

Estimación del contenido de agua de la vegetación en la zona V.A.S. de validación de SMOS mediante la extensión espacial de medidas de campo con imágenes CHRIS y MODIS

Retrieving vegetation water content in the V.A.S. SMOS validation area by scaling up of field data using CHRIS and MODIS imagery

J. Cernicharo¹, F. Camacho¹, B. Martínez² y E. López-Baeza²
jesus.cernicharo@eolab.es

¹ EOLAB. Parc Científic Universitat de València. C/ Catedrático José Beltrán, 2. 46980. Paterna (Valencia)

² Departamento de Física de la Tierra y Termodinámica. Facultad de Física. Universidad de Valencia. C/ Dr. Moliner, 50. 46100. Burjassot (Valencia)

Recibido el 25 de marzo de 2010, aceptado el 07 de mayo de 2010

RESUMEN

La validación de productos de satélite requiere de la adquisición de medidas de campo que permitan generar mapas de verdad-terreno a diferentes resoluciones espaciales. Este trabajo describe un método para derivar mapas de contenido de agua de la vegetación (VWC – *Vegetation Water Content*) a media resolución, en la zona de validación Valencia Anchor Station (VAS) de productos SMOS de humedad de suelo, mediante una función de transferencia que relaciona de forma empírica medidas in-situ de la variable biofísica con sus respectivos valores de reflectividad de imágenes CHRIS/PROBA de alta resolución y MODIS/TERRA+AQUA de resolución media. La extensión espacial de las medidas de campo se desarrolla en dos etapas: (1) utilizando valores in-situ y datos CHRIS, y (2) mediante el mapa verdad-terreno obtenido a alta resolución y datos MODIS. Se propone la técnica de la envolvente convexa para evaluar la calidad de interpolación de la función de transferencia. Los resultados muestran que las combinaciones de bandas utilizadas presentan

ABSTRACT

Remote sensing derived products require the acquisition of field measurements which allow generating ground truth maps at different spatial resolutions. This work describes a method to derive vegetation water content (VWC) maps at medium resolution, obtained from SMOS products calibration area, by applying a transfer function that establishes an empirical relationship between in-situ data and reflectance values retrieved from high resolution CHRIS/PROBA and medium resolution MODIS/TERRA+AQUA imagery. The spatial extension of field measurements is developed in two steps: (1) by using in-situ values and CHRIS data, and (2) from the high resolution extended map and MODIS data. The convex hull technique has been proposed to assess the transfer function interpolation quality. Results obtained from apply the selected band combination of bands show cross validation errors (RC=0.221 kg/m² for high-resolution and RC=0.386 kg/m² for medium resolution) lower than traditional spectral indexes ones, good correlations with observed data and a high

errores de validación cruzada ($RC=0.221 \text{ kg/m}^2$ para alta resolución y $RC=0.386 \text{ kg/m}^2$ para resolución media) inferiores a los proporcionados por los tradicionales índices espectrales, una alta consistencia con los datos muestreados y una amplia capacidad de interpolación (un 70% para alta resolución y un 95% para media resolución). Los valores promedios de VWC para las diferentes clases de vegetación oscilan entre los 0.04 kg/m^2 para zonas de secano y los 0.7 kg/m^2 correspondientes a cubiertas de regadío.

PALABRAS CLAVE: Humedad de la Vegetación, Función Transferencia, SMOS, CHRIS, MODIS.

interpolation capacity (70% y 95%). VWC mean values at medium resolution range between 0.04 kg/m^2 , for non-irrigated areas, and 0.7 kg/m^2 , for irrigated crops.

KEYWORDS: VWC, Transfer function, SMOS, CHRIS, MODIS.

INTRODUCCIÓN

El contenido de agua de la vegetación (VWC, *Vegetation Water Content*), correspondiente a la masa total de agua líquida en hojas y ramas por unidad de superficie (kg/m^2), es un parámetro de gran importancia en la monitorización del ecosistema terrestre y su ciclo hidrológico. Provee una información de gran utilidad a nivel agrícola y forestal, permitiendo valorar condiciones de estrés hídrico de cara a decisiones de irrigación (Peñuelas *et al.*, 1993; Tucker, 1980) además de servir como indicador para la determinación de susceptibilidades de ignición (Pyne *et al.*, 1996). El contenido de agua de la vegetación es además uno de los parámetros imprescindibles para la estimación con éxito de la humedad del suelo a partir de los sensores remotos de microondas (Jackson *et al.*, 1982, 2004). Esta sensibilidad de la humedad del suelo al contenido de agua de la vegetación puede apreciarse observando la aproximación establecida en el modelo tau-omega (Mo *et al.*, 1992), de amplia difusión en la comunidad de microondas, donde este parámetro aparece en dos de los tres términos para la ecuación de la temperatura de brillo (Njoku *et al.*, 2003). Una desviación de 1 kg/m^2 en la estimación del VWC puede ocasionar de acuerdo a Bindlish and Barros (2002) errores del 10% en el cálculo de la humedad volumétrica del suelo, alcanzando tasas todavía mayores para suelos con alto contenido de humedad.

El presente estudio ha sido desarrollado en el marco del proyecto MIDAS-5 (Medidas radiométricas en microondas y desarrollo de algoritmos para la misión SMOS), financiado por el Programa Nacional del Espacio con el objetivo de desarrollar nuevos al-

goritmos para la validación de los productos de la misión SMOS (*Soil Moisture and Ocean Salinity*), centrada en el estudio de la humedad de la superficie terrestre y la salinidad de los océanos, de cara a mejorar los modelos actuales de predicción atmosférica, oceánica e hidrológica. El instrumento principal, llamado MIRAS (*Microwave Imaging Radiometer with Aperture Synthesis*), consiste en un radiómetro interferométrico de apertura sintética, compuesto por 72 receptores que monitorizan la radiación terrestre emitida en la banda L de microondas del espectro electromagnético. Para una estimación precisa de la humedad del suelo se hace por tanto necesaria, atendiendo a las consideraciones expuestas anteriormente, la caracterización del contenido de agua de la vegetación, tarea asignada a EOLAB (*Earth Observation Laboratory*) dentro del proyecto MIDAS-5.

De acuerdo a este objetivo, presentamos una metodología de extensión espacial de datos de campo a partir de imágenes de satélite, con el fin de obtener un mapa de media resolución correspondiente al VWC en el área MIDAS ($125 \text{ km} \times 125 \text{ km}$) de validación de modelos de humedad de suelo SMOS, cuya área de referencia corresponde con la estación VAS (*Valencia Anchor Station*) (<http://www.uv.es/anchors/indexVAS.html>) localizada en la meseta de Utiel-Requena. Tradicionalmente, la derivación de parámetros de contenido de agua se ha llevado a cabo mediante el uso de modelos lineales de regresión que relacionan las medidas de campo con índices espectrales obtenidos a partir de combinaciones simples de bandas (Chen *et al.*, 2005; Cheng *et al.*, 2008; Jackson *et al.*, 2004; Yilmaz *et al.*, 2008). La metodología planteada en este

estudio está basada en las directrices de validación para productos biofísicos establecidas por el subcomité LPV (*Land Product Validation*) del CEOS WGCV (*Committee Earth Observing Satellites' Working Group on Calibration and Validation*), consistentes en la calibración de funciones de transferencia (FTs) empíricas para establecer relaciones entre los datos obtenidos sobre el terreno y los valores de reflectividad asociados a diferentes bandas espectrales adquiridas por satélites de alta resolución (Morissette *et al.*, 2006). Diferentes modelos de regresión han sido estudiados para minimizar el error sobre las estimaciones, ofreciendo el método de mínimos cuadrados (OLS, *Ordinary Least Squares*) con el menor error cuadrático medio (Cohen *et al.*, 2003). Este modelo, en combinación con el algoritmo IRLS (*Iteratively Re-weighted Least Squares*), previamente validado en la zona de validación de Barrax (Martínez *et al.*, 2009), se ha seleccionado para la implementación de las funciones de transferencia que permiten derivar la variable objeto de estudio a partir de medidas de campo y datos de satélite.

METODOLOGÍA

Visión general

La metodología de extensión espacial propuesta está constituida, tal como indica la figura 1, por dos

etapas que emplean un procedimiento análogo a dos escalas de trabajo.

