.

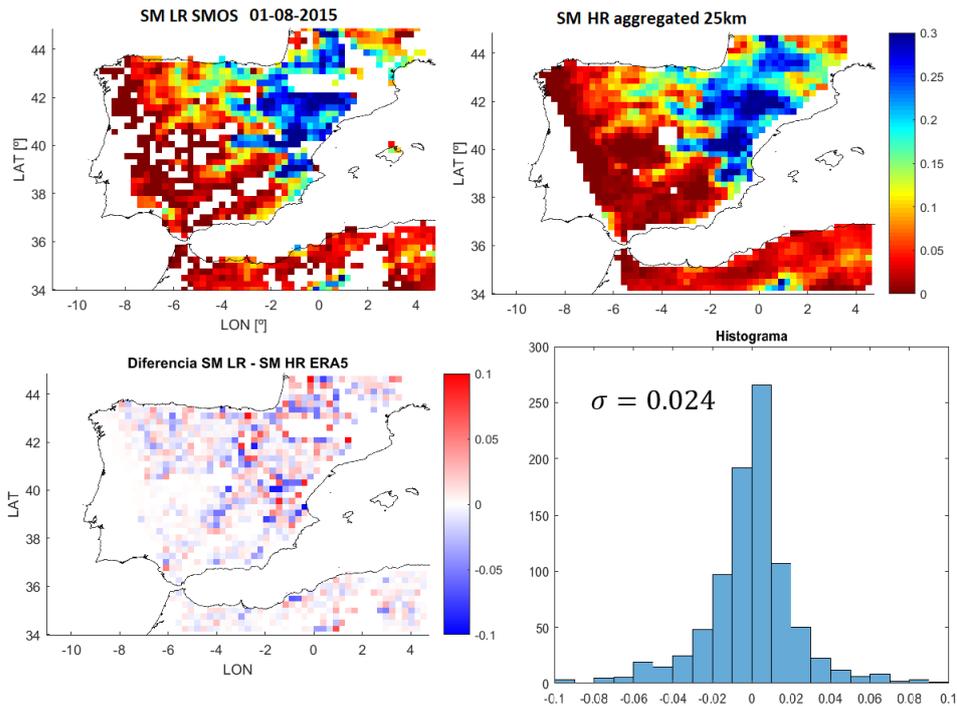


Figura 5.11 Análisis de la conservación de la energía del método. SE ha utilizado una imagen SM HR ERA5 con SM LR SMOS-BEC del día 01-08-2015

En la figura 5.11 el producto de downscaling utilizado ha sido el SM HR ERA5 y en la tabla 5.1 se muestran las desviaciones estándar calculadas para el resto de los productos.

La desviación estándar de esta diferencia es de  $0.024 \text{ m}^3/\text{m}^3$  por debajo de los requisitos científicos de la misión SMOS ( $0.04 \text{ m}^3/\text{m}^3$ ).

Productos utilizados de “Downscaling adaptive moving window”	$\sigma [\text{m}^3/\text{m}^3]$
SM HR MODIS	0.016
SM HR ERA5	0.024
SM UHR MODIS	0.018
SM UHR ERA5	0.024

Tabla 5.1 Desviaciones estándar obtenidas al hacer las diferencias del mapa original L3 con los productos L4 agregados a 25km para el 01/08/2015.

Todos los valores de la tabla 5.1 cumplen los requisitos científicos de la misión SMOS ( $0.04 \text{ m}^3/\text{m}^3$ ). Por lo tanto, se puede concluir que el algoritmo “Downscaling adaptive moving window” no afecta la media de los valores de SM originales a baja resolución, cuando utilizamos las combinaciones de productos auxiliares presentados.

## 5.5 VALIDACION EN LA ZONA DE REMEDHUS

La red de medidas REMEDHUS proporciona datos in-situ de forma constante y regular desde 1999 [31]. En este proyecto se utilizan estos datos para validar los diferentes productos de humedad presentados en este trabajo Fin de Grado. El periodo elegido para este estudio ha sido 2013-2015.

La red de medidas in-situ REMEDHUS (red de medición de humedad del Suelo), actualmente está compuesta por 23 estaciones (equipadas con sensores de humedad *Hydra probes* y *Envirosmart probes*) que se encargan de medir y monitorizar la humedad del suelo a diferentes profundidades entre 0 cm y 50 cm. están ubicadas en un área de unos 1300 km<sup>2</sup> (41. 1º 41. 5º N; -5.1 -5. 7º W) en una zona semiárida de Zamora, España. Son tierras que se dedican principalmente a la agricultura, con cereales de secano en invierno y primavera (78%), cultivos de regadío en verano (5%), viñedos (13%) y algunas zonas de bosques (3%).

ESTACIÓN	NOMBRE	2013	2014	2015	2016
E10	LasTresRayas	V	V	V	V
F11	Zamarron	S	B*	S	B
F6	LasArenas	V	V	V	V
H13	LasBodegas	B	B	B	B*
H7	ElTomillar	V	V	V	V
H9	Guarrati	F-P	F-P	F-P	F-P
I6	ELCoto	V	V	V	V
J12	LasEritas	S	B	S	B*
J14	LaAtalaya	S	S	S*	B*
J3	Paredinas	V	V	V	V
K10	Carretoro	S	S*	S	B*
K13	Canizal	B	R	R	R***
K4	LasVictorias	S	B	R	B*
K9	Granja_g	S	S	R**	S
L3	LasBrozas	V	V	V	V
L7	Llanos de la Boveda	S	S	S	S
M13	Guarena	F-P	F-P	F-P	F-P
M5	CasaPeriles	S	S	S	S
M9	LaCruzdeElias	S	S	S	B
N9	ConejoDelMonte	S	S	S	S
O7	LasVacas	B	S	S	B

Tabla 5.2 Estaciones de REMEDHUS separadas por años y agrupadas por el tipo de uso: secano (S), viñedo (V), barbecho (B), bosque y pasto (F-P) y regadío (R)

En la tabla 5.2 está la información del uso de suelo de cada una de las estaciones de REMEDHUS. Para la validación de los productos de humedad a alta resolución desarrollados en este proyecto se han utilizado las estaciones situadas en las zonas de Secano (S), Viñedo (V) y Barbecho (B).

La Red Internacional de Humedad del Suelo es una cooperación internacional para establecer y mantener una base de datos global sobre la humedad del suelo in situ. Esta

base de datos es un medio esencial de la comunidad geocientífica para validar y mejorar las observaciones satelitales mundiales y los modelos de superficie terrestre [32].

### 5.5.1 Procedimiento de validación

La base de datos de REMEDHUS contiene la información de las coordenadas geográficas de la situación de cada estación, así como el promedio diario de los datos de la humedad medidos por el sensor.

Para cada uno de los productos obtenidos con el algoritmo “Downscaling adaptive moving window” y los conjuntos de variables auxiliares mencionados, se extrae el valor de la humedad del suelo correspondiente a las coordenadas de las estaciones utilizadas. Este proceso se repite con todos los días del año. Como resultado se obtiene un vector de humedad para cada producto y estación para comparar con cada secuencia paralela de las medidas in-situ proporcionadas por las estaciones de REMEDHUS.

