



Universidad de Valladolid

Departamento de Física Teórica, Atómica y Óptica

Determinación de parámetros biofísicos de la cubierta vegetal mediante inversión de modelos de transferencia radiativa

Memoria presentada por
Alberto Jesús Berjón Arroyo
Para optar al grado de Doctor en Ciencias
Valladolid, Marzo 2007

Este trabajo ha sido realizado en el
Grupo de Óptica Atmosférica de la Universidad de Valladolid



AUTORIZACIÓN DE LOS DIRECTORES DE TESIS

(Art. 11.3 del R.D. 56/2005 de 21 de enero)

Dña. Victoria Eugenia Cachorro Revilla, Catedrático de Escuela Universitaria, y D. Pablo Jesús Zarco Tejada, Científico Titular del Consejo Superior de Investigaciones Científicas, junto con D. Angel de Frutos Baraja, que actúa como Ponente, Catedrático de la Universidad de Valladolid,

INFORMAN

que la presente tesis doctoral, titulada “Determinación de parámetros biofísicos de la cubierta vegetal mediante inversión de modelos de transferencia radiativa”, ha sido realizada bajo nuestra dirección, en el Departamento de Física Teórica, Atómica y Óptica de la Universidad de Valladolid.

Y para que conste, y en cumplimiento de la legislación vigente, firmamos el presente en Valladolid, 6 de Marzo de 2007.

Antes de comenzar con la memoria del trabajo que aquí presentamos, quiero daros las gracias a todos los que a lo largo de los últimos años me habeis prestado vuestro apoyo para desarrollarlo.

En primer lugar quiero daros las gracias a mi familia, y en especial a mis padres, ya que gracias a vuestros esfuerzos he podido recorrer el camino que me ha llevado hasta aquí.

Quiero expresar también mi gratitud a la Dra. Victoria E. Cachorro, al Dr. Pablo J. Zarco y al Dr. Angel de Frutos, por vuestra dirección y apoyo durante tanto tiempo, por la oportunidad que me ofrecisteis un día para desarrollar un trabajo, así como por la confianza que habeis depositado siempre en mí.

Tampoco puedo olvidar a todos los que habéis pasado por el Grupo de Óptica Atmosférica, compañeros y amigos. Porque habéis estado siempre ahí, apoyándome, ayudándome y soportándome en los momentos difíciles.

Y a tantos y tantos. Compañeros de departamento, universidad, amigos de siempre,...

Gracias.

ÍNDICE

RESUMEN	V
ABSTRACT	VII
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO	7
1.1 CONCEPTOS RADIOMÉTRICOS BÁSICOS. MAGNITUDES Y UNIDADES.	7
1.2 PROPAGACIÓN DE LA RADIACIÓN EN UN MEDIO MATERIAL.	9
1.2.1 <i>Absorción</i>	9
1.2.2 <i>Scattering</i>	10
1.2.3 <i>Ecuación de transferencia radiativa</i>	12
1.3 REFLEXIÓN.	12
1.4 USO DE ESFERAS INTEGRANTES PARA LA MEDIDA DE LA REFLEXIÓN.	14
CAPÍTULO 2. MODELOS DE TRANSFERENCIA RADIATIVA EN VEGETACIÓN 19	
2.1 TRANSFERENCIA RADIATIVA EN HOJAS.	20
2.2 MODELO PROSPECT.	22
2.3 MODELO SAILH.	25
2.4 SENSIBILIDAD DE LOS MODELOS.	29
2.4.1 <i>Sensibilidad del modelo PROSPECT</i>	29
2.4.2 <i>Sensibilidad del modelo SAILH</i>	31
2.4.3 <i>Análisis cuantitativo de sensibilidad de los modelos</i>	35
2.5 INVERSIÓN DE LOS MODELOS.	37
2.5.1 <i>Relación entre la reflectancia medida y modelizada</i>	39
2.5.2 <i>Algoritmo Downhill Simplex</i>	40
2.5.3 <i>“Ill-Posed Problem”</i>	42
CAPÍTULO 3. MEDIDAS DE LA CAMPAÑA 2002	47
3.1 MEDIDAS ESPECTRALES.	48
3.2 MEDIDAS DE LA REFLECTANCIA DEL CULTIVO.	50
3.2.1 <i>Dispositivo experimental de medida del factor de reflectancia</i>	52
3.3 MEDIDAS ATMOSFÉRICAS: IRRADIANCIA GLOBAL E IRRADIANCIA DIRECTA.	54
3.4 IRRADIANCIA GLOBAL Y MEDIDA SOBRE EL PANEL DE REFERENCIA.	57
3.5 REFLECTANCIA DEL SUELO.	59
3.6 MEDIDAS DE REFLECTANCIA Y TRANSMITANCIA FOLIAR.	59
3.7 MEDIDAS DEL CONTENIDO DE CLOROFILA.	65
3.8 MEDIDA DIRECTA DEL LAI.	66
3.9 MEDIDA CON EL LAI-2000.	67
3.10 RELACIÓN ENTRE LAI Y EL NDVI.	70
CAPÍTULO 4. MEDIDAS DE LA CAMPAÑA 2003	73
4.1 IMÁGENES DEL SATÉLITE QUICKBIRD II.	74
4.2 TRATAMIENTO RADIOMÉTRICO DE LAS IMAGENES.	78
4.3 CORRECCIÓN ATMOSFÉRICA DE LAS IMAGENES.	80
4.4 ERRORES DE LAS CORRECCIONES ATMOSFÉRICAS.	84
4.5 MUESTREO DEL LAI.	88
4.6 RELACIÓN ENTRE LAI Y EL NDVI.	90
4.7 DISTRIBUCIÓN DE ÁNGULOS DE INCLINACIÓN FOLIAR.	92
4.8 MEDIDAS DE REFLECTANCIA Y TRANSMITANCIA FOLIAR.	92
4.8.1 <i>Medida de hojas grandes</i>	95
4.8.2 <i>Medida de hojas pequeñas</i>	100
4.9 COMPARACIÓN ENTRE LAS DOS ESFERAS UTILIZADAS EN LAS CAMPAÑAS.	103