En primer lugar, es necesario llevar a cabo una campaña de campo con el fin de muestrear un conjunto significativo de datos sobre el terreno, caracterizados a una resolución de 20 m (ESU, *Elementary Sampling Unit*). La relación de los mismos con las reflectividades de la imagen CHRIS/PROBA (17 m) permite obtener una función de transferencia (FT) a partir de la cual realizar una extensión espacial de los datos de campo a toda la imagen, obteniendo un mapa de VWC a alta resolución espacial.

Posteriormente, este mapa se remuestrea a la resolución espacial de las imágenes MODIS (500 m) seleccionadas, para efectuar una selección de puntos homogéneamente distribuidos que serán utilizados como datos de verdad terreno para realizar la extensión espacial de la información de campo con MODIS.

La aplicación de una nueva FT a partir de las reflectividades MODIS permite obtener un mapa de contenido de agua a partir de datos in-situ a una resolución de 500 metros. En ambas etapas se generan mapas de calidad mediante la técnica de la envolvente convexa o *convex hull*, con el objetivo de caracterizar la representatividad de la función de transferencia de acuerdo a las combinaciones de bandas seleccionadas (Barber *et al.*, 1986).

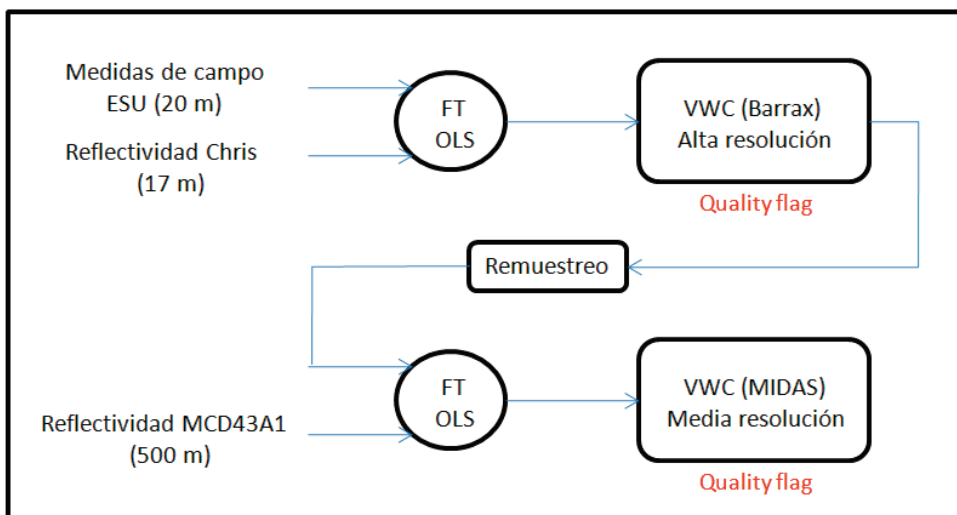


Figura 1. Metodología propuesta para la extensión espacial de las medidas de campo

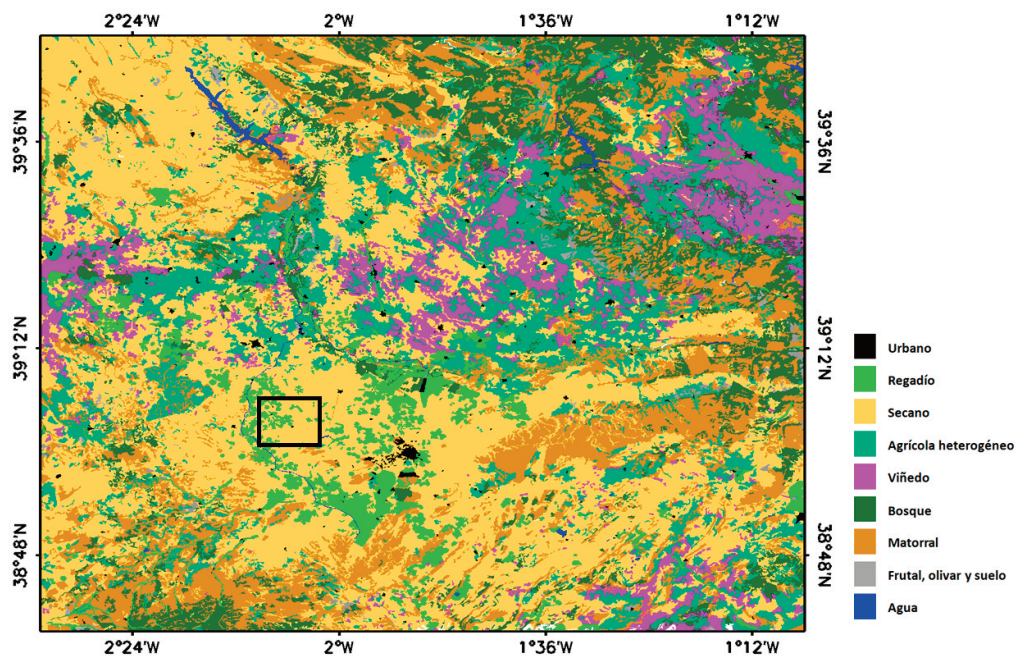


Figura 2. Distribución por clases en la zona MIDAS de validación (125 km x 125 km) a partir de la clasificación CLC-CORINE 2000 a 100 metros. El área reducida seleccionada corresponde con la zona de medidas en Barrax (10 km x 10 km)

Área de estudio

La figura 2 muestra la clasificación de usos de suelo de la zona de estudio MIDAS, que se extiende sobre un área de 125 km x 125 km, incluyendo la región oriental de Castilla-La Mancha y la meseta de Utiel-Requena en la Comunidad Valenciana, en la zona de estudio se localiza la estación de referencia VAS (*Valencia Anchor Station*) (<http://www.uv.es/anchors/Estacion.html>) para la validación de productos SMOS equipada con instrumentos para la caracterización de parámetros meteorológicos, radiativos y de humedad del suelo.

La zona presenta una amplia variedad de cubiertas vegetales: secano (40%), matorral (18.6%), agricultura heterogénea (16.6%), bosque (11%), viñedos (7.5%) y regadío (5.3%); distribuyéndose las cubiertas heterogéneas y de vid a lo largo de la mitad septentrional del área de estudio y las de regadío en la mitad restante.

Con el objetivo de cubrir todos los rangos de reflectividad y valores de VWC, la campaña de medidas realizada por EOLAB se ha llevado a cabo en una zona test que presenta toda la variabilidad de valores de VWC existente en la zona, pero que sin embargo no presenta cubiertas de vegetación natural (matorral y forestal) que, por otro lado, presentan una caracterización en el campo mucho más com-

plicada. Esta zona se extiende sobre un área de 5 km x 5 km (39°3'N, 2°5'W) centrada en la finca experimental de 'Las Tias' de la Diputación de Albacete, localizada en el término municipal de Barrax y a solo 28 km de Albacete capital. Presenta una morfología sin relieves con presencia de unidades agrícolas extensas y uniformes, características que la convierten en lugar idóneo para la validación de instrumentos de teledetección y productos derivados.

Los cultivos dominantes, detallados de forma precisa en la figura 3, incluyen cultivos de secano (cereales de invierno y barbecho), agricultura de regadío (maíz, cebada, girasol, alfalfa, cebolla, ajo, patata), viñedos y frutales.

Desde que fuera seleccionada en 1991 como área de estudio dentro del proyecto EFEDA (*European International Project on Climatic and Hydrological Interactions between Vegetation, Atmosphere and Land Surface, Field Experiment in Desertification Threatened Areas*), han sido numerosas las campañas realizadas en el área experimental de Barrax en el marco de diferentes estudios financiados por la ESA, tal es el caso de los campañas DAISEX (*Digital Airborne Imaging Spectrometer Experiment*) en 1998, 1999 y 2003, SPARC (*Spectra Barrax Campaign*), 2003 y 2004, y SEN3EXP (*Sentinel-3 Experiment*), 2009.

