

Análisis temporal del contenido de humedad en pasto en un ecosistema de DEHESA mediante imágenes Landsat, y su relación con factores climáticos

José Cáceres, Pilar Martín Isabel,
Javier Salas

Resumen

Según la guía de buenas prácticas del Panel Intergubernamental de Expertos en Cambio Climático (IPCC), las técnicas de teledetección son adecuadas para la estimación de variables biofísicas en la vegetación. En este trabajo se ha utilizado una serie temporal de imágenes Landsat para estimar el contenido de humedad del pasto en una zona de dehesa al NE de la provincia de Cáceres en el período 1985-2010. Se realizaron muestreos de campo de contenido de la humedad de la cubierta (CWC), así como de radiometría, en cuatro parcelas ubicadas dentro de la zona de estudio para la calibración del modelo. Se aplicó un modelo de regresión lineal entre los datos de campo e índices espectrales para la estimación de la variable. El índice NDII5 obtuvo los mejores ajustes para la estimación de CWC ($R^2=0,85$). Los valores promedios de CWC mostraron sensibilidad a los cambios extremos de las series temporales de precipitación y temperatura.

Palabras clave: Landsat; dehesa; índices espectrales; contenido de humedad; variables climáticas

Abstract

According to the Intergovernmental Panel on Climate Change Good Practice Guidance (IPCC GPG), remote sensing techniques are suitable for estimation of vegetation biophysical variables. In this work we used a Landsat time series to estimate canopy water content (CWC) in a pasture area Northeast of the province of Cáceres, from 1985 to 2010. Field sampling of canopy water content (CWC) were performed, as well as radiometry, in four plots located within the study site for the model calibration. We applied a linear regression model using field data and spectral indices for estimating the variables. NDII5 was the best index for CWC estimation ($R^2=0.85$). The average values of CWC were sensitive to extreme changes in time series of precipitation and temperature.

Keywords: Landsat; grassland; spectral indices; canopy water content; climatic variables

José Cáceres . (josedavid.caceres@gmail.com.) Departamento de Ciencia y Tecnologías de la Información Geográfica, Facultad de Ciencias Espaciales, Universidad Nacional Autónoma de Honduras (UNAH). **Pilar Martín Isabel**. Centro de Ciencias Humanas y Sociales (CCHS), Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) **Javier Salas**. Departamento de Geografía, Universidad de Alcalá (UAH)

Introducción

Las dehesas son sistemas silvopastorales de larga tradición de gestión sostenible en el ámbito mediterráneo, capaces de producir bienes y servicios de calidad de forma eficiente, que, sin embargo, en un entorno de cambio global pueden variar su dinámica y funcionamiento (Roig & Rubio, 2009). La estimación de variables biofísicas de la vegetación en zonas heterogéneas, como las dehesas, utilizando sensores remotos, representa desafíos únicos debido a la presencia de dos estratos de vegetación con un comportamiento muy diferenciado, el pasto y las encinas (Todd, Hoffer, & Milchunas, 1998).

El contenido de humedad en la vegetación juega un papel importante para entender el rol de los ecosistemas terrestres y los cambios que podrían presentar en el futuro, debido a las muchas aplicaciones que esta variable presenta, interesándonos primordialmente el papel que desempeña en la fotosíntesis y la evapotranspiración, que nos ayudan a entender el desarrollo de la biomasa y, por tanto, de los stocks de carbono. Así mismo, la estimación del contenido de humedad resulta también interesante para evaluar el estrés hídrico de la vegetación, y ha sido usado para evaluaciones de sequía y predicciones de incendios (Cheng, Zarco-Tejada, Riaño, Rueda, & Ustin, 2006). Este estudio se basa en el uso de índices espectrales, derivados de imágenes Landsat, para estimar contenido de humedad en una zona de dehesa en el momento de máxima actividad vegetativa, que corresponde con la época de primavera.

Para alcanzar este objetivo general se abordarán los siguientes objetivos específicos:

- Analizar la capacidad de las imágenes Landsat para estimar contenido de humedad a partir de índices espectrales calibrados con datos de terreno.
- Elaborar los mapas del comportamiento temporal de la variable en los años de estudio.
- Relacionar los resultados obtenidos con factores climáticos de precipitación y temperatura.

Antecedentes

En la última década, la teledetección ha brindado información esencial sobre la variación espacial y temporal de las cubiertas vegetales. Ha contribuido a la

estimación de importantes variables biofísicas y bioquímicas. Hasta ahora, se han aplicado con éxito enfoques empíricos basados en índices de vegetación que han obtenido un nivel de precisión satisfactorio para estimar importantes parámetros biofísicos de la vegetación.

En este contexto, en el marco del proyecto Biospec se utiliza la teledetección para estimar diversos parámetros biofísicos de la vegetación en una zona de dehesa localizada al Noreste de la provincia de Cáceres. (<http://www.lineas.cchs.csic.es/biospec/>).