4.10	ESPECTRÓGRAFO USB-2000.....	103
4.11	MEDIDAS DE CONTENIDO DE CLOROFILA.....	105
4.12	CAMPAÑA VID-2003.....	107
CAPÍTULO 5. ANÁLISIS DE LOS DATOS A NIVEL DE HOJA.....		109
5.1	ANÁLISIS DE DATOS DE HOJAS DE VID.....	109
5.2	ANÁLISIS DE DATOS DE HOJAS DE CEREAL.....	113
5.2.1	<i>Campaña 2002.....</i>	<i>114</i>
5.2.2	<i>Campaña 2003.....</i>	<i>116</i>
5.2.2.1	Análisis de los datos tomados el 17 de mayo de 2003.....	117
5.2.2.2	Análisis de los datos tomados el 5 de Julio de 2003.....	120
CAPÍTULO 6. ANÁLISIS DE LA CAMPAÑA 2002.....		121
6.1	INTRODUCCIÓN DEL PARÁMETRO BSL EN LA INVERSIÓN.....	123
6.2	RESULTADOS DE LA INVERSIÓN DE ESPECTROS DE REFLECTANCIA INDIVIDUALES.....	123
6.2.1	<i>Resultado al fijar los valores de N y C_m.....</i>	<i>128</i>
6.2.2	<i>Resultado al utilizar las medidas de reflectancia y transmitancia foliar.....</i>	<i>129</i>
6.3	ANÁLISIS DE SERIES CORTAS DE ESPECTROS DE REFLECTANCIA.....	132
6.4	ANÁLISIS DE SERIES LARGAS DE ESPECTROS DE REFLECTANCIA.....	134
6.4.1	<i>Resultado considerando un solo dato por día.....</i>	<i>136</i>
6.4.2	<i>Resultado considerando todos los datos medidos.....</i>	<i>138</i>
6.4.2.1	Estudio de los resultados del parámetro BSL.....	141
CAPÍTULO 7. ANÁLISIS DE LA CAMPAÑA 2003.....		145
7.1	JUSTIFICACIÓN DE LA SELECCIÓN DEL SENSOR.....	146
7.2	PARÁMETRO BSL.....	148
7.3	INVERSIÓN ESTÁNDAR DE DATOS.....	150
7.4	SELECCIÓN DE LOS DATOS A INVERTIR.....	152
7.5	INVERSIÓN MÚLTIPLE DE DATOS.....	153
7.6	INFLUENCIA DE LA CORRECCIÓN ATMOSFÉRICA SOBRE EL LAI ESTIMADO.....	163
CONCLUSIONES.....		165
LÍNEAS FUTURAS.....		167
APÉNDICE I. MODELO PROSPECT.....		169
APÉNDICE II. MODELO SAILH.....		175
II.1	RESOLUCIÓN DEL SISTEMA DE ECUACIONES DIFERENCIALES.....	177
II.2	CUBIERTA VEGETAL ILUMINADA ÚNICAMENTE POR LA IRRADIANCIA DIFUSA.....	178
II.3	CUBIERTA VEGETAL ILUMINADA ÚNICAMENTE POR LA IRRADIANCIA SOLAR DIRECTA....	180
II.4	EFFECTO HOT SPOT.....	181
BIBLIOGRAFIA.....		184

