

ÍNDICES ÓPTICOS OBTENIDOS MEDIANTE DATOS HIPERESPECTRALES DEL SENSOR CASI COMO INDICADORES DE ESTRÉS EN ZONAS FORESTALES

P. J. Zarco-Tejada (*), J.R. Miller (**), G.H. Mohammed (***), T.L. Noland (***) y P.H. Sampson (***)

pzarco@yorku.ca

(*) 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, Canada.

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

Resumen

El presente trabajo es un avance del proyecto *Bioindicators of Forest Sustainability* que persigue el desarrollo de índices ópticos relacionados con indicadores fisiológicos mediante teledetección hiperspectral. El estudio se desarrolla en 17 zonas de *Pinus strobus* L., *Pinus banksiana* Lamb. y *Acer saccharum* M. localizadas en Ontario (Canadá) donde se obtuvieron medidas de campo de muestras foliares así como datos hiperspectrales del sensor aerotransportado CASI en 1997, 1998 y 1999. Datos de índice de área foliar e índice de cobertura así como medidas de contenido clorofílico, fluorescencia clorofílica, carotenoides, reflectancia y transmitancia fueron obtenidos de cada muestra foliar en cada una de las zonas de estudio. Índices ópticos desarrollados a nivel de hoja fueron aplicados a los datos de reflectancia obtenidos por CASI de 2 m de resolución espacial y 72 bandas.

Abstract

This paper reports on progress made to link physiologically-based indicators to optical indices from hyperspectral remote sensing. The study is being carried out at seventeen sites of *Pinus strobus* L., *Pinus banksiana* Lamb. and *Acer saccharum* M. in the Algoma Region, Ontario (Canada), where field measurements and hyperspectral CASI imagery have been collected in 1997, 1998 and 1999 deployments. Crown cover, LAI and individual tree samples were collected at each site for biochemical analysis and measurement of leaf chlorophyll, chlorophyll fluorescence and carotenoid concentrations, as well as reflectance and transmittance of broad leaves and needles. The *physiological indices* and *derivative analysis indices* extracted from leaf spectral reflectance have been tested at canopy level using CASI data of 72 channels and 2 m spatial resolution.

Palabras clave: hiperspectral, índices ópticos, fluorescencia clorofílica, parámetros espectrales.

INTRODUCCIÓN

El diseño y desarrollo de medidas cuantitativas que determinen el grado de estrés en la vegetación en zonas forestales es básico para estudiar el efecto que tienen fenómenos naturales y actividades de explotación en dichas áreas. Diversas leyes de protección mediomambiental y forestal canadienses proveen las medidas necesarias para la investigación y desarrollo de las mencionadas medidas de tipo cuantitativo de vitalidad de ecosistemas así como medidas de producción forestal que exijan su desarrollo sostenido (*Canadian Council of Forest Ministers y Terms and Conditions of the Environmental Assessment for Ontario*). El presente trabajo de investigación forma parte del proyecto *Bioindicators of Forest Sustainability* (Sampson *et alii.* 1997, Mohammed *et alii.* 1998) llevado a cabo por York University, Centre for Research in Earth and Space Technology (CRESTech) y Ontario Forest Research Institute

(OFRI) y tiene como objetivo el desarrollo de índices ópticos relacionados con indicadores fisiológicos en distintas especies forestales derivados mediante teledetección hiperspectral. El estudio está siendo llevado a cabo en 17 zonas de estudio de *Pinus strobus* L., *Pinus banksiana* Lamb., y *Acer saccharum* M. situados en Ontario (Canadá), donde se han realizado medidas de campo así como medidas hiperspectrales con el sensor aerotransportado CASI (*Compact Airborne Spectrographic Imager*) en 1997, 1998 y 1999. CASI realiza medidas en el intervalo 400-950 nm y los datos obtenidos en las mencionadas zonas de estudio varían 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.