Se agrupan las estaciones por su tipo de usos y se hace un promedio descartando los días donde el satélite no proporciona un valor real.

En este proceso de validación se utilizan las medidas in-situ de las estaciones de REMEDHUS como referencia y, se han evaluado las cuatro magnitudes estadísticas siguientes: el coeficiente de correlación de Pearson (R), el error cuadrático medio (RMSE), el RMSE in-sesgado (uRMSE) y el sesgo [18]:

$$R = \frac{E[(SM_{in-situ} - E[SM_{in-situ}])(SM_{SMOS} - E[SM_{SMOS}])]}{\sigma_{in-situ}\sigma_{SMOS}} \quad (5.1)$$

$$RMSE = \sqrt{E[(SM_{in-situ} - SM_{SMOS})^2]} \quad (5.2)$$

$$uRMSE = \sqrt{E\left[\left((SM_{in-situ} - E[SM_{in-situ}]) - (SM_{SMOS} - E[SM_{SMOS}])\right)^2\right]} \quad (5.3)$$

$$Bias = E[SM_{in-situ}] - E[SM_{SMOS}] \quad (5.4)$$

La correlación (R) mide el nivel de igualdad entre los dos vectores a estudiar, cuanto más cercano su valor a uno más exacta es la relación entre los vectores  $SM_{in-situ}$  y  $SM_{SMOS}$ , el error cuadrático medio RMSE mide la diferencia entre ambos vectores, el Bias muestra un valor constante al que tiende esta diferencia y por último el uRMSE mide el error cuadrático medio insesgado.

ESTACIONES	SM LR SMOS				SM HR ERA5				SM UHR ERA5				
	N	R	RMSE	uRMSE	BIAS	R	RMSE	uRMSE	BIAS	R	RMSE	uRMSE	BIAS
	<b>(S) SECANO</b>				<b>(S) SECANO</b>				<b>(S) SECANO</b>				
INVIERNO	47	0,8945	0,0477	0,0519	0,0203	0,9194	0,0482	0,0487	0,0074	0,9255	0,0483	0,0489	0,0081
PRIMAVERA	40	0,5551	0,0646	0,0484	0,0429	0,6204	0,0600	0,0433	0,0416	0,6163	0,0605	0,0431	0,0425
VERANO	44	<b>0,1977</b>	0,0469	0,0358	0,0302	<b>0,1213</b>	0,0463	0,0330	0,0325	<b>0,1230</b>	0,0464	0,0338	0,0317
OTOÑO	48	0,7062	0,0534	0,0511	0,0154	0,7158	0,0515	0,0512	0,0056	0,7059	0,0521	0,0519	0,0047
<b>2014</b>	<b>178</b>	<b>0,8229</b>	<b>0,0543</b>	<b>0,0474</b>	<b>0,0265</b>	<b>0,8554</b>	<b>0,0519</b>	<b>0,0471</b>	<b>0,0218</b>	<b>0,8516</b>	<b>0,0523</b>	<b>0,0475</b>	<b>0,0218</b>
	<b>(V) VIÑEDOS</b>				<b>(V) VIÑEDOS</b>				<b>(V) VIÑEDOS</b>				
INVIERNO	49	0,9221	0,0454	0,0817	-0,0679	0,9239	0,0471	0,0938	-0,0812	0,9247	0,0464	0,0943	-0,0821
PRIMAVERA	45	0,6961	0,0541	0,0541	-0,0017	0,6291	0,0553	0,0547	-0,0081	0,6383	0,0557	0,0551	-0,0079
VERANO	52	0,5570	0,0380	0,0372	0,0081	0,5449	0,0389	0,0386	0,0046	0,5569	0,0407	0,0407	0,0017
OTOÑO	49	0,6343	0,0903	0,0541	-0,0723	0,6608	0,0945	0,0538	-0,0777	0,6435	0,0979	0,0552	-0,0809
<b>2014</b>	<b>182</b>	<b>0,8338</b>	<b>0,0692</b>	<b>0,0606</b>	<b>-0,0335</b>	<b>0,8347</b>	<b>0,0740</b>	<b>0,0627</b>	<b>-0,0392</b>	<b>0,8265</b>	<b>0,0756</b>	<b>0,0635</b>	<b>-0,0410</b>
	<b>(B) BARBECHO</b>				<b>(B) BARBECHO</b>				<b>(B) BARBECHO</b>				
INVIERNO	48	0,7294	0,0585	0,0652	-0,0289	0,7492	0,0518	0,0555	-0,0200	0,7499	0,0520	0,0557	-0,0198
PRIMAVERA	43	0,6567	0,0691	0,0529	0,0445	0,6429	0,0663	0,0475	0,0463	0,6370	0,0664	0,0476	0,0464
VERANO	49	0,5324	0,0668	0,0342	0,0574	<b>0,3549</b>	0,0685	0,0327	0,0602	<b>0,3663</b>	0,0681	0,0327	0,0598
OTOÑO	49	0,8355	0,0463	0,0463	0,0000	0,8309	0,0433	0,0433	0,0022	0,8289	0,0442	0,0442	0,0015
<b>2014</b>	<b>177</b>	<b>0,8730</b>	<b>0,0623</b>	<b>0,0597</b>	<b>0,0176</b>	<b>0,8720</b>	<b>0,0592</b>	<b>0,0546</b>	<b>0,0227</b>	<b>0,8715</b>	<b>0,0593</b>	<b>0,0549</b>	<b>0,0225</b>

Tabla 5.3 Valores estadísticos obtenidos con los mapas originales del SMOS-BEC (nivel L3, 25km), con mapas a 1km SM HR ERA5 y resolución a 300m SM UHR ERA5 para el año 2014

La tabla 5.3 muestra que las correlaciones anuales están para todos los productos entre 0.83 a 0.87. Mientras que si analizamos sus valores por estaciones del año se observa que los valores más bajos ocurren en verano mientras que las mejores correlaciones se obtienen normalmente en otoño e invierno. Comparando los valores estadísticos para los distintos productos, se observa que los valores, en la mayoría de los casos, son muy parecidos a los valores que se obtenían con el producto de baja resolución inicial (primeras columnas).

En el anexo II se muestran las estadísticas de los otros métodos y para otros años. Las conclusiones son las mismas.

## PRESUPUESTO

En esta parte se describe un breve estudio del coste se supone realizar este trabajo.

En la mayor parte del tiempo se ha utilizado Matlab R2017a, También se ha tenido que utilizar una versión gratuita de Python 3.4 de forma puntual.

Se tienen en cuenta los recursos humanos, donde se ha considerado que el proyecto ha sido realizado por un ingeniero junior con un salario de 8 €/h.

También se incluyen recurso informático utilizado, Licencia Microsoft Office y un ordenador con buena capacidad computacional. En la siguiente tabla, se muestra con mayor detalle el estudio económico desarrollado.