RESUMEN

El Grupo de Óptica Atmosférica de la Universidad de Valladolid (GOA-UVA), viene estudiando desde hace años los procesos de interacción entre la luz y la atmósfera, tanto en el contexto experimental de medidas espectrorradiométricas, como en el teórico del estudio, desarrollo y aplicación de modelos de transferencia radiativa. Con el presente trabajo añadimos una nueva línea de investigación dentro del grupo de trabajo, centrada en el estudio de la transferencia de la radiación en las cubiertas vegetales. Es por lo tanto uno de nuestros primeros objetivos conseguir comprender los procesos físicos que tienen lugar en la interacción entre la luz y la vegetación, así como obtener la experiencia necesaria en los procesos de medida y análisis, que nos permita avanzar en la obtención de información de nuestro entorno mediante la herramienta de la teledetección por satélite.

Una de las líneas más prometedoras dentro del análisis de información espectral de la vegetación, es la inversión de modelos de transferencia radiativa. Sin embargo, y a pesar de los esfuerzos de la comunidad científica internacional en desarrollar esta línea, no se han obtenido resultados que permitan afianzar una metodología suficientemente flexible, capaz de generar resultados sin necesidad de tener un importante conocimiento previo de las condiciones de la vegetación. Esto se debe principalmente a que la inversión de estos modelos es un problema numéricamente mal planteado (“ill-posed problem”). Es decir, los modelos de transferencia radiativa, partiendo de conjuntos de parámetros de entrada diferentes, pueden generar resultados muy similares. Por lo tanto, pequeños cambios en la reflectancia medida dan como resultados grandes diferencias en los parámetros estimados. En los últimos años se viene apuntando por diferentes autores el análisis múltiple de datos como una de las soluciones propuestas a este problema.

Con este trabajo se pretende aportar datos experimentales que avalen esta postura, estudiando dos aproximaciones, basadas en el análisis múltiple de datos temporales y espaciales, que presentan claros beneficios en la estimación de parámetros biofísicos de la cubierta vegetal frente a las metodologías tradicionales.

ABSTRACT

The Atmospheric Optics Group at the University of Valladolid (GOA-UVA) focuses on the light-interaction processes with the atmosphere, both in the experimental context of spectroradiometric measurement as well as in the theoretical research and development of radiative transfer models. This work opens a new research line within the research group, aimed at the study of the radiative transfer in vegetal canopies. One of the main objectives is to understand the basis for the physical processes that take place in the interaction between light and vegetation. Progress made on its measurement and analysis will enable the understanding in obtaining information from the environment by means of remote sensing tools.

A promising methodology for estimating leaf and canopy biophysical parameters from spectral reflectance is the inversion of radiative transfer models. Nevertheless, in spite of international efforts make progress on such objective, current developments do not allow an easy and straight forward method for estimating canopy parameters unless a previous knowledge about the initial conditions of the vegetation are known. The retrieval of biophysical variables using canopy reflectance models is limited by the fact that conducting canopy reflectance model inversions is an ill-posed problem. This means that radiative transfer models could simulate a similar reflectance from different sets of combined input parameters. Therefore, small changes in the measured reflectance could generate critical differences in the estimated parameters by model inversion. Lately, new research ideas suggest using seasonal spectral data as a potential solution for the *ill-posed* problem.

This work aims at contributing toward a methodology to improve estimates from canopy reflectance models, focusing on methods to reduce the ill-posed problem. Research consisted on two approximations based on multiple analyses of temporal and spatial datasets, which introduced improvements on the biophysical parameter estimation by radiative transfer model inversion, as compared with traditional methods.

INTRODUCCIÓN

La posibilidad de observación de la tierra desde el espacio mediante el uso de satélites artificiales, permite en la actualidad nuevos enfoques en el estudio de los diferentes sistemas que forman el planeta (ESA, 2006).

Nos solemos referir con el termino teledetección a la adquisición de información sobre el estado de un objeto mediante un sensor que no está directamente en contacto con él (Asrar, 1989), aunque en el presente trabajo generalmente aplicaremos este término más concretamente a la obtención de datos mediante métodos ópticos pasivos. Se pueden situar los comienzos de la teledetección aplicada a la observación de la tierra hacia la segunda mitad del siglo XIX, con la primera fotografía aérea tomada por Tournachon, en 1858 desde un globo aerostático, o la primera imagen multispectral tomada por Du Hauron, en 1862 (Cohen, 2000). Obviamente desde estos orígenes los sistemas utilizados en teledetección han evolucionado en muy diversos sentidos. Pero creo interesante destacar dos: la sistematización de las medidas y la capacidad de procesamiento. Actualmente en torno a medio centenar de satélites artificiales dedicados a la observación de la tierra recogen diariamente información de todos los puntos del planeta. Esta situación se ve acompañada por la potencia de cálculo actual que nos ofrecen los sistemas informáticos.

