

ESTIMACIÓN DEL CONTENIDO CLOROFÍLICO EN COBERTURAS CON ESTRUCTURA CADUCIFOLIA Y CONÍFERA MEDIANTE INVERSIÓN DE MODELOS DE TRANSFERENCIA RADIATIVA Y DATOS HIPERESPECTRALES

P. J. ZARCO-TEJADA (*,**), J. R. MILLER (***) , G. H. MOHAMMED (****), T. L. NOLAND (****)
y P. H. SAMPSON (****)

pzarco@ucdavis.edu

(*) Centre for Research in Earth and Space Science (CRESS) y (***) Dept. of Physics and Astronomy, York University & Centre for Research in Earth and Space Technology (CRESTech), 4700 Keele Street - Toronto, Ontario M3J 1P3, Canadá

(****) Ontario Forest Research Institute (OFRI), Ontario Ministry of Natural Resources, 1235 Queens St. E., Sault Ste. Marie, Ontario P6A 2E5, Canadá

(**) Actualmente en: Center for Spatial Technologies and Remote Sensing (CSTARS), Department of Land, Air, and Water Resources (LAWR), Veihmeyer Hall, University of California, Davis, Davis, CA 95616 - 8671, EE.UU.

RESUMEN: El presente trabajo describe los resultados obtenidos en la estimación de contenido clorofílico mediante inversión de modelos de transferencia radiativa. El estudio se desarrolló en 17 zonas de estudio de dos especies forestales con grandes diferencias estructurales, *Acer saccharum* M. y *Pinus strobus* L. entre 1997 y 2000 en Ontario, Canadá, estimando chl_{a+b} mediante inversión de PROSPECT, SAILH y SPRINT. El sensor hiperspectral aerotransportado CASI se utilizó para obtener datos de reflectancia a 0.5 y 2 m de resolución espacial, con 72 y 288 bandas en el intervalo 400-950 nm. Datos de LAI, contenido clorofílico, carotenoides, reflectancia y transmitancia fueron obtenidos en las muestras foliares de acículas y caducifolias en cada una de las zonas de estudio.

ABSTRACT: This paper reports on progress made to estimate leaf chlorophyll content by radiative transfer model inversion techniques. The study was carried out at seventeen sites of *Pinus strobus* L. and *Acer saccharum* M. in Ontario, Canada, where field measurements and hyperspectral CASI imagery were collected between 1997 and 2000 deployments. PROSPECT, SAILH, and SPRINT models were used by numerical model inversion. Individual tree samples were collected at each site for biochemical analysis and measurement of leaf chlorophyll, carotenoid concentrations, as well as reflectance and transmittance of broad leaves and needles. The model inversion techniques were tested using CASI data of 72 and 288 channels and 0.5 and 2 m spatial resolution.

Palabras clave: hiperspectral, índices ópticos, transferencia radiativa, contenido clorofílico.

INTRODUCCIÓN

El presente trabajo de investigación forma parte del proyecto *Bioindicators of Forest Sustainability* (Mohammed *et al.*, 1997) cuyo objeto es el desarrollo de métodos basados en modelos de transferencia radiativa e índices ópticos para la estimación de contenido clorofílico en zonas forestales. El contenido clorofílico a nivel de hoja es uno de los posibles indicadores de estrés en vegetación, por lo que su estimación mediante datos hiperspectrales de alta resolución espacial tiene un gran interés en zonas forestales.

La estimación del contenido de pigmentos en vegetación mediante teledetección generalmente se ha veni-

do realizando a través de una de las siguientes metodologías: i) mediante relaciones estadísticas directas establecidas entre datos obtenidos en campo de contenido clorofílico medido en muestras foliares y datos de reflectancia de la cobertura vegetal; ii) mediante la aplicación a datos de reflectancia de la cobertura de relaciones obtenidas a nivel de hoja entre contenido clorofílico e índices ópticos; iii) mediante utilización de modelos de transferencia radiativa de cobertura y relaciones a nivel de hoja entre índices ópticos y pigmentos (*scaling-up*); y iv) mediante inversión de modelos de transferencia radiativa a nivel de hoja y de cobertura a partir de datos de reflectancia, obteniendo estimaciones

de contenido clorofílico sin necesidad de datos de campo.

