



7º CONGRESO FORESTAL ESPAÑOL

**Gestión del monte: servicios
ambientales y bioeconomía**

26 - 30 junio 2017 | Plasencia
Cáceres, Extremadura

7CFE01-131

Edita: Sociedad Española de Ciencias Forestales
Plasencia. Cáceres, Extremadura. 26-30 junio 2017
ISBN 978-84-941695-2-6

© Sociedad Española de Ciencias Forestales

Impacto de los tricomas en la aplicación de los modelos de transferencia radiativa en hojas de *Quercus ilex*

PACHECO LABRADOR, J.¹, GONZÁLEZ CASCÓN, R.², HERNÁNDEZ-CLEMENTE, R.³, MARTÍN, M.P.⁴, MELENDO DE LA VEGA, J.R.⁴ y ZARCO-TEJADA, P.⁵,

¹ Max Planck Institute for Biogeochemistry, Hans Knöll Straße 10, D-07745, Jena, Germany.

² Departamento de Medio Ambiente, Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria (INIA), Ctra. Coruña, Km. 7,5, 28040 Madrid, Spain.

³ Department of Geography, Swansea University, Swansea, SA1 8EN, Wales, United Kingdom.

⁴ Laboratorio de Espectro-radiometría y Teledetección Ambiental (SpecLab), IEGD-CCHS, Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC), C/ Albasanz 26-28, 28037, Madrid.

⁵ European Commission, Joint Research Centre (JRC), Directorate D – Sustainable Resources, Via E. Fermi 2749, I-21027 Ispra (VA), Italy.

Resumen

PROSPECT es un Modelo de Transferencia Radiativa (MTR) que describe las propiedades ópticas de las hojas, y es la base de numerosos modelos físicos empleados en teledetección el estudio variables biofísicas de la vegetación. Algunas especies presentan en sus hojas diferentes estructuras defensivas -como los tricomas-, que modifican sus propiedades ópticas sin que dichos modelos las incluyan en su formulación. En este trabajo se ha analizado el impacto de los tricomas en la estimación de las propiedades de las hojas mediante la inversión de PROSPECT-4, para ello se ha medido la transmisividad y reflectividad de 59 hojas de encina empleando una esfera integrante LiCOR-1800-12 antes y después de eliminar los tricomas. Además se ha determinado su contenido de agua, materia seca, clorofila y carotenoides. Los resultados muestran que los tricomas modifican la radiación reflejada y especialmente la transmitida a través de la hoja. Su eliminación reduce el Error Cuadrático Medio Relativo (RRMSE) en la estimación de clorofilas, carotenoides y humedad en un 21.85%, 6.75% y 26.09% respectivamente; aunque RRMSE aumenta para la materia seca en un 14.05%. Concluimos que es necesario caracterizar el efecto de los tricomas en los RTM para asegurar su aplicabilidad en especies donde estos estén presentes.

Palabras clave

PROSPECT-4, pilosidades, encina, inversión, variables biofísicas

1. Introducción

La teledetección se ha empleado durante décadas para en el estudio de las propiedades físicas y bioquímicas de la vegetación, así como la variación de las mismas en el espacio y en el tiempo (BARET & BUIS 2008, PFEIFER, DISNEY et al. 2012, HOUBORG, FISHER et al. 2015). Dichas estimaciones se han basado, en gran medida, en las propiedades ópticas de las cubiertas vegetales, que han sido analizadas mediante múltiples métodos de diferente complejidad. Estos pueden ser diferenciados entre métodos estadísticos, físicos e híbridos (VERRELST, CAMPS-VALLS et al. 2015). De entre los primeros, los métodos paramétricos ha sido tradicionalmente los más utilizados, si bien el potencial de los análisis no paramétricos y algoritmos de *machine learning* están siendo explotados con mayor intensidad en los últimos años (VERRELST, CAMPS-VALLS et al. 2015, VERRELST, MUÑOZ et al. 2012). Los métodos físicos emplean MTR que, con diferentes enfoques, simulan la interacción de la radiación con un dosel vegetal o una hoja de características determinadas (FERET, FRANÇOIS et al. 2008, JACQUEMOUD, VERHOEF et al. 2009). Normalmente, varios MTR se combinan a diferentes escalas (hoja, dosel, y también atmosféricos) para simular el proceso completo de iluminación-