Centrándonos en el estudio de los ecosistemas terrestres, el principal reto que se presenta en la actualidad es comprender el papel que juegan estos ecosistemas dentro del sistema completo que forma la tierra, prestando especial atención a sus relaciones con el resto de elementos, principalmente con la atmósfera (ESA, 2006). Para conseguir este objetivo es necesario ser capaces de caracterizar los sistemas vegetales a partir de la información que los satélites artificiales nos proporcionan.

A nivel más local, existe gran interés por parte de administraciones y empresas en contar con sistemas que permitan automatizar la obtención de propiedades de la vegetación, incluidos bosques y cultivos, para una mejor gestión de los recursos.

Mas concretamente, en lo referente al proceso productivo en la agricultura, las nuevas técnicas a desarrollar pretenden, no sólo el conocimiento puntual de los cultivos existentes, sino también prever los rendimientos (Steven & Clark, 1990; Monteith, 1994; Steven et al., 1997) y los efectos que sobre la erosión y el impacto medioambiental puedan tener las nuevas técnicas de producción, buscando el equilibrio dentro de la llamada “sostenibilidad del medio”.

La metodología actual utilizada para determinar las estadísticas agrarias de cultivos y rendimientos hace que sus resultados se conozcan una vez que estos se han producido y, por tanto, carecen de la necesaria hot reaction, que permitan tomar decisiones rápidas, tanto a las administraciones como a los propios actores de la actividad económica. Esto conlleva, casi siempre, la producción de excesos sobre la tasa comunitaria, lo que produce un desequilibrio productivo con el consiguiente impacto económico sobre la renta agraria, no sólo por las sanciones comunitarias, sino por la existencia de excedentes agrarios con enormes dificultades para ser asumidos por la

demanda, produciéndose, inexorablemente, un efecto de rebote en las siguientes campañas.

Como de todos es conocido, la normativa comunitaria que regula la PAC prevé el mantenimiento sostenido tanto de los ecosistemas naturales como de la población agraria dentro de un sistema productivo (Anderson et al., 1974; Peñuelas & Filella, 1998; Lobo, 1995). Para conseguir ambos objetivos es necesario su conocimiento cuantitativo y analítico, así como el de los modelos econométricos de simulación que permitan prever la evolución de los sistemas productivos. La consecución de dichos objetivos no es tarea fácil.

Para la resolución de toda esta problemática enmarcada en la estimación de superficies cultivadas y sus rendimientos y en lo que concierne a Europa y concretamente a la Unión Europea se han venido desarrollando en los últimos años muy diversos programas y proyectos que serían difícil enumerar (González Alonso et al., 1991; Gallego et al., 1993; Clevers, 1997). Sin embargo, cabe citar como más representativo el proyecto MARS (*Monitoring Agriculture with remote Sensing*; JRC, 1996) que es por su envergadura e importancia el de mayor relevancia con respecto a cualquiera de los demás, dado su carácter transnacional dentro de la UE. Con casi 10 años de trabajo este proyecto ha ido diversificando sus actividades, formando hoy parte sustancial de la unidad estructural de programas ARIS (*Agriculture and Regional Information System*) dentro del SAI (*Space Applications Institute*) del JRC, Centro dependiente de la Comisión Europea.

En este sentido el trabajo que aquí se desarrolla se enmarca dentro de una contribución al conocimiento, desarrollo y puesta en operatividad de nuevas técnicas de aplicación en el proceso productivo agrícola, siempre desde una perspectiva muy general, ya que lo que aquí se desarrolla son un conjunto de metodologías destinadas a caracterizar y conocer el estado de la vegetación. Éste es un paso previo necesario en el proceso de estimación de productividad de cultivos.

El grupo de Óptica Atmosférica de la UVA (GOA-UVA) siempre en la línea de aplicar las técnicas ópticas y espectralradiométricas en muy diversos campos de estudio e investigación, inició esta tarea para el caso de la caracterización y estimación de parámetros biofísicos de la vegetación. Ello como consecuencia tanto por la cercanía que parte de sus integrantes tienen con el mundo agrícola, como por la importancia que la espectralradiometría de campo y satelital han tomado en este campo de trabajo, así como por la idoneidad de este tipo de estudios para nuestra Comunidad de Castilla y León. Todo ello en colaboración con otros grupos de investigación, dada la multidisciplinaridad que esta línea de investigación conlleva.