Sotware y Materiales	Obserbacin	Precio (€)
Matlab R2017a	Licenca academica	0
Python 3.4	version gratuita	0
Ordenador	Portatil	1000
Microsoft Office	Licenca	70

Recursos humanos	Horas (8€/h)	Precio
Investigación y aprendizaje	80	640
Diseño del algoritmo	150	1200
Simulaciones y validaciones	180	1440
Redaccion de la memoria	140	1120
<b>Total</b>		<b>5.470 €</b>

## CAPITULO 6: CONCLUSIONES Y LÍNEAS DE FUTURO

El objetivo principal de este proyecto ha sido proporcionar mapas de humedad a alta resolución utilizando sinergias con datos de distintos sensores a partir de mapas de SMOS. Para ello, se ha utilizado el algoritmo recientemente desarrollado por Gerard Portal “Downscaling adaptive moving window”, en el marco de su tesis doctoral. Gerard Portal había validado su algoritmo aplicando sinergias entre los datos de SMOS en una malla de 25km y los datos de LST y NDVI de MODIS a 1km para obtener mapas de humedad a alta resolución de 1km que fueran útiles para aplicaciones locales, como son las agrícolas o la prevención de incendios. En este proyecto se han obtenido nuevos productos utilizando otras bases de datos. El primero de ellos obtiene mapas a 300m, se sustituye el NDVI de MODIS a 1km, por el NDVI a 300m que proporciona PROBA-V a través del portal de Copérnicus. Por otro lado, es bien conocidos que los datos de LST de MODIS se ven afectados por las condiciones meteorológicas y no proporciona valor en condiciones de cielo nublado o con niebla. Par resolver este problema se ha utilizado la base de datos que proporciona ECMWF ERA5 de temperatura superficial. Estos datos son obtenidos con modelos de re-análisis y por tanto, siempre obtienen valor.

También se han validado los productos obtenidos a través de un estudio estadístico comparando con datos in-situ de la red de medidas REMEDHUS. Se observa que, en todos los casos, las correlaciones y los errores cuadráticos con y sin vías se mantienen dentro del mismo rango que los obtenidos cuando comparamos los datos in-situ con los mapas originales del producto de nivel L3 que proporciona el SMOS BEC.

Como resultado directo de este proyecto hay que destacar que está previsto poner como productos operacionales el producto de alta resolución que no se ve afectado por las nubes, ya que utiliza la LST de ERA5. Este producto sustituirá al producto “cloud free de humedad” actual. Los mapas serán mejores por dos razones: se sustituye el algoritmo utilizado hasta ahora por el de Gerard Portal y se sustituye la base de datos ERA-interim por la ERA5. Por otro lado, también está pensado en proporcionar un producto a 300m desde el BEC.

Todos estos nuevos productos tienen la ventaja respecto de los que actualmente está proporcionando SMOS de mantener la energía de los mapas originales y de que se pueden utilizar sobre cualquier tamaño de área, puesto que utilizan el algoritmo “Downscaling adaptive moving window”.

Parte del estudio presentado en este proyecto se describe en el artículo “GLOBAL HIGH-RESOLUTION SOIL MOISTURE MAPS USING OPTICAL AND MICROWAVE SENSORS DATA FUSION”, en el que aparezco como coautor, y que se va a presentar en Julio de este año en IGARSS 2017.

Como líneas de futuro inmediato podemos mencionar:

- Validación en otras zonas en donde haya redes de medidas in-situ. La región de Yanco en Australia y la de CEMADEN en Brasil, son dos candidatos.
- Sustituir los datos MODIS por los que proporciona SENTINEL 2. De esta manera estaríamos utilizando los datos de Copérnicus, la plataforma de datos Europea.
- Desarrollo de un algoritmo que propague los datos de alta resolución de SM en la capa superficial (0-5cm) hacia la zona de las raíces de las plantas, root-zone en inglés. Este parámetro es de mucho interés para aplicaciones agrícolas.
- Estudiar el uso de sinergias con datos de radar de SENTINEL 1. Se aplicaría un algoritmo similar al que utiliza SMAP cuando tenía en funcionamiento el RDAR además del radiómetro. Es conocido que el RADAR proporciona una mayor resolución espacial, pero sus medidas son mucho más ruidosas, por lo que deben realizarse promedios de varias imágenes para mejorarlas. Cuando se combinan datos de uno y otro sensor se aprovecha las ventajas de cada uno de ellos.

## Referencias

- [1] T. C. R.R. Gillies, «Thermal remote-sensing of surface soil-water content with partial vegetation cover for incorporation into climate-models,,» *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, vol. 34, nº 4, pp. 745-756, 1995.
- [2] M. PILES, «Downscaling SMOS-derived soil moisture using MODIS visible/infrared data.,» *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing,,* vol. 49, nº 9, pp. 3156-3166, 2011.
- [3] «SMOS-BEC,» [En línea]. Available: <http://bec.icm.csic.es>.
- [4] M. I. M. V.-I. S. M. I. M. P. M. I. A. C. F. M. I. D. C. M. I. M. P. M. I. L. R. Gerard Portal, «A Spatially Consistent Downscaling Approach for SMOS Using an Adaptive Moving Window,» *IEEE*, 2017.
- [5] ECMWF, «Advancing global NWP through international collaboration,» [En línea]. Available: <https://www.ecmwf.int/>.
- [6] Copernicus, «Copernicus global Land Service,» [En línea]. Available: <https://land.copernicus.eu/global/products/ndvi>.
- [7] F. Ulaby, R. Moore y A. Fung, «Microwave Remote Sensing Active and Passive Vol. I Fundamentals and Radiometry,» *Norwood, MA: Artech House*, 1981.
- [8] B. Choudhury, A. Chang y R. Newton, «Effect of surface roughness on the microwave emission from soils,» *Journal of Geophysical Research-Oceans*, vol. 84, nº C9, pp. 5699-5706, 1979.
- [9] J. Wang y B. Choudhury, «Remote sensing of soil moisture content, over bare field at 1.4 GHz frequency,» *Journal of Geophysical Research-Oceans*, vol. 86, nº C6, pp. 5277-5282, Junio 1981.
- [10] J. Wigneron, L. Laguerre y Y. Kerr, «A simple parameterization of the L-band microwave emission from rough agricultural soils,» *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 39, nº 2.2.4, 3.2, 4.2, 6.3.2, pp. 1696-1707, 2001.
- [11] R. Newton y J. Rouse, «Microwave Radiometer Measurements of Soil Moisture Content,» *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 28, pp. 680-686, Septiembre 1980.
- [12] T. C. B. a. S. T. Mo, «A model for microwave emission from vegetation-covered fields,» *Journal of Geophysical Research-Oceans*, vol. 87, nº C13, pp. 11229-11237, Diciembre 1982.
- [13] M. Piles, Multiscale soil moisture retrievals from microwave remote sensing observations, ETSETB: Tesis Doctoral, julio 2010.