Los estudios sobre la estimación del contenido de humedad de la vegetación, tradicionalmente se han realizado a partir de muestreos en campo, que generalmente resultan costosos y conllevan mucho tiempo en realizarse, por lo cual resulta difícil la implementación de esta metodología a una mayor escala espacial y temporal. La teledetección ofrece un enfoque efectivo para la estimación del contenido de humedad (Chen, Huang, & Jackson, 2005; Cheng et al., 2006; Clevers, Kooistra, & Schaepman, 2008, 2010; Jackson et al., 2004). Las técnicas implementadas para este fin varían desde la utilización de satélites de baja resolución espacial como MODIS (Chen et al., 2005; Cheng et al., 2006; Jiang, Li, & Ustin, 2009), de resolución media como Landsat (Jackson et al., 2004), así como también el uso de sensores hiperespectrales (Cheng et al., 2006; Clevers et al., 2010). La utilización de índices que relacionan el infrarrojo cercano (NIR) con el infrarrojo de onda corta (SWIR) son los más empleados para la estimación del contenido de humedad (Chen et al., 2005; Cheng et al., 2006; Clevers et al., 2008; Jackson et al., 2004; Jiang et al., 2009). En este sentido, Clevers et al. (2008) y Cheng et al. (2006) proponen el uso de información hiperespectral para la construcción de índices derivados del infrarrojo cercano, como el *water index* (WI), *el normalized difference water index* (NDWI), *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI), *Enhanced Vegetation Index* (EVI) y *el Shortwave Infrared Water Stress Index* (SIWSI). Jiang et al. (2009) utilizan estos mismos índices para la estimación de CWC a partir de imágenes MODIS.

Área de Estudio

El área de estudio se encuentra localizada en una zona de dehesa situada al NE de la provincia de Cáceres. El área propuesta cubre una extensión de 40.280,18 ha y abarca parte de los municipios de Toril, Serrejón, Majadas, Casatejada, Saucedilla, Almaraz, Belvís de Monroy, Valdehúncar, Millanes, Peraleda de la Mata, Navalmoral de la Mata y Talayuela (Figura 1). La definición del área se realizó

utilizando como base la cartografía generada por el Sistema de Información sobre Ocupación del Suelo en España (SIOSE), identificando y seleccionando la zona correspondiente a la cobertura de dehesa.



Figura 1. Mapa de Localización del Área de Estudio

El relieve de la zona es poco accidentado, con una altitud media de 258 m. La zona presenta una precipitación promedio anual de 645 mm y una temperatura media anual de 16,8 °C. El tipo de vegetación natural corresponde a las series meso-mediterráneas de *Pyro bourgeanae* - *Querceto rotundifoliae quercetum*, que ha sido transformada en praderas arboladas, incluidas algunas especies arbustivas. El manejo de la tierra se centra en el pastoreo intensivo de vacuno. Predominan los Lixisoles (sustratos no calizos del Mioceno) y la profundidad del suelo es mayor a 80 cm. La densidad de árboles es de aproximadamente 20 árboles por hectárea, con una altura promedio de 8 m y un diámetro a la altura del pecho (DAP) promedio de 40 cm.

Metodología

Nuestro análisis se estructura en cinco fases (Figura 2). En primer lugar, aunque en paralelo con las dos siguientes fases, se procedió a la selección y preprocesamiento de las imágenes Landsat, así como al cálculo de diversos índices espectrales. La segunda y tercer fase incluye el trabajo de campo en el que se realizaron mediciones de la variable biofísica de interés (contenido de humedad), así como de la radiometría de la cubierta de pasto. En la cuarta fase, se generaron modelos empíricos para la estimación del contenido de humedad a partir de ajustes

de regresión lineal entre índices espectrales obtenidos de la radiometría de campo y los valores de las variables medidas en terreno en las mismas fechas. Utilizando estos modelos empíricos, se estimó el contenido de humedad a partir de los índices espectrales obtenidos con las imágenes Landsat. En la última fase se compara la evolución temporal de las variables estimadas con la de dos variables meteorológicas, la precipitación y la temperatura.