Los referidos métodos tradicionales de tipo estadístico han demostrado su utilidad en repetidas ocasiones, mostrando, entre otros, la correlación existente entre datos hiperespectrales del sensor aerotransportado AVIRIS con la concentración de nitrógeno (N), contenido clorofílico y LAI (Johnson *et al.*, 1994). Sin embargo, dichas metodologías que no realizan modelización mediante transferencia radiativa, no son transferibles a otro tipo de especies forestales debido al efecto de la estructura y arquitectura de la cobertura. La metodología que se presenta en este trabajo para estimación de contenido clorofílico a partir de datos hiperespectrales de sensores aerotransportados se basa en la utilización de modelos de transferencia radiativa mediante la unión de modelos a nivel de hoja (PROSPECT) y de simulación de cobertura (SAILH, *Kuusk*, SPRINT). La utilización de distintas modelizaciones de la interacción fotón-vegetación depende de la simulación que dichos modelos realizan de la estructura forestal sobre la que se pretende realizar la estimación.

TOMA DE DATOS HIPERESPECTRALES

El presente estudio se llevó a cabo en 17 zonas de estudio de *Pinus strobus* L., *Pinus banksiana* L., y *Acer saccharum* M. situadas en Ontario (Canadá), donde se realizaron medidas de campo así como medidas hiperespectrales con el sensor aerotransportado CASI (*Compact Airborne Spectrographic Imager*). Las dos arquitecturas forestales estudiadas, coníferas y caducifolias, requiere la aplicación de distintos modelos de transferencia radiativa que permitan una mejor simulación de cada tipo de estructura. El sensor aerotransportado CASI realizó medidas en el intervalo 400-950 nm y los datos obtenidos en las mencionadas zonas de estudio variaron desde 0.5 m a 5 m de resolución espacial y 72 y 288 bandas con 7.5 nm y 2.5 nm de resolución espectral respectivamente. La toma de datos en campo y mediante el sensor aerotransportado CASI se realizó en campañas durante los años 1997, 1998, 1999 y 2000. Las tomas de datos en campo se realizaron en los mismos períodos de tiempo anteriormente mencionados y teniendo como objetivo medidas de índice de área foliar e índice de cobertura forestal, utilizando fotografía hemisférica y PCA-Licor-2000. Un total de 440 muestras foliares fueron recogidas en las 12 zonas de estudio de caducifolias, y 84 grupos de 5 acículas en cada una de las 6 zonas de estudio de coníferas en cada año. Dichas muestras se utilizaron para realizar medidas de contenido clorofílico y carotenoides según el método descrito en Zarco-Tejada *et al.* (2000; 2001). Medidas de reflectancia (ρ) y transmitancia (τ) de cada

muestra foliar, tanto de tipo caducifolia como acicular, fueron obtenidas mediante esfera Li-Cor y espectrómetro de fibra óptica de 7.5 nm de resolución espectral [400-900 nm]. Los valores digitales del sensor CASI en cada zona de estudio se procesaron a radiancia y corrigieron atmosféricamente mediante el modelo CAM5S

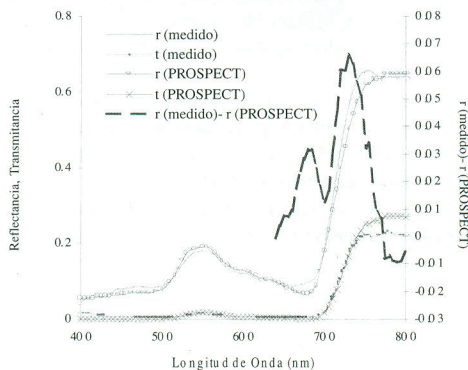


Figura 1. ρ y τ de acículas medidas mediante el método de Harron & Miller y simuladas mediante el modelo PROSPECT ($chl_{a+b}=68.5$ mg/cm², N=3.5).

utilizando medidas atmosféricas de aerosoles a 550nm. Finalmente, las imágenes fueron georeferenciadas utilizando las medidas realizadas e incorporadas por el GPS y sistema de navegación inercial a bordo. La metodología y resultados obtenidos se describen a continuación.