- [14] A. C. J. B. I. C. R. F. F. Torres, «On Board Phase and Modulus Calibration of Large aperture Synthesis Radiometers: Study applied to MIRAS,» *IEEE TGRS*, Vols. %1 de %2GRS -34, pp. 1000-1009, Julio 1996.
- [15] J. B. I. C. F. T. A. Camps, «The Processing of Hexagonally Sampled Signals with Standard Rectangular Techniques: Application to 2D Large Aperture Synthesis Interferometric Radiometers,» *IEEE TGRS*, Vols. %1 de %2 Vol: GRS-35, pp. Pp 183-190,, Enero 1997.
- [16] I. C. J. B. F. T. A. Camps, «Radiometric Sensitivity Computation in Aperture Synthesis Interferometric Radiometry,» *IEEE TGRS*, vol. 36, nº 2, pp. 680- 685, Marzo 1998.
- [17] D. Fraga, I. Mas, O. Alonso y D. De Miguel, «La misión SMOS. Primera observación de la salinidad del océano y humedad del suelo desde el espacio,» *Asociación Meteorológica Española (AME)*, vol. 5, nº 17, Julio 2007.
- [18] G. portal, «A SPATIALLY CONSISTENT DOWNSCALING APPROACH FOR SMOS USING AN ADAPTIVE MOVING WINDOW,» *IEEE IGARSS 2017*, 2017.
- [19] SAVTCHENKO, «Terra and Aqua MODIS products available from NASA GES DAAC,» *Advances in Space Research*, vol. 34, nº 4, pp. 710-714, 2004.
- [20] «LP DAAC,» Land processes Distributed active archive center, [En línea]. Available: [https://lpdaac.usgs.gov/tools/data\\_access/daac2disk\\_web](https://lpdaac.usgs.gov/tools/data_access/daac2disk_web).
- [21] «MODIS,» Moderate Resolution Imaging Spectrometer, [En línea]. Available: <https://modis.gsfc.nasa.gov/about/specifications.php>.
- [22] «PROBA-VEGETATION,» [En línea]. Available: <https://earth.esa.int/documents/700255/1929094/PROBA+V+PV-RS-ESA-SY-0001+MRD+Issue+2+Revision+0/ae1714e3-97b1-42bb-b054-0dda3a19e466>.
- [23] «ERAINTERIN Data,» [En línea]. Available: <http://apps.ecmwf.int/datasets/data/interim-full-daily/levtype=sfc/>.
- [24] «ERAINTERIN Document,» [En línea]. Available: <https://www.ecmwf.int/en/elibrary/8174-era-interim-archive-version-20>.
- [25] F. X. POU IBAR, «Implementing improvements in obtaining high resolution soil moisture maps using SMOS,» 2015.
- [26] A. Camps, J. Font, I. Corbella, M. Vall-Llossera, M. Portabella, J. Ballabrera-Poy, V. González, M. Piles, A. Aguasca, R. Acevo, X. Bosch, N. Duffo y P. Fernández, «Review of the CALIMAS Team Contributions to European Space Agency's Soil Moisture and Ocean Salinity Mission Calibration and Validation,» *Remote Sensing*, vol. 4, pp. 1272-1309, Mayo 2012.
- [27] N. Sánchez, J. Martínez-Fernández, A. Scaini y C. Pérez-Gutiérrez, «Validation of the First SMOS L2 Soil Moisture Data in REMEDHUS Network (Spain),» *Geoscience and Remote Sensing*, vol. 50, nº 5, pp. 1602-1611, Marzo 2012.

- [28] M. J. E. M. A. M. O. H. A. A. B. Y. K. O. Merlin, «Self-calibrated evaporation-based disaggregation of SMOS soil moisture: An evaluation study at 3km and 100m resolution in Catalunya, Spain,,» *Remote Sensing of Environment*, vol. 130, nº 0, pp. 25-38, 2013.
- [29] N. S. M. V.-I. A. C. J. M.-F. J. M. V. G.-G. M. Piles, «A Downscaling Approach for SMOS Land Observations: Evaluation of High-Resolution Soil Moisture Maps Over the Iberian Peninsula,» *IEEE Journal of Sel. Topics in Applied Earth Obs. and Remote Sens*, vol. 7, nº 9, pp. 3845-3857, 2014.
- [30] Carlson et al., «An overview of the “triangle method” for estimating surface evapotranspiration and soil moisture from satellite imagery,» *Sensors,,* vol. 7, pp. 1612-1629, 2007.
- [31] J. Martínez-Fernández, A. Ceballos y M. Luengo, «La sequía edáfica en la cuenca del Duero,» *Ecosistemas, revista de ecología y medio ambiente*, vol. 10, nº 3, Septiembre 2001.
- [32] D. Entekhbi, R. Reicjihle, R. Koster y W. Crow, «Performance Metrics for Soil Moisture Retrievals and Applications Requirements,» *Journal of Hydrometeorology*, vol. 11, pp. 832-840, 2010.
- [33] G. a. A. Cescatti, «“Spatially downscaling sun-induced chlorophyll fluorescence leads to an improved temporal correlation with gross primary productivity,”,» *Remote Sensing of Environment*, vol. 182, pp. 72-89, 2016.

# ANEXO I: DESCARGAR DATOS ERA5

La plataforma ECMWFS (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) ha desarrollado recientemente una base de datos con valores climáticos globales a una resolución espacial de ~30km.

El ECMWF lleva a cabo el procesamiento de datos para ERA5, utilizando el modelo IFS del sistema de tierra ECMWFS, ciclo 41r2. El nombre ERA se refiere a 'ECMWF ReAnalysis', siendo ERA5 el quinto mayor reanálisis global producido por ECMWF (después de FGGE, ERA-15, ERA-40, ERA-Interino). ERA es un conjunto de datos de reanálisis climático, que abarca desde 1950 hasta el presente. Se está desarrollando a través del Servicio de Cambio Climático de Copernicus (C3S – Copernicus climate change service). Los datos de ERA5 son de acceso abierto y de descarga gratuita para todos los usos.

Todos los datos que ofrece ERA5 están disponibles en “ERA5 Catalogue”, donde se puede seleccionar los datos que necesarios de una fecha determinada, en una misma descarga se puede tener datos de un mes entero.

Esta página solo es un catálogo y como resultado obtenemos un código en lenguaje Python que nos permite descargar los datos accediendo al servicios donde se almacenan. En este documento mostraremos los pasos a seguir para una primera descarga utilizando el sistema operativo Windows ya que es el que tiene un método más complejo.