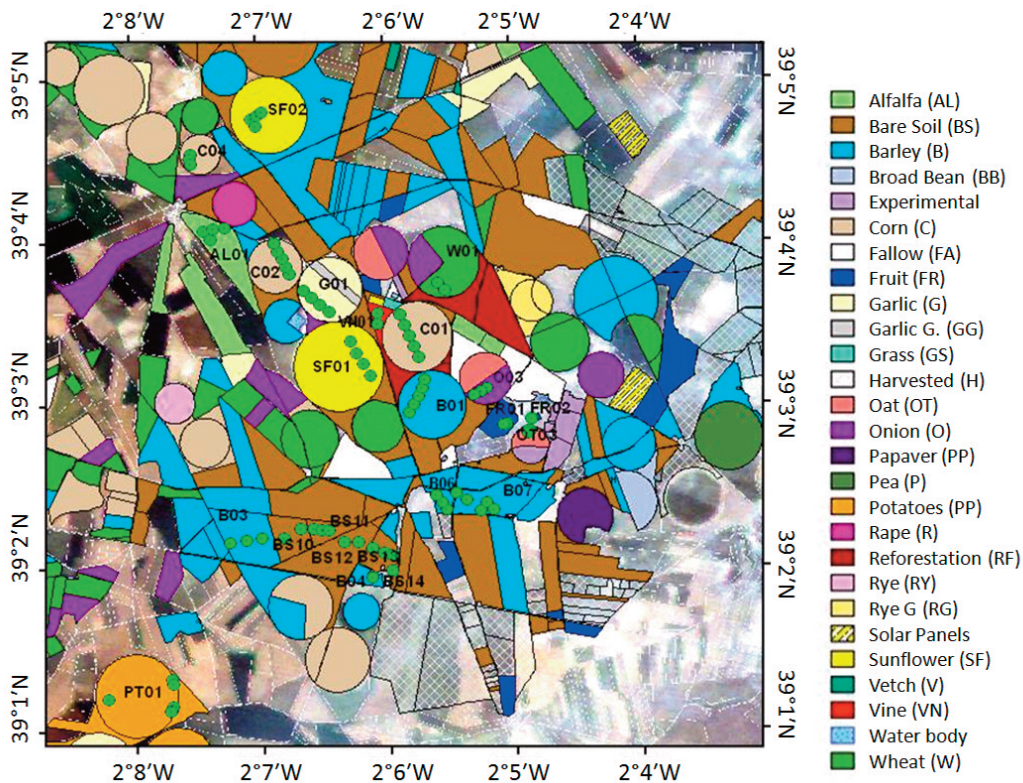


Figura 3. Distribución por clases en la zona de medidas de Barrax y localización de las Unidades Elementales de Medida (ESU)

Trabajo de campo

La campaña de campo se desarrolló entre el 20 y el 24 de Junio de 2009, y se enmarcó dentro de la campaña SEN3EXP, financiada por la Agencia Espacial Europea, con el fin de obtener un conjunto de datos que permitan simular los instrumentos que equiparán al satélite Sentinel-3, desarrollado y operado en el marco del proyecto GMES (*Global Monitoring for Environment and Security*). Estos datos, compuestos por las medidas llevadas a cabo sobre el terreno además de las adquiridas desde sensores hiperespectrales aerotransportados y desde sensores espaciales (MERIS, AASTR y CHRIS), serán utilizados con el objetivo de diseñar y evaluar nuevos algoritmos para el segmento de proceso de datos en tierra.

Con el objetivo de asegurar una representación fiable de la variabilidad existente se aplicó un procedimiento de muestreo aleatorio estratificado (Fassnacht et al., 1997; Liang, 2004) considerando preferentemente campos con tamaño de píxel supe-

rior a los 300 metros (MERIS/ENVISAT). Teniendo en cuenta asimismo las experiencias derivadas de las actividades de validación en el marco del programa VALERI (<http://w3.avignon.inra.fr/valeri/>) se caracterizaron 46 Unidades Elementales de Medida (ESU, 20 m x 20 m) correspondientes a 14 parcelas y 9 clases de vegetación. Adicionalmente, se localizaron 11 unidades de suelo desnudo, que servirán posteriormente como puntos de control donde las variables de vegetación deben presentar un valor nulo.

La estrategia de muestreo ha sido evaluada mediante un procedimiento de Monte-Carlo relacionando la frecuencia acumulada de la distribución de NDVI de las ESU con patrones de muestreo aleatoriamente distribuidos por la imagen CHRIS. El resultado obtenido en la figura 4 muestra una distribución equidistante con los valores máximos y mínimos de las distribuciones acumuladas, de forma que podemos garantizar que el muestreo realizado es adecuado y presenta un leve sesgo hacia valores altos de vegetación únicamente para aquellas ESUs con valores de NDVI superior a 0.5

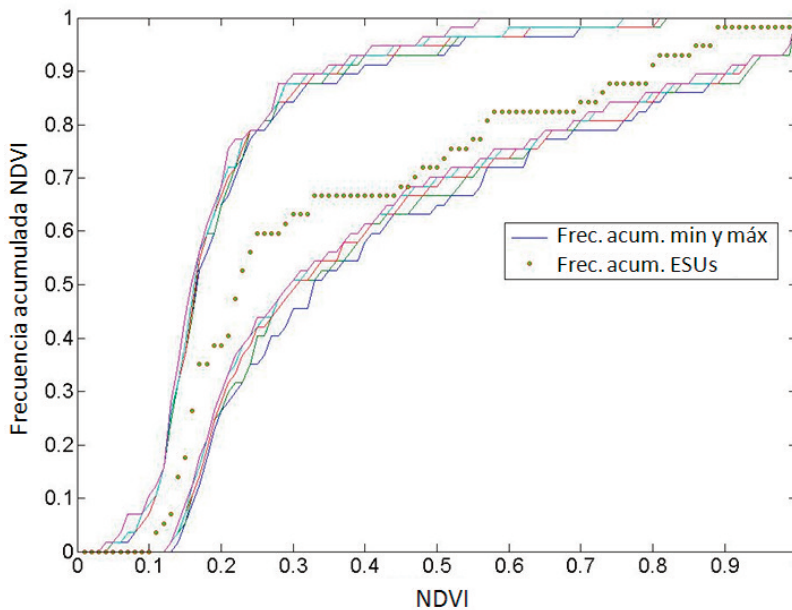


Figura 4. Comparativa entre las distribuciones de NDVI correspondientes a las ESU y las correspondientes a patrones aleatoriamente distribuidos

La caracterización in-situ de la vegetación llevada a cabo por EOLAB incluyó el muestreo de las siguientes variables:

- LAI (*Leaf Area Index*): superficie foliar fotosintéticamente activa.
- FAPAR (*Fraction of Absorbed Photosynthetically Active Radiation*): fracción de radiación fotosintéticamente activa ($0.4\mu\text{m} - 0.7\mu\text{m}$) absorbida por la cubierta.
- FCOVER (*Fraction of green Vegetation Cover*): proporción de suelo cubierto por la vegetación fotosintéticamente activa.
- Peso de hoja fresca (FW, *Fresh Weight*), peso de hoja seca (DW, *Dry Weight*) y superficie de hoja (A).

Por su parte, otros grupos participantes en la campaña SEN3EXP, realizaron un muestreo paralelo caracterizando reflectividad, transmisividad, contenido de clorofila, biomasa, temperatura radiométrica, irradiancia directa y difusa y componentes atmosféricos.

Para la derivación del LAI, FAPAR y FCOVER se ha utilizado principalmente la técnica indirecta no destructiva de la fotografía digital hemisférica (12-15 fotografías por cada ESU), basada en la medida de la fracción de huecos de la cubierta (*gap fraction*) a partir de una lente angular u ojo de pez que proyecta las coordenadas angulares de un objeto de tres

dimensiones en un plano (Martínez *et al.*, 2006). El procesamiento de las imágenes ha sido llevado a cabo con el software CAN-EYE desarrollado por INRA (*Institut National de la Recherche Agronomique*). A partir de este método se han podido computar tres índices de área foliar: el LAI efectivo (LAI_{eff}) derivado a partir de la *gap fraction* en función del ángulo cenital (Welles *et al.*, 1991), el LAI efectivo (LAI_{57eff}) derivado a partir de la *gap fraction* a 57.5° (Weiss *et al.*, 2004) y el LAI corregido a partir del índice de agrupamiento. En aquellos lugares donde ha sido imposible la utilización de la cámara hemisférica, se ha empleado el instrumento LICOR LAI-2000 PCA (LICOR, 1992) para la estimación del índice foliar efectivo, el cual se sirve de una lente ojo de pez con ángulo de visión 145° para proyectar la radiación incidente sobre cinco fotodiodos concéntricos que permiten un muestreo desde 5 ángulos cenitales diferentes.