TRANSFERENCIA RADIATIVA A NIVEL DE HOJA

La realización de medidas precisas de las propiedades ópticas de muestras foliares es un paso crítico para el desarrollo y validación de modelos a nivel de hoja así como para su unión a modelos que simulen la reflectancia de la cobertura. El modelo PROSPECT es ampliamente aceptado y utilizado en muestras foliares de caducifolias para su inversión numérica con objeto de estimar contenido clorofílico. Mientras que protocolos de medida de ρ y τ a nivel de hoja utilizando esfera integrante Li-Cor 1800 son ampliamente utilizados para muestras de caducifolias, su utilización en acículas tiene mayor dificultad dados su tamaño y forma.

Por este motivo, la metodología de Daughtry *et al.* (1989) para medida de ρ y τ de acículas fue adaptada utilizando el método de Harron & Miller (Harron, 2000) (Figura 1) eliminando espacios entre acículas en la esfera Li-Cor mediante el diseño de un protocolo específico. Esta metodología elimina la necesidad de caracterización del flujo radiante entre acículas, así como la medida del espacio interior que originaba sobreestimación

de ρ y τ . Esta metodología de medida en acúlas permite la utilización del modelo de transferencia radiativa PROSPECT para su simulación, así como su inversión con datos de ρ y τ para estimación de contenido clorofílico.

Los datos de r y t obtenidos en las zonas de estudio de coníferas a partir de medidas con la nueva metodología de Harron & Miller obtuvieron $r^2=0.4$ en la estimación del contenido clorofílico mediante inversión del modelo PROSPECT (Figura 2). Las 84 medidas de ρ y τ de acúlas fueron utilizadas para la estimación del parámetro estructural N y el contenido clorofílico total utilizando PROSPECT. La inversión del modelo se realizó mediante iteración, variando N de 2 a 5, minimizando la función $\xi(N)$ del error cuadrático medio (RMSE) utilizando r y t en la región 780-800nm.

$$RMSE = \xi(N, chl_{a+b}) = \sqrt{\frac{\sum_{\lambda} [(r_{PROSPECT} - r_m)_{\lambda}^2 + (t_{PROSPECT} - t_m)_{\lambda}^2]}{n}}$$

donde r_m y t_m son reflectancia y transmitancia medidas en las acúlas con la esfera Li-Cor. En el segundo paso de la inversión del modelo, con N ya estimado, el contenido clorofílico se estima mediante iteración variándolo entre 40 y 100 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ minimizando la función $\xi(N, chl_{a+b})$. La mejora de la metodología de medida de ρ y τ en acúlas permitió la validación del modelo PROSPECT para la estimación de contenido clorofílico en coníferas. La simulación de transferencia radiativa a nivel de hoja permite su unión a modelos de la cobertura forestal con la metodología que se describe en el siguiente apartado.

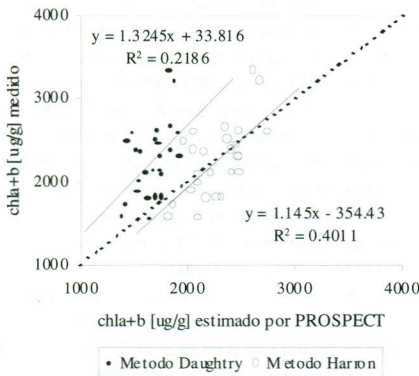


Figura 2. Estimación del contenido clorofílico en acúlas de *Pinus strobus* mediante inversión del modelo PROSPECT con datos de ρ y τ medidos mediante el método de Daughtry, y Harron & Miller.