interacción-observación. Las propiedades de la vegetación, por tanto, pueden ser inferidas mediante la inversión de dichos modelos (VERRELST, CAMPS-VALLS et al. 2015, JACQUEMOUD, VERHOEF et al. 2009). Sin embargo, la complejidad y en ocasiones coste de dicha inversión, hacen su uso menos frecuente (VERRELST, CAMPS-VALLS et al. 2015). A los problemas matemáticos propios del proceso de inversión, se suma la el rigor con el que estos modelos representan la vegetación y sus propiedades ópticas. Esto es especialmente relevante cuando las especies vegetales muestran características poco frecuentes (MORALES, ABADIA et al. 2002, BUSCHMANN, LENK et al. 2012) - tricomas, pilosidades, ceras...-, cuyos efectos en las propiedades ópticas de las hojas no son descritos habitualmente en los MTR. Uno de los modelos más empleados a nivel de hoja es PROSPECT (JACQUEMOUD & BARET 1990), y sus versiones más actuales, PROSPECT-4 y PROSPECT-5 (FERET, FRANÇOIS et al. 2008). Este modelo, describe las hojas como un conjunto de N láminas caracterizadas por un índice de refracción y un conjunto de coeficientes de absorción correspondientes a clorofilas (C_{ab}), carotenoides (C_{ar}), materia seca (C_m) y agua (C_w) determinados empíricamente a partir de amplias librerías espectrales (FERET, FRANÇOIS et al. 2008, JACQUEMOUD, VERHOEF et al. 2009). La versión 5 incluye además la absorción de los denominados “pigmentos marrones”, pero no ha sido empleada en este trabajo. El modelo simula la radiación transmitida y reflejada en función de las concentraciones de dichos elementos en su interior así como del número de láminas, relacionado con el desarrollo del mesófilo esponjoso (JACQUEMOUD & BARET 1990).

2. Objetivos

En este trabajo, analizamos el impacto de los tricomas presentes en hojas de *Quercus ilex* en las propiedades ópticas de dichas hojas, así como en la estimación de las concentraciones foliares de diferentes constituyentes mediante la inversión del RTM PROSPECT-4.

3. Metodología

En este trabajo, se han llevado a cabo dos campañas experimentales en Junio y Septiembre de 2016. En cada campaña, se muestrearon ramas de un ejemplar de *Quercus ilex* que fueron guardadas en neveras refrigeradas y en oscuridad hasta su medición. 33 hojas brotadas en el año fenológico en curso (“actual”) y 26 hojas del año o los años anteriores (“previos”) fueron seleccionadas para medir sus concentraciones foliares así como sus propiedades ópticas antes y después de eliminar los tricomas de sus superficies abaxial y adaxial. Además, en la segunda campaña, 11 y 5 hojas de cada grupo de edad respectivamente fueron parcialmente desecadas en una estufa a 65°C durante entre 10 y 20 minutos; lo que permitió incrementar el rango de valores del contenido de humedad de las hojas analizadas.

El proceso de análisis del efecto de los tricomas tuvo tres fases consecutivas: la primera, donde todos los tricomas permanecieron presentes en la hoja; la segunda, donde se eliminaron los de la cara adaxial frotando la hoja con un paño de tela; y la tercera, donde los tricomas de la cara abaxial fueron también eliminados con un bisturí. En cada hoja, los tricomas fueron eliminados sólo en una de las mitades separadas por el nervio central, con el fin de poder monitorizar variaciones en el contenido de clorofila así como para minimizar la alteración de la misma.

En cada una de las fases, la hoja fue pesada para determinar posteriormente su contenido de humedad y materia seca por unidad de superficie (g/cm^2) por métodos gravimétricos (MENDIGUREN, MARTÍN et al. 2015). Terminado el experimento, se determinó el área foliar mediante el escaneo de las hojas y su peso seco tras el secado en estufa a 65°C durante 48 h. Durante la primera fase (hoja con tricomas) se tomaron mediciones con un sensor de clorofila SPAD-Minolta 502. A partir de estas mediciones se las unidades SPAD se convirtieron a valores de clorofila y carotenoides usando los modelos empíricos previamente calibrados (GONZÁLEZ-CASCÓN, PACHECO-LABRADOR et al. 2016).