Para la estimación del contenido de agua, las muestras recogidas en cada ESU fueron selladas en bolsas herméticas y posteriormente conducidas a las instalaciones del ITAP (Instituto Técnico Agronómico Provincial) para su pesado en fresco y en seco (tras permanecer 24 horas introducidas en un horno a 105°). Adicionalmente, se llevó a cabo la determinación de la superficie de hoja mediante clasificación de fotografía digital. A partir de estos datos,

ha sido posible derivar el contenido de agua de la vegetación (VWC), aproximándolo al contenido de agua de la cubierta, a partir del índice foliar corregido por el índice de agrupamiento y el contenido de agua de la hoja (LWC, *Leaf Water Content*).

$$LWC = \frac{FW - DW}{A} \quad [\text{kg/m}^2] \quad (1)$$

$$VWC = LAI \times LWC \quad [\text{kg/m}^2] \quad (2)$$

donde FW corresponde al peso húmedo de la hoja, DW al peso seco y A es la superficie de la misma.

La figura 5 muestra los resultados finales para VWC en las diferentes ESU, mostrando valores máximos entre 1 y 1.5 kg/m² en cubiertas correspondientes al ajo y girasol, y valores mínimos inferiores a 0.1 kg/m² en el caso de viñedos y frutales.

Imágenes de satélite

Las imágenes de satélite de alta y media resolución empleadas en el presente trabajo han sido adquiridas por los sensores CHRIS y MODIS emplazados a bordo de los satélites PROBA-1 y TERRA/AQUA respectivamente. La imagen CHRIS fue capturada el 19 de Junio de 2009, correspondiendo al modo 1 del sensor, que ofrece valores de reflectividad BRDF

a lo largo de 62 bandas espectrales entre los 406 nm y los 1003 nm, con una resolución espacial de 34 metros, una resolución espectral entre 6-20 nm y un ancho de barrido de 14 km. El procesado de la misma fue llevado a cabo por el Laboratorio de Observación de la Tierra (LEO) de la Universidad de Valencia incluyendo remuestreado a 17 metros, corrección geométrica mediante 50 puntos de control (alcanzando precisión geométrica de 13 metros) y corrección atmosférica mediante la Tool Boox de B E A M (<http://www.brockmann-consult.de/cms/web/beam>) para CHRIS/PROBA. Atendiendo a especificaciones de mínimo ruido y máxima sensibilidad, han sido seleccionadas para la FT 4 bandas espectrales correspondientes al verde (banda 13/546-556 nm), rojo (banda 25/666-677 nm), NIR1 (banda 47/835-845 nm) y NIR2 (banda 59/960-971 nm) donde las variaciones de contenidos del agua son ya perceptibles.

La imagen MODIS fue adquirida el 18 de Junio de 2009, y corresponde al producto MCD43A1 de parámetros BRDF_Albedo. El producto incluye corrección atmosférica, dispone de una resolución espacial de 500 m y ha sido derivado a partir de una ventana de adquisición de 16 días. En este trabajo hemos utilizado el parámetro isotrópico (“iso”) de la BRDF que equivale a una reflectividad normalizada a una configuración de observación nadir y de iluminación cenital. Las bandas seleccionadas en este caso corresponden al verde (banda 1/620-670

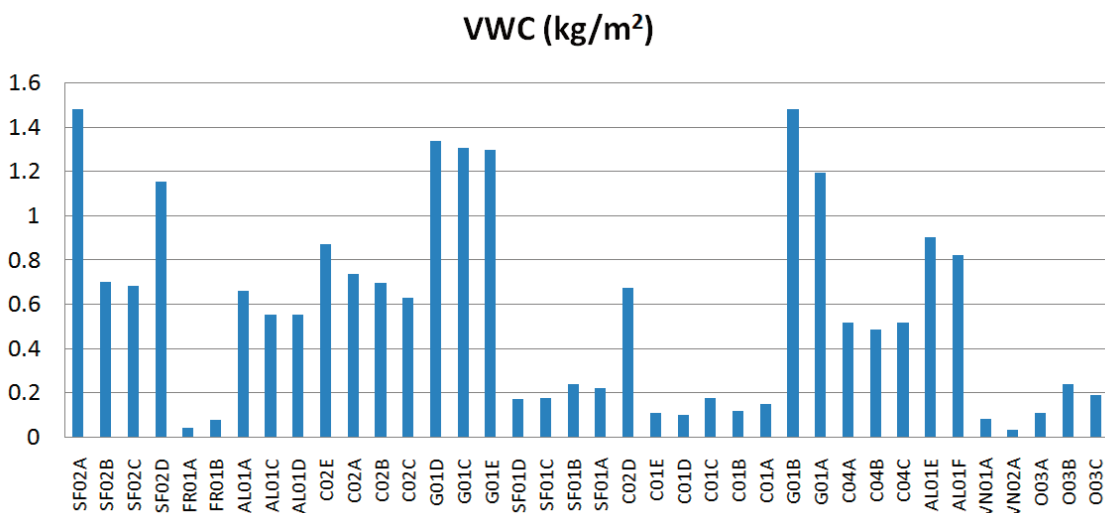


Figura 5. Contenido de agua de la vegetación (kg/m²) muestreado sobre el terreno en las diferentes ESU. AL (Alfalfa), C (Maíz), FR (Frutal), G (Ajo), SF (Girasol), O (Patata), VN (Viñedo)

nm), NIR (banda 2/841-876 nm), SWIR1 (banda 5/1230-1250 nm) y SWIR2 (banda 6/1628-1652 nm).

Función de transferencia

Los mapas de extensión espacial han sido derivados a partir de una FT que relaciona la información in-situ con el valor de las reflectividades correspondientes a las imágenes de satélite adquiridas. Este procedimiento se presenta como una técnica robusta y operativa, actualmente en uso en el contexto de validación de diferentes productos de teledetección (Chen *et al.*, 2002; Fernandes *et al.*, 2003; Martínez *et al.*, 2006; Martínez *et al.*, 2009; Weiss *et al.*, 2004) de acuerdo a las directrices metodológicas recomendadas por el comité CEOS LPV. En el presente estudio, la FT se obtiene mediante la técnica de regresión por mínimos cuadrados (OLS) multivariada utilizando un algoritmo iterativo (IRLS, *Iteratively Re-weighted Least Squares*) que asigna un factor de escala o peso a cada ESU. Este método permite minimizar la influencia de aquellas ESU que no se ajusten correctamente al comportamiento general del resto de observaciones, detectando de esta forma posibles errores en los datos. Los pesos toman valores desde cero a uno, de modo que cuanto menor sea su valor más diferirá dicha observación del comportamiento general.

El método de OLS multivariado responde a la siguiente expresión (Steel and Torrie, 1980):

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^n \beta_i (X_i) + \varepsilon \quad (3)$$

donde Y es la variable observada (variable dependiente); X_i las variables independientes consideradas; β_0 el valor medio de Y cuando X es igual a cero, también conocida como ordenada en el origen; β_i corresponde a la pendiente asociada a cada variable independiente considerada, indicando el cambio que experimenta la variable Y respecto a la variable X_i y finalmente, ε corresponde al error aleatorio asociado a cada observación del conjunto Y . Éste término de error es una variable de diagnóstico para comprobar si el modelo utilizado es válido.

Como variables independientes (X_i) se han utilizado los valores de reflectividad en superficie, extraídos de las imágenes de satélite para aquellos píxeles localizados sobre las ESUs. Las bandas utilizadas corresponden a las mencionadas anterior-

mente, además del índice de vegetación NDVI en el caso de la imagen CHRIS, así como los índices NDWI (descripción) y SIWSI (descripción) en el caso de la imagen MODIS. Se han calculado las FTs para todas las combinaciones de bandas seleccionadas, repitiendo el proceso para otras variables que no serán mostradas en el presente trabajo: LAI, FAPAR, FCOVER y contenido de humedad del combustible (FMC, *Fuel Moisture Content*).

