

APLICACIÓN DE LA TELEDETECCIÓN HIPERESPECTRAL A LA ESTIMACIÓN DEL CONTENIDO EN CLOROFILA DE LAS PLANTAS

J. Delegido, L. Alonso, M. P. Cendrero, A. Forner y J. Moreno.

Departamento de Física de la Tierra y Termodinámica. Laboratorio de Procesado de Imágenes, Universidad de Valencia. P.O. Box 22085. E-46071 Paterna (Valencia) Jesus.Delegido@uv.es

RESUMEN

A partir de los datos de las dos campañas SPARC, donde se obtuvieron medidas in situ de varios parámetros biofísicos de 9 cultivos y se tomaron imágenes del sensor hiperespectral Proba/CHRIS, se han obtenido más de 300 puntos de los que se dispone de medidas in situ y del espectro obtenido por satélite. Con ello, se ha calculado distintos índices y se ha estudiado la relación con el contenido en clorofila en hoja (Ch), las relaciones entre ellos, la relación entre los índices y el Índice de Área Foliar (LAI) y la relación con el producto Ch*LAI. Buscando el máximo de la matriz de correlación, se estudia cuales son las bandas óptimas de distintos índices para estimar la clorofila a partir de imágenes hiperespectrales en áreas heterogéneas. Además, con los datos de la campaña CEFLES2 se ha validado los resultados obtenidos y estudiado el interés de las bandas en el Red-Edge del Sentinel-2 para los estudios de clorofila.

ABSTRACT

From the data of the two SPARC campaigns, where in situ measures were made over 9 crops of various biophysical parameters and Proba/CHRIS hyperspectral sensor images were available, we have obtained more than 300 points with coupled in situ measurements and remotely sensed spectra. From them different indices have been calculated and it has been studied their relationship with leaf chlorophyll content (Ch), the relations among them, the relationship between the indices and Leaf Area Index (LAI) and the relationship with the product Ch*LAI. Finding the maximum from the correlation matrix, we determine the best bands for different indices to estimate the chlorophyll from hyperspectral images of heterogeneous areas. Furthermore, the data from CEFLES2 campaign been used to validate the previous results and it has been studied the interest of Sentinel-2 Red Edge bands for chlorophyll studies.

Palabras clave: clorofila, LAI, NAOC, NDVI, hiperespectral, Proba/CHRIS.

INTRODUCCIÓN

El conocimiento de la cantidad de clorofila en hoja de los vegetales es fundamental tanto en estudios forestales o agronómicos como ambientales. Por ello se han desarrollado distintos métodos para su estudio, tanto a nivel de hoja como por teledetección, proponiendo una gran variedad de índices que relacionan la reflectividad obtenida por sensores en distintas bandas (Haboudane et al., 2008). El objetivo de este trabajo es estudiar distintos índices y compararlos con datos experimentales, así como buscar las bandas con las que se obtiene la mejor correlación.

COMPARACIÓN DE DISTINTOS ÍNDICES

Se han estudiado los siguientes índices:

- Modified Chlorophyll Absorption in Reflectance Index (MCARI), definido por Daughtry et al. (2000) como:

$$MCARI = [(R_{700}-R_{670}) - 0,2(R_{700}-R_{550})] R_{700}/R_{670} \quad (1)$$

Donde R_λ es la reflectividad en la banda de longitud de onda λ (en nm)

- Transformed CARI (TCARI), definido por Haboudane et al. (2002) como:

$$TCARI = 3[(R_{700}-R_{670}) - 0,2(R_{700}-R_{550})R_{700}/R_{670}] \quad (2)$$

- MERIS Terrestrial Chlorophyll Index (MTCI), definido por Dash and Curran, (2005) como:

$$MTCI = [(R_{750}-R_{710})/(R_{710}-R_{680})] \quad (3)$$

- Triangular Chlorophyll Index (TCI) propuesto por Haboudane et al., (2008) como:

$$TCI = 1,2(R_{700}-R_{550}) - 1,5(R_{670}-R_{550})(R_{700}/R_{670})^{1/2} \quad (4)$$

