

# UTILIZACIÓN DE MODELOS DE REFLECTANCIA COMO NEXO ENTRE MUESTRAS FOLIARES Y LA COBERTURA FORESTAL: APLICACIÓN A DATOS HIPERESPECTRALES

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), York University, 4700 Keele Street, Toronto, Ontario M3J 1P3, Canadá.

(\*\*) 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

## Resumen

El presente trabajo demuestra la utilización de modelos de simulación de la cobertura forestal mediante su aplicación a datos hiperespectrales del sensor aerotransportado CASI. Los modelos SAIL y *Kuusk* permiten ser utilizados como nexo de unión entre los niveles de hoja y de cobertura: las relaciones a nivel de hoja obtenidas entre índices ópticos y bioindicadores de estrés, como contenido clorofílico o fluorescencia clorofílica, pueden ser transformadas a un nivel superior de cobertura mediante la utilización de dichos modelos. Finalmente se realiza una demostración de la utilización de modelos de cobertura a través de los resultados obtenidos en el proyecto *Bioindicators of Forest Sustainability*, desarrollado en 12 zonas de *Acer saccharum* M. localizadas en Ontario (Canadá) donde se obtuvieron medidas de campo de muestras foliares, así como datos hiperespectrales del sensor aerotransportado CASI en 1997, 1998 y 1999. Los índices ópticos desarrollados a nivel de hoja fueron aplicados, a través de modelos de cobertura, a los datos de reflectancia obtenidos por CASI de 2 m de resolución espacial y 72 bandas.

**Palabras clave:** hiperespectral, índices ópticos, modelos de cobertura, contenido clorofílico, fluorescencia clorofílica.

## Abstract

This paper demonstrates the use and applications of Canopy Reflectance Models (CR) with airborne hyperspectral CASI data. SAIL and *Kuusk* canopy reflectance models are the link between the leaf and canopy levels: leaf-level relationships obtained between optical indices and stress bioindicators, such as chlorophyll content and chlorophyll fluorescence can be scaled-up to the canopy level using canopy reflectance models. The application of canopy reflectance models is demonstrated with the results obtained in the *Bioindicators of Forest Sustainability Project*. The work was carried out in 12 study areas of *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. Single leaf reflectance and transmittance, chlorophyll and carotenoid content, and chlorophyll fluorescence of broad leaves were measured. The *physiological indices* and *derivative analysis indices* extracted from leaf spectral reflectance were tested at canopy level using CASI data of 72 channels and 2 m spatial resolution.

**Key Words:** hyperspectral, optical indices, canopy reflectance models, chlorophyll fluorescence.

## INTRODUCCIÓN

La estimación del contenido clorofílico y fluorescencia clorofílica a nivel de hoja mediante medidas de reflectancia es motivo de gran número de estudios debido a que es uno de los indicadores más importantes de estrés en vegetación, y por lo tanto un área de gran interés para la teledetección hiperespectral de alta resolución espacial. El contenido clorofílico

foliar total es inversamente proporcional al grado de estrés en vegetación, originando un cambio en la proporción de absorción de luz en el visible: las variaciones en la reflectancia, transmitancia y absorbancia permiten distinguir distintos grados de estrés en función de la proporción en que queda afectada por dicho pigmento cada una de las mencionadas propiedades ópticas foliares (Horler *et al.*, 1983; Ahern 1988; Rock *et al.*, 1988; Hoque *et*

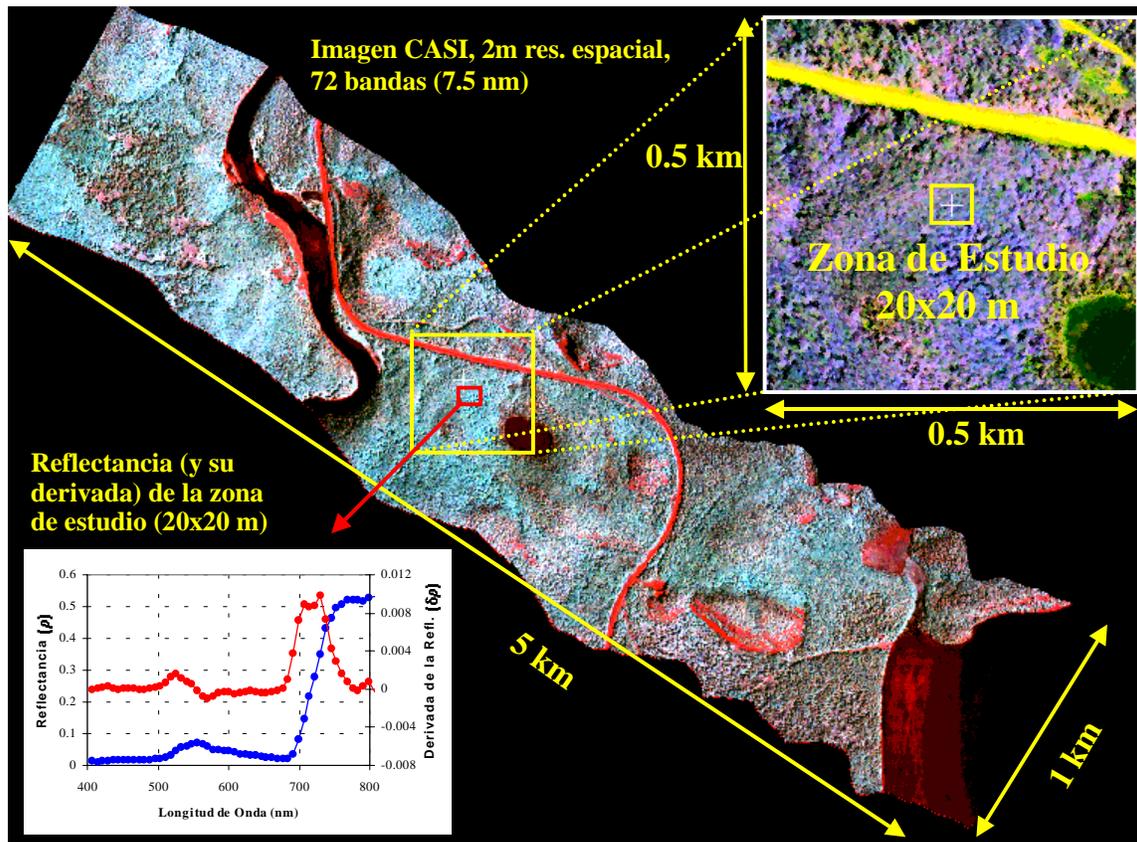
*al.*,1992; Palmier and Ansseau 1992; Vogelmann *et al.*,1993; Carter 1994; Carter *et al.*,1996; Gitelson *et al.*,1996).