Así pues este trabajo enmarcado en ese contexto de especial relevancia para nuestra Comunidad de Castilla y León, dada su especificidad agrícola y forestal, se inició ante la propuesta y aprobación del Proyecto **Caracterización, discriminación y estimación de cultivos mediante nuevas Tecnologías** (CULTEC, 1FD1997-2006) en el año 2000 como parte de los Proyectos del Plan Nacional financiados con Fondos Feder. Ha sido continuado a través de varios proyectos a nivel internacional, nacional y de la nuestra Comunidad, así como de un Proyecto de Infraestructura, los cuales se detallan a continuación

- **OPTECU (Desarrollo y operatividad de técnicas ópticas espectralométricas para la caracterización fenológica de los cultivos)** del Programa de Apoyo a Proyectos de investigación de la Junta de Castilla y León.
- **CLIMARAD (Evaluación climatológica, medioambiental y agronómica de la radiación solar y de los aerosoles atmosféricos)** del Programa de Apoyo a Proyectos de investigación de la Junta de Castilla y León, Tipo C "Grupos de Excelencia".
- **Leaf Biochemistry Estimation on EU High-Value Crops with ROSIS and DAIS 7915 Hyperspectral Data and Radiative Transfer Simulation.** Del Programa de acceso a grandes infraestructuras de investigación HySens, de la Union Europea
- **Estimación de variables biofísicas en cultivos de olivar y viñedo mediante métodos de teledetección hiperespectral para su integración en Agricultura de Precisión.** Financiado por el Del Ministerio de Ciencia y Tecnología (MCyT). UVA-CSIC-INTA (Proyecto Coordinado por la UVA); Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) - AGL2002-04407-C03-01, Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA) - AGL2002-04407-C03-02, y Universidad de Valladolid (UVA) - AGL2002-04407-C03-03.
- **Estimación de Variables Biofísicas en Viñedo mediante métodos de Teledetección Hiperespectral y Satélites de Alta Resolución Espacial para su Integración en Agricultura de Precisión (VINSAT) - VA108/03.** Junta de Castilla y León
- Finalmente mencionamos el proyecto de la Convocatoria de Infraestructura Científico-Técnica (2001-02), Ref. UNVA-0023-014, titulado **Espectrómetro y Fotómetro con estación de trabajo incorporada y GPS de alta precisión.**

En todo este trabajo se ha colaborado intensamente con el Departamento de Ingeniería Agrícola y Forestal y el Departamento de Producción Vegetal y Recursos Forestales de la Escuela Técnica Superior de Ingenierías Agrarias de Palencia. Con el Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA) a través del Departamento de Observación de la Tierra, Teledetección y Atmósfera, tanto con el Grupo de Madrid como con el de la ESAT-El Arenosillo en Huelva. Con Instituto de Agricultura Sostenible (IAS), del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC), Córdoba, así como con la York University (Canada).

Existen diversas metodologías capaces de proporcionarnos información sobre el estado de las plantas a partir de datos obtenidos desde satélites. Algunos de los parámetros más utilizados en la descripción del estado de la vegetación y que podemos obtener actualmente mediante teledetección, es el índice de área foliar o *LAI (Leaf Area Index)*, es decir la superficie foliar por unidad de superficie de suelo ocupado, o su contenido de clorofila. Sin embargo, recientes estudios (Morissette et al., 2006) insisten en afirmar la necesidad de mayores esfuerzos en aumentar la precisión al determinar estos parámetros.

En la actualidad, la metodología más extendida para la estimación del *LAI* mediante teledetección es a través de relaciones empíricas entre ese parámetro e índices de vegetación, calculados generalmente teniendo en cuenta las diferencias existentes entre los valores de la reflectancia de la vegetación medidos en el infrarrojo cercano y en el visible. Muchos estudios han relacionado índices de vegetación como el *NDVI* (*Normalized Difference Vegetation Index*), con el *LAI* (Turner et al., 1999). Sin embargo una estimación precisa del *LAI* siguiendo esta metodología requiere una calibración mediante datos de control en el suelo, para tener en cuenta las variaciones entre las relaciones *LAI-NDVI* para diferentes especies vegetales (Green et al., 2000). Estas relaciones pueden incluso cambiar para una misma especie a lo largo de su ciclo de crecimiento (Gutman, 1991). Incluso hay diferencias entre los índices de vegetación calculados utilizando diferentes satélites, índices que necesitan ser corregidos para poder compararlos (Steven et al., 2003). Todo esto supone un alto handicap en la utilización de los índices de vegetación.