La elección de la función de transferencia se realiza en base a tres criterios: (i) menor error cuadrático medio de la regresión con pesos (RW, *Weighted RMSE*), (ii) menor error de validación cruzada (RC, *Cross-validation RMSE*) y (iii) menor número de ESUs con pesos menores de 0.7. Análisis previos han demostrado que aquellas ESUs que presentaban pesos inferiores a 0.7 correspondían principalmente a medidas cerca del borde de los campos, errores de georeferenciación en cubiertas heterogéneas o errores experimentales. El RW proporciona una herramienta de análisis de dispersión de los valores estimados respecto a los observados, es decir el error medio que se comete en la estimación. Sin embargo, este error sólo evalúa la función con los datos in-situ, de modo que para valorar la función en otras localizaciones donde no se ha medido deben utilizarse otras herramientas, como el error de validación cruzada. El RC, por su parte, se ha calculado a partir del método *leaving-one-out* (Cohen *et al.*, 2003). Este método obtiene tantos modelos de regresión como observaciones presenta el conjunto de datos, eliminando en cada caso un dato del conjunto n valores para predecir su valor a partir del modelo ajustado a las $n-1$ observaciones restantes. De esta forma, es posible establecer la media de las diferencias al cuadrado entre el valor observado y el predicho, de modo que cuanto más se aproxime el valor estimado al observado menor será el RC y por tanto, mejor será el modelo considerado. El error RC proporciona un valor más realista y menos sesgado que el RW, siendo un indicador más preciso para evaluar la capacidad del modelo elegido para estimar los parámetros de interés.

Control de calidad

Para caracterizar la representatividad de la función de transferencia se ha desarrollado un método de evaluación a partir del conocido como *convex-hull* o envolvente convexa (Barber *et al.*, 1986). Este método ha demostrado su utilidad en el campo de la teledetección en aplicaciones relacionadas con la

normalización de espectros, definición de regiones de vegetación en procesos de clasificación y búsquedas de píxeles dentro de una imagen (Ifarraguerri and Chang, 1999; García-Haro *et al.*, 2005). Dado un conjunto S de datos, su envolvente convexa es el polígono convexo más pequeño que incluye a todos los puntos de S. Para ello, en primer lugar, asociaremos un determinado conjunto de píxeles a diferentes conjuntos calculando la envolvente para cada una. El resto de píxeles de la imagen se clasificarán dentro de un determinado conjunto si al representarlos se incluyen dentro de la región convexa definida para el mismo. Mediante este método estaremos en disposición de obtener un mapa indicador de calidad, computado sobre las reflectividades de la combinación de bandas seleccionada, que podrá tomar 3 valores de acuerdo a la siguiente interpretación:

- Píxeles comprendidos dentro de la envolvente convexa estricta: se computa la envolvente convexa comparando las reflectividades de la función de transferencia con las correspondientes a las ESU. Estos píxeles podrán ser considerados como bien representados por el muestreo de campo de manera que, al aplicar la función de transferencia, el grado de confianza de los resultados será muy alto, presentando la FT un carácter interpolador.
- Píxeles comprendidos dentro de la envolvente convexa relajada: la envolvente convexa se calcula comparando las reflectividades de la FT ($\pm 5\%$ en valor relativo) con las propias a las

ESUs. Para estos píxeles, el grado de confianza de la FT será alto, pero cercano a la extrapolación.

- Píxeles fuera de la envolvente convexa: para estos puntos la función de transferencia tendrá un carácter totalmente extrapolador de modo que los resultados tendrán un grado de fiabilidad menor.

RESULTADOS

El estudio llevado a cabo sobre la aplicación de la FT a diferentes combinaciones de bandas de la imagen CHRIS ha permitido seleccionar el conjunto de 4 bandas Green(13)-Red(25)-NIR1(47)-NIR2(59) de acuerdo a las condiciones de mínimo error cuadrático medio calculado mediante regresión con pesos (RW), mínimo error de validación (RC) y, finalmente, mínimo número de puntos con peso inferior a 0.7.

La comparativa mostrada en la figura 6, pone de manifiesto la mejoría de esta selección respecto a otras combinaciones que, a pesar de disponer de un RW bajo, presentan un error de validación y un número total de puntos descartados elevado, tal es el caso de utilizar un índice tradicional como el NDVI. La relación entre datos in-situ y los proporcionados por la FT seleccionada (figura 7), presenta una elevada correlación, superior a 0.9, y un RMSE inferior a 0.2 kg/m², mostrando una ligera sobreestimación para valores bajos atribuida a desviaciones en la realización del muestreo.

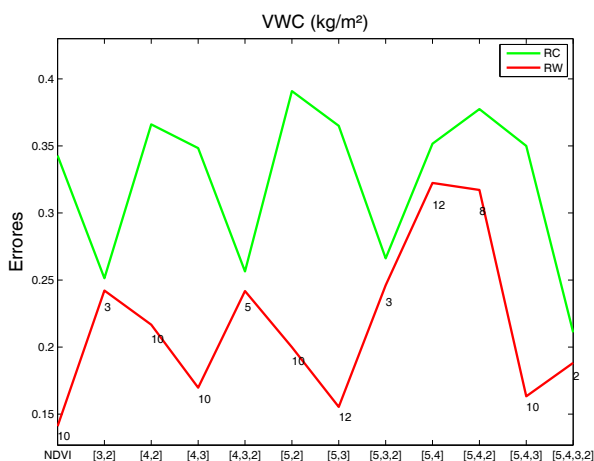


Figura 6. Test de regresión múltiple aplicado sobre diferentes combinaciones de bandas del sensor CHRIS: GREEN (2), RED (3), NIR1 (4), NIR2 (5). Los números indican el total de ESUs con peso inferior a 0.7. RW (*Weighted RMSE*), RC (*Cross-validation RMSE*)

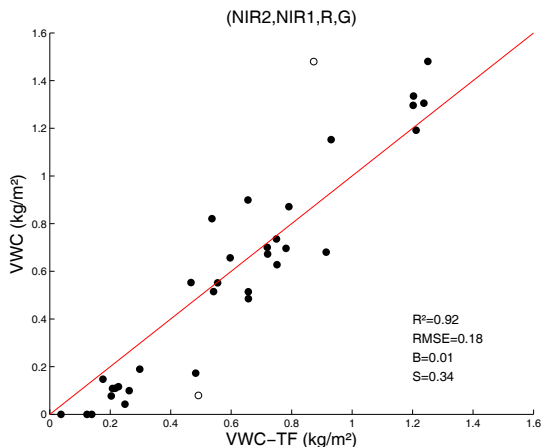


Figura 7. Relación entre las medidas in-situ y la función de transferencia con datos CHRIS. R^2 (Coeficiente de Determinación), RMSE (Root Mean Square Error), B (Bias) y S (Slope)

Aplicando los coeficientes obtenidos mediante el método de OLS (tabla 1) ha sido posible obtener una imagen de alta resolución, correspondiente al contenido de agua de la vegetación (VWC, kg/m^2), sobre la totalidad de la imagen CHRIS. Presentamos un recorte reducido de 10 km x 10 km sobre la

zona central de la imagen, obteniendo cotas máximas de $2 kg/m^2$ en las cubiertas de patata y guisante. Para evitar posibles desviaciones derivadas de la alta variabilidad del brillo y color del suelo, se ha aplicado una máscara de valor nulo para aquellos puntos donde el NDVI de la imagen es inferior a 0.18.