La fluorescencia clorofílica, por su parte, es producida en tejidos fotosintéticos por excitación con luz natural o artificial procedente principalmente del Fotosistema II (P680). La producción de fluorescencia clorofílica es una de las formas en que el cloroplasto disipa energía sobrante de la fotosíntesis, por lo tanto reacción como medida de protección a la oxidación del cloroplasto. Las numerosas revisiones bibliográficas y trabajos que ocupan el estudio de la fluorescencia clorofílica a nivel de hoja demuestra el gran interés y potencialidad (Schreiber *et al.*, 1994; Larcher, 1994; Lichtenthaler, 1992; Krause and Weis, 1984; Papageorgiou, 1975). El interés radica en que la fluorescencia clorofílica demuestra ser una herramienta útil en la identificación de estrés de tipo previsual, incluso antes de que otros métodos puedan revelarlo. A modo de ejemplo, cambios en la eficiencia fotosintética preceden a cambios en el contenido clorofílico, por lo tanto la variación de la fluorescencia clorofílica se puede observar con mucha más antelación a síntomas cloróticos de tipo visual, siendo una técnica de tipo no destructivo, no invasivo y rápida (Mohammed *et al.*, 1995).

Todos los trabajos anteriormente descritos presentan mayor o menor éxito en la modelización cuantitativa del contenido clorofílico y la fluorescencia clorofílica como estimación del grado de estrés a nivel de hoja. Las relaciones o algoritmos de estimación se obtienen entre índices ópticos calculados a partir de reflectancia y bioindicadores medidos a partir de muestras foliares. Sin embargo el nexo de unión entre el nivel de hoja y el nivel de cobertura en campo utilizando teledetección aerotransportada o espacial no suele tener en cuenta aspectos críticos: (i) la estructura y arquitectura de la cobertura vegetal sobre la que se quieren aplicar estimaciones desarrolladas a nivel de hoja; y (ii) la geometría de visión de toma de datos por el sensor en el momento de la

adquisición, función de la reflectancia bidireccional (BRDF).

El presente trabajo pretende demostrar algunas de las implicaciones anteriormente comentadas cuando se quieren conectar algoritmos a nivel de hoja con estimaciones de bioindicadores a nivel de cobertura. El proyecto *Bioindicators of Forest Sustainability* (Mohammed *et al.*, 1997; Sampson *et al.*, 1998), llevado a cabo por York University, *Centre for Research in Earth and Space Technology* (CRESTech) y *Ontario Forest Research Institute* (OFRI)-Canadá, es el marco bajo el que se desarrolla la presente investigación, sirviendo para estudiar la utilización de índices ópticos obtenidos mediante teledetección hiperespectral en la estimación de bioindicadores sobre zonas forestales. 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 el norte de Ontario, donde se han realizado medidas de campo así como medidas hiperespectrales 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. La Figura 1 muestra una de las zonas de estudio del proyecto, imagen obtenida por CASI en el modo de operación de 72 bandas, a 2 m de resolución espacial. Los datos fueron corregidos atmosféricamente utilizando el modelo CAM5S y medidas de aerosoles en campo a 550 nm en el momento de la toma de la imagen. Modelos de reflectancia como SAIL (Verhoef, 1984) y *Kuusk* (Kuusk, 1996) utilizados anteriormente con éxito en el presente proyecto (Zarco-Tejada *et al.*, 1999a; Zarco-Tejada *et al.*, 1999b), así como el reciente modelo SPRINT (Goel *et al.*, recientemente enviado para publicación) con capacidad de modelización de arquitecturas de forma tridimensional, serán también comentados.



**Figura 1.** Imagen obtenida sobre una de las 12 zonas de estudio de *Acer saccharum M.* en el Proyecto *Bioindicators of Forest Sustainability* (York Univ., OFRI, CRESTech). La imagen fue obtenida por el sensor hiperespectral aerotransportado CASI, en el modo de operación de 72 bandas, a 2 m de resolución espacial. Los datos fueron corregidos atmosféricamente utilizando el modelo CAM5S y medidas de aerosoles en campo a 550 nm en el momento de la toma de la imagen. La zona de estudio de 20x20m fue utilizada para calcular la reflectancia media, así como para su análisis derivativo. La localización de las zonas de estudio fue posible utilizando el modo de operación de 0.5 m de resolución espacial, que permitió la localización de paneles de 3x3 m distribuidos por cada una de las zonas y de los cuales se obtuvieron medidas de GPS diferencial.

## ÍNDICES ÓPTICOS RELACIONADOS CON BIOINDICADORES A NIVEL DE HOJA: CONTENIDO CLOROFÍLICO Y FLUORESCENCIA CLOROFÍLICA

La variación en la absorción de radiación electromagnética por pigmentos clorofílicos produce cambios en la pendiente y posición del red-edge (0.70-0.74  $\mu\text{m}$ ), motivo de extensa discusión por Horler (1983) y otros. De la misma forma, diversos estudios sugieren variaciones en la reflectancia aparente a nivel de hoja debido a cambios en la fluorescencia clorofílica (Peñuelas *et al.*, 1998; Gamon *et al.*, 1997; Peñuelas *et al.*, 1997; Peñuelas *et al.*, 1995). La teledetección hiperespectral permite la utilización de índices ópticos, obtenidos mediante medidas de reflectancia, directamente asociados a variaciones en la absorción a específicas longitudes de onda o a re-emisiones

de energía, como en el caso de la fluorescencia, que modifican la reflectancia aparente.

Existen múltiples referencias en la literatura sobre la relación entre índices ópticos y contenido clorofílico: parámetros espectrales de red-edge relacionados con contenido clorofílico en *Acer saccharum M.* (Vogelmann *et al.*, 1993) utilizando el punto de inflexión  $\lambda_p$  (máximo de la primera derivada de la reflectancia);  $R_{740}/R_{720}$ ; así como índices derivativos como  $D_{715}/D_{705}$ . Índices desarrollados por Peñuelas *et al.* (1995) como *Simple Ratio Pigment Index* SRPI ( $R_{430}/R_{680}$ ) demuestran verse afectados por la relación carotenoides/clorofila-a. *Normalized Phaeophytinization Index* (NPQI) calculado como  $(R_{415}-R_{435})/(R_{415}+R_{435})$  está basado en la degradación de la clorofila (Barnes *et al.*, 1992), demostrado por diferentes estudios como índice sensible al grado de estrés (Peñuelas *et*

al., 1995; Lorenzen and Jensen, 1989; Ahern, 1988).

*Photochemical Reflectance Index* (PRI) es un índice fisiológico relacionado con la eficiencia fotosintética (Gamon *et al.*, 1992), calculado como  $(R_{REF}-R_{531})/(R_{REF}+R_{531})$ , en que  $R_{REF}$  ha sido establecido como  $R_{550}$  y  $R_{570}$  (Gamon *et al.*, 1992; Filella *et al.*, 1996) y  $R_{531}$  puede ser calculado como  $R_{530}$  (Peñuelas *et al.*, 1994) y  $R_{539}$  (Filella *et al.*, 1996), con objeto de minimizar complicaciones asociadas a variaciones del ángulo de inclinación solar. Sin embargo índices como PRI han podido ser demostrados de utilidad solamente a nivel de hoja, no a nivel de cobertura. *Normalized Pigment Chlorophyll ratio Index* (NPCI) calculado como  $(R_{680}-R_{430})/(R_{680}+R_{430})$  y otros índices asociados con cambios fisiológicos en Nitrógeno han demostrado ser sensibles a la variación del contenido clorofílico (Peñuelas *et al.*, 1994).