ANÁLISIS DE DATOS

La toma de datos a nivel de hoja y mediante el sensor aerotransportado CASI se realizó en 2

campañas anuales repetidas durante los años 1997, 1998 y 1999. Los datos tomados por CASI han sido divididos en 3 categorías distintas según las cuales la adquisición se realiza con distintas características espectrales y espaciales. La misión de *mapeado* de 0.5 m de resolución espacial y 5 bandas espectrales tuvo como objetivo la localización de las zonas de estudio mediante paneles de 3 x 3 m distribuidos en cada una de ellas y cuyas coordenadas geográficas fueron obtenidas mediante GPS. La misión de *reflectancia bidireccional* de 2 m de resolución espacial, 72 bandas y resolución espectral de 7.5 nm, así como la misión *hiperespectral* de 5 m de resolución espacial, 288 bandas y resolución espectral de 2.5 nm tuvieron por objeto el desarrollo de índices ópticos a partir de datos de reflectancia y de su análisis derivativo.

Las tomas de datos a nivel de hoja se realizaron en los mismos periodos de tiempo anteriormente mencionados y teniendo como objetivo medidas de índice de área foliar e índice de cobertura forestal, utilizando fotografía hemisférica, PCA-Licor-2000 y densímetro. Un total de 440 muestras foliares fueron recogidas en las zonas de estudio en cada campaña con objeto de realizar medidas de contenido clorofílico y carotenoides, así como fluorescencia clorofílica (ChF). Fv/Fm representa la relación entre variable y máxima fluorescencia clorofílica y puede ser considerado como una medida de eficiencia fotosintética. Una amplia revisión de las posibilidades que la fluorescencia clorofílica tiene como indicador de estrés en vegetación puede encontrarse en la revisión realizada por Mohammed (1995). Medidas de reflectancia y transmitancia de cada muestra foliar fueron obtenidas mediante una esfera Licor revestida interiormente con BaSO₄ y conectada a un espectrómetro de fibra óptica de 7.5 nm de resolución espectral e intervalo de muestreo de 0.5 nm en el rango 400-900 nm. El nivel de ruido obtenido en la toma de datos de reflectancia y transmitancia por la fibra óptica fue estudiado con objeto de adecuar el ancho de banda correcto y la función de filtrado y derivación de cada medida de reflectancia y transmitancia. Las diferencias anatómicas existentes en las muestras foliares de *Pinus strobus* L., *Pinus banksiana* Lamb., y *Acer saccharum* M. originaron el diseño de placas con aberturas longitudinales para que las muestras de *Pinus strobus* L. y *Pinus banksiana* Lamb. pudieran ser introducidas en la esfera Licor. Diversas funciones de filtrado de los datos de reflectancia y transmitancia fueron aplicadas con objeto de minimizar el mencionado nivel de ruido, en concreto técnicas de filtrado de función rectangular, triangular y Savitzky-Golay de orden 3, 4 y 5, todos ellos con

ancho de banda variable. Se realizó un estudio análogo para la derivación de la reflectancia y transmitancia, utilizándose finalmente el algoritmo de Savitzky-Golay de orden 3 con ancho de banda de 25 nm en *Acer saccharum* M., 30 nm en *Pinus strobus* L. y 40 nm en *Pinus banksiana* Lamb., y la misma técnica de Savitzky-Golay para el cálculo de las derivadas de reflectancia y transmitancia, con ancho de banda de 13 nm. Los valores digitales de 16 bits de resolución radiométrica del sensor CASI se procesaron para obtener radiancia utilizando coeficientes de calibración obtenidos en laboratorio por CRESTech. Durante la toma de datos, al mismo tiempo que el sensor sobrevolaba cada zona, se obtuvieron medidas atmosféricas de aerosoles (AOD) a 550 nm en las zonas de estudio. Dichas medidas de aerosoles fueron utilizadas en el cálculo de la reflectancia aplicando una variante del modelo de corrección atmosférica 5S denominado CAM5S. Los datos de reflectancia fueron posteriormente georeferenciados utilizando las medidas realizadas e incorporadas a la imagen por el GPS a bordo del avión y finalmente registrados a las imágenes de 0.5 m de resolución espacial que fueron utilizadas para la localización de cada zona de estudio.