VWC (kg/m^2): coeficientes FT	RW	RC	Media	Desv
$1.61131 - 0.00125 * NIR2 + 0.00090 * NIR - 0.00095 * R + 0.00185 * G$	0.188	0.221	0.2612	0.4375

Tabla 1. Coeficientes correspondientes a la función de transferencia junto al error (RW, Weighted RMSE, y RC, Cross-validation RMSE), media y desviaciones estándar (Desv)

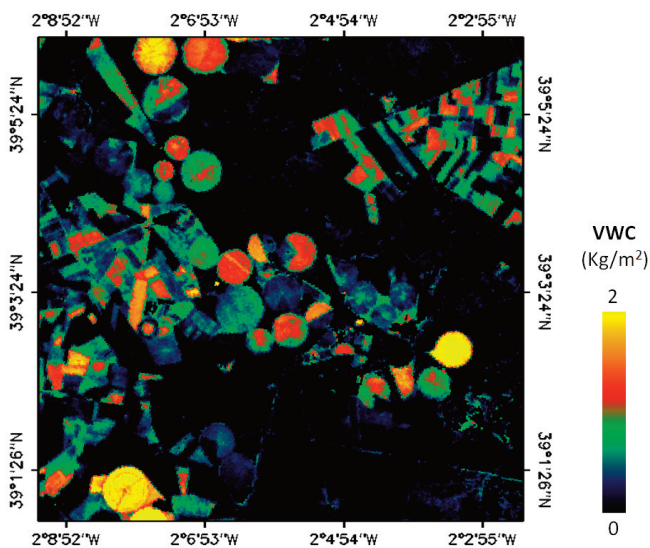


Figura 8. VWC obtenido a alta resolución para la zona de Barrax (10 km x 10 km)

El indicador de calidad o *quality flag* generado a partir del método de envolvente convexa con la combinación de bandas seleccionada (figura 9), confirma la alta representatividad de la función de transferencia, alcanzando las zonas interiores a la envolvente convexa, donde existe un elevado grado de confianza, un porcentaje del 70.2%, correspondiente a un 46.1% de píxeles en envolvente estricta, y un 24.1 % en envolvente relajada. Es posible apreciar en la imagen que éstos últimos, junto al 28.8 % de valores extrapolados restantes, están asociados principalmente a zonas de suelo, debido a la alta variabilidad que éstas presentan en el área de estudio de Barrax.

La fiabilidad del mapa de extensión espacial obtenido se ha valorado adicionalmente, mediante la comparación de las medias de los cultivos de la FT en toda la parcela, con los promedios de los valores in-situ (3-5 ESU) correspondientes a los diferentes cultivos. Los resultados, mostrados en la figura 10, y en la que se han considerado las respectivas desviaciones estándar, muestran una alta equivalencia exceptuando algunas cubiertas con valores bajos como el frutal o el girasol, debido a la ligera sobreestimación de la función de transferencia comentada anteriormente y a la mayor variabilidad existentes en campos con poca cobertura vegetal.

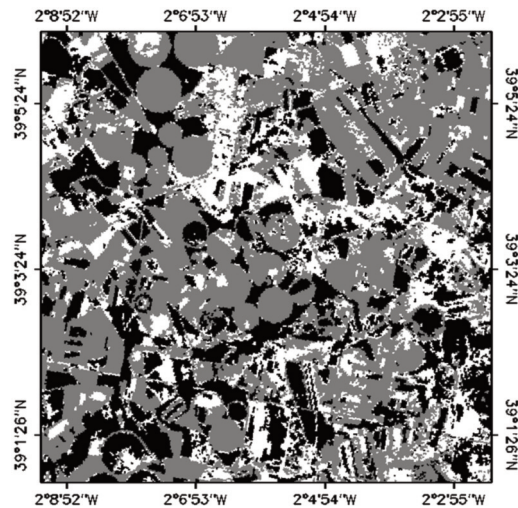


Figura 9. Test de envolvente convexa a partir de datos CHRIS. Las zonas en gris y blanco corresponden respectivamente con píxeles dentro de la envolvente convexa estricta y relajada, y negros, con píxeles donde la función está extrapolando

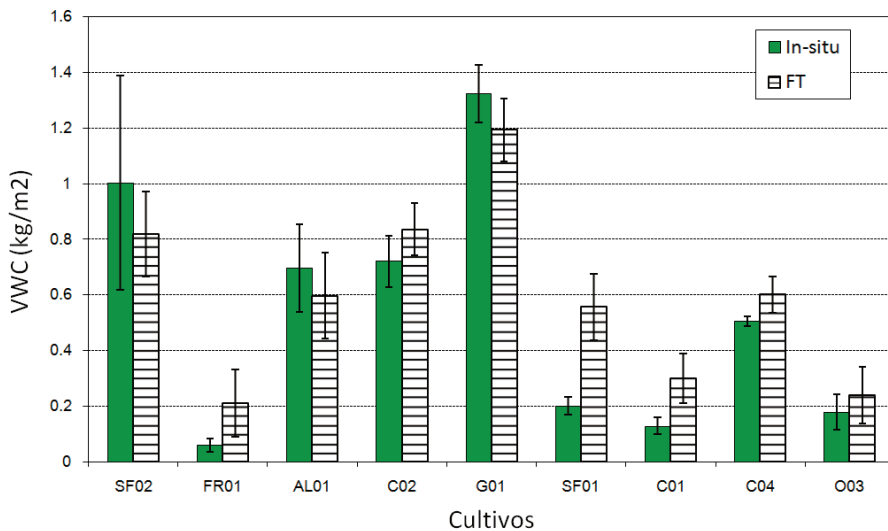


Figura 10. Correspondencia entre los promedios de los valores in-situ y la función de transferencia en toda la parcela para alta resolución. Las barras se muestran con sus correspondientes desviaciones estándar

Una vez desarrollada la extensión espacial a alta resolución, se ha continuado el proceso de reescalado a partir de las reflectividades de la imagen MODIS así como de 50 puntos de verdad terreno derivados del remuestreo del mapa anterior de FT.

El estudio de las diferentes combinaciones de bandas, de acuerdo a los condicionantes mencionados previamente, ha concluido con la selección de la combinación RED(1)-NIR(2)-SWIR1(5). En esta ocasión, apreciamos unos resultados de error y de puntos inválidos bastante similares para las diferentes combinaciones, pero en todo caso muy inferiores a los que resultarían de utilizar una combinación

simple de bandas, como son el índice NDWI o SIWSI. La comparativa entre datos in-situ y los proporcionados por la FT seleccionada (figura 12), muestra buenos resultados con un *bias* nulo y un error cuadrático medio de 0.36 kg/m². No obstante, este modelo presenta, una correlación inferior a la obtenida para alta resolución, que puede explicarse parcialmente debido al efecto PSP (*Point Spread Function*) asociado al filtro espectral del sensor, impidiendo una correspondencia exacta con el tamaño de píxel remuestreado, así como con posibles errores de geolocalización de MODIS.

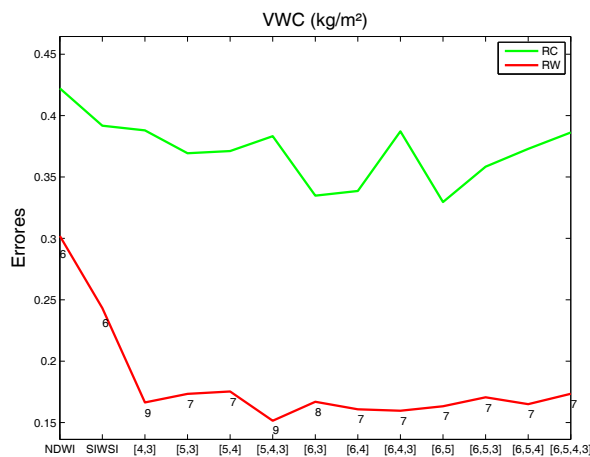


Figura 11. Test de regresión múltiple aplicado sobre diferentes combinaciones de bandas del sensor MODIS: RED (3), NIR (4), SWIR1 (5), SWIR2 (6). Los números indican el total de ESUs con peso inferior a 0.7. RW (*Weighted RMSE*), RC (*Cross-validation RMSE*)

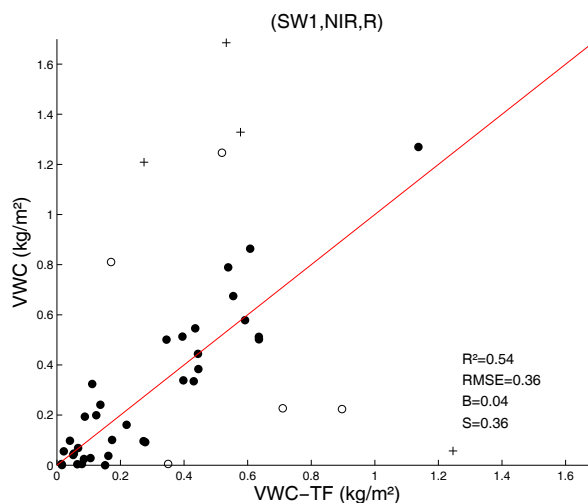


Figura 12. Relación entre las medidas in-situ y la función de transferencia con datos MODIS. R² (*Coefficiente de Determinación*), RMSE (*Root Mean Square Error*), B (*Bias*) y S (*Slope*)

Aplicando los coeficientes obtenidos mediante el método de OLS (tabla 2) se ha derivado el mapa de contenido de humedad a media resolución para la zona MIDAS de 125 km x 125 km, donde se muestran cotas máximas de 1 kg/m² en determinadas zonas de regadío.