El análisis derivativo de la reflectancia también ha sido utilizado ampliamente como estimador del contenido clorofílico a nivel de hoja: el máximo (dG) y mínimo (dg) de la primera derivada de la reflectancia entre 525 y 570 nm están relacionados con la variación diaria de la eficiencia fotosintética; estudios previos realizados en el marco del proyecto BOREAS/NASA demuestran la utilización de parámetros espectrales  $\lambda_o$ ,  $\lambda_p$  y  $\sigma$  calculados a partir de datos CASI mediante ajuste de una curva invertida de Gauss en imágenes de 16 bandas, permitiendo demostrar la asociación de  $\lambda_p$  a variaciones del contenido clorofílico entre distintas especies forestales (Zarco-Tejada y Miller, 1999c). Otros índices ópticos han sido utilizados con éxito como indicadores de estrés:  $R_{695}/R_{670}$ ,  $R_{695}/R_{420}$ ,  $R_{605}/R_{760}$ ,  $R_{695}/R_{760}$  y  $R_{710}/R_{760}$  (Carter, 1994).

La correlación entre índices ópticos y fluorescencia clorofila está asociada a la utilización de índices calculados en las zonas 680-690 nm y 720-740 nm, que corresponden a bandas de emisión de los Fotosistemas II y I, P680 y P700, respectivamente:  $R_{685}/R_{655}$ ,  $R_{683}^2/(R_{675}\cdot R_{691})$ ,  $D_{730}/D_{706}$  (Zarco-Tejada *et al.*, enviado para publicación).

La gran variedad de índices ópticos existentes para su cálculo mediante datos de reflectancia y a partir de su análisis derivativo

nos permite realizar una clasificación en 4 categorías fundamentales dependiendo del tipo de parámetro y 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 ( $R_{695}/R_{760}$ );  $R_{685}/R_{665}$ ,  $R_{683}^2/(R_{675}\cdot R_{691})$ .

(d) Índices Espectrales, como  $\lambda_p$ ,  $\lambda_o$ ,  $R_o$ ,  $R_s$  y  $\sigma$  así como índices espectrales calculados a partir de análisis derivativo de la reflectancia: DPR1 ( $D_{\lambda_p}/D_{\lambda_p+12}$ ), DPR2 ( $D_{\lambda_p}/D_{\lambda_p+22}$ ), DP21 ( $D_{\lambda_p}/D_{703}$ ) y DP22 ( $D_{\lambda_p}/D_{720}$ ),  $D_{730}/D_{706}$ , entre otros.

## DE NIVEL DE HOJA A NIVEL DE COBERTURA FORESTAL: DISTINTAS POSIBILIDADES

Los índices ópticos mencionados anteriormente, que asocian relaciones de reflectancia a longitudes de onda particulares con contenido clorofílico o fluorescencia clorofílica a nivel de hoja, deben ser modificados o transportados al nivel superior de la cobertura vegetal si queremos aplicarlos a datos de reflectancia obtenidos mediante sensores aerotransportados o espaciales. Existen distintas posibilidades al respecto de la transportabilidad de dichas relaciones de índices ópticos, que vienen a ser resumidas de la siguiente forma:

(i) relaciones obtenidas a nivel de hoja pueden ser aplicadas directamente a datos de reflectancia de cobertura del sensor aerotransportado o espacial;

- (ii) relaciones a nivel de hoja son transformadas a través de modelos de reflectancia infinita ( $R_{\infty}$ ), mediante datos de reflectancia y transmitancia a nivel de hoja;
- (iii) la transformación se realiza a través de modelos de cobertura, mediante datos de reflectancia, transmitancia y parámetros que definen la arquitectura de la cobertura vegetal y la geometría de visión.

Como puede observarse, las tres posibilidades están ordenadas en grado de menor a mayor complejidad: la primera opción aplica directamente relaciones obtenidas a nivel de hoja a datos de reflectancia del sensor sin tener en cuenta la transmitancia de las muestras foliares ni la estructura de la cobertura; la segunda opción, mediante 3 modelos de reflectancia infinita (Zarco-Tejada *et al.*, 1999b, para mayor detalle) requieren reflectancia y transmitancia foliar y se realiza la simulación mediante modelos de cobertura ópticamente densa, con el fin de simular, de una forma inicial, las medidas de reflectancia obtenidas por un sensor aerotransportado o espacial sobre una cobertura forestal densa y prácticamente cerrada a partir de medidas foliares individuales. Las medidas de transmitancia a nivel de hoja son, por lo tanto, necesarias con objeto de utilizar los mencionados modelos que relacionan las medidas foliares individuales de reflectancia y transmitancia con las medidas a nivel de cobertura forestal realizadas por el sensor. En los modelos de reflectancia infinita la simulación de la cobertura no tiene en cuenta su arquitectura, y se realiza solamente una aproximación a la estructura de la cobertura forestal; la tercera opción, la más compleja, requiere datos de reflectancia y transmitancia a nivel foliar, así como parámetros que describan la arquitectura de la cobertura vegetal y geometría de visión en el momento de la toma de datos. Esta última opción es el objetivo del siguiente apartado y centra el interés del presente trabajo.

## **MODELOS DE COBERTURA: FILOSOFÍA DE FUNCIONAMIENTO, REVISIÓN Y CLASIFICACIÓN**

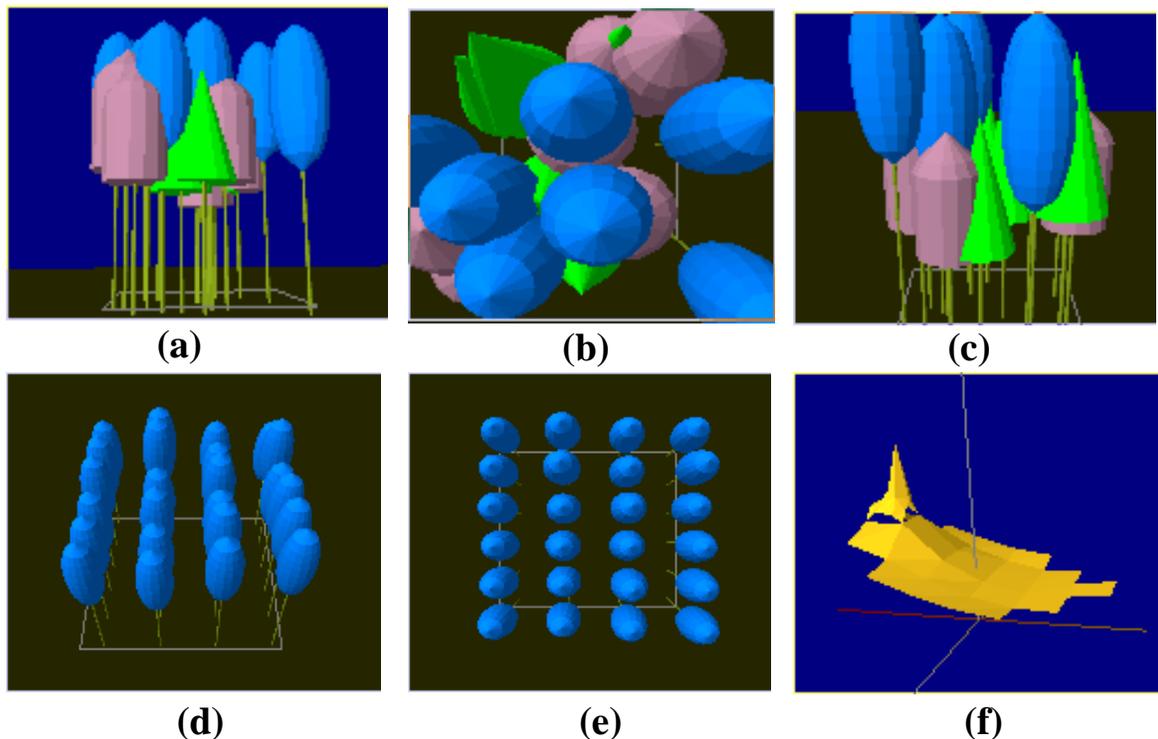
Existen muchos factores que determinan la reflectancia de una cobertura vegetal, y que deben ser comprendidos dado que serán integrados en los mencionados modelos: (i) el