**Para un primer contacto tenemos que seguir los siguientes pasos:**

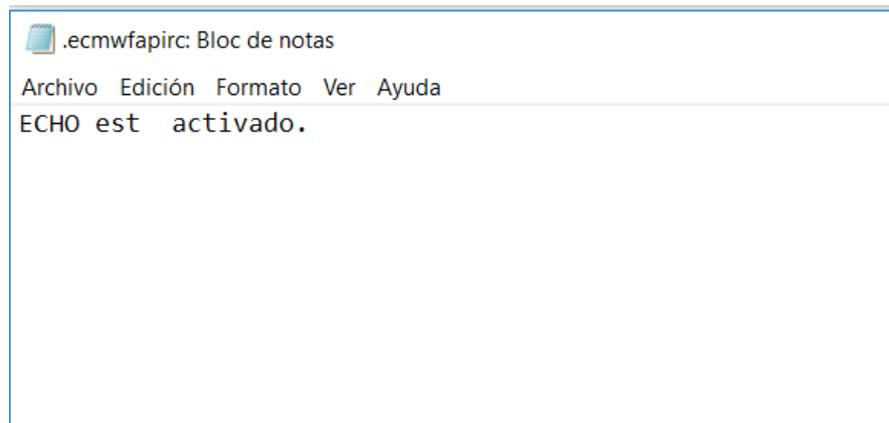
- Registrar una cuenta de usuario en **ECMWF account**,  
<https://apps.ecmwf.int/registration/>
- Una vez registrado, se obtiene una clave de acceso para un año.  
<https://api.ecmwf.int/v1/key/>
- Para Windows se requiere de unos pasos extra para poder identificar el usuario en cada descarga
  - Entrar en la terminal de Windows (cmd) y crear un subarchivo (**.ecmwfapirc**)

 Símbolo del sistema

```
Microsoft Windows [Versión 10.0.16299.98]
(c) 2017 Microsoft Corporation. Todos los derechos reservados.

C:\Users\Khalid> echo > .ecmwfapirc
```

- Se crea el subarchivo (.ecmwfapirc) en la carpeta de usuarios y se cambia a un formato de texto.



Aparece el mensaje de la figura, se borra y se copia la clave de acceso.

- Instalar el lenguaje de programación pythos, [install Python now](#).
  - Se recomienda tener la última versión, pero funciona correctamente a partir de la v2.7
- Descargar las librerías necesarias, copiar la carpeta (ecmwfapi) junto con las demás en el directorio de Python.
  - <https://software.ecmwf.int/wiki/download/attachments/56664858/ecmwf-api-client-python.tgz>

Con estos pasos el ordenador ya está listo para poder descargar los datos de ERA5.

### Ahora se procede a hacer una prueba a modo de ejemplo.

Se procede a descargar los datos de la temperatura superficial de la tierra (Skin temperature) del mes de marzo del 2015 en la zona de la península IBERICA.

- Entrar en el catálogo (<http://apps.ecmwf.int/data-catalogues/era5/?class=ea>) y buscar la ruta hacia este valor:

Deterministic forecasts → Atmospheric model → Analysis → 2015 → March → Surface

ERAS

- Documentation
- Download

See also...

- Job list
- MARS Activity
- Web-API Activity
- Retrieval efficiency

### ERA5 Catalogue

Date (31 values)	Time (24 values)	Parameter (114 values)
2015-03-01	07:00:00	Neutral wind at 10 m v-component
2015-03-02	08:00:00	Sea surface temperature
2015-03-03	09:00:00	Sea-ice cover
2015-03-04	10:00:00	Skin reservoir content
2015-03-05	11:00:00	Skin temperature
2015-03-06	12:00:00	Slope of sub-gridscale orography
2015-03-07	13:00:00	Snow albedo
2015-03-08	14:00:00	Snow density
2015-03-09	15:00:00	Snow depth
2015-03-10	16:00:00	Soil temperature level 1

- Check for availability
- View the MARS request

See [how to download](#) the selected data above.

- No seleccionar nada en la primera columna para obtener los datos de todo el mes, en la segunda columna escoger la hora del día, y en la última columna seleccionamos nuestra variable "Skin temperatura".

EL valor resultante estará en forma de una matriz en tres dimensiones

$$Skt(latitud, longitud, día)$$

Si se quiere añadir más variable, como por ejemplo tener la temperatura disponible a diferentes horas del día, se recomienda hacer otra descarga.

- En el recuadro "View the MARS request" aparece el código python a ejecutar

Estimated number of fields: 31

Python script

MARS request

For more information on how to retrieve data programmatically, in Python, please go to [Access ECMWF Public Datasets](#).

```
#!/usr/bin/env python
from ecmwfapi import ECMWFDataServer
server = ECMWFDataServer()
server.retrieve({
    "class": "ea",
    "dataset": "era5",
    "date": "2015-03-01/to/2015-03-31",
    "expver": "1",
    "levtype": "sfc",
    "param": "235.128",
    "stream": "open",
    "time": "12:00:00",
    "type": "an",
    "target": "output",
})
```

Es este caso que quienes los datos en formato NECDF y de una zona concreta, para ello hay que hacer un pequeño ajuste al código.

```
from ecmwfapi import ECMWFDataServer
server = ECMWFDataServer()
server.retrieve({
```

```

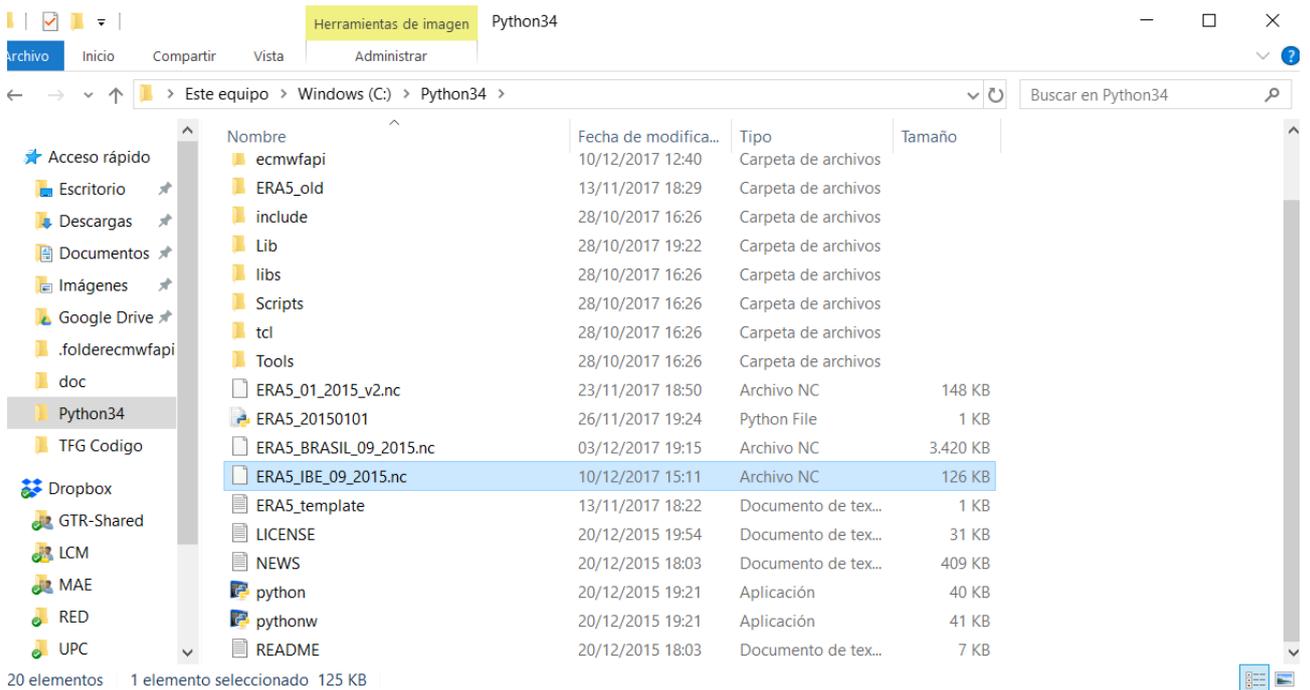
    "class": "ea",
    "dataset": "era5",
# Se indica la base de datos a la que se quiere conectarse
    "date": "2015-03-01/to/2015-03-31",
# El valor a estudiar es diario, en este caso se obtiene una matriz donde el
tercer parámetro es el día
    "expver": "1",
    "levtype": "sfc",
# Indica a que nivel/altura se recoge el valor, en este caso sfc= superficie
o un solo nivel.
    "param": "235.128",
# es un parámetro que indica la variable, en este caso es "skin temperatura"
    "stream": "oper",
# Indica periodicidad diaria
    "time": "12:00:00",
# para cada variable hay una periodicidad de 3 horas, la hora más óptima para
la temperatura de la tierra es a las 12 del medio día
    "type": "an",
# Indica en tipo de dato, an= analyses
# Hasta aquí el código propuesto por el catálogo
    "grid": "0.3/0.3",
# se añade una malla de separación 0.3 para ajusta la resolución de 30km
    "area": "44.8638/-11.0231/33.9863/4.7983",
# seleccionar las coordenadas latitud y longitud N/W/E/S
    "grid": "0.3/0.3",
# Dimensionar las coordenadas a la malla de 30km.
    "format": "netcdf",
# Seleccionar el formato del archivo
    "target": "ERA5_IBE_09_2015.nc",
# por último escoger un nombre para el archivo.
})