SELECCIÓN DE ÍNDICES UTILIZADOS

La selección de índices ópticos calculados mediante los datos de reflectancia y a partir de su análisis derivativo se basó en 4 categorías fundamentales dependiendo del tipo de parámetro utilizado así como la zona del espectro utilizado:

(a) Índices en el Espectro Visible, como SRPI (R_{430}/R_{680}); NPQI ($(R_{415}-R_{435})/(R_{415}+R_{435})$); PRI calculado según 3 ecuaciones ($(R_{531}-R_{570})/(R_{531}+R_{570})$), ($(R_{550}-R_{531})/(R_{550}+R_{531})$) y ($(R_{570}-R_{539})/(R_{570}+R_{539})$); NPCI ($(R_{680}-R_{430})/(R_{680}+R_{430})$); Carter (R_{695}/R_{420}), G (R_{554}/R_{677}) y Lictenthaler (R_{440}/R_{690}), entre otros.

(b) Índices en el Visible/NIR, como NDVI ($(R_{774}-R_{677})/(R_{774}+R_{677})$); SR (R_{774}/R_{677}); Lictenthaler ($(R_{800}-R_{680})/(R_{800}+R_{680})$), (R_{440}/R_{740}); Gitelson & Merzylak (R_{750}/R_{550}) y SIPI ($(R_{800}-R_{450})/(R_{800}+R_{650})$).

(c) Índices en Red Edge, como Vogelmann calculados según (R_{740}/R_{720}), ($(R_{734}-R_{747})/(R_{715}+R_{726})$), ($(R_{734}-R_{747})/(R_{715}+R_{720})$), (D_{715}/D_{705}); Gitelson & Merzylak (R_{750}/R_{700}); y Carter (R_{695}/R_{760}).

(d) Índices Espectrales, como λ_p , λ_o , R_o , R_s y σ así como índices espectrales calculados a partir de análisis derivativo de la reflectancia: DPR1 ($D_{\lambda_o}/D_{\lambda_o+12}$), DPR2 ($D_{\lambda_o}/D_{\lambda_o+22}$), DP21 (D_{λ_o}/D_{703}) y DP22 (D_{λ_o}/D_{720}), entre otros.

Los índices ópticos fueron calculados a partir de las medidas de reflectancia a nivel de hoja así como a partir de la reflectancia infinita (R_{∞}) obtenida para cada muestra foliar mediante modelos de cobertura ópticamente densa, como Fujimura, Lillistaeter y Hapke, con el fin de simular, de una forma inicial, las medidas de reflectancia obtenidas por CASI sobre una cobertura forestal densa y prácticamente cerrada a partir de medidas foliares individuales. Las medidas de transmitancia a nivel de hoja fueron por lo tanto necesarias con objeto de utilizar los mencionados modelos que relacionan las medidas foliares individuales de reflectancia con las medidas a nivel de cobertura forestal realizadas por CASI. El modelo SAIL así como su variante teniendo en cuenta la fluorescencia clorofílica se aplicarán en las imágenes CASI de las campañas de Junio y Agosto de 1999 y los resultados serán discutidos en la comunicación oral del Congreso.

RESULTADOS A NIVEL DE HOJA

Los resultados a nivel de hoja de las dos campañas de 1998 realizadas en Junio y finales de Julio demuestran que algunos índices espectrales e índices en el red edge están relacionados con ChFl (Fv/Fm). En la Tabla 1 se relacionan los índices que obtuvieron mejores coeficientes de determinación en el análisis estadístico realizado con las 440 muestras de *Acer saccharum* M.

Índice Óptico	r
Vogelmann (R_{740}/R_{720})	0.69
PRI1 ($(R_{531}-R_{570})/(R_{531}+R_{570})$)	0.72
PRI2 ($(R_{550}-R_{531})/(R_{550}+R_{531})$)	-0.68
PRI3 ($(R_{570}-R_{539})/(R_{570}+R_{539})$)	-0.68
Carter (R_{695}/R_{760})	-0.64
Gitelson & Merzylak (R_{750}/R_{700})	0.66
Vogelmann ($(R_{734}-R_{747})/(R_{715}+R_{726})$)	-0.66
Vogelmann ($(R_{734}-R_{747})/(R_{715}+R_{720})$)	-0.66
Licenthaler (R_{440}/R_{690})	0.61
λ_p	0.69
DP22 (D_{66}/D_{720})	-0.71
Vogelmann (D_{715}/D_{705})	0.69

Tabla 1.- Coeficientes de determinación obtenidos en el análisis estadístico de índices ópticos y ChFl (Fv/Fm) aplicados a las muestras foliares de *Acer saccharum* M. a nivel de hoja.