flujo solar incidente; (ii) las propiedades espectrales de los elementos que componen la cobertura vegetal; (iii) la arquitectura de la cobertura, y (iv) la reflectancia del suelo o de las coberturas inferiores que la componen (Goel, 1988). Una cobertura vegetal es compleja y, por lo tanto, sus elementos se orientan y distribuyen de forma complicada. Dichos elementos interactúan con la radiación electromagnética de forma que es difícil de cuantificar el porcentaje de radiación que llega al sensor después de interactuar con todos los elementos que forman parte de la cobertura. Existen distintas formas de simular dicha reflectancia de la cobertura, y pueden ser clasificados en 4 categorías:

(i) **modelos de turbidez**, tratan la cobertura vegetal como un medio infinito, horizontalmente uniforme y plano. Los elementos de la vegetación se consideran que están distribuidos de forma aleatoria en capas paralelas, cuyos elementos son pequeñas partículas reflectoras y que absorben dependiendo de sus propiedades ópticas definidas por la reflectancia y transmitancia. LAI y LAD (distribución de área foliar) son utilizados para definir la arquitectura de la cobertura, mientras que propiedades como las dimensiones de los elementos foliares, distancia entre elementos o distribuciones de tipo no aleatorio son ignorados. Este tipo de modelos son los elegidos cuando se pretende simular coberturas densas, como por ejemplo maíz, soja y cebada en sus estados de desarrollo avanzados. Existen 3 formas distintas de simulación en modelos de turbidez: modelos basados en la teoría de Kubelka-Munk (como Suits y SAIL); modelización de tipo discreto; y modelos basados en la ecuación de transferencia radiactiva.

(ii) **modelos geométricos**, utilizados principalmente cuando las coberturas vegetales no son densas, la cobertura es diseñada a base de un ensamblaje de formas con dimensiones y propiedades ópticas simuladas.

(iii) **modelos híbridos**, son una combinación de los dos anteriores, de turbidez y geométricos, y es utilizado en aquellos casos en que la cobertura vegetal no se adecua a ninguno de los casos anteriores. La modelización sigue siendo de tipo geométrica, pero la interacción del flujo con los elementos de la cobertura es realizada

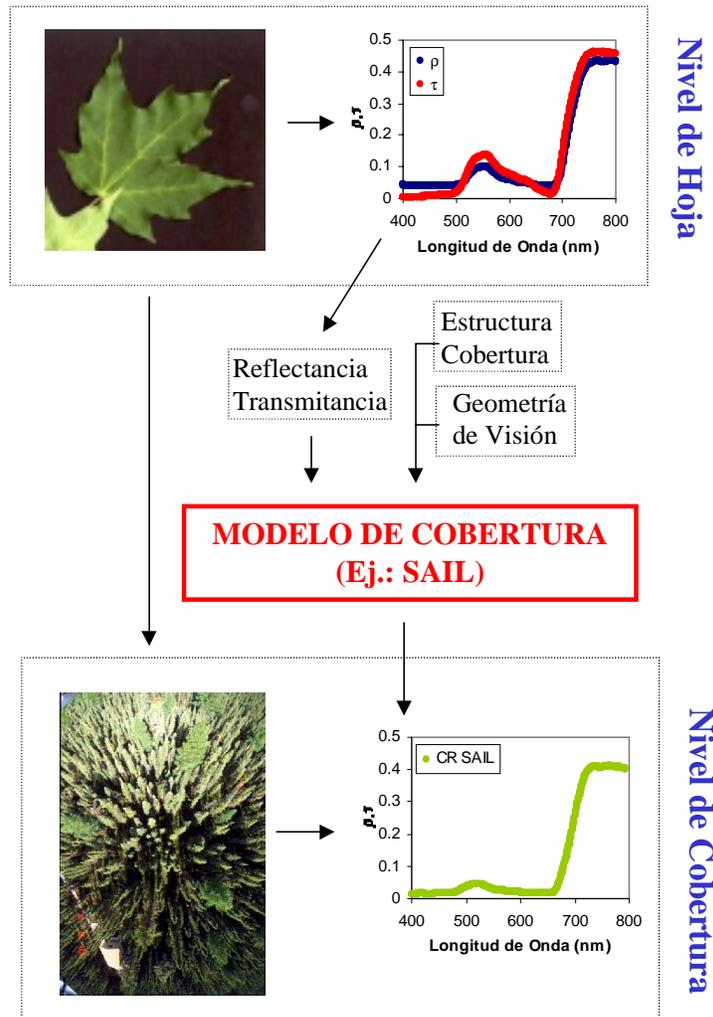


**Figura 2.** Generación de una cobertura forestal tridimensional mediante la utilización del modelo de simulación SPRINT. La distribución de elementos puede ser de tipo aleatoria utilizando distribuciones de Poisson y Neyman (a,b,c), o mediante elementos ordenados por filas, simulando una cobertura agrícola (d,e). Los elementos pueden ser diseñados para simular elementos forestales o cultivos determinados en sus distintos estados fenológicos: la arquitectura, por lo tanto, puede simular cambios temporales que afecten a la reflectancia observada por un sensor aerotransportado o espacial. La reflectancia bidireccional se calcula a partir de la arquitectura diseñada (f) donde puede observarse el efecto “hot-spot”. Modelo SPRINT utilizado con el permiso de Narendra S. Goel, Department of Computer Science, Wayne State University, Detroit, MI.

mediante modelos de turbidez. Estos modelos son los más complejos y computerizadamente intensivos.