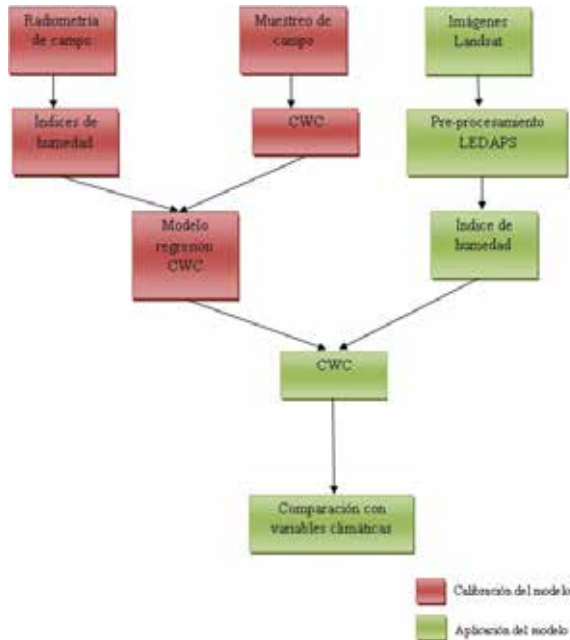


Figura 2. Descripción general del proceso de estimación de contenido de humedad

- *Selección y preprocesamiento de Imágenes Landsat*

Para este estudio se utilizó una serie histórica de la escena 202-032 adquirida por los sensores Enhanced Thematic Plus (ETM+) y Thematic Mapper (TM) a bordo del satélite Landsat. Las escenas fueron descargadas del servidor gratuito de imágenes del Servicio Geológico de los Estados Unidos (<http://glovis.usgs.gov/>).

Teniendo en cuenta las limitaciones existentes en la adquisición de imágenes, finalmente se seleccionaron un total de 13 escenas desde 1985 a 2010 (Tabla 1).

Sensor	Fecha de Adquisición
TM	25 marzo 1985
TM	12 abril 1987
ETM+	25 mayo 2000
ETM+	10 abril 2001
ETM+	29 abril 2002
ETM+	18 mayo 2003
ETM+	1 marzo 2004
ETM+	7 mayo 2005
ETM+	24 abril 2006
ETM+	10 marzo 2007
ETM+	9 febrero 2008
ETM+	15 marzo 2009
TM	11 abril 2010

Tabla 1. Listado de escenas Landsat utilizadas.

Una vez obtenidas las escenas a utilizar se procedió a realizar el preprocesamiento de las imágenes, esto incluye la transformación de los niveles digitales (ND) originalmente captados por el sensor a valores de radiancia y reflectividad incluyendo las oportunas correcciones del efecto atmosférico. Para este fin se tuvo acceso a la herramienta desarrollada por el Landsat Ecosystem Disturbance Adaptive Processing System (LEDAPS)(<http://ledaps.nascom.nasa.gov/>).

- *Mediciones de Campo de Variables Biofísicas*

Con el propósito de calibrar los algoritmos para la estimación del contenido en humedad del pasto a partir de las imágenes Landsat, se utilizaron los datos de terreno recopilados en el ámbito del proyecto BIOSPEC. Estos datos se refieren a un total de 12 parcelas de 25x25 m localizadas en la dehesa objeto de estudio (Figura 3). Estas parcelas fueron muestreadas cada 16 días haciendo coincidir el muestreo con el paso del satélite Landsat 5 desde marzo de 2009 hasta abril de 2011. De las 12 parcelas disponibles se seleccionaron 4, las que presentaban mayor densidad de vegetación, y de las fechas disponibles se utilizaron sólo las correspondientes a los meses de marzo y abril, que corresponden con el pico de verdor del pasto en esta zona. El objetivo de esta selección es obtener datos en

parcelas/períodos donde exista poco o ningún material senescente y suelo descubierto que pudieran interferir en la relación entre el dato medido en terreno y la respuesta espectral de la vegetación captada por el sensor (Malmstrom et al., 2009).

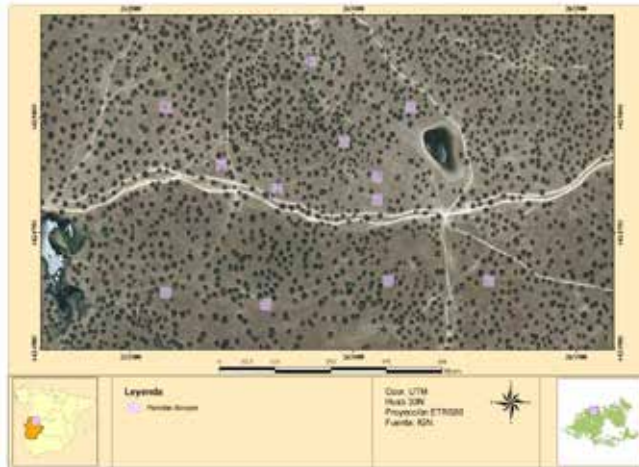


Figura 3. Localización de las Parcelas de Biospec.