Los índices fueron aplicados a los datos de reflectancia y R_{∞} calculada mediante Hapke, Lillistaeter y Fujimura. La Figura 1 muestra la relación obtenida entre Fv/Fm y PRI calculado como $(R_{531}-R_{570})/(R_{531}+R_{570})$, a partir de R_{∞} (Fujimura).

PREDICCIÓN DE ChFl EN IMÁGENES HIPERESPECTRALES CASI UTILIZANDO LAS RELACIONES OBTENIDAS A NIVEL DE HOJA

Las imágenes del sensor CASI fueron obtenidas en las mismas zonas de estudio y al mismo tiempo sobre las que se realizó la campaña de toma de muestras foliares. Se calculó la reflectancia media en un área de 20 x 20 m en cada una de las 12 zonas de estudio de *Acer saccharum* M. El modo utilizado fue el de reflectancia bidireccional, con 2 m de resolución espacial, 72 bandas y resolución espectral de 7.5 nm. Con objeto de minimizar sombras y apertura de la cobertura forestal, con posible influencia de la cobertura de fondo o suelo, la metodología seguida consistió en utilizar el 25% de los valores más altos de reflectancia en el infrarrojo cercano en cada zona de estudio.

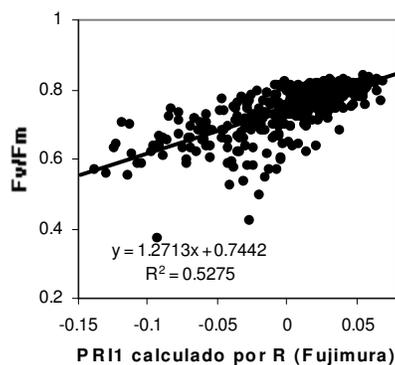


Figura 1.- Relación obtenida entre Fv/Fm y PRI calculado como $(R_{531}-R_{570})/(R_{531}+R_{570})$, a partir de R_{∞} (Fujimura). Fv/Fm fue medido en laboratorio horas después de la recogida de muestras foliares de *Acer saccharum* M. y tras un periodo de adaptación a la oscuridad. Valores superiores de Fv/Fm indican mayor eficiencia fotosintética.

La Tabla 2 muestra los coeficientes de determinación obtenidos entre los valores medidos de ChFl (Fv/Fm) y las estimaciones de ChFl (Fv/Fm) utilizando las relaciones obtenidas a nivel de hoja y aplicadas a los datos CASI en las 12 zonas de estudio. En todos los casos las estimaciones son mejores cuando se utilizan las relaciones a nivel de hoja obtenidas a partir de R_{∞} de Hapke, Lillistaeter y Fujimura. La Figura 2 muestra la estimación de ChFl mediante el índice óptico de Vogelmann (R_{740}/R_{720}) utilizando las relaciones obtenidas a nivel de hoja basadas en reflectancia y R_{∞} . En dicho gráfico se observa que la mejor estimación se realiza

cuando se utiliza R_{∞} de Hapke, seguida por Fujimura y Lillistateter respectivamente.

Indice Optico	r
Vogelmann (R_{740}/R_{720})	r=0.9
DP21 ($D_{\lambda 0}/D_{703}$)	r=0.91
Vogelmann ($R_{734}R_{747}$)/($R_{715}+R_{726}$)	r=0.87
Vogelmann ($R_{734}R_{747}$)/($R_{715}+R_{720}$)	r=0.87
Gitelson & Merzylak (R_{750}/R_{700})	r=0.84
Carter (R_{695}/R_{760})	r=0.83
λ_p	r=0.82
Vogelmann (D_{715}/D_{705})	r=0.79
DPR2 ($D_{\lambda 0}/D_{\lambda 0+22}$),	r=-0.68
Gitelson & Merzylak (R_{750}/R_{550})	r=0.67
DP22 ($D_{\lambda 0}/D_{720}$)	r=-0.63
PRI3 ($R_{570}-R_{539}$)/($R_{570}+R_{539}$)	r=0.63
DPR1 ($D_{\lambda 0}/D_{\lambda 0+12}$)	r=-0.6
PRII ($R_{531}-R_{570}$)/($R_{531}+R_{570}$)	r=0.59

Tabla 2.- Coeficientes de determinación obtenidos en la estimación de ChFI (Fv/Fm) aplicando a los datos CASI las relaciones obtenidas a nivel de hoja basadas en índices ópticos calculados a partir de reflectancia y R_{∞} de Hapke, Lillistaeter y Fujimura.