Las mediciones de los factores reflectividad y transmisividad direccional hemisféricas (ρ y τ respectivamente) se llevaron a cabo con espectrorradiómetro ASD FieldSpec® 3 (Analytical Spectral Devices, Boulder, Colorado, USA) acoplado a una esfera integrante LiCor-1800-12 (LiCor, Lincoln, Nebraska, USA), de acuerdo con el método descrito en ZARCO-TEJADA, BERJÓN et al, (2005). En esta

ocasión se empleó un blanco de referencia de BaSO₄ calibrado en el rango espectral 400-1599 nm. En cada fase del análisis se midió la misma zona de la hoja obteniéndose 10 espectros sin variar la posición de la hoja. Las mediciones se llevaron a cabo lo más rápidamente posible, para minimizar la degradación de las hojas. N , C_{ab} , C_{ar} , C_w y C_m mediante la inversión de la v modelo.

Finalmente, los espectros de ρ y τ medidos en cada fase fueron empleados para la inversión del modelo PROSPECT-4, en la que se estimaron los valores de N , C_{ab} , C_{ar} , C_w y C_m minimizando la función de coste mostrada en la ecuación (1) mediante la función *fminsearchbnd* de Matlab® (The MathWorks, Inc, Natick, Massachusetts, USA)

$$\chi^2 = \sum_{\lambda=400}^{1599} \left((\rho_{\text{meas},\lambda} - \rho_{\text{pred},\lambda})^2 + (\tau_{\text{meas},\lambda} - \tau_{\text{pred},\lambda})^2 \right) \quad (1)$$

donde el subíndice “meas” indica medido, el subíndice “pred” indica predicho por el modelo y λ es la longitud de onda en nm.

4. Resultados

La figura 1 muestra la dispersión de las variables biofísicas medidas en las hojas de los grupos de edad “actual” (Fig.1a-d) y “previos” (Fig.1e-h). Como puede observarse, las hojas más jóvenes presentan valores medios de concentración menores en todas las variables. Los rangos de variabilidad son similares, debido en parte al proceso de secado de las hojas.

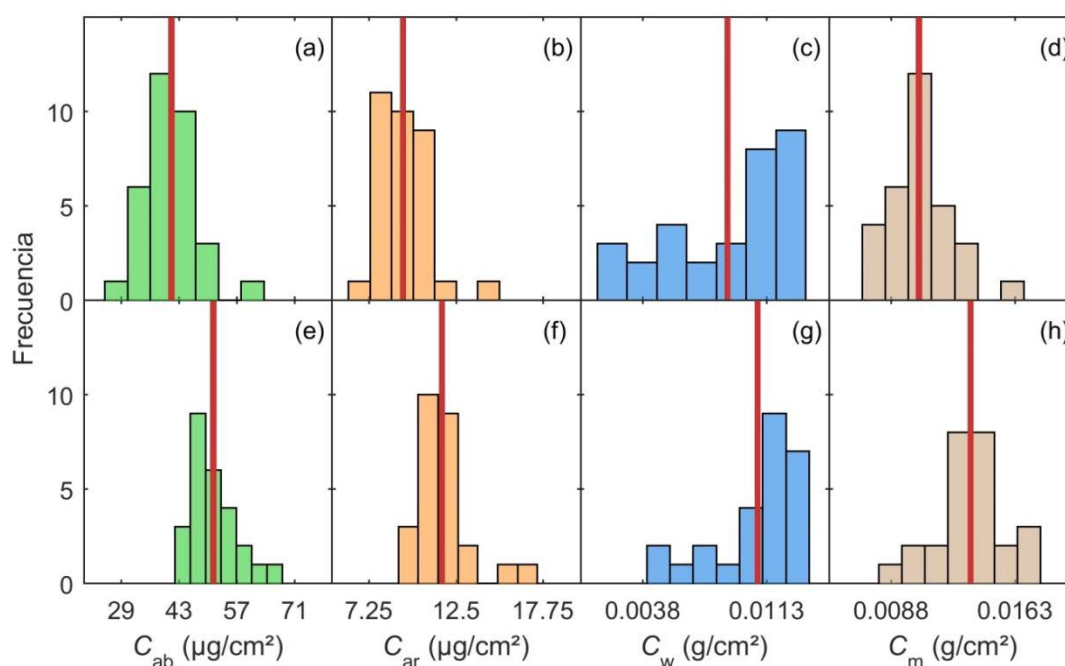


Figura 1. Histograma de frecuencias y valor medio (líneas rojas) de las diferentes variables biofísicas medidas en las hojas de los dos grupos de edad: "actual" (a-d) y "previos" (e-h).

Los tricomas se presentan de forma diferente en las hojas de los dos grupos de edad (figura 2). En las hojas más jóvenes, estos están presentes en ambas caras de la hoja, con un color blanquecino a la vista (Fig.2a,b). Pasado el primer año, estos desaparecen en gran medida de la cara adaxial, siendo menos notorio su efecto (Fig.2c) y toman un tono más oscuro y mayor espesor en la cara abaxial (Fig.2d).