**(iv) modelos de simulación por ordenador,** permiten la simulación de las posiciones y orientaciones de los elementos que forman la cobertura vegetal. Suelen utilizar el método de Monte Carlo para seguir la trayectoria del fotón desde que llega a la cobertura e interacciona con los distintos elementos vegetativos que la componen. La trayectoria es seguida hasta que, de forma aleatoria, el fotón es absorbido (por lo tanto se pierde en la cobertura) o es reflejado (y por lo tanto captado por el sensor aerotransportado o espacial). Los resultados son excepcionales cuanto mayor grado de detalle y conocimiento se tenga de la cobertura, lo cual puede ser considerado como una ventaja (la simulación es realista y muy exacta) o como un inconveniente (el conocimiento de una cobertura forestal pocas veces puede ser tan detallado como estos modelos requieren).

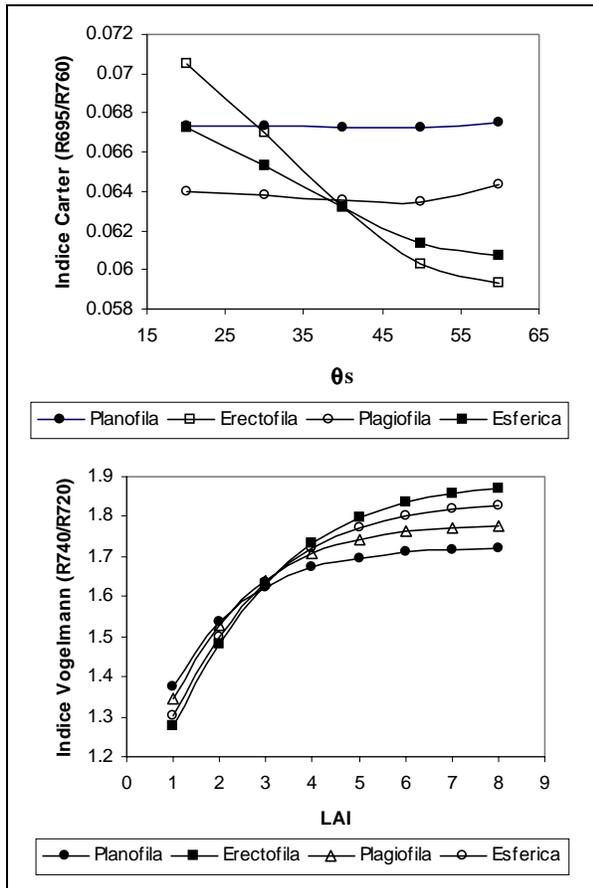
Es interesante hacer mención del nuevo modelo de simulación por ordenador SPRINT que permite el diseño de coberturas tridimensionales utilizando formas geométricas a medida. El modelo realiza simulación de reflectancia bidireccional (BRDF) sobre coberturas en que los elementos son dispuestos en líneas y columnas (simulación de coberturas agrícolas) o bien utilizando distribuciones de Poisson o Neyman, con múltiples posibilidades de diseño y creación de la arquitectura de la cobertura. La Figura 2 muestra un ejemplo de una cobertura creada utilizando distribución de Poisson con 3 tipos distintos de elementos vegetales. La utilización de este tipo de modelos de cobertura es especialmente interesante para aplicaciones sobre coberturas de cultivos, donde los distintos estados fenológicos están asociados a diferentes tipos de arquitecturas, que pueden simularse mediante modificación de los tamaños y formas de los elementos del modelo.



**Figura 3.** Utilización del modelo de cobertura SAIL para la simulación de reflectancia de cobertura forestal. La reflectancia y transmitancia de una muestra foliar se utilizan para simular la reflectancia de la cobertura forestal a partir de datos conocidos de la estructura de la cobertura (índice de área foliar LAI, función de distribución angular foliar LADF, reflectancia de suelo) y de geometría de visión (ángulo zenital y azimutal solar, ángulo de visión), así como de la relación de la radiación directa/difusa. La simulación del ejemplo ha sido realizada con LAI=3.5, LADF=plagiofila y ángulo zenital solar=35°. Los índices ópticos calculados a partir de la reflectancia simulada están afectados por la estructura de la cobertura forestal.

La Figura 3 muestra la simulación realizada por el modelo SAIL utilizando una muestra de reflectancia y transmitancia foliar obtenida en campo. Mediante los parámetros de estructura de la cobertura (índice de área foliar LAI, función de distribución angular foliar LADF, reflectancia de suelo) y de geometría de visión (ángulo zenital y azimutal solar, ángulo de visión del sensor), así como de la relación de radiación directa/difusa, se simula la reflectancia de la cobertura forestal y se permite el cálculo de índices ópticos a partir de la reflectancia simulada. La Figura 4 muestra la modelización de los índices de Carter ( $R_{695}/R_{760}$ ) y de Vogelmann ( $R_{740}/R_{720}$ ), para distintos tipos de LADF (función de distribución angular foliar), LAI (índice de área

foliar) y  $\theta_s$  (ángulo zenital solar). Puede observarse que la estructura (LADF y LAI) y la geometría de visión ( $\theta_s$ ) afectan de forma considerable los índices ópticos calculados a partir de coberturas forestales. Ello demuestra la importancia de la utilización de modelos de cobertura para la estimación de bioindicadores sobre zonas forestales con variable LAI y LADF. Variaciones de BRDF en función de la geometría de visión deben tenerse en cuenta para la correcta aplicación de índices ópticos sobre datos de sensores aerotransportados o espaciales. El siguiente apartado trata de un ejemplo de utilización de modelos de turbidez, comparando los resultados obtenidos mediante los modelos SAIL y *Kuusk*, utilizando datos hiperespectrales del sensor CASI.



**Figura 4.** Modelización de los índices de Carter ( $R_{695}/R_{760}$ ), gráfico superior, y de Vogelmann ( $R_{740}/R_{720}$ ), gráfico inferior, para distintos tipos de LADF (función de distribución angular foliar), LAI (índice de área foliar) y  $\theta_s$  (ángulo zenital solar). Puede observarse que la estructura (LADF y LAI) y la geometría de visión ( $\theta_s$ ) afectan de forma considerable los índices ópticos calculados a partir de coberturas forestales.

### EJEMPLO DE UTILIZACIÓN DE MODELOS DE COBERTURA: EL NEXO DE UNIÓN ENTRE MUESTRAS FOLIARES Y DATOS DEL SENSOR HIPERESPECTRAL CASI

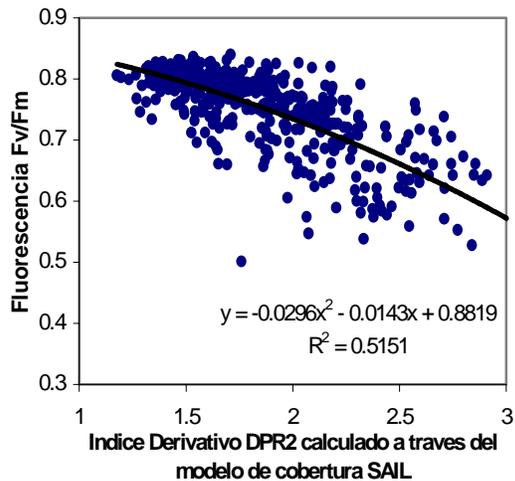
El presente apartado trata de demostrar un caso práctico de utilización de modelos de cobertura, en especial de SAIL y *Kuusk*. Los datos forman parte del proyecto *Biondicators of Forest Sustainability*, realizado durante los años 1997, 1998 y 1999. Las relaciones entre bioindicadores y reflectancia a nivel de hoja son transformadas al nivel de la cobertura forestal mediante la utilización de 2 modelos que tienen en cuenta la estructura del medio: SAIL y *Kuusk*.