```

- Finalmente, abrir la terminal de Python y copiar el código resultado , Al cabo de un rato, el archivo "ERA5\_IBE\_09\_2015.nc" estará en la carpeta de Python.

```

C:\Python34\python.exe
...
"class": "ea",
"dataset": "era5",
"date": "2015-03-01/to/2015-03-31",
"expver": "1",
"levtype": "sfc",
"param": "235.128",
"stream": "oper",
"time": "12:00:00",
"type": "an",
...
# Hasta aquí el código propuesto por el catálogo
"grid": "0.3/0.3",
...
# añadimos esto porque los datos tienen una resolución de 30km
"area": "44.8638/-11.0231/33.9863/4.7983",
...
# seleccionamos las coordenadas latitud y longitud N/W/E/S
"grid": "0.3/0.3",
...
# con esto dimensionamos la separación entre coordenadas
"format": "netcdf",
...
# seleccionamos el formato del archivo
"target": "ERA5_IBE_09_2015.nc",
...
# por último le damos un nombre con el mismo formato
... })
2017-12-10 15:11:27 ECMWF API python library 1.5.0
2017-12-10 15:11:27 ECMWF API at https://api.ecmwf.int/v1
2017-12-10 15:11:27 Welcome Khalid Aabouch
2017-12-10 15:11:28 In case of problems, please check https://software.ecmwf.int/wiki/display/WEBAPI/Troubleshooting+or+contact+calldesk@ecmwf.int
2017-12-10 15:11:28 Request submitted
2017-12-10 15:11:28 Request id: 5a2d409c8806adbdee888161
2017-12-10 15:11:28 Request is queued
  
```



Herramientas de imagen Python34

Inicio Compartir Vista Administrar

Este equipo > Windows (C:) > Python34 >

Buscar en Python34

Nombre	Fecha de modifica...	Tipo	Tamaño
ecmwfapi	10/12/2017 12:40	Carpeta de archivos	
ERA5_old	13/11/2017 18:29	Carpeta de archivos	
include	28/10/2017 16:26	Carpeta de archivos	
Lib	28/10/2017 19:22	Carpeta de archivos	
libs	28/10/2017 16:26	Carpeta de archivos	
Scripts	28/10/2017 16:26	Carpeta de archivos	
tcl	28/10/2017 16:26	Carpeta de archivos	
Tools	28/10/2017 16:26	Carpeta de archivos	
ERA5_01_2015_v2.nc	23/11/2017 18:50	Archivo NC	148 KB
ERA5_20150101	26/11/2017 19:24	Python File	1 KB
ERA5_BRASIL_09_2015.nc	03/12/2017 19:15	Archivo NC	3.420 KB
ERA5_IBE_09_2015.nc	10/12/2017 15:11	Archivo NC	125 KB
ERA5_template	13/11/2017 18:22	Documento de tex...	1 KB
LICENSE	20/12/2015 19:54	Documento de tex...	31 KB
NEWS	20/12/2015 18:03	Documento de tex...	409 KB
python	20/12/2015 19:21	Aplicación	40 KB
pythonw	20/12/2015 19:21	Aplicación	41 KB
README	20/12/2015 18:03	Documento de tex...	7 KB

20 elementos 1 elemento seleccionado 125 KB

# ANEXO II: VALORES ESTADÍSTICOS

En el capítulo 5.5 se han mostrado en una tabla con el estudio estadístico de para la validación de los datos obtenidos de los diferentes productos. En este anexo se muestran las tablas con los años 2013 - 2015.