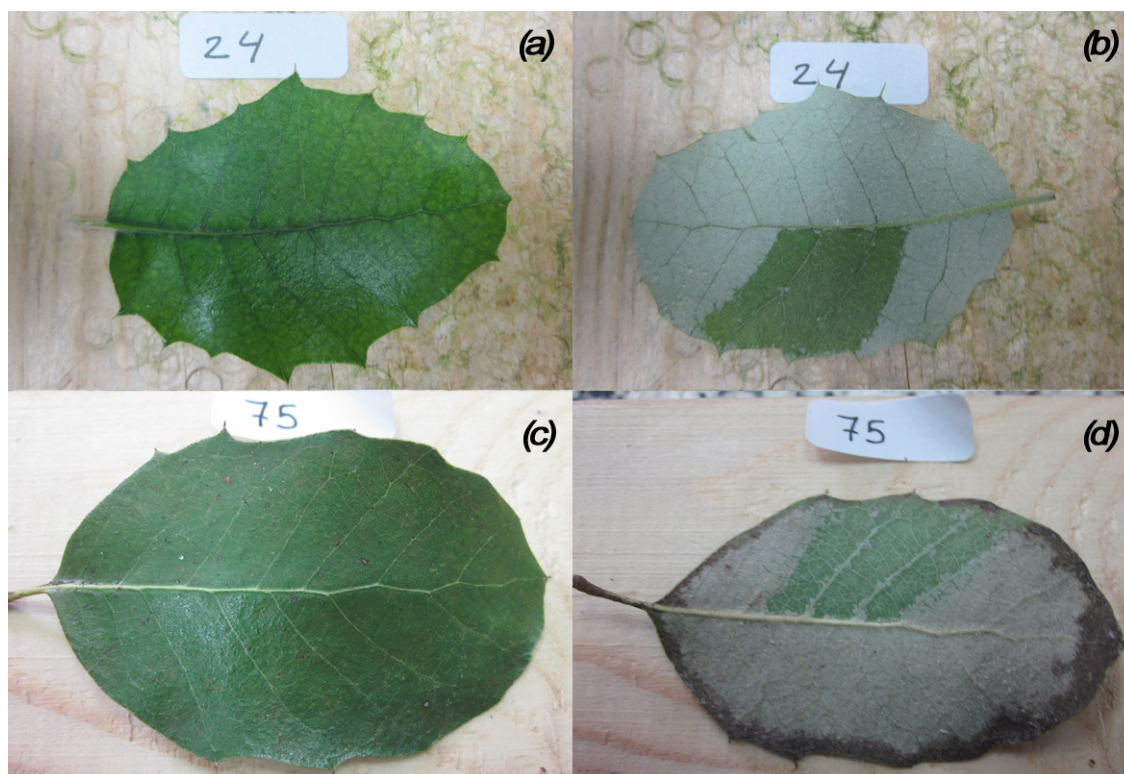


Figura 2. Hoja del grupo “actual” sin tricomas en la mitad inferior de la cara adaxial (a) y sin tricomas en la misma región de la cara abaxial (b). Hoja del grupo “previos” sin tricomas en la mitad inferior de la cara adaxial (c) y sin tricomas en la misma región de la cara abaxial (d)

En ambos casos, los tricomas presentan un fuerte impacto en las propiedades ópticas de las hojas. La figura 3 muestra los espectros promedio de ρ y τ de dos hojas, una de cada grupo de edad. Las mayores variaciones se detectan al eliminar los tricomas de la cara abaxial lo que produce un aumento significativo de τ que es mayor en las hojas del grupo “previos” (Fig.3b,d). Este incremento es más pronunciado en las regiones del infrarrojo cercano (NIR) y de onda corta (SWIR). En las hojas del grupo “actual” (Fig.3a,c), la variación de τ en la región visible es inapreciable, siendo mayor por encima de 700 nm. En todas las hojas, la eliminación de los tricomas de la cara adaxial tiene escaso impacto en τ , con ligero tendencia a aumentar, pero no en ρ . Cuando desaparecen los tricomas adaxiales ρ aumenta en las regiones donde hay una menor absorción, en la región central del NIR. Por el contrario, en las regiones con una fuerte absorción ρ disminuye. Cuando se eliminan los tricomas de la cara abaxial ρ vuelve a aumentar en el visible alcanzando valores similares a los de la primera fase en el pico del verde, pero menores en el rojo y el azul. ρ también se reduce ligeramente en las hojas del grupo “actual”, alcanzando valores similares a los de la hoja original; por el contrario, esta aumenta significativamente en las hojas del grupo “previos”. En la región central del NIR ρ disminuye, alcanzando valores inferiores a los iniciales, si bien esto es más pronunciado en las hojas del grupo “actual”. En longitudes de onda mayores de 1350 nm, ρ aumenta más cuanto más intensa es la absorción del agua. τ por su parte aumenta significativamente en el NIR y el SWIR, más notoriamente en las hojas de años “previos”.