Las medidas de contenido de humedad del pasto se realizaron mediante muestreo destructivo. Se muestrearon 3 cuadrantes de 25x25 cm distribuidos aleatoriamente en cada parcela. En cada cuadrante se recogió toda la vegetación cortándola a ras de suelo y se introdujo en una bolsa zip que fue pesada en el campo con una balanza de dos dígitos de precisión. Las muestras fueron transportadas al laboratorio donde se secaron en estufa a 60 grados durante 48 horas, después fueron pesadas de nuevo utilizando la misma báscula de campo. El contenido en humedad se calculó como:

$$CWC = EWT * LAI$$

Donde $EWT = (\text{peso fresco} - \text{peso seco}) / \text{área de hojas}$

El área de las hojas se calculó mediante el escaneo de una submuestra del cuadrante, estableciendo posteriormente una relación área-peso para el cálculo del área de las hojas correspondiente a toda la muestra.

- *Mediciones de radiometría de campo*

Se realizaron también mediciones de radiometría sobre el terreno utilizando un espectro-radiómetro ASD Fieldspec FR3, que recoge información entre 400 y 2500 nanómetros. Se realizaron dos transectos por parcela, uno NW-SE y otro NE-SW. Por cada transecto se tomaron una media de 10 mediciones, por lo que se contó finalmente con unos 20 espectros por parcela.

Los valores de reflectividad obtenidos con el ASD Fieldspec FR3, disponibles en intervalos de 1 nm, fueron remuestreados a las bandas Landsat-TM utilizando el software ENVI que considera la función de respuesta espectral de cada banda.

Con esta información se calcularon diversos índices espectrales propuestos en la literatura para estimar el contenido en humedad de la vegetación.

- *Calibración de los modelos para la predicción de contenido de humedad.*

Para la estimación del contenido de humedad se utilizó el *Normalized Difference Infrared Index* (NDII) (Chuvieco, 2010) utilizando las bandas 5 y 7:

$$NDII_5 = \frac{TM4 - TM5}{TM4 + TM5} \quad (1)$$

$$NDII_7 = \frac{TM4 - TM7}{TM4 + TM7} \quad (2)$$

Una vez calculados los índices a partir de los datos de radiometría de campo se realizó un análisis de correlación entre éstos y los datos de CWC medidos en las 4 parcelas seleccionadas para las siguientes fechas: 23 marzo, 7 abril, y 24 de abril de 2009, 11 de abril de 2010, y 30 de marzo y 14 de abril de 2011. El dato de campo para cada parcela fue un promedio de los 3 cuadrantes muestreados en cada una de ellas.

A partir del dato de la medición de contenido de humedad en campo y del valor del índice de vegetación seleccionado, tomando como referencia los valores de la banda 5 y 7 del sensor TM y ETM+, se procedió a realizar un análisis de

regresión lineal para obtener la ecuación de ajuste del modelo para la estimación del contenido de humedad. El modelo resultante se aplicó a las escenas Landsat seleccionadas para obtener los valores de contenido de humedad para la serie temporal.

- *Información Climatológica*

Con el objetivo de identificar la posible relación existente entre la evolución anual del contenido de humedad, con variables climatológicas como precipitación y temperatura, se procedió a identificar las estaciones meteorológicas más cercanas al área de estudio. Se seleccionaron cinco estaciones próximas o incluidas en el área de estudio: Bohonal de Ibor, Navalморal de la Mata, Toril, Malpartida de Plasencia y Serradilla (Figura 4). Estos datos fueron solicitados a la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) para obtener las series históricas existentes.

Una vez obtenida la serie temporal de datos a utilizar, a partir de la fecha de adquisición de las escenas, se calculó la precipitación acumulada para dos meses (mes anterior y el propio mes de la toma de la imagen), así como también la temperatura máxima promedio para esos dos meses. Con estos datos, se realizó una comparación de la distribución temporal existente entre la precipitación y temperatura con el contenido de humedad, de cara a identificar la posible influencia de las condiciones climáticas sobre las variables biofísicas analizadas.



Figura 4. Localización de las Estaciones Climatológicas

Resultados y discusión

1. *Pre-procesamiento de imágenes Landsat*

Para comprobar la fiabilidad de la corrección radiométrica y atmosférica realizada por la herramienta LEDAPS se contó con datos de radiometría de campo para dos parcelas de calibración definidas por el proyecto BIOSPEC. Los valores de reflectividad medidos en el campo se compararon con los obtenidos utilizando la herramienta LEDAPS para la imagen Landsat 5 TM del 30 de junio de 2010. En la figura 5 se presentan las curvas espectrales obtenidas con los datos de campo y las extraídas de la imagen para las dos parcelas de calibración. Como se puede observar, las diferencias son mínimas entre ambos conjuntos de datos. De hecho, al realizar un análisis más cuantitativo de la información, se obtuvo que no existía una diferencia estadística significativa entre los datos, existiendo una correlación fuerte entre los datos de campo y los de la imagen ($R^2 = 0,99$), lo que indica que la herramienta LEDAPS resulta adecuada para el pre-procesamiento en serie de imágenes Landsat.