El desarrollo de modelos de transferencia radiativa en cubierta vegetal (Verhoef, 1984) y en elementos básicos de éstas, como son las hojas (Jacquemoud & Baret, 1990), ha abierto una nueva y prometedora vía en la caracterización de la vegetación mediante teledetección. Estos modelos generan el espectro de reflectancia de la cubierta vegetal a partir de los parámetros que caracterizan la vegetación, como el *LAI* o el contenido de clorofila de las hojas. A diferencia de lo que ocurre con otros índices de vegetación, los parámetros que utilizan estos modelos tienen una interpretación clara y aportan por sí mismos una interesante información.

Sin embargo, tratar de obtener los parámetros de entrada a partir de un espectro de reflectancia conocido, es decir invertir el proceso, es un problema numéricamente mal planteado (*ill-posed problem*). Los modelos de transferencia radiativa, partiendo de conjuntos de parámetros de entrada diferentes, pueden generar resultados muy similares y por lo tanto, pequeños cambios en la reflectancia medida dan como resultado grandes diferencias en los parámetros estimados (Combal et al., 2002). Utilizando esta metodología solamente se consiguen resultados admisibles fijando la mayor parte de los parámetros en sus valores reales, e intentando solamente deducir uno o dos parámetros desconocidos. Otro hecho que ha evitado el progreso de esta metodología es la gran potencia de cálculo requerida para su desarrollo (Jacquemoud et al., 1995a). Sin embargo en la actualidad este punto parece superado gracias al desarrollo de los equipos informáticos y al uso de algoritmos más eficientes.

Uno de los caminos propuestos para regularizar la inversión de modelos de reflectancia radiativa es el análisis múltiple de series de datos (Atzberger, 2004). El trabajo que aquí presentamos pretende ahondar en esta última propuesta, estudiando dos aproximaciones, basadas en el análisis múltiple de datos temporales y espaciales, intentando en ambos casos minimizar el conocimiento previo sobre la vegetación. En ambos casos la principal hipótesis que se pretende contrastar es que la inversión simultánea de *N* espectros de reflectancia de la cubierta vegetal, junto con ciertas condiciones sobre el comportamiento de los parámetros, transforma la obtención de parámetros biofísicos mediante inversión de modelos de transferencia radiativa en un problema bien propuesto. A la hora de aplicar esta hipótesis tendremos que asegurar ciertas condiciones como que el conjunto de espectros a invertir sean suficientemente diferentes, pero manteniendo al mismo tiempo unos ciertos vínculos entre sí, de modo que aporten suficiente información como para resolver el problema sin aumentar los grados de libertad del mismo.

La presente memoria se ha estructurado a fin de presentar el trabajo efectuado en esta línea. En los capítulos 1º y 2º se hace una descripción de los conceptos teóricos y de los modelos que vamos a utilizar a lo largo de todo el trabajo. En los capítulos siguientes se hace una descripción de las metodologías y de las medidas efectuadas en campo y en el laboratorio a fin de verificar las hipótesis de partida. Estas medidas se han realizado a lo largo de dos campañas efectuadas durante los años 2002 y 2003, descritas respectivamente en los capítulos 3º y 4º. El experimento diseñado en la primera campaña tiene como objetivo estudiar series temporales de datos obtenidos a lo largo de la evolución de un cultivo. El diseño de la segunda campaña está orientado al estudio de la distribución espacial de datos de los cultivos. En ambos casos, teniendo en cuenta nuestro propio entorno, así como las características de los modelos utilizados, se ha trabajado con cultivos de cereal. En el capítulo 5º se analiza las medidas realizadas sobre las hojas del cultivo. En los capítulos 6º y 7º se estudian diferentes metodologías de inversión respectivamente de los datos de las campañas 2002 y 2003. Finalmente se recogen las conclusiones del trabajo.

Capítulo 1. Marco teórico

Dada la variedad de nomenclaturas existentes en el campo de la radiometría y la fotometría, en este capítulo se pretende hacer una recopilación de las magnitudes que se utilizan a lo largo del presente trabajo. Siguiendo la nomenclatura de diferentes trabajos realizados en el Grupo de Óptica Atmosférica (Vergaz, 2000; Durán, 1997) así como de otros autores (Lenoble, 1993; Snell, 1978), pasamos a definir las magnitudes básicas en este campo.

1.1 Conceptos radiométricos básicos. Magnitudes y unidades.

Siendo E la energía transportada por la radiación, medida en Julios (J), el flujo radiante se define como la energía radiante medida por unidad de tiempo:

$$\Phi = \frac{dE}{dt} \quad (1-1)$$

y viene medido en Watios (W). El flujo que atraviesa la unidad de superficie es la densidad de flujo radiante:

$$F = \frac{d\Phi}{dA} \quad (1-2)$$

expresada en Wm^{-2} . A esta densidad de flujo normalmente se le da el nombre de emitancia radiante cuando es emitida o emerge de una superficie fuente, e irradiancia cuando el flujo es recibido por una superficie.