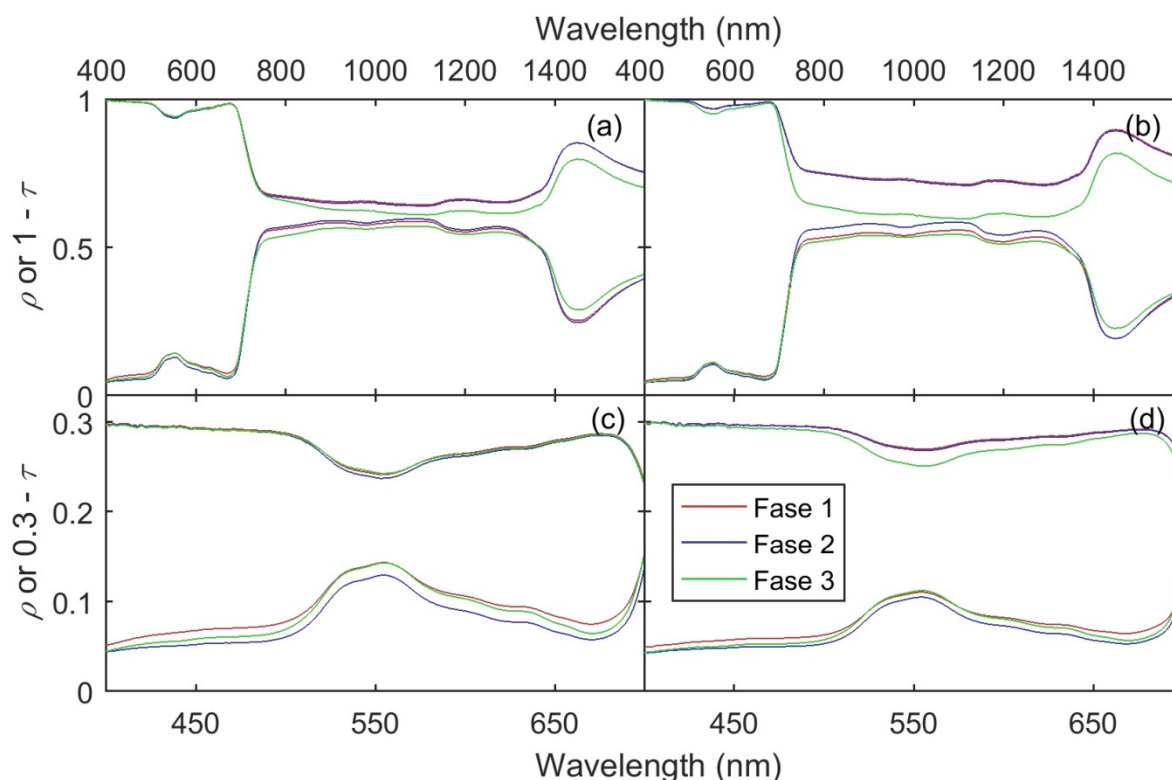


Figura 3. Espectros promedios de las hojas del grupo de edad "actual" (a,c) y "previos" (b,d) medidos en las diferentes fases de eliminación de tricomas. En la fila superior (a,b) se muestran los espectros en todo el rango espectral medido, mientras que la fila inferior (c,d) muestra en detalle la región visible del espectro. En la Fase 1 los tricomas están presentes en ambas caras, en la Fase 2 sólo tricomas sólo estaban presentes en la cara abaxial y en la Fase 3 los tricomas fueron eliminados en ambas caras.