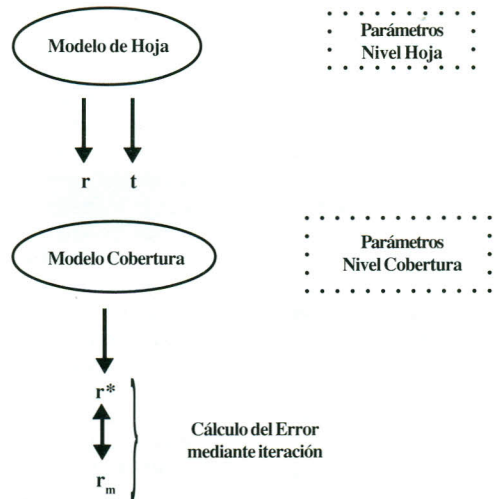


Figura 3. Unión de modelos de transferencia radiativa a nivel de hoja y de cobertura para su inversión ($r^*=p$ estimada; $r_m=p$ medida).

RESULTADOS A NIVEL DE COBERTURA MEDIANTE INVERSIÓN DE MODELOS CON DATOS HIPERESPECTRALES

La simulación de la cobertura forestal se realizó utilizando dos modelos de transferencia radiativa, SAILH para coberturas caducifolias, y SPRINT para coberturas de coníferas. En ambos casos la estimación de contenido clorofílico se realizó mediante inversión numérica de la unión de PROSPECT+SAILH y PROSPECT+SPRINT utilizando parámetros estructurales y de geometría de visión nominales medidos en campo para ambas especies forestales (Tabla 1). La inversión de dichos modelos para estimación de contenido clorofílico a partir de datos hiperespectrales se realizó siguiendo 3 pasos descritos en Zarco-Tejada *et al.* (2001) consistentes en minimizar una función Δ^2 dados una serie de parámetros $P=(N, Chl_{a+b}, C_m, LAI, \theta_s, \dots)$ en el intervalo 400-950 nm,

$$\Delta^2 = \sum_n [r_m(\lambda_i) - r^*(\lambda_i, P)]^2$$

donde $r_m(\lambda_i)$ es la reflectancia de la cobertura medida con el sensor hiperespectral aerotransportado; y $r^*(\lambda_i, P)$ es la reflectancia simulada por los modelos de transferencia radiativa función de los parámetros de entrada P (Figura 3).

Los resultados obtenidos mediante la descrita inversión de modelos para la estimación de contenido

clorofílico en las 17 zonas de estudio fueron $r^2=0.4$, $RMSE=8.1 \mu g/cm^2$ (*Acer saccharum*) y $r^2=0.4$, $RMSE=5.5 \mu g/cm^2$ (*Pinus strobus*) con datos hiperspectrales de 1999 y 2000 (Figura 4).

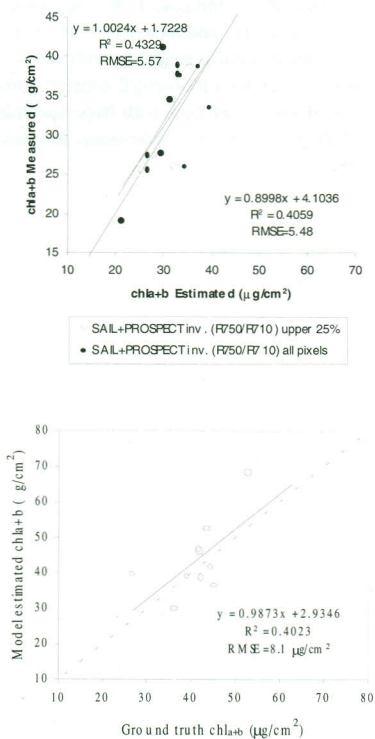


Figura 4. Estimación de contenido clorofílico en zonas forestales de *Acer saccharum* (arriba) y *Pinus strobus* (abajo) mediante inversión de modelos PROSPECT, SAILH y SPRINT con datos hiperspectrales del sensor aerotransportado CASI.