La radiancia en un punto del espacio y en una dirección se define como el flujo radiante por unidad de ángulo sólido en una dirección dada, que atraviesa la unidad de superficie proyectada sobre la normal a esa misma dirección, midiéndose por

consiguiente en $\text{Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}$. Definida así, implica una direccionalidad en la propagación de la radiación.

$$L = \frac{dE}{dA dt \cos \theta d\omega} = \frac{dF}{\cos \theta d\omega} \quad (1-3)$$

donde $d\omega$ indica el diferencial de ángulo sólido en la dirección definida por el ángulo cenital θ y el ángulo azimutal φ , respecto de la normal a la superficie, Figura 1-1. De la expresión anterior se deriva la expresión (1-4) que nos relaciona el flujo total emitido con la radiancia emitida en cada dirección.

$$F = \int_{2\pi} L \cos \theta d\omega = \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{\pi/2} L(\theta, \varphi) \cos \theta \sin \theta d\theta \quad (1-4)$$

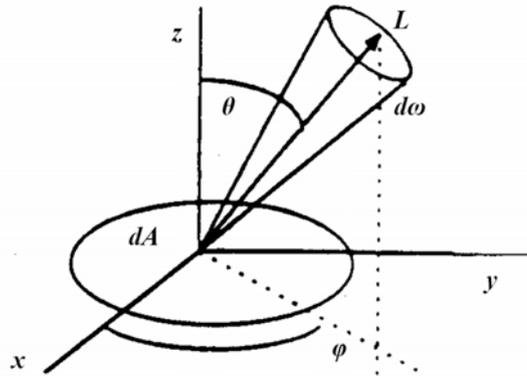


Figura 1-1 Radiancia emitida por un elemento de superficie dA en un ángulo sólido $d\omega$, en la dirección (θ, φ) .

Cuando la radiancia de una superficie es independiente de la dirección de observación, a esta superficie se le denomina lambertiana. En este caso podemos, a partir de la ecuación (1-4), escribir:

$$F = L \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{\pi/2} \cos \theta \sin \theta d\theta \quad (1-5)$$

$$F = \pi L \quad (1-6)$$

Las magnitudes definidas anteriormente en general varían con la longitud de onda, por lo que tal como las hemos definido corresponderán a la magnitud integrada en todo el espectro. Así, en el caso de la irradiancia tendremos:

$$F = \int_0^{\infty} F_{\lambda} d\lambda \quad (1-7)$$

Dado que en general, y mientras no se indique lo contrario, utilizaremos el nm como unidad de longitud de onda, F_{λ} vendrá expresado en $\text{Wm}^{-2}\text{nm}^{-1}$. Equivalentemente en el caso de la radiancia tendremos que L_{λ} vendrá expresado en $\text{Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}\text{nm}^{-1}$.

1.2 Propagación de la radiación en un medio material.

La interacción de la radiación, representada bien por su densidad de flujo F o por su radiancia L , con el medio material en el que se propaga, conlleva en general la absorción de parte de esa radiación. Si el medio no es homogéneo, debido por ejemplo a las moléculas o a las partículas que lo componen, se producirá también scattering. Dicho medio también presentará unos bordes o límites, que en la mayoría de los casos reflejan la radiación que les llega.

Es necesario pues introducir los conceptos de absorción, scattering, transmisión y reflexión de una capa de espesor finito a través de funciones o coeficientes que cuantifiquen estos efectos.

1.2.1 Absorción

La estructura cuantizada en los niveles o estados de energía que presentan los átomos y las moléculas debido a sus estados electrónicos, de rotación y de vibración, da origen a la complicada estructura que presentan sus espectros de absorción. En general se suele trabajar en un cierto intervalo de longitudes de onda, $\Delta\lambda$, en el cual se presentan múltiples absorciones que pueden producirse de forma superpuesta. Para dar cuenta de esto, se suele partir de modelos de bandas de absorción, obviando su estructura fina.