La figura 4 compara los valores observados de las variables biofísicas medidas con los valores estimados mediante la inversión del modelo PROSPECT-4 empleando los espectros de ρ y τ en las diferentes fases de limpieza de los tricomas, así como los errores cuadráticos medios relativos (RRMSE) y el coeficiente de correlación r^2 . Como puede observarse, la eliminación de los tricomas en ambas caras de la hoja reduce los valores de RRMSE en todas las variables menos C_m y en casi todos los casos reduce el valor de r^2 . Cuando sólo se eliminan los tricomas de la cara adaxial, RRMSE alcanza valores máximos, si bien también r^2 en algunos casos. En general, la presencia de tricomas incrementa los rangos de variabilidad de los parámetros del modelo, pero alejados de los valores observados. En las muestras analizadas C_{ab} , C_{ar} y C_w son en gran medida sobreestimados, mientras que C_m es infraestimado cuando para valores inferiores a 0.0145 g/cm^2 .

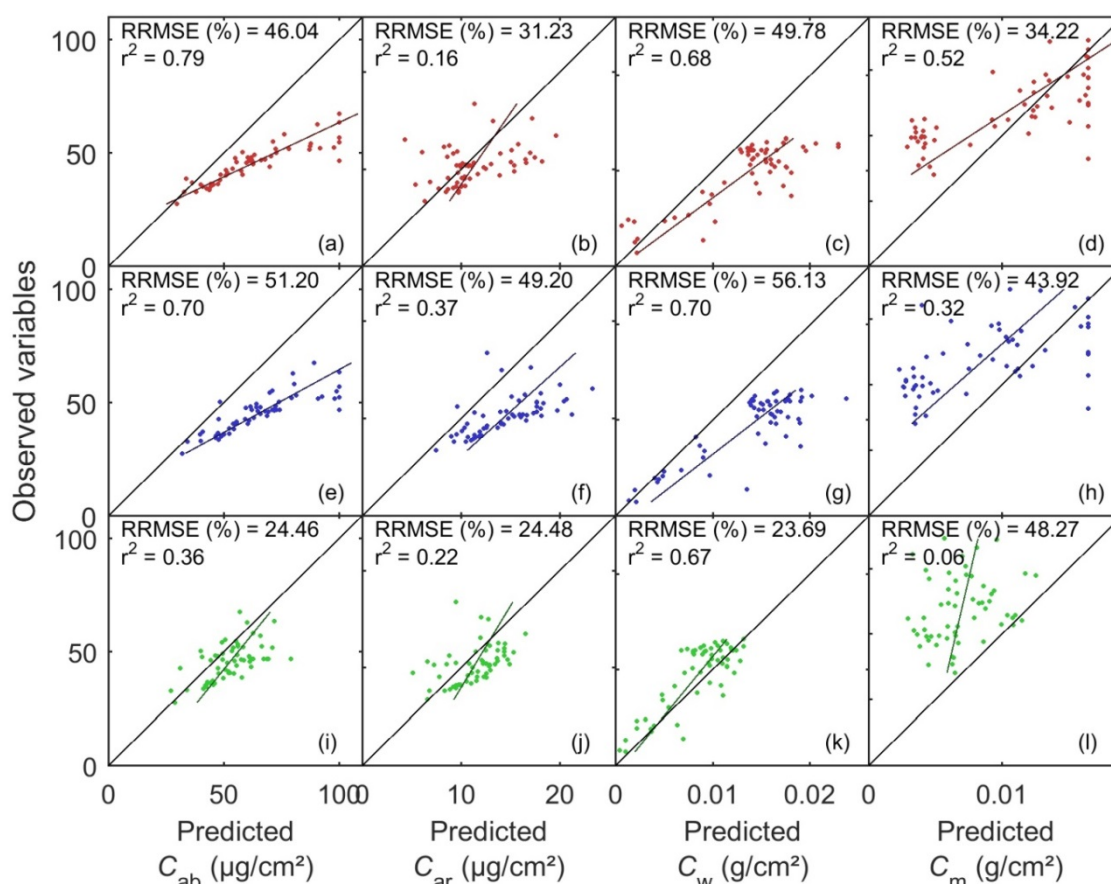


Figura 4. Gráfico de valores predichos-vs-observados para cada variable y cada fase de tratamiento de las hojas en el análisis. En las celdas a-d se muestran los resultados para la inversión a partir de los espectros medidos en la primera fase (todos los tricomas); en e-h los correspondientes a la segunda fase (cara adaxial limpia) y en i-l los de la tercera fase (ambas caras limpias).