Los resultados anteriores demuestran que los índices que están altamente correlacionados con Fv/Fm son aquéllos basados en red edge así como índices espectrales principalmente. Estudios previos realizados en el marco del proyecto BOREAS/NASA demuestran la utilización de parámetros espectrales λ_0 , λ_p y σ calculados a partir de datos CASI mediante ajuste de una curva invertida de Gauss en imágenes de 16 bandas, permitiendo la diferenciación de especies forestales (Zarco-Tejada y Miller 1999). La Figura 3 muestra la estimación de Fv/Fm utilizando datos CASI en las 2 zonas de estudio que presentaron valores extremos de Fv/Fm en las muestras de campo. Para la estimación se utilizó Vogelmann (R_{740}/R_{720}) como indicador óptico a partir de la relación obtenida mediante R_{∞} Hapke. En el centro de cada imagen, de 2 m de resolución espacial, se encuentra localizada la zona de estudio de 20 x 20 m donde se realizó la toma de muestras; la circunferencia alrededor tiene un radio de 100 m. Se puede observar que los valores de Fv/Fm en la zona de estudio de la imagen superior, correspondiente a la zona de estrés bajo, presenta valores superiores de Fv/Fm (0.83), mientras que la imagen inferior, correspondiente a la zona de estrés alto, presenta valores inferiores de Fv/Fm (0.69). Con objeto de validar los resultados obtenidos en las campañas de 1997 y 1998 se plantea la adquisición de datos de Junio y Agosto de 1999 mediante una toma de muestras de tipo selectivo basándonos en las predicciones utilizando el índice Vogelmann (R_{740}/R_{720}) para Fv/Fm así

como otros índices que demostraron ser buenos indicadores de clorofila-a y b, y carotenoides. Se utilizarán zonas homogéneas cercanas a las de estudio que presenten valores extremos de dichas variables para la validación de los algoritmos. Los resultados de dicha validación serán presentados en la comunicación del Congreso.

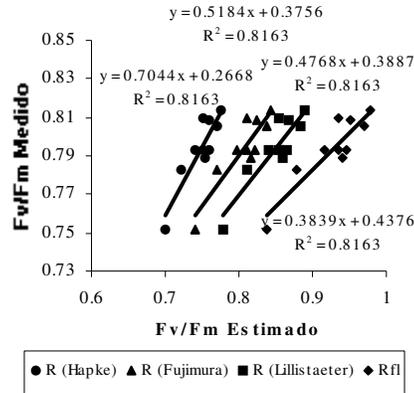


Figura 2.- Estimación de Fv/Fm mediante los datos hiperspectrales de CASI utilizando algoritmos obtenidos a nivel de hoja mediante el índice óptico de Vogelmann (R_{740}/R_{720}) y mediante los modelos de cobertura óptica densa de Hapke, Fujimura y Lillistaeter. El gráfico representa la relación entre Fv/Fm estimado mediante los datos CASI y Fv/Fm medido en laboratorio en *Acer saccharum* M.

BIBLIOGRAFÍA

- 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*, Ontario Forest Research Institute, Sault Ste. Marie, ON, Canada, 1997.
- Mohammed, G.H., Binder, W. D., y Gillies, S. L., Chlorophyll fluorescence: A review of its practical forestry applications and instrumentation, *Scand. J. For. Res.*, 10, 383-410, 1995.
- Sampson, P.H., Mohammed, G. H., Colombo, S. J., Noland, T. L., Miller, J. R., y Zarco-Tejada, P. J., *Bioindicators of Forest Sustainability Progress Report*, Ontario Forest Research Institute, Sault Ste. Marie, ON, Canada, 1998
- Zarco-Tejada, P.J. y J.R. Miller. Land Cover Mapping at BOREAS using red edge spectral parameters from *casi* imagery. *Journal of Geophysical Research (JGR)*. En prensa.