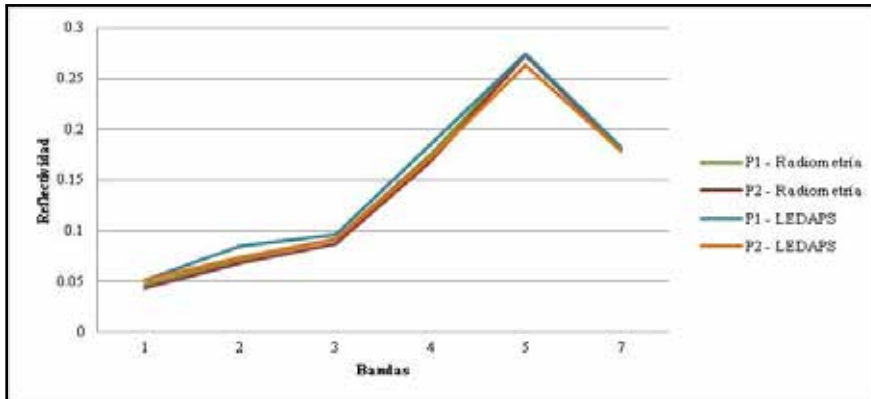


Figura 5. Comparación de espectros para las parcelas de calibración

1. *Estimación de contenido en humedad de la vegetación*

En el caso del contenido en humedad de la vegetación, las dos variaciones del NDII ofrecieron valores altos de correlación (Tabla 2) y p-valor < 0,0001. Se

seleccionó el NDII5 para la estimación del contenido de humedad, debido a que presentó una correlación más fuerte ($R^2 = 0,85$).

Indice	R ²
NDII ₅	0,8460
NDII ₇	0,7988

Tabla 2. Coeficientes de Correlación entre los valores de CWC medidos en terreno y los índices espectrales calculados a partir de radiometría de campo

La ecuación de ajuste del modelo para la estimación del contenido de humedad a partir de los valores del NDII5 aparece en la figura 6. Esta función fue aplicada a las imágenes NDII5 de la serie temporal obteniéndose el valor de contenido de humedad para las diversas fechas de estudio (Figura 7).

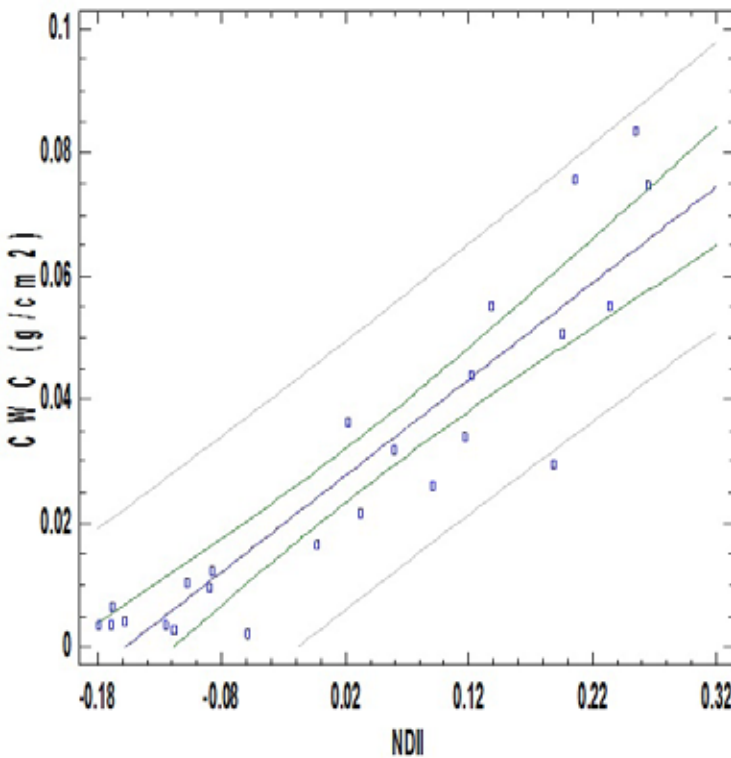


Figura 6. Gráfico del Modelo Ajustado para la estimación del CWC

Los resultados obtenidos del análisis de correlación son ligeramente más altos que los obtenidos por Jiang et al. (2009), quienes utilizando imágenes MODIS para calibrar el modelo a partir de la relación existente entre el EWT, obtienen mediante el EVI un $R^2=0,7547$, para el NDVI un $R^2=0,7299$, para el SIWSI un $R^2=0,7509$ y para el NDWI un $R^2=0,7547$. En su análisis definieron que los índices que relacionan el infrarrojo cercano y el infrarrojo de onda corta, como el NDWI y el SIWSI predicen de manera más eficiente el CWC, resultando estos dos últimos equivalentes al NDII para Landsat utilizado en el presente estudio. Por otro lado, Cheng et al. (2006) obtuvieron mejores resultados, el NDVI registró un R^2 de 0,89, seguido por EVI con $R^2=0,82$ y SIWSI con $R^2=0,81$, mientras que el NDWI presentó la más baja correlación con $R^2=0,62$.