| Parámetros Cobertura | Valores Nominales |
|------------------------------|---------------------------------------|
| Densidad de copas | 1100/ha |
| Distribución de copas | Distribución de Poisson |
| Forma de las copas | Cónica irregular |
| Altura de tronco | 8.5 m |
| Altura del árbol | 15.0 m |
| Radio del tronco | 8.3 cm |
| Radio de la copa | 2.0 m |
| Distrib. angular foliar | Considerada esférica |
| Área de rama | 0.0008 m ² |
| LAI efectiva | 2.5 |
| Densidad del área foliar | 0.4171/m |
| Parámetros Hoja | Valores Nom. y rango |
| Espesor de la hoja | 0.062 cm (0.057 – 0.076) |
| Área foliar esp. (p. fresco) | 20.9 cm ² /g (17.9 – 23.7) |
| Área foliar esp. (p. seco) | 48.1 cm ² /g (37.7 – 58.6) |
| Parámetros Bioquímicos | Rango de valores |
| Clorofila a+b | 1,286 a 3,588 mg.g ⁻¹ |
| Carotenoides | 243 a 611 mg.g ⁻¹ |
| Agua (% de peso seco) | 97.3 a 179.3 |

Tabla 1. Parámetros utilizados en las modelizaciones a nivel de hoja y cobertura con los modelos PROSPECT+SPRINT en *Pinus strobus*.

CONCLUSIONES

El presente trabajo ha demostrado la utilización de inversión de modelos de transferencia radiativa para estimación de pigmentos clorofílicos en distintas especies forestales. La validación y utilización a nivel de hoja de PROSPECT unido a SAILH para caducifolias, y SPRINT para coníferas ha permitido la estimación del contenido clorofílico total en dichas coberturas con amplias diferencias estructurales, obteniendo errores entre 5 y 8 $\mu g/cm^2$. Las diferencias estructurales de *Acer saccharum* y *Pinus strobus*, no sólo respecto a la forma y tamaño de hojas caducifolias y acículas, sino también a nivel de arquitectura forestal fueron simuladas de forma satisfactoria mediante los modelos utilizados en el presente trabajo. Esta metodología permite la estimación de contenido clorofílico a partir de datos hiperspectrales sin necesidad de tomas de datos en campo, demostrando su superioridad respecto a métodos estadísticos tradicionales y permitiendo su transferencia a otro tipo de especies.

BIBLIOGRAFÍA

DAUGHERTY, C. S. T., BIEHL, L. L., and RANSON, K. J., A new technique to measure the spectral properties of conifer needles, *Remote Sensing of Environment*, 27:81-91, 1989.

- HARRON, J. W., Optical properties of phytoelements in conifers, M. Sc. Thesis, *Graduate Program in Earth and Space Science*, pp193, York University, Toronto, December, 2000.
- JOHNSON, L. F., HLAVKA, C. A. and PETERSON, D. L., Multivariate analysis of AVIRIS data for canopy biochemical estimation along the Oregon transect, *Remote Sensing of Environment*. 47:216-230, 1994.
- MOHAMMED, G. H., SAMPSON, P. H., COLOMBO, S. J., NOLAND, T. L., y MILLER, J. R., Bioindicators of forest sustainability: *Development of a forest condition rating system for Ontario*, OFRI, ON, Canada, 1997.
- ZARCO-TEJADA, P. J., MILLER, J. R., MOHAMMED, G. H., NOLAND, T. L., Chlorophyll Fluorescence Effects on Vegetation Apparent Reflectance: I. Leaf-Level Measurements and Model Simulation. *Remote Sensing of Environment*, 74(3):582-595, 2000.
- ZARCO-TEJADA, P. J., MILLER, J. R., NOLAND, T. L., MOHAMMED, G. H., and SAMPSON, P. H., *Scaling-up and model inversion methods with narrow-band optical indices for chlorophyll content estimation in closed forest canopies with hyperspectral data*, *IEEE Trans. Geos. Remote Sensing*, aceptado Enero 2001.