5. Discusión

Los tricomas pueden modificar severamente las propiedades ópticas de las hojas en las que se desarrollan y, por tanto, dificultan la aplicación de MTR en el estudio de la vegetación, tanto en modo directo como inverso. La eliminación de los tricomas ha producido mejoras significativas en la estimación de C_w y C_{ab} , y en menor medida de C_{ar} . Los tricomas incrementan ρ y mayor medida reducen τ , lo que es interpretado como una mayor presencia de elementos absorbentes durante la inversión de PROSPECT-4. Por el contrario, en ausencia de tricomas el contenido de materia seca resulta subestimado y presenta mayores errores que cuando estos cubren la hoja. Esto es explicado por el hecho de que la materia seca actúa como un absorbente dentro de la hoja: la eliminación de los tricomas en ambas caras produce un mayor aumento de τ que decrecimiento de ρ , y especialmente en el NIR, donde los pigmentos no absorben radiación. Como consecuencia la inversión reduce los valores de C_m al eliminarse los tricomas. El valor del parámetro N también disminuye respecto a los valores asignados en las inversiones a partir de mediciones de hojas con tricomas. El uso de pesos asignados a diferentes regiones espectrales o regularización basada en las relaciones entre N y C_m (JACQUEMOUD & BARET 1990) podrían contribuir a reducir la infra-estimación de C_m .

Los efectos de los tricomas en las propiedades ópticas de las hojas observados en este trabajo son coherentes con los mostrados en estudios previos (BICKFORD 2016). Los tricomas contribuyen al incremento de ρ en un amplio rango espectral desde el visible hasta el SWIR. La eliminación de los

tricomas de la cara adaxial conlleva una reducción de ρ en la región visible (MORALES, ABADIA et al. 2002), si bien ésta aumenta de nuevo cuando se eliminan también los de la cara abaxial. Esto podría ser explicado por un efecto de absorción de la radiación visible de estos tricomas. Estudios previos muestran que la composición química y estructura de los tricomas de ambas caras varía (FERNÁNDEZ, SANCHO-KNAPIK et al. 2014) y contienen un porcentaje elevado de flavonoides que absorben fuertemente la radiación ultra-violeta (KARIOTI, TOULAKOU et al. 2011). Sin embargo, también podría deberse en parte a una degradación de la hoja durante y/o posterior a la eliminación de los tricomas. Aunque la monitorización del clorofila con el SPAD-502 sobre la mitad no manipulada de las hojas no reveló variaciones significativas, la mitad manipulada no pudo ser controlada. En la región del NIR, la reflectividad aumenta al eliminarse los tricomas adaxiales, ya que la radiación transmitida es reflejada por la capa de tricomas abaxiales y transmitida a través del mesófilo y la capa adaxial (ELLER & WILLI 1977); mientras que τ apenas varía. Cuando la capa abaxial es eliminada, la ρ se reduce ligeramente y τ aumenta en mayor medida; especialmente en las hojas de años previos, donde los tricomas abaxiales presentan un mayor espesor.

6. Conclusiones

La diversidad de estructuras que las hojas desarrollan en sus superficies para hacer frente a diferentes factores bióticos y abióticos, como tricomas, pilosidades o ceras-, constituye un reto para uso de RTM en el estudio de la vegetación. Se requieren mayores esfuerzos para determinar el impacto de estas en determinadas especies o conjuntos de especies. Sin embargo, la inclusión de estas estructuras en RTM resulta complicada, y difícilmente generalizable para grandes cubiertas o comunidades vegetales.

7. Agradecimientos

Los autores agradecen la colaboración de la Dra. Lara Vilar por su ayuda para obtener el BaSO₄ utilizado en las mediciones espectrales realizadas con la esfera integrante. Este trabajo se engloba en las actividades del proyecto SynerTGE ("CGL2015-G9095-R"), financiado del Ministerio de Economía, Industria y Competitividad.