### Toma de datos de muestras foliares

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. Las tomas de datos a nivel de hoja 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, 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 (Fv/Fm) que representa la relación entre variable y máxima fluorescencia clorofílica.

Se obtuvieron medidas de reflectancia y transmitancia de cada muestra foliar mediante una esfera Li-Cor revestida interiormente con  $BaSO_4$  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 la 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 Li-Cor. Se aplicaron diversas funciones de filtrado de los datos de reflectancia y transmitancia 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, todas ellas 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. La Figura 5 muestra la relación obtenida entre fluorescencia clorofílica Fv/Fm y el índice derivativo DPR2

$(D_{\lambda_p}/D_{\lambda_{p+22}})$  a partir de datos de reflectancia de las muestras foliares y mediante el modelo de cobertura SAIL. Los parámetros de entrada al modelo fueron medidos en las zonas de estudio: LAI=3.5, función de distribución foliar de tipo plagiofila, reflectancia del suelo derivada a partir de imágenes CASI y relación de la radiación directa/difusa estimada mediante modelo.



**Figura 5.-** Relación obtenida entre Fv/Fm y el índices derivativo DPR2 calculado como  $(D_{\lambda_p}/D_{\lambda_{p+22}})$ , a partir de medidas foliares de reflectancia y transmitancia de muestras obtenidas en las zonas de estudio y utilizadas para simulación a través del modelo de cobertura SAIL. Los parámetros nominales medidos en las zonas de estudio que fueron utilizados para la aplicación del modelo fueron: LAI=3.5, función de distribución foliar de tipo plagiofila, reflectancia del suelo derivada a partir de imágenes CASI, relación de la radiación directa/difusa estimada mediante modelo, y ángulo zenital solar=35°. 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.

### Toma de datos hiperespectrales con sensor aerotransportado CASI

Los datos tomados por CASI fueron divididos en 3 categorías distintas según las cuales la adquisición se realiza en distintos modos 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.

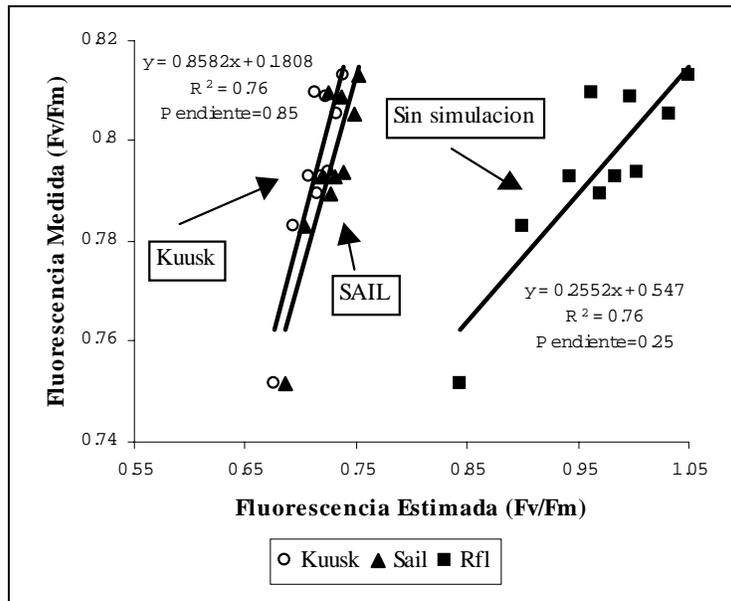
Los valores digitales de 16 bits de resolución radiométrica del sensor CASI se procesaron para obtener radiancia utilizando coeficientes de calibración obtenidos en laboratorio por CRESTech. Durante la toma de datos, al mismo tiempo que el sensor sobrevolaba cada zona, se obtuvieron medidas atmosféricas 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. (O'Neill *et al.*, 1997).

Los datos de reflectancia fueron posteriormente georreferenciados 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. Con objeto de minimizar sombras y apertura de la cobertura forestal, con posible influencia de la cobertura de fondo o suelo, la metodología seguida para el cálculo de la reflectancia media fue utilizar el 25% de los píxeles de valores más altos de reflectancia en el infrarrojo cercano en cada zona de estudio.

### Comparación de resultados a nivel de cobertura utilizando índices ópticos

Los datos de reflectancia y transmitancia de las muestras foliares fueron utilizados como datos de entrada en los modelos SAIL y *Kuusk*, y los índices ópticos recalculados a partir de la reflectancia simulada por los modelos. Los índices ópticos fueron, por lo tanto, función de la estructura de la cobertura y de la geometría de visión en el momento de la toma de datos hiperespectrales con CASI.

Los parámetros nominales medidos en las zonas de estudio que fueron utilizados para la aplicación de SAIL han sido comentados anteriormente. Para el modelo *Kuusk*, los parámetros adicionales necesarios fueron:  $n=1.4$  (índice refractivo de la superficie foliar),



**Figura 6.-** Estimación de Fv/Fm mediante los datos hiperespectrales de CASI utilizando algoritmos obtenidos a nivel de hoja mediante el índice óptico de Vogelmann  $(R_{734}-R_{747})/(R_{715}+R_{726})$  y mediante los modelos de cobertura SAIL y *Kuusk*. El gráfico representa la relación entre Fv/Fm estimado mediante los datos CASI, y Fv/Fm medido en laboratorio en *Acer saccharum* M. Se puede observar la comparación entre la estimación obtenida cuando no se realiza simulación, y cuando se utilizan los modelos de SAIL y *Kuusk*. La pendiente progresivamente se acerca más a la unidad cuando se relacionan el bioindicador medido en campo con el estimado mediante relaciones desarrolladas e nivel de hoja que han sido transformadas por los modelos SAIL o *Kuusk* y aplicadas a los datos de reflectancia de CASI.