- Red – edge model (R-M) definido por Gitelson et al. (2005) como:

$$R-M = R_{750}/R_{720} - 1 \quad (5)$$

- Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) propuesto por Rouse et al. (1973) como:

$$\text{NDVI} = (R_{800} - R_{670}) / (R_{800} + R_{670}) \quad (6)$$

- Normalized Area Over reflectance Curve (NAOC) propuesto por Delegido et al., (2009) como:

$$\text{NAOC} = 1 - \frac{\int_{643}^{795} R d\lambda}{152 R_{795}} \quad (7)$$

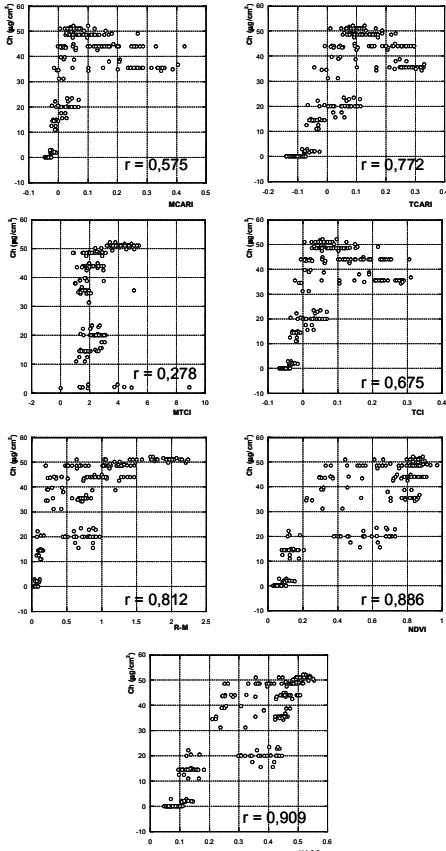


Figura 1.- Clorofila en hoja en función de los distintos índices. Se ha incluido el coeficiente de correlación lineal, r .

Se han utilizado los datos de las campañas SPARC 2003 y 2004 (Moreno et al., 2004), desarrolladas en Barrax donde se obtuvo la medida del contenido en clorofila en hoja, LAI y fracción de cobertura vegetal (fCOVER) de nueve cultivos en

unos 150 puntos mientras se obtuvieron dos imágenes Proba/CHRIS (Barnsley et al., 2004) en modo 1 (62 bandas y 34 m de resolución) cada año, bajo 5 ángulos de observación. De las imágenes a nadir, se han obtenido 300 píxeles (240 de cultivos y 60 de suelos desnudos) de los que se ha obtenido su espectro, con los que se han calculado los distintos índices. Al representar gráficamente los valores experimentales de la clorofila en función de los distintos índices se obtienen las gráficas de la Figura 1, donde se observa que la mejor correlación se obtiene con el NAOC.

Se ha estudiado si los índices están correlacionados entre sí, y hemos observado que existe una fuerte correlación entre los índices MCARI, TCARI y TCI (Figura 2) que relacionan tres bandas y proporcionan similar información. Por otra parte, se observa correlación entre el NDVI y el NAOC (Figura 2) que disminuye para valores altos de clorofila. Puesto que el NAOC se calcula a partir del área bajo la curva es susceptible de mejora con sensores que tengan mayor número de bandas, mientras que el NDVI sólo se obtiene de dos bandas.

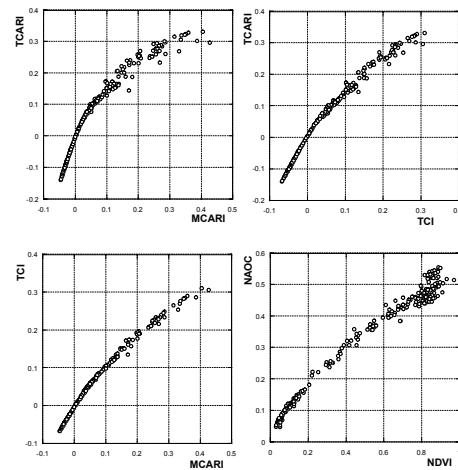


Figura 2.- Relaciones entre distintos índices

CANTIDAD DE CLOROFILA TOTAL

El producto de la clorofila por el LAI es un indicador de la cantidad total de clorofila en un cultivo. $\text{Ch} \cdot \text{LAI}$ se da en $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ (μg de clorofila por cm^2 de suelo). Otro parámetro relacionado con la cantidad de clorofila total es el producto $\text{Ch} \cdot \text{fCOVER}$.