8. Bibliografía

- BARET, F. & BUIS, S. 2008. Estimating canopy characteristics from remote sensing observations: Review of methods and associated problems. LIANG, S. *Advances in Land Remote Sensing: System, Modeling, Inversion and Application*. Springer. 171–200. Dordrecht.
- BICKFORD, C. P. 2016. Ecophysiology of leaf trichomes. *Funct. Plant Biol.* 43(9): 807-814.
- BUSCHMANN, C., S. LENK & H. K. LICHTENTHALER. 2012. Reflectance spectra and images of green leaves with different tissue structure and chlorophyll content. *Isr. J. Plant Sci.* 60(1-2): 49-64.
- ELLER, B. M. & P. WILLI. 1977. The significance of leaf pubescence for the absorption of global radiation by *Tussilago farfara* L. *Oecol.* 29(2): 179-187.
- FERET, J.-B., FRANÇOIS, C., ASNER, G.P., GITELSON, A.A., MARTIN, R.E., BIDEL, L.P.R., USTIN, S.L., LE MAIRE, G., & JACQUEMOUD, S. 2008. PROSPECT-4 and 5: Advances in the leaf optical properties model separating photosynthetic pigments. *Remote Sens. Environ.* 112: 3030-3043.
- FERNÁNDEZ, V., SANCHO-KNAPIK, D., GUZMÁN, P., PEGUERO-PINA, J.J., GIL, L., KARABOURNIOTIS, G., KHAYET, M., FASSEAS, C., HEREDIA-GUERRERO, J.A., HEREDIA, A., & GIL-PELEGRÍN, E. 2014. Wettability, Polarity, and Water Absorption of Holm Oak Leaves: Effect of Leaf Side and Age. *Plan Physiol.* 166: 168-180.

- GONZÁLEZ-CASCÓN, M. R., J. PACHECO-LABRADOR y M. P. MARTÍN ISABEL 2016. Variación temporal del comportamiento espectral y la composición química en el dosel arbóreo de una dehesa. *Revista de la Asociación Española de Teledetección*. 46: 31-43.
- HOUBORG, R., FISHER, J.B., & SKIDMORE, A.K. 2015. Advances in remote sensing of vegetation function and traits. *Int. J. Appl. Earth. Obs.* 43: 1-6
- JACQUEMOUD, S., & BARET, F. 1990. PROSPECT: A model of leaf optical properties spectra. *Remote Sens. Environ.* 34: 75-91
- JACQUEMOUD, S., VERHOEF, W., BARET, F., BACOUR, C., ZARCO-TEJADA, P.J., ASNER, G.P., FRANÇOIS, C., & USTIN, S.L. 2009. PROSPECT + SAIL models: A review of use for vegetation characterization. *Remote Sens. Environ.* 113: Supplement 1, S56-S66
- KARIOTI, A., G. TOULAKOU, A. R. BILIA, G. K. PSARAS, G. KARABOURNIOTIS AND H. SKAL TSA 2011. Erinea formation on *Quercus ilex* leaves: Anatomical, physiological and chemical responses of leaf trichomes against mite attack. *Photochem.* 72(2-3): 230-237.
- MENDIGUREN, G., PILAR MARTÍN, M., NIETO, H., PACHECO-LABRADOR, J., & JURDAO, S. 2015. Seasonal variation in grass water content estimated from proximal sensing and MODIS time series in a Mediterranean Fluxnet site. *Biogeosciences*. 12: 5523-5535.
- MORALES, F., ABADIA, A., ABADIA, J. MONTSERRAT, G., & GIL-PELEGRIN, E. 2002. Trichomes and photosynthetic pigment composition changes: responses of *Quercus ilex* subsp. *ballota* (Desf.) Samp. and *Quercus coccifera* L. to Mediterranean stress conditions. *Trees*. 16: 504-510.
- PFEIFER, M., DISNEY, M., QUAIFFE, T., & MARCHANT, R. 2012. Terrestrial ecosystems from space: a review of earth observation products for macroecology applications. *Glob. Ecol. Biogeogr.* 21: 603-624
- VERRELST, J., CAMPS-VALLS, G., MUÑOZ-MARÍ, J., RIVERA, J.P., VEROUSTRAETE, F., CLEVERS, J.G.P.W., & MORENO, J. 2015. Optical remote sensing and the retrieval of terrestrial vegetation biogeophysical properties – ISPRS J. Photogramm. *Remote Sens.* 108: 273-290
- VERRELST, J., MUÑOZ, J., ALONSO, L., DELEGIDO, J., RIVERA, J.P., CAMPS-VALLS, G., & MORENO, J. 2012. Machine learning regression algorithms for biophysical parameter retrieval: Opportunities for Sentinel-2 and -3. *Remote Sens. Environ.* 118: 127-139
- ZARCO-TEJADA, P.J., BERJÓN, A., LÓPEZ-LOZANO, R., MILLER, J.R., MARTÍN, P., CACHORRO, V., GONZÁLEZ, M.R., & DE FRUTOS, A. 2005. Assessing vineyard condition with hyperspectral indices: Leaf and canopy reflectance simulation in a row-structured discontinuous canopy. *Remote Sens. Environ.* 99: 271-287