Los valores de contenido de humedad obtenidos a nivel de píxel para la serie temporal presentaron rangos desde valores muy cercanos a cero hasta 0,1966 g/cm^2 . Este valor máximo se registró en el año 2001. En general el valor medio del contenido de humedad para cada píxel en toda la serie temporal fue de 0,05 g/cm^2 . Estos valores pueden ser comparados con los obtenidos por Clevers et al. (2010) que obtuvieron un valor medio de 0,095 g/cm^2 en una de sus áreas de estudio, un valor más alto al nuestro, y 0,053 g/cm^2 en otra zona, más acorde con los valores obtenidos con nuestro método. Clevers et al. (2008) obtuvieron un rango de 0,1 a 0,2 g/cm^2 , siendo bastante acordes con los resultados obtenidos en el presente estudio.

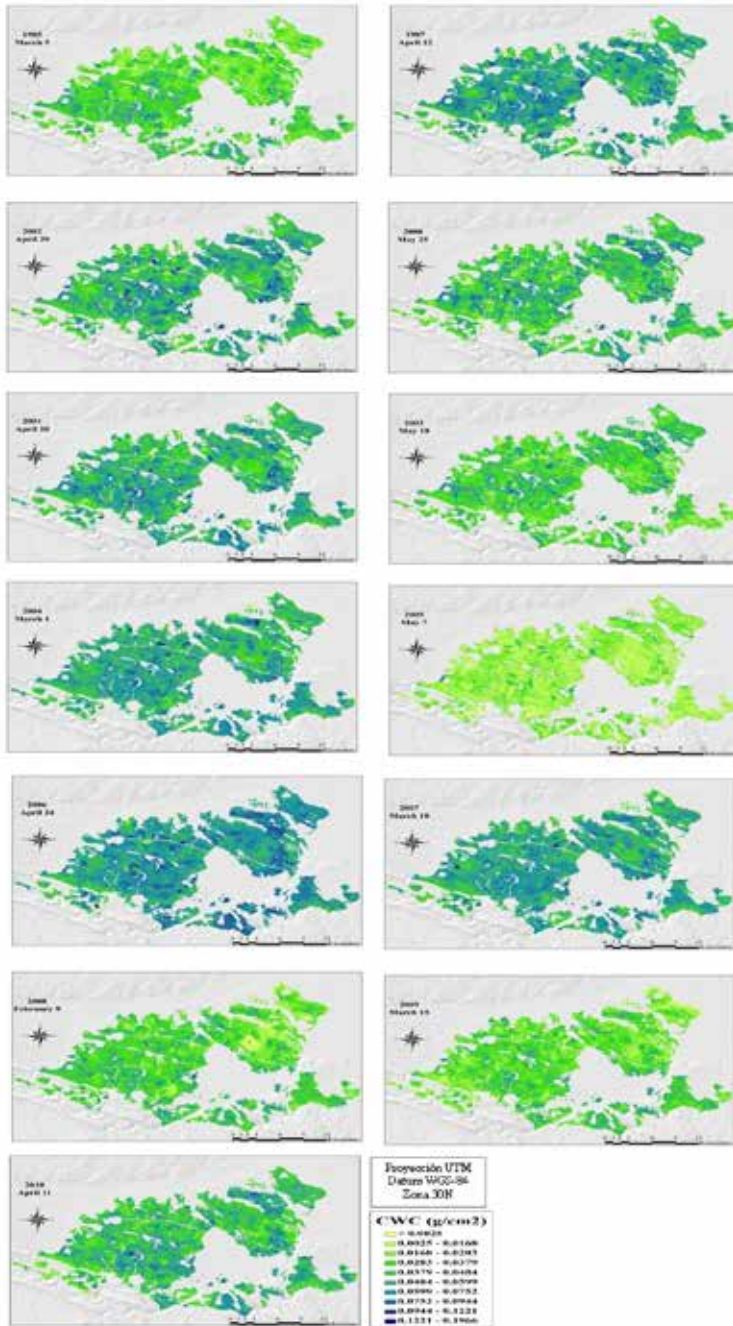


Figura 7. Estimaciones de contenido de humedad del pasto obtenida de imágenes Landsat para la zona de estudio, 1985-2010.

En general se observa una distribución espacial bastante uniforme del contenido de humedad en la zona de estudio, aunque aparece un sector al noreste del área de estudio en el que se registran valores más altos a lo largo de toda la serie temporal. La serie presenta un patrón homogéneo a lo largo del tiempo, con la clara excepción del año 2005, el cual presenta una variación del 57% por debajo del promedio y el 2006 con una variación del 40% por encima del promedio.