## 2013

ESTACIONES	SM LR SMOS					SM HR ERA5				SM HR MODIS			
	N	R	RMSE	uRMSE	BIAS	R	RMSE	uRMSE	BIAS	R	RMSE	uRMSE	BIAS
	<b>(S) SECANO</b>					<b>(S) SECANO</b>				<b>(S) SECANO</b>			
INVIERNO	48	0,7865	0,0401	0,0569	0,0403	0,7610	0,0416	0,0598	0,0429	0,7594	0,0445	0,0582	0,0376
PRIMAVERA	52	0,8670	0,0704	0,0445	0,0545	0,9124	0,0825	0,0300	0,0768	0,8775	0,0612	0,0393	0,0469
VERANO	46	<b>0,3196</b>	0,0659	0,0385	0,0535	<b>0,3938</b>	0,0624	0,0330	0,0529	<b>0,3741</b>	0,0624	0,0340	0,0524
OTOÑO	47	0,7276	0,0645	0,0511	0,0393	0,7835	0,0584	0,0380	0,0444	0,7533	0,0560	0,0426	0,0363
<b>2013</b>	<b>193</b>	<b>0,8351</b>	<b>0,0647</b>	<b>0,0444</b>	<b>0,0470</b>	<b>0,8482</b>	<b>0,0652</b>	<b>0,0370</b>	<b>0,0536</b>	<b>0,8544</b>	<b>0,0596</b>	<b>0,0408</b>	<b>0,0435</b>
	<b>(V) VIÑEDOS</b>					<b>(V) VIÑEDOS</b>				<b>(V) VIÑEDOS</b>			
INVIERNO	48	0,7704	0,0431	0,0778	-0,0648	0,7316	0,0488	0,0819	-0,0658	0,7439	0,0480	0,0859	-0,0713
PRIMAVERA	50	0,8704	0,0584	0,0581	-0,0055	0,6412	0,0535	0,0378	0,0378	0,8317	0,0609	0,0605	-0,0065
VERANO	49	<b>0,1769</b>	0,0426	0,0391	0,0169	<b>0,2264</b>	0,0399	0,0359	0,0173	<b>0,2047</b>	0,0388	0,0351	0,0164
OTOÑO	49	0,7883	0,0685	0,0513	-0,0454	0,8035	0,0546	0,0430	-0,0337	0,8332	0,0629	0,0422	-0,0467
<b>2013</b>	<b>196</b>	<b>0,7758</b>	<b>0,0631</b>	<b>0,0582</b>	<b>-0,0244</b>	<b>0,7017</b>	<b>0,0551</b>	<b>0,0548</b>	<b>-0,0049</b>	<b>0,7791</b>	<b>0,0643</b>	<b>0,0585</b>	<b>-0,0267</b>
	<b>(B) BARBECHO</b>					<b>(B) BARBECHO</b>				<b>(B) BARBECHO</b>			
INVIERNO	48	0,7744	0,0409	0,0477	-0,0245	0,6047	0,0491	0,0507	-0,0128	0,7181	0,0469	0,0495	-0,0157
PRIMAVERA	48	0,8531	0,0547	0,0545	-0,0037	0,7544	0,0468	0,0304	0,0355	0,8650	0,0454	0,0454	0,0004
VERANO	42	0,6286	0,0409	0,0349	0,0214	0,7435	0,0303	0,0234	0,0191	0,6978	0,0315	0,0248	0,0194
OTOÑO	45	0,8172	0,0510	0,0485	-0,0157	0,8498	0,0360	0,0359	-0,0031	0,8130	0,0418	0,0396	-0,0133
<b>2013</b>	<b>183</b>	<b>0,8625</b>	<b>0,0490</b>	<b>0,0486</b>	<b>-0,0063</b>	<b>0,8594</b>	<b>0,0387</b>	<b>0,0369</b>	<b>0,0117</b>	<b>0,8646</b>	<b>0,0425</b>	<b>0,0424</b>	<b>-0,0019</b>

Dado que los datos de la misión PROBA-V solo están disponibles desde el 2014, para estos años no están incluidos los productos de alta resolución a 300m.

## 2014 PRODUCTOS MODIS

ESTACIONES	SM LR SMOS					SM HR MODIS				SM UHR MODIS			
	N	R	RMSE	uRMSE	BIAS	R	RMSE	uRMSE	BIAS	R	RMSE	uRMSE	BIAS
	<b>(S) SECANO</b>					<b>(S) SECANO</b>				<b>(S) SECANO</b>			
INVIERNO	19	0,8945	0,0477	0,0519	0,0203	0,8731	0,0495	0,0602	0,0342	0,8695	0,0511	0,0606	0,0326
PRIMAVERA	23	0,5551	0,0646	0,0484	0,0429	0,7439	0,0663	0,0189	0,0636	0,7469	0,0685	0,0373	0,0575
VERANO	33	<b>0,1977</b>	0,0469	0,0358	0,0302	<b>0,1412</b>	0,0494	0,0307	0,0388	<b>0,1476</b>	0,0500	0,0301	0,0400
OTOÑO	18	0,7062	0,0534	0,0511	0,0154	0,7143	0,0548	0,0459	0,0299	0,7363	0,0545	0,0475	0,0267
<b>2014</b>	<b>93</b>	<b>0,8229</b>	<b>0,0543</b>	<b>0,0474</b>	<b>0,0265</b>	<b>0,8358</b>	<b>0,0572</b>	<b>0,0386</b>	<b>0,0423</b>	<b>0,8335</b>	<b>0,0584</b>	<b>0,0422</b>	<b>0,0404</b>
	<b>(V) VIÑEDOS</b>					<b>(V) VIÑEDOS</b>				<b>(V) VIÑEDOS</b>			
INVIERNO	20	0,9221	0,0454	0,0817	-0,0679	0,8835	0,0509	0,0795	-0,0610	0,8696	0,0454	0,0714	-0,0551
PRIMAVERA	24	0,6961	0,0541	0,0541	-0,0017	0,6156	0,0339	0,0293	0,0171	0,6820	0,0317	0,0268	0,0171
VERANO	31	0,5570	0,0380	0,0372	0,0081	0,4932	0,0330	0,0287	0,0163	0,4642	0,0325	0,0287	0,0151
OTOÑO	18	0,6343	0,0903	0,0541	-0,0723	0,8808	0,0652	0,0413	-0,0505	0,8001	0,0711	0,0444	-0,0555
<b>2014</b>	<b>93</b>	<b>0,8338</b>	<b>0,0692</b>	<b>0,0606</b>	<b>-0,0335</b>	<b>0,8936</b>	<b>0,0533</b>	<b>0,0517</b>	<b>-0,0131</b>	<b>0,8671</b>	<b>0,0521</b>	<b>0,0503</b>	<b>-0,0136</b>
	<b>(B) BARBECHO</b>					<b>(B) BARBECHO</b>				<b>(B) BARBECHO</b>			
INVIERNO	19	0,7294	0,0585	0,0652	-0,0289	0,6631	0,0556	0,0559	0,0054	0,6752	0,0545	0,0548	0,0059
PRIMAVERA	22	0,6567	0,0691	0,0529	0,0445	0,7174	0,0736	0,0242	0,0695	0,6769	0,0760	0,0465	0,0601
VERANO	32	0,5324	0,0668	0,0342	0,0574	<b>0,3235</b>	0,0717	0,0292	0,0654	<b>0,2184</b>	0,0720	0,0293	0,0657
OTOÑO	15	0,8355	0,0463	0,0463	0,0000	0,9349	0,0363	0,0284	0,0226	0,9255	0,0372	0,0307	0,0210
<b>2014</b>	<b>88</b>	<b>0,8730</b>	<b>0,0623</b>	<b>0,0597</b>	<b>0,0176</b>	<b>0,8436</b>	<b>0,0642</b>	<b>0,0446</b>	<b>0,0462</b>	<b>0,8357</b>	<b>0,0646</b>	<b>0,0481</b>	<b>0,0432</b>