El indicador de calidad o *quality flag* (figura 14) generado para el mapa de media resolución alcanza un porcentaje del 95.6 % de los valores dentro de la envolvente convexa (72 % para envolvente estricta y 23.6% para relajada), siendo por tanto las zonas

extrapoladas inferiores al 5%.

De esta forma, es posible afirmar que la elección de la zona de Barrax permite cubrir de forma mayoritaria toda la variabilidad presente en la zona extendida MIDAS. Los puntos extrapolados y los asociados a la envolvente relajada se corresponden, de acuerdo a la clasificación mostrada, con zonas forestales y determinadas zonas de agricultura heterogénea y matorral donde no se ha caracterizado y, por tanto es lógica la extrapolación.

VWC (kg/m ²): coeficientes FT	RW	RC	Media	Desv
$0.78581 - 2.75779 * SWIR1 + 3.84891 * NIR - 2.94423 * R$	0.173	0.386	0.274	0.18

Tabla 2. Coeficientes correspondientes a la función de transferencia junto al error (RW, *Weighted RMSE*, y RC, *Cross-validation RMSE*), media y desviaciones estándar (Desv)

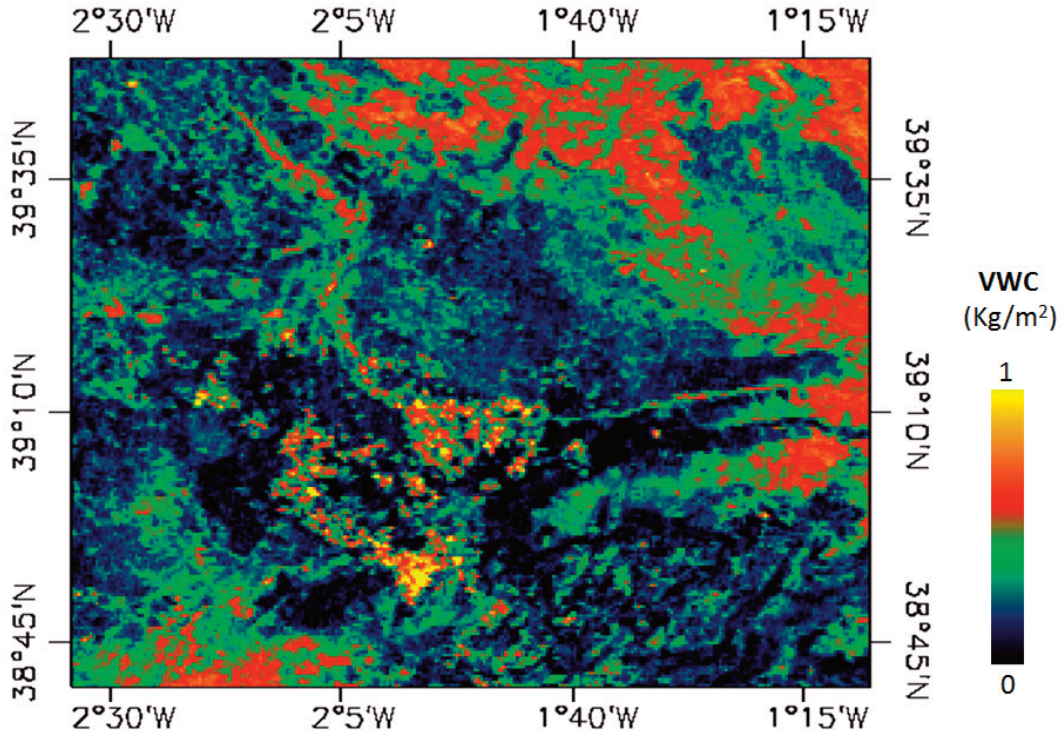


Figura13. VWC obtenido a media resolución para la zona MIDAS (125 km x 125 km)

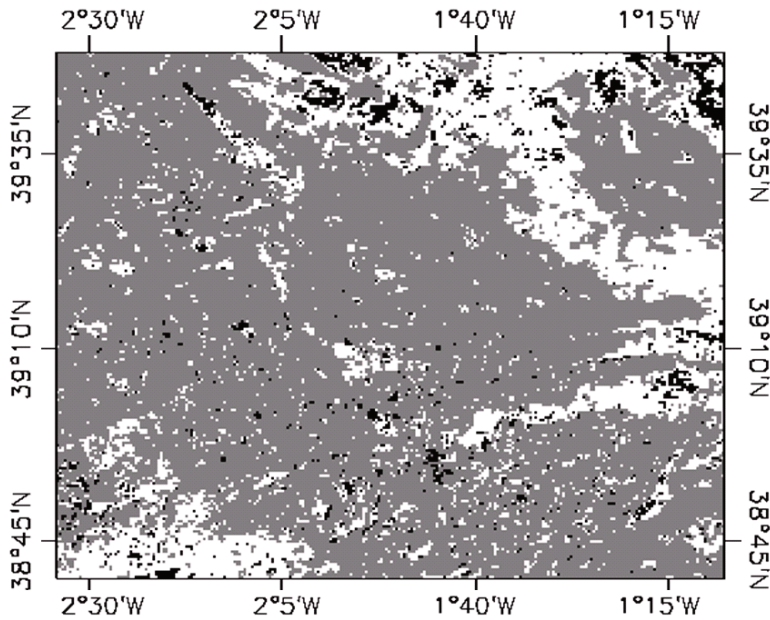


Figura 14. Test de envolvente convexa a partir de datos MODIS. Las zonas en gris y blanco corresponden respectivamente con píxeles dentro de la envolvente convexa estricta y relajada, y negros, con píxeles donde la función está extrapolando

Finalmente, los resultados medios de VWC obtenido por clases (figura 15), en base a la clasificación CLC-CORINE2000 remuestreada a 500 metros, muestran un valor mínimo de 0.15 Kg/m² para cubiertas de secano, valores intermedios entre 0.2-0.26 Kg/m² en áreas de agricultura heterogénea, viñedo,

frutal y olivar, y valores máximos de 0.40, 0.45 y 0.55 Kg/m² para el caso del matorral, agricultura de regadío y bosque respectivamente. Los cultivos de regadío ofrecen una amplia desviación estándar debido a su alta variabilidad, motivo por el cual el valor promedio es más bajo del que cabría esperar.

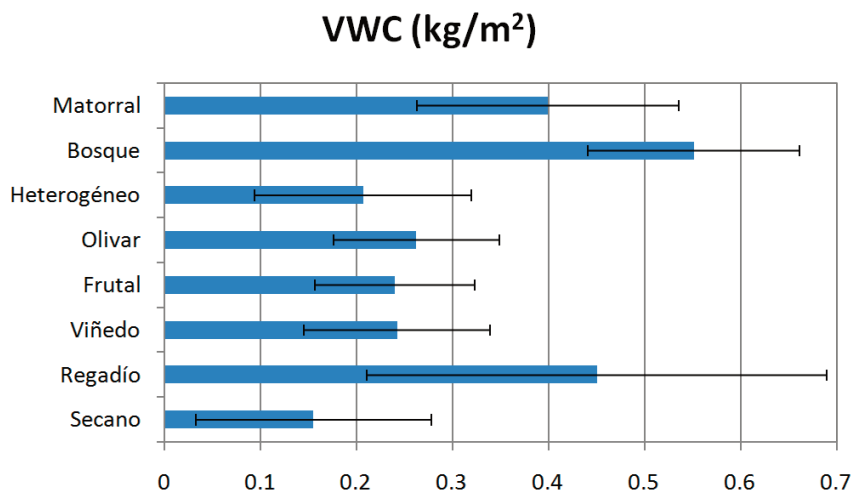


Figura 15. Valores medios de VWC (kg/m²) para el mapa de extensión espacial de acuerdo a la clasificación CLC-CORINE 2000 remuestreada a 500 metros. Las barras se muestran con su desviación estándar

CONCLUSIONES

En este artículo presentamos una metodología en dos etapas para estimar mapas del contenido de agua de la vegetación a media resolución sobre la zona extensa de validación de productos SMOS de humedad de suelo, a partir de un conjunto de datos verdad terreno e imágenes CHRIS/PROBA de alta resolución y MODIS/TERRA+AQUA de media resolución. El problema de escalado asociado con algoritmos no lineales sobre superficies heterogéneas ha sido solventado mediante la utilización de una función de transferencia determinada mediante regresión por mínimos cuadrados multivariada basada en el algoritmo IRLS.