$sl=0.007$  (relación longitud elemento foliar/altura elemento arbóreo),  $\theta^*=40^\circ$  (ángulo zenital solar del valor de la reflectancia de suelo), y  $\epsilon=0.95$  &  $\theta_m=45^\circ$  (distribución foliar de tipo plagiofila). Los índices ópticos calculados a partir de la reflectancia simulada mediante SAIL y *Kuusk* y relacionados con bioindicadores, como clorofila-a&b, carotenoides y fluorescencia clorofílica, pueden ser ya aplicados a imágenes hiperespectrales CASI con objeto de realizar estimaciones de dichos bioindicadores. La Figura 6 muestra la comparación entre Fv/Fm estimada mediante relación directa (es decir, mediante relaciones a nivel de hoja sin realizar simulación de cobertura), y mediante los modelos SAIL y *Kuusk* cuando se utiliza el índice óptico Vogelmann  $(R_{734}-R_{747})/(R_{715}+R_{726})$ . Se puede observar que la modelización mejora (la pendiente se aproxima progresivamente a la unidad) cuando se utilizan modelos como SAIL o *Kuusk*, que tienen en cuenta la estructura de la cobertura forestal. La modelización se aproxima más a la realidad cuando se utilizan modelos de cobertura: ello permite la realización de estimaciones aplicando los algoritmos obtenidos a través de simulación a los datos de sensores aerotransportados y espaciales

La Tabla 1 muestra los coeficientes de determinación obtenidos entre los valores medidos de Fv/Fm y las estimaciones de Fv/Fm utilizando las relaciones 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 transformadas mediante los modelos SAIL y *Kuusk*. La Figura 7 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 modelo de

Indice Optico	$r^2$
Vogelmann $(R_{740}/R_{720})$	0.81
DP21 $(D_{\lambda_p}/D_{703})$	0.82
Vogelmann $(R_{734}-R_{747})/(R_{715}+R_{726})$	0.76
Vogelmann $(R_{734}-R_{747})/(R_{715}+R_{720})$	0.76
Gitelson & Merzylak $(R_{750}/R_{700})$	0.7
Carter $(R_{695}/R_{760})$	0.69
$\lambda_p$	0.67

**Tabla 1.-** Coeficientes obtenidos en la estimación de Fv/Fm aplicando a los datos CASI las relaciones a nivel de hoja basadas en índices ópticos calculados a través de modelos de cobertura SAIL y *Kuusk*.

reflectancia. 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).

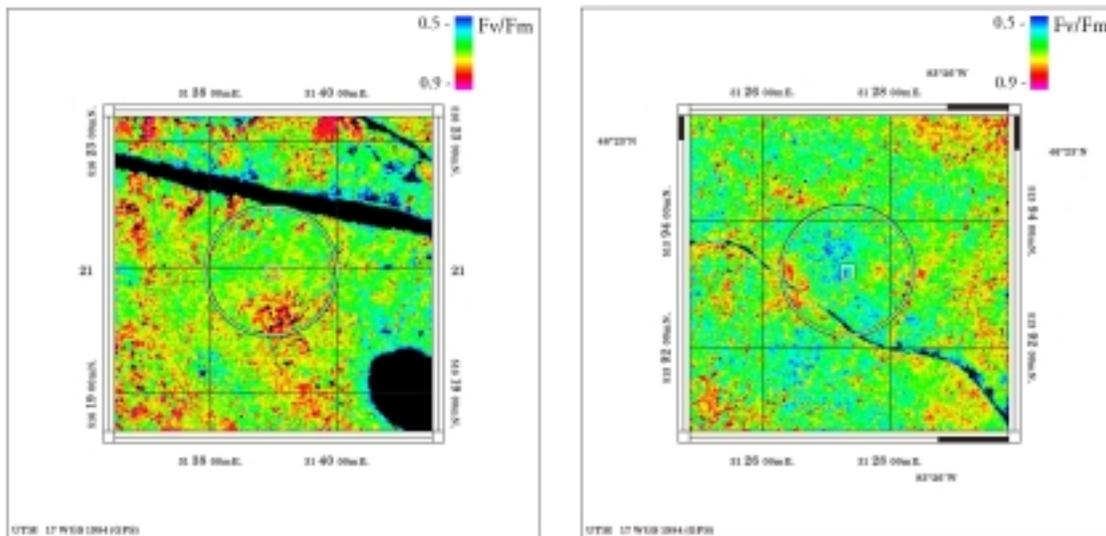
## CONCLUSIONES

El presente trabajo muestra la metodología de utilización de modelos de cobertura y su aplicabilidad cuando se pretende relacionar medidas obtenidas en los niveles foliar y de cobertura. La estructura de la cobertura juega un papel primordial en las estimaciones de bioindicadores de estrés en zonas forestales, y su modelización puede tenerse en cuenta mediante la utilización de modelos de reflectancia de mayor o menor complejidad. En todos los índices ópticos calculados a partir de datos hiperespectrales del sensor CASI, la estimación del contenido clorofílico y de la

fluorescencia clorofílica a nivel de cobertura mejora cuando se tienen en cuenta dichos modelos que consideran la estructura forestal y la geometría de visión en el momento de la adquisición de datos. Modelos como SAIL y *Kuusk* demuestran su utilidad por su simplicidad y el poco conocimiento de la cobertura forestal que requieren, pese a necesitar datos de transmitancia foliar. Sin embargo, la utilización de nuevos modelos de simulación tridimensional y mucho más realistas, como SPRINT, permiten modelizar coberturas con cambios estructurales y de arquitectura asociados a la fenología, como en el caso de cultivos. Los mencionados modelos de simulación requieren un estudio en profundidad para determinar su aplicabilidad real en teledetección.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores desean mostrar su agradecimiento al profesor Narendra S. Goel, Department of Computer Science, Wayne State University, Detroit, MI, por su colaboración en el trabajo y por permitir la utilización del modelo SPRINT en sus fases iniciales de desarrollo.



**Figura 7.-** Estimación de Fv/Fm, indicador de eficiencia fotosintética, a partir de imágenes CASI de 2 m de resolución y 72 bandas, en las 2 zonas de estudio de *Acer saccharum* M. que presentaron valores extremos de Fv/Fm medido en muestras foliares. Se utilizó el índice de Vogelmann ( $R_{740}/R_{720}$ ) como indicador a través de modelo de reflectancia. 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. Imagen izquierda, estrés bajo, Fv/Fm ~0.83; imagen derecha, estrés alto, Fv/Fm ~0.69.