En la Figura 3 se muestra la cantidad $\text{Ch} \cdot \text{LAI}$ en función del MCARI (la forma del

TCARI y TCI son similares y con el R-M presenta menos correlación), y en función del NAOC, donde hay dos zonas, una lineal con $\text{Ch}^*\text{LAI} < 100 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ y otra zona donde el índice satura para valores superiores. Las representaciones gráficas de Ch^*fCOVER no se incluyen pues dan resultados similares.

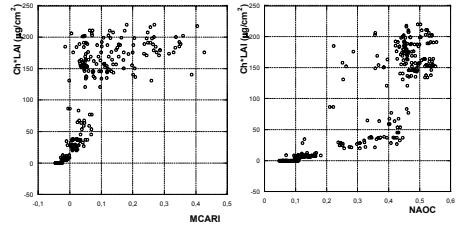


Figura 3.- Producto Ch^*LAI en función del MCARI y el NAOC.

El problema puede abordarse de dos formas: una intentar buscar correlaciones de tipo exponencial (como en el caso del NAOC) y otra intentar calcular el LAI por separado. Siguiendo esta metodología, se han intentado buscar correlaciones de los distintos índices con el LAI, observándose que existe cierta correlación entre el LAI y el NDVI y entre el LAI y el TCARI, por lo que hemos buscado las bandas óptimas para estos dos índices.

El resultado es que, para el IDN se obtiene máxima correlación lineal (0,868) con el LAI en las bandas de 674 nm y 712 nm (Figura 4).

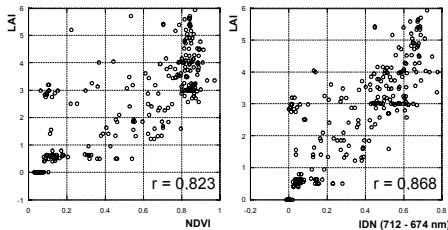


Figura 4.- LAI en función del NDVI y del Índice de Diferencia Normalizada calculado a 712 y 674 nm.

De forma similar, se han calculado las bandas óptimas que relacionan el LAI con el TCARI, obteniéndose que la máxima correlación (0,894) se obtiene sustituyendo la banda de 700 por 688, la de 670 por 664 y la de 550 por 542 en la ecuación (2), que son muy próximas a las originales y mejoran la correlación (Figura 5) pero no de forma significativa. En el resto de índices no se observa correlación con el LAI.

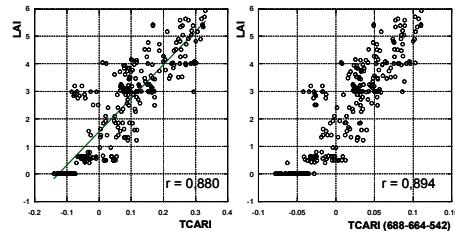


Figura 5.- LAI en función del TCARI según (2) y del mismo índice calculado a 688, 664 y 542 nm.

CLOROFILA CON SENTINEL-2

Para contrastar los resultados obtenidos se han utilizado datos similares procedentes de la campaña CEFLES2 (Rascher et al., 2009) que tuvo lugar en Las Landas (Francia) en 2007. También se ha estudiado la influencia del Red-Edge en la estimación de la clorofila usando el índice NAOC.

Se ha utilizado una imagen AHS (Fernández-Renau et al., 2005) obtenida en la campaña CEFLES2 y se ha calculado el NAOC, observándose una correlación de tipo exponencial con el producto Ch^*LAI obtenido a partir de medidas *in-situ* de distintas especies, consistente con los resultado de SPARC. Seguidamente se simularon imágenes de Sentinel-2 (Martimor et al., 2007) que cuenta con dos bandas en la región del Red-Edge situadas en 705 y 740 nm.

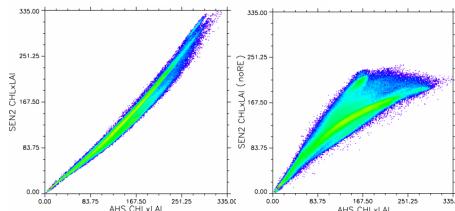


Figura 6.- Ch^*LAI calculado usando las bandas Sentinel en función de las bandas AHS, con todas las bandas (izquierda) y eliminando las dos bandas del Red-Edge (derecha).

En la Figura 6 se ha representado el cálculo de Ch^*LAI usando el espectro completo de AHS frente al obtenido con todas las bandas del Sen-2 (izquierda) y eliminando las dos bandas anteriores (derecha). Se observa una importante pérdida de correlación que justifica el uso de las citadas bandas.