3. Relación con variables climáticas

Los análisis realizados de comparación de muestras mostraron que no existen diferencias estadísticamente significativas entre los datos obtenidos para las cinco estaciones meteorológicas, registrando un $R^2 = 0,95$ para las precipitaciones y un $R^2 = 0,99$ para las temperaturas.

Durante la serie temporal analizada (1985-2010), se observaron algunos años con comportamientos extremos. Así la precipitación ha sido muy inferior a la media en 2005 (57%), coincidiendo con el año con menor valor promedio de CWC ($0,0190 \text{ g/cm}^2$), y muy superior en el 2001, 15% por encima de la media, año en el que se registró uno de los valores más altos de CWC promedio ($0,0523 \text{ g/cm}^2$). El resto de los años muestran valores más cercanos a la media (Figura 8).

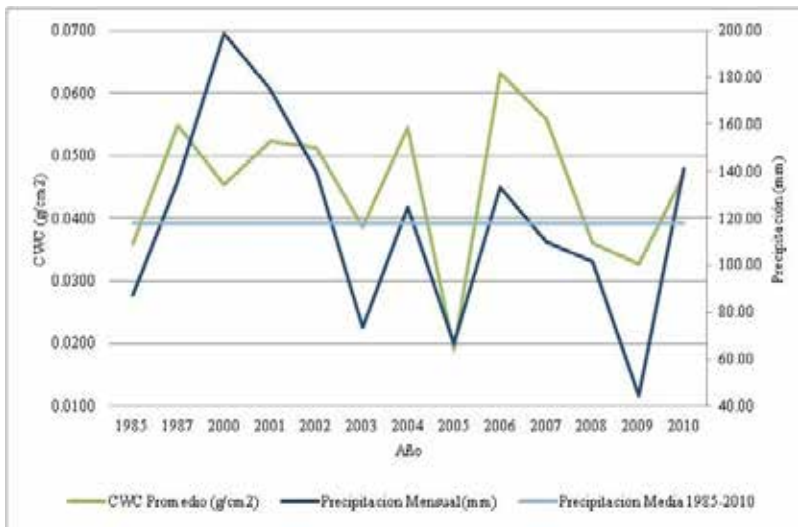


Figura 8. Serie temporal de precipitación y valor medio de CWC estimado para primavera en la zona de estudio

El contenido de humedad mostró correlaciones bajas con las precipitaciones, aunque puede observarse una evolución temporal similar, con incrementos y descensos en los mismos años, a excepción del 2000, en el que esta variable experimenta comportamientos opuestos. La divergencia en el año 2000 parece estar relacionada con la fecha de adquisición de la imagen (25 de mayo), en la que probablemente el pasto estaría notablemente seco.

Como en el caso de las precipitaciones, la temperatura también ofreció bajos valores de correlación con el contenido de humedad. No obstante, salvo alguna excepción, se observa una clara tendencia inversa entre ambas variables, de manera que de acuerdo a lo observado, temperaturas más altas generan menores valores de CWC (Figura 9).

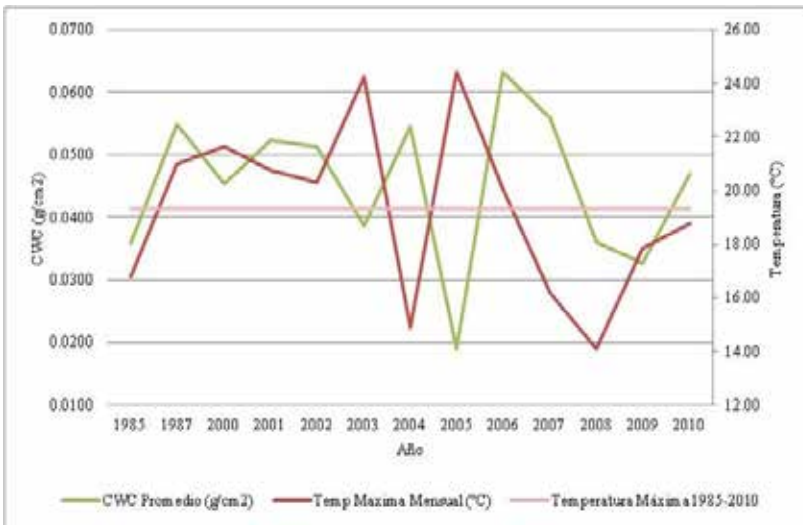


Figura 9. Serie temporal de temperatura máxima y valor medio de CWC estimado para primavera en la zona de estudio