## 2015 PRODUCTOS MODIS

ESTACIONES	SM LR SMOS					SM HR MODIS				SM UHR MODIS			
	N	R	RMSE	uRMSE	BIAS	R	RMSE	uRMSE	BIAS	R	RMSE	uRMSE	BIAS
	<b>(S) SECANO</b>					<b>(S) SECANO</b>				<b>(S) SECANO</b>			
INVIERNO	45	0,7259	0,1531	0,0519	0,1511	0,8277	0,0262	0,1521	0,1498	0,8304	0,0242	0,1522	0,1503
PRIMAVERA	41	0,6366	0,1081	0,0484	0,0984	0,8940	0,1240	0,0186	0,1226	0,8867	0,1245	0,0191	0,1231
VERANO	39	0,3294	0,1314	0,0358	0,1184	0,1418	0,1387	0,0453	0,1311	0,0212	0,1405	0,0485	0,1319
OTOÑO	48	0,6541	0,1117	0,0511	0,1031	0,8564	0,1259	0,0260	0,1232	0,8329	0,1163	0,0374	0,1101
<b>2015</b>	<b>173</b>	<b>0,5115</b>	<b>0,0983</b>	<b>0,0474</b>	<b>0,0661</b>	0,6203	0,0995	0,0400	0,0824	0,6429	0,0978	0,0391	0,0820
	<b>(V) VIÑEDOS</b>					<b>(V) VIÑEDOS</b>				<b>(V) VIÑEDOS</b>			
INVIERNO	39	0,7615	0,0306	0,0550	-0,0076	0,8463	0,0321	0,0598	-0,0159	0,8258	0,0255	0,0567	-0,0143
PRIMAVERA	41	0,6333	0,0682	0,0489	-0,0102	0,6640	0,0511	0,0305	0,0259	0,6043	0,0551	0,0357	0,0223
VERANO	39	0,2504	0,0700	0,0506	0,0195	0,0366	0,0676	0,0448	0,0344	0,1589	0,0689	0,0448	0,0338
OTOÑO	48	0,4565	0,0864	0,0533	-0,0278	0,6220	0,0720	0,0345	-0,0010	0,5654	0,0757	0,0421	-0,0099
<b>2015</b>	<b>167</b>	<b>0,5170</b>	<b>0,0725</b>	<b>0,0525</b>	<b>-0,0070</b>	0,4661	0,0639	0,0451	0,0184	0,5015	0,0653	0,0461	0,0155
	<b>(B) BARBECHO</b>					<b>(B) BARBECHO</b>				<b>(B) BARBECHO</b>			
INVIERNO	30	0,6516	0,0431	0,1042	0,0949	0,6829	0,0324	0,1172	0,1126	0,6386	0,0403	0,1119	0,1044
PRIMAVERA	42	0,7932	0,1043	0,0360	0,0979	0,6497	0,1061	0,0407	0,0980	0,7994	0,1019	0,0350	0,0957
VERANO	40	0,5086	0,1011	0,0486	0,0887	0,3671	0,1000	0,0441	0,0898	0,5729	0,0975	0,0406	0,0886
OTOÑO	44	0,8627	0,0965	0,0336	0,0904	0,9172	0,1003	0,0165	0,0990	0,8610	0,0991	0,0306	0,0943
<b>2015</b>	<b>156</b>	<b>0,7661</b>	<b>0,1013</b>	<b>0,0405</b>	<b>0,0929</b>	0,6973	0,1049	0,0386	0,0975	0,7837	0,1020	0,0371	0,0950

## 2015 PRODUCTOS ERA5

ESTACIONES	SM LR SMOS					SM HR ERA5				SM UHR ERA5			
	N	R	RMSE	uRMSE	BIAS	R	RMSE	uRMSE	BIAS	R	RMSE	uRMSE	BIAS
	<b>(S) SECANO</b>					<b>(S) SECANO</b>				<b>(S) SECANO</b>			
INVIERNO	45	0,7259	0,1531	0,0519	0,1511	0,7866	0,0275	0,1429	0,1403	0,7863	0,0281	0,1425	0,1397
PRIMAVERA	41	0,6366	0,1081	0,0484	0,0984	0,7301	0,1085	0,0359	0,1024	0,7206	0,1088	0,0361	0,1026
VERANO	39	0,3294	0,1314	0,0358	0,1184	0,3090	0,1351	0,0517	0,1248	0,2902	0,1359	0,0524	0,1254
OTOÑO	48	0,6541	0,1117	0,0511	0,1031	0,6128	0,1216	0,0458	0,1127	0,6180	0,1216	0,0455	0,1127
<b>2015</b>	<b>173</b>	<b>0,5115</b>	<b>0,0983</b>	<b>0,0474</b>	<b>0,0661</b>	<b>0,5494</b>	<b>0,0970</b>	<b>0,0500</b>	<b>0,0673</b>	<b>0,5544</b>	<b>0,0969</b>	<b>0,0499</b>	<b>0,0673</b>
	<b>(V) VIÑEDOS</b>					<b>(V) VIÑEDOS</b>				<b>(V) VIÑEDOS</b>			
INVIERNO	39	0,7615	0,0306	0,0550	-0,0076	0,7874	0,0305	0,0601	-0,0161	0,7816	0,0304	0,0606	-0,0169
PRIMAVERA	41	0,6333	0,0682	0,0489	-0,0102	0,5996	0,0647	0,0462	-0,0074	0,6064	0,0663	0,0476	-0,0081
VERANO	39	0,2504	0,0700	0,0506	0,0195	0,1005	0,0667	0,0487	0,0218	0,1473	0,0678	0,0485	0,0206
OTOÑO	48	0,4565	0,0864	0,0533	-0,0278	0,3024	0,0931	0,0588	-0,0266	0,3177	0,0925	0,0583	-0,0268
<b>2015</b>	<b>167</b>	<b>0,5170</b>	<b>0,0725</b>	<b>0,0525</b>	<b>-0,0070</b>	<b>0,4722</b>	<b>0,0733</b>	<b>0,0534</b>	<b>-0,0063</b>	<b>0,4816</b>	<b>0,0738</b>	<b>0,0533</b>	<b>-0,0070</b>
	<b>(B) BARBECHO</b>					<b>(B) BARBECHO</b>				<b>(B) BARBECHO</b>			
INVIERNO	30	0,6516	0,0431	0,1042	0,0949	0,6342	0,0411	0,1114	0,1035	0,6513	0,0407	0,1110	0,1033
PRIMAVERA	42	0,7932	0,1043	0,0360	0,0979	0,7887	0,1016	0,0356	0,0952	0,7975	0,1017	0,0348	0,0956
VERANO	40	0,5086	0,1011	0,0486	0,0887	0,5718	0,0969	0,0407	0,0880	0,4924	0,0995	0,0441	0,0892
OTOÑO	44	0,8627	0,0965	0,0336	0,0904	0,8524	0,1000	0,0311	0,0950	0,8488	0,1027	0,0296	0,0983
<b>2015</b>	<b>156</b>	<b>0,7661</b>	<b>0,1013</b>	<b>0,0405</b>	<b>0,0929</b>	<b>0,7764</b>	<b>0,1019</b>	<b>0,0375</b>	<b>0,0947</b>	<b>0,7664</b>	<b>0,1032</b>	<b>0,0380</b>	<b>0,0960</b>