CONCLUSIONES

Del estudio se pueden obtener las siguientes conclusiones:

1. El mejor índice para obtener directamente el contenido en clorofila en hoja a partir de una imagen hiperespectral es el NAOC.

2. Los índices MCARI, TCARI y TCI están fuertemente correlacionados entre sí. Existe correlación entre el NDVI y el NAOC, pero esta correlación se rompe para valores altos de NDVI y NAOC que corresponden a la vegetación verde que es precisamente la que más nos interesa estudiar.

3. La máxima correlación lineal entre el LAI y el IDN se obtienen en las bandas de 674 nm y 712 nm.

4. La máxima correlación lineal entre el LAI y el TCARI se obtienen en las bandas de 688, 664 y 542 nm, que prácticamente coinciden con las definidas por sus autores para el estudio de la clorofila. Ambos índices nos permitirían estimar el LAI en una zona heterogénea a partir de imágenes de satélite.

5. El Sentinel-2 permite calcular el NAOC gracias a las dos bandas en el Red-Edge, con lo que puede ser utilizado para la estimación de la clorofila por teledetección.

BIBLIOGRAFÍA

Barnsley, M.J.; Settle, J.J.; Cutter, M.A.; Lobb, D.R.; Teston, F., 2004. The PROBA/CHRIS mission: a low-cost smallsat for hyperspectral multiangle observations of the Earth surface and atmosphere. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol.42, no.7, pp. 1512-1520.

Daughtry, C. S. T., Walthall, C. L., Kim, M. S., Brown, E., and McMurtrey, J. E. 2000. Estimating corn leaf chlorophyll concentration from leaf and canopy reflectance, *Remote Sensing Environment* 74, 229-239.

Dash, J., and Curran, P. J. 2005. The MERIS terrestrial chlorophyll index. *International Journal Remote Sensing* 25, no 23, 5403-5413.

Delegido, J., Alonso, L., González, G. and Moreno, J. 2009. Estimating chlorophyll content of crops using a Normalized Area Over reflectance Curve (NAOC) and hyperspectral images. Enviado a *Remote Sensing of Environment*.

Fernández-Renau, A., Gómez, J. A., and de Miguel, E. 2005. The INTA AHS system. *Proc. SPIE, Sensing Technologies II*, Vol. 5978, 59781L.

Gitelson, A.A., Viña, A., Ciganda, V., Rundquist, D.C., & Arkebauer, T.J. 2005. Remote Estimation of Canopy Chlorophyll Content in Crops. *Geophysical Research Letters* 32, L08403, doi:10.1029/2005GL022688.

Haboudane, D., Miller, J. R., Tremblay, N., Zarco-Tejada, P. J., and Dextraze, L. 2002. Integrated narrow-band vegetation indices for prediction of crop chlorophyll content for application to precision agriculture. *Rem Sens of Environment* 81, 416-426.

Haboudane, D., Tremblay, N., Miller, J.R., Vigneault, P. 2008. Remote Estimation of Crop Chlorophyll Content Using Spectral Indices Derived From Hyperspectral Data. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing* 46, 423-437.

Martimor, P. et al., 2007. Sentinel-2 optical high resolution mission for GMES operational services. *Proceedings of IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS 2007*, pp.2677-2680.

Moreno, J., Alonso, L., Fernández, G., Fortea, J. C., Gandía, S., Guanter, L., García, J. C., & Martí, J. M. 2004. The spectra Barrax campaign (SPARC): overview and first results from Chris data. Proceedings of the 2nd CHRIS/Proba Workshop, ESA/ESRIN, Frascati, Italy.

Rascher, U., Agati, G., Alonso, L., Cecchi, G. et al. CEFLES2: the remote sensing component to quantify photosynthetic efficiency from the leaf to the region by measuring sun-induced fluorescence in the oxygen absorption bands. *Biogeosciences Discuss.*, 6, 2217-2266, 2009

Rouse, J.W., Haas, R.H., Schell, J.A., & Deering, D.W. 1973. Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. 3rd ERTS Symp., NASA SP-351, Vol. 1. pp. 309-17. Washington, DC.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean mostrar su agradecimiento a la ESA por la organización y publicación de los datos de las distintas campañas de medida utilizadas en este trabajo y a los distintos investigadores que han participado en ella, especialmente al personal del ITAP en Albacete y Barrax.