Conclusiones

En este estudio hemos investigado el uso de índices espectrales derivados de los sensores TM y ETM+ a bordo del satélite Landsat para la estimación de contenido de humedad del pasto en una zona de dehesa, así como la importancia de contar con información medida en campo para calibrar los modelos de estimación a partir de regresiones simples. Las imágenes Landsat fueron procesadas antes

del cálculo de los índices espectrales y se obtuvo que para la predicción de CWC en pastos, la utilización de un índice como el NDII5 brinda un modelo más robusto ($R^2=0,85$) frente a otros índices, siendo estos valores comparables con resultados obtenidos por otros autores con metodología similar (Cheng et al., 2006; Cheng et al., 2006; Jiang et al., 2009; Malmstrom et al., 2009; Todd et al., 1998). Estos datos ponen de manifiesto el interés de utilizar imágenes de satélite para la estimación de variables biofísicas, que de otra manera requerirían de costosos muestres de campo, inabordables para medios y grandes territorios.

Resalta el hecho de que la variable analizada, contenido de humedad, es sensible a los cambios extremos en las condiciones climáticas, presentando sus valores más bajos en el año en que se registró la menor cantidad de precipitación y a su vez la mayor temperatura máxima (2005) en la zona, lo cual tuvo un impacto directo en el contenido de humedad existente.

Aunque la serie temporal registra importantes lagunas debidas a la inexistencia de imágenes Landsat en el catálogo Glovis, parece registrarse una ligera tendencia de disminución del contenido de humedad en la serie temporal analizada, que se corresponde con una tendencia similar en el registro de precipitaciones. La tendencia hacia una menor de cantidad de lluvia limitaría en gran medida en papel del CWC dentro de la fotosíntesis, y por ende reduciría su capacidad de fijar carbono, tal y como se observó en el año con menor cantidad de precipitación dentro de la serie temporal.

Agradecimientos

Agradezco a la Fundación Carolina por la beca otorgada para desarrollar el Máster en Tecnologías de la Información Geográfica en la Universidad de Alcalá. Al Servicio Geológico de los Estados Unidos por la disponibilidad de las imágenes Landsat. A Jeffrey Masek por facilitar el acceso a la herramienta de pre-procesamiento de LEDAPS. Al proyecto Biospec por facilitar los datos de campo para la calibración de los modelos. Y a la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) por la cesión de los datos meteorológicos.

Bibliografía

- Chen, D., Huang, J., & 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. doi: 10.1016/j.rse.2005.07.008
- Cheng, Y.-B., Zarco-Tejada, P., Riaño, D., Rueda, C., & Ustin, S. (2006). Estimating vegetation water content with hyperspectral data for different canopy scenarios: Relationships between AVIRIS and MODIS indexes. *Remote Sensing of Environment*, 105, 354-366.
- Chuvieco, E. (2010). *Teledetección Ambiental: La observación de la Tierra desde el espacio*. Barcelona, España.
- Clevers, J. G. P. W., Kooistra, L., & Schaepman, M. E. (2008). Using spectral information from the NIR water absorption features for the retrieval of canopy water content. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 10(3), 388-397. doi: 10.1016/j.jag.2008.03.003
- Clevers, J. G. P. W., Kooistra, L., & Schaepman, M. E. (2010). Estimating canopy water content using hyperspectral remote sensing data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 12(2), 119-125. doi: 10.1016/j.jag.2010.01.007
- Irish, R., Barker, J., Goward, S., & Arvidson, T. (2006). Characterization of the Landsat-7 ETM+ Automated Cloud Cover Assessment (ACCA) Algorithm. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 72, 1179-1188.
- Jackson, T., Chen, D., Cosh, M., Li, F., Anderson, M., Walthall, C., . . . Hunt, E. R. (2004). Vegetation water content mapping using Landsat data derived normalized difference water index for corn and soybeans. *Remote Sensing of Environment*, 92, 475-482. doi: 10.1016/j.rse.2003.10.021
- Jiang, Z., Li, L., & Ustin, S. L. (2009). Estimation of canopy water content with MODIS spectral index. Paper presented at the Remote Sensing and Modeling of Ecosystems for Sustainability VI.

- Malmstrom, C. M., Butterfield, H. S., Barber, C., Dieter, B., Harrison, R., Qi, J., . . . Wirka, J. (2009). Using Remote Sensing to Evaluate the Influence of Grassland Restoration Activities on Ecosystem Forage Provisioning Services. *Restoration Ecology*, 17(4), 526-538. doi: 10.1111/j.1526-100X.2008.00411.x
- Roig, S., & Rubio, A. (2009). *El sistema agroforestal dehesa como sumidero de carbono: hacia un modelo conjunto de la vegetación y el suelo*. Paper presented at the 5° Congreso Forestal Español.
- Todd, S. W., Hoffer, R. M., & Milchunas, D. G. (1998). Biomass estimation on grazed and ungrazed rangelands using spectral indices. *International Journal of Remote Sensing*, 19(3), 427-438. doi: 10.1080/014311698216071