## REFERENCIAS

- AHERN, F.J. 1988. The effects of bark beetle stress on the foliar spectral reflectance of lodgepole pine. *Int. J. Remote Sens.* 9: 1451-1468.
- BARNES, J.D., *et al.*, 1992. A reappraisal of the use of DMSO for the extraction and determination of chlorophylls a and b in lichens and higher plants. *Environmental Experimental Botany*, 2, 85-100.
- CARTER, G.A. 1994. Ratios of leaf reflectances in narrow wavebands as indicators of plant stress. *Int. J. Remote Sens.* 15: 697-703.
- CARTER, G.A., *et al.*, 1996. Narrow-band reflectance imagery compared with thermal imagery for early detection of plant stress. *J. Plant Physiol.* 148: 515-522.
- FILELLA, I., *et al.*, 1996. Relationship between photosynthetic radiation-use efficiency of barley canopies and the photochemical reflectance index (PRI). *Physiologia Plantarum* 96: 211-216.
- GAMON, J.A., *et al.*, 1992. A narrow-waveband spectral index that tracks diurnal changes in Photosynthetic Efficiency. *Remote Sens. Environ.* 41:35-44.
- GAMON, J.A., L. SERRANO, 1997. The photochemical reflectance index: an optical indicator of photosynthetic radiation use efficiency across species, functional types, and nutrient levels. *Oecologia* 112: 492-501.
- GITELSON, A.A., *et al.*, 1996. Detection of red edge position and chlorophyll content by reflectance measurements near 700 nm. *J. Plant Physiol.* 148: 501-508.
- GOEL, N., 1988. Models of vegetation canopy reflectance and their use in estimation of biophysical parameters from reflectance data. *Remote Sensing Reviews*, 4(1): 1-222.
- HOQUE, E., *et al.*, 1992. Reflectance, colour, and histological features as parameters for the early assessment of forest damages. *Can. J. Remote Sens.* 18:104-110.
- HORLER, D.N.H., *et al.*, 1983. The red edge of plant leaf reflectance. *Int. J. Remote Sens.* 4: 273-288.
- KRAUSE, G.H., y E. Weis. 1984. Chlorophyll fluorescence as a tool in plant physiology. II. Interpretation of fluorescence signals. *Photosynthesis Res.* 5: 139-157.
- KUUSK, A., 1996. A computer-efficient plant canopy reflectance model. *Computers & Geosciences*, 22(2), pp. 149-163.
- LARCHER, W. 1994. Photosynthesis as a tool for indicating temperature stress events. In: Schulze, E.-D. y M.M. Caldwell (eds.) *Ecophysiology of photosynthesis*. Ecological Studies 100. Berlin: Springer, pp. 261-277.
- LICHTENTHALER, H.K. 1992. The Kautsky effect: 60 years of chlorophyll fluorescence induction kinetics. *Photosynthetica* 27: 45-55.
- LORENZEN, B., y JENSEN, A. 1989. Changes in leaf spectral properties induced in barley by cereal powdery mildew. *Remote Sensing of Environ.* 27: 201-209.
- MOHAMMED, G.H., W.D. BINDER, y S.L. GILLIES. 1995. Chlorophyll fluorescence: A review of its practical forestry applications and instrumentation. *Scand. J. For. Res.* 10: 383-410.
- MOHAMMED, G.H., SAMPSON, P. H., COLOMBO, S. J., NOLAND, T. L., y MILLER, J. R., 1997. Bioindicators of forest sustainability: *Development of a forest condition rating system for Ontario*, Ontario Forest Research Institute, Sault Ste. Marie, ON, Canada.
- O'NEILL, N.T., F. ZAGOLSKI, M. BERGERON, A. ROYER, J.R. MILLER, y J. FREEMANTLE, 1997. Atmospheric correction validation of CASI images acquired over the BOREAS Southern Study Area, Canadian Journal of Remote Sensing, 23 (2), 143-162.

- PALMIER, C., *et al.*, 1992. Remote sensing of physiological disturbances related to sugar maple dieback in southern Quebec: Potentials of imaging spectrometry. Pp. 133-137. In J.K. Hornsby, D.J. King y N. Prout (eds). A World of Applications: Proc. 15<sup>th</sup> Can. Symp. Remote Sens. Vol. 1. Ontario Centre for Remote Sensing, North York, ON.
- PAPAGEORGIU, G. 1975. Chlorophyll fluorescence: An intrinsic probe of photosynthesis. In: Govindjee (ed.) Bioenergetics of Photosynthesis. New York: Academic press, pp. 319-371.
- PEÑUELAS, J., *et al.*, 1994. Reflectance indices associated with physiological changes in nitrogen- and water-limited sunflower leaves. Remote Sensing of Environ. 48:135-146.
- PEÑUELAS, J., I. FILELLA, y J.A. GAMON. 1995. Assessment of photosynthetic radiation-use efficiency with spectral reflectance. New Phytol. 131: 291-296.
- PEÑUELAS, J., J. LLUSIA, J. PINOL, y I. FILELLA. 1997. Photochemical reflectance index and leaf photosynthetic radiation-use efficiency assessment in Mediterranean trees. Int. J. Rem. Sens. 18: 2863-2868.
- PEÑUELAS, J., I. FILELLA, J. LLUSIA, D. SISCART, y J. PINOL. 1998. Comparative field study of spring and summer leaf gas exchange and photobiology of the mediterranean trees Quercus ilex and Phillyrea latifolia. J. Exp. Bot. 49: 229-238.
- ROCK, B.N., *et al.*, 1988. Comparison of in situ and airborne spectral measurements of the blue shift associated with forest decline. Remote Sens. Environ. 24: 109-127.
- SAMPSON, P.H., MOHAMMED, G. H., COLOMBO, S. J., NOLAND, T. L., MILLER, J. R., y ZARCO-TEJADA, P. J., 1998. *Bioindicators of Forest Sustainability Progress Report, Ontario Forest Research Institute, Sault Ste. Marie, ON, Canada.*
- SCHREIBER, U., W. BILGER, y C. NEUBAUER. 1994. Chlorophyll fluorescence as a non-destructive indicator for rapid assessment of in vivo photosynthesis. Ecol. Stud. 100: 49-70.
- VERHOEF, W., 1984. Light Scattering by Leaf Layers with Application to Canopy Reflectance Modeling: The SAIL Model, *Remote Sensing of the Environment*, 16, pp. 125-141.
- VOGELMANN, J.E., *et al.*, 1993. Red edge spectral measurements from sugar maple leaves. Int. J. Remote Sens. 14: 1563-1575.
- ZARCO-TEJADA, P.J., J.R. MILLER, G.H. MOHAMMED, T.L. NOLAND, y P.H. SAMPSON, 1999a. Optical Indices as Bioindicators of Forest Condition from Hyperspectral CASI data. 19th Symposium of the European Association of Remote Sensing Laboratories (EARSeL). Valladolid (Spain), 31st May - 2nd June.
- ZARCO-TEJADA, P.J., J.R. MILLER, G.H. MOHAMMED, T.L. NOLAND, y P.H. SAMPSON, 1999b. Canopy Optical Indices from Infinite Reflectance and Canopy Reflectance Models for Forest Condition Monitoring: Application to Hyperspectral CASI data. IEEE 1999 International Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS'99, Hamburg (Germany), 28th June - 2nd July.
- ZARCO-TEJADA, P.J. y J.R. MILLER. 1999c. Land cover mapping at BOREAS using red edge spectral parameters from CASI imagery, J. Geophys. Res., Vol. 104 , No. D22, pp. 27,921.
- ZARCO-TEJADA, P.J., MILLER, J.R., MOHAMMED, G.H., NOLAND, T., Natural Fluorescence Effects on Vegetation Apparent Reflectance: I. Leaf-Level Measurements and Simulation of Reflectance and Transmittance Spectra. *Submitted.*
- ZARCO-TEJADA, P.J., MILLER, J.R., MOHAMMED, G.H., NOLAND, T., y SAMPSON, P.H., Natural Fluorescence Effects on Vegetation Apparent Reflectance: II. Laboratory and Hyperspectral Airborne Experiments. *Submitted.*