La combinación de bandas seleccionadas en la función de transferencia tanto para CHRIS como para MODIS minimiza los errores proporcionados por el RMSE ponderado (RW) y por el error (RMSE) de validación cruzada (RC), obteniendo para este último índice valores de 0.221 kg/m² (alta resolución) y 0.386 kg/m² (media resolución). Estos valores son inferiores en todos los casos a los proporcionados en regresiones con los tradicionales índices espectrales. Las ligeras desviaciones detectadas en las funciones de transferencia se corresponden, en la primera etapa, con una sobreestimación de valores bajos atribuida principalmente a la mayor incertidumbre para valores bajos de la cubierta vegetal en el muestreo de campo y, en la segunda etapa, con el efecto de *point spread function* y posibles errores en la georeferenciación de las imágenes. La técnica de la envolvente convexa ha sido seleccionada para evaluar la calidad de los mapas derivados, obteniendo porcentajes superiores al 70 % (alta resolución) y 95 % (media resolución), confirmando de esta forma el alto carácter interpolador de las funciones de transferencia estimadas, así como el acierto de la elección de Barrax como zona representativa del área de estudio extendida MIDAS.

Los valores promedios de VWC que hemos obtenido a media resolución para las diferentes clases de vegetación oscilan entre los 0.04 kg/m² para zonas de seco y los 0.7 kg/m² correspondientes a cubiertas de regadío.

Nuestros resultados muestran que realizando un muestreo adecuado de campo, las funciones de transferencia permiten realizar, con suficiente precisión, una extensión espacial de las medidas de campo en etapas sucesivas, con el fin de obtener mapas verdad-terreno sobre zonas extensas para la validación de productos de satélite.

REFERENCIAS

- BARBER, C.B., DOBKIN C.P. & HUHDANPAA, H.T. 1986. The Quickhull Algorithm for Convex Hulls, *ACM Transactions on Mathematical software*. 22(4): 469-483.
- BINDLISH, R. & BARROS, A.P. 2002. Subpixel variability of remotely sensed oil moisture: An inter-comparison study of SAR and ESTAR. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 40(2): 326-337.
- COHEN, W.B., MAIERSPERGER, T.K., YANG, Z., GOWER, S.T., TURNER, D.P., RITTS, W., BERTERRETICHE, M. & RUNNING, S. 2003. Comparisons of land cover and LAI estimates derived from ETM+MODIS for four sites in North America: a quality assessment of 2000/2001 provisional MODIS products. *Remote Sensing of Environment*. 88: 233-255.
- CHEN, J.M., PAVLIC, G., BROWN, L., CIHLAR, J. & LEBLANCS, S.G., *et al.* 2002. Derivation and validation of Canada wide coarse resolution leaf area index maps using high resolution satellite imagery and ground measurements. *Remote Sensing of Environment*. 80: 165-184.
- CHEN, D., HUANG, J. Y JACKSON, T. 2005. Vegetation water content estimation for corn and soybeans using spectral indices derived from MODIS near- and short-wave infrared bands. *Remote Sensing of Environment*. 98: 225-236.
- CHENG, Y., USTIN, S.L., RIAÑO, D. & VANDERBILT, V.C. 2008. Water content estimation from hyperspectral images and MODIS indexes in Southeastern Arizona. *Remote Sensing of Environment*. 112: 363-374.
- FASSNACHT, K., GOWER, S., MACKENZIE, M., NORDHEIM, E., & LILLESAND, T. 1997. Estimating of North Central Wisconsin forests using the Landsat thematic mapper. *Remote Sensing of Environment*. 61: 229-245.
- FERNANDES, R., BUTSON, C., LEBLANC, S. & LATIFOVIC, R. 2003. Landsat-5 TM and Landsat-7 ETM+ based accuracy assessment of leaf area index products for Canada derived from SPOT-4 VEGETATION data. *Canadian Journal of Remote Sensing* 29: 241-258.
- GARCIA-HARO, F.J., SOMMER, S. & KEMPER, T. 2005. A new tool for variable multiple

- endmember spectral mixture analysis (VMESMA). *International Journal of Remote Sensing*. 26(10): 2135-2162.
- IFARRAGUERRI, A. & CHANG, C.I. 1999. Multispectral and hyperspectral image analysis with convex cones. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 37(2): 756-770.
- JACKSON, T.J., CHEN, D., COSH, M., LI, F., ANDERSON, & M. WALTHALL, C. *et al.* 2004. Vegetation water content mapping using Landsat data derived normalized difference water index for corn and soybeans. *Remote Sensing of Environment*. 92: 475-482.
- JACKSON, T.J., SCHMUGGE, T.J. & WANG, J.R. 1982. Passive microwave remote sensing of soil moisture under vegetation canopies. *Water resources Research*. 18: 1137-1342.
- LIANG, S. 2004. Quantitative Remote Sensing of Land Surfaces. John Wiley & Sons, Inc., New York. 534 pp.
- LICOR, 1992. LAI-2000 Plant Canopy Analyzer Operating Manual. LI-COR, Lincoln, Nebr., April 1992. 90 pp.
- MARTÍNEZ, B., CAMACHO DE COCA, F. Y GARCÍA-HARO, J. 2006. Estimación de parámetros biofísicos de vegetación utilizando el método de la cámara hemisférica. *Revista Española de Teledetección*. 26: 5-17.
- MARTÍNEZ, B., CAMACHO DE COCA, F. & GARCÍA-HARO, J. 2009. Derivation of high-resolution leaf area index maps in support of validation activities: Application to the cropland Barrax site. *Agricultural and forest meteorology*. 149: 130-145.
- MO, T., CHOUDHURY, B. J., SCHMUGGE, T. J., WANG, J. R. & JACSKON, T. J. 1982. A model for microwave emission from vegetation-covered fields. *Journal of Geophysical Research*. 87 (C13): 11229-11237.
- MORISSETTE, J. T., BARET, F., PRIVETTE, J. L., NYNENI, R. B. & NICKESON, J.E., *et al.* 2006. Validation of global moderate-resolution LAI products: a framework proposed within the CEOS land product validation subgroup. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 44: 1804-1817.
- NJOKU, E. G., JACKSON, T. J., LACKSHIMI, V., CHAN, T. K. & NGHIEM, S. V. 2003. Soil moisture retrieval from AMSR-E. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 41(2): 215-299.
- PEÑUELAS, J., FILELLA, I., BIEL, C., SERRANO, L. & SAVE, R. 1993. The reflectance at the 950-970 nm region as an indicator of plant water status. *International Journal of Remote Sensing*. 14: 1887-1905
- PYNE, S. J., ANDREWS, P. L. & LAVEN, R. D. 1996. *Introduction to wildland fire* (2nd ed). Nueva York: John Wiley.
- STEEL, R. G., & TORRIE J. H, 1980. *Principles and Procedures of Statistics*. Ed. McGraw Hill, Singapore.
- TUCKER, C. J. 1980. Remote sensing of leaf water content in the near infrared. *Remote Sensing of Environment*. 10: 23-32.
- WEISS, M., BARET, F., SMITH, G. J, JONCKHEERE, I. & COPPIN, P., 2004. Review of methods for in situ leaf area index (LAI) determination. Part II. Estimation of LAI, errors and sampling. *Agricultural and Forest Meteorology*. 121: 37-53.
- WELLES, J. M & NORMAN J. M. 1991. Instrument for indirect measurement of canopy architecture. *Agronomy Journal*. 83: 818-825.
- YILMAZ, M. T., HUNT, E. R., GOINS, L. D., USTIN, S. L., VANDERBILT, V. C. & JACKSON, T. J. 2008. Vegetation water content during SMEX04 from ground data and Landsat 5 Thematic Mapper Imagery. *Remote Sensing of Environment*. 112: 350-362.