Cuando un haz de luz caracterizado por su irradiancia F , atraviesa un medio exclusivamente absorbente, se ve atenuado de manera que al atravesar un espesor dx , la irradiancia toma un valor $F + dF$, siendo dF proporcional a F , a dx y a un coeficiente característico del medio denominado coeficiente de absorción, $\sigma_{a\lambda}$:

$$dF_{\lambda}(x) = -\sigma_{a\lambda}(x)F_{\lambda}(x)dx \quad (1-8)$$

Integrado en un camino finito $x_1 \rightarrow x_2$, obtendremos la ecuación de atenuación en un medio, denominada ley de Beer-Lambert-Bouguer, (1-9), donde δ_a designa el espesor óptico de absorción.

$$F_{\lambda}(x_2) = F_{\lambda}(x_1) \exp\left(-\int_{x_1}^{x_2} \sigma_{a\lambda}(x)dx\right) = F_{\lambda}(x_1) \exp(-\delta_a) \quad (1-9)$$

La transmitancia de una capa entre x_1 y x_2 a lo largo de la dirección de propagación se puede definir como:

$$\tau(\lambda) = \frac{F_{\lambda}(x_2)}{F_{\lambda}(x_1)} \quad (1-10)$$

En este caso, la energía no transmitida es absorbida, definiéndose la absortancia de la capa como:

$$a(\lambda) = \frac{F_{\lambda}(x_1) - F_{\lambda}(x_2)}{F_{\lambda}(x_1)} = 1 - \tau(\lambda) \quad (1-11)$$

1.2.2 Scattering.

El scattering o dispersión puede ser entendido como el proceso por el cual la energía que incide sobre las partículas del medio, es redistribuida en todas las direcciones.

Microscópicamente se puede entender considerando que iluminar una partícula provoca la oscilación de las cargas que la componen. Las cargas eléctricas aceleradas emiten radiación en todas las direcciones. La emisión de esta radiación es lo que se conoce como scattering. Según esta definición, el proceso de scattering implica el de absorción. Si la reemisión de radiación se hace en la misma cantidad que la absorción estaremos ante scattering elástico o conservativo. En caso contrario, la fracción de energía no reemitida puede ser empleada en diversos procesos, por ejemplo térmicos. A este caso se le denomina scattering inelástico.

La distribución angular de la fracción de radiación reemitida en el proceso de scattering cuando una irradiancia F incide sobre un volumen $dV = dAdx$, viene determinada por la función de scattering $f(\theta)$, descrita en (1-12), donde θ indica el ángulo formado entre una determinada dirección y la dirección de la radiación que incide sobre la partícula.

$$f_{\lambda}(\theta) = \frac{d\Phi_{\lambda}}{F_{\lambda}dAdxd\omega} \quad (1-12)$$

Suponiendo que el haz de luz atraviesa un medio puramente dispersivo, ésta es atenuada por el proceso de scattering, siendo la diferencia de radiación redistribuida hacia otras direcciones. De la expresión anterior, el flujo radiante perdido en la dirección de incidencia lo obtendremos integrando respecto de $d\omega$ en todas las direcciones:

$$d\Phi_{\lambda} = F_{\lambda}dAdx \int_{4\pi} f_{\lambda}(\theta)d\omega \quad (1-13)$$

Siguiendo la misma nomenclatura utilizada en la expresión (1-8), a la integral en todas las direcciones de la función de scattering la denominaremos coeficiente de scattering:

$$\sigma_{s\lambda} = \int_{4\pi} f_{\lambda}(\theta)d\omega \quad (1-14)$$

llamando coeficiente de extinción, $\sigma_{e\lambda}$, a la suma del coeficiente de absorción y el coeficiente de scattering. Al cociente entre el coeficiente de scattering y el de extinción se le denomina albedo de scattering simple, $\bar{\omega}_{\lambda}$. En el caso de scattering elástico $\bar{\omega}_{\lambda} = 1$, mientras que en scattering inelástico o no conservativo $0 \leq \bar{\omega}_{\lambda} < 1$.

$$\bar{\omega}_{\lambda} = \frac{\sigma_{s\lambda}}{\sigma_{e\lambda}} = \frac{\sigma_{s\lambda}}{\sigma_{a\lambda} + \sigma_{s\lambda}} \quad (1-15)$$

Normalmente no emplearemos la función de scattering directamente, sino normalizada, llamándose en este caso función de fase:

$$p_\lambda(\theta) = \frac{4\pi}{\sigma_{s\lambda}} f_\lambda(\theta) \quad (1-16)$$

la cual, tendiendo en cuenta (1-14), cumple al ser integrada en todas las direcciones del espacio, el criterio de normalización:

$$\int_{4\pi} p_\lambda(\theta) d\omega = 4\pi \quad (1-17)$$

La determinación de la función de fase para partículas esféricas se puede determinar siguiendo la teoría desarrollada por Mie (Mie, 1908; Cachorro & Salcedo, 1991), que converge con la desarrollada por Rayleigh cuando el radio r de las partículas consideradas tiende a cero. En la Figura 1-2 se muestran cuatro casos de funciones de fase, en función del parámetro x :

$$x = \frac{2\pi r}{\lambda} \quad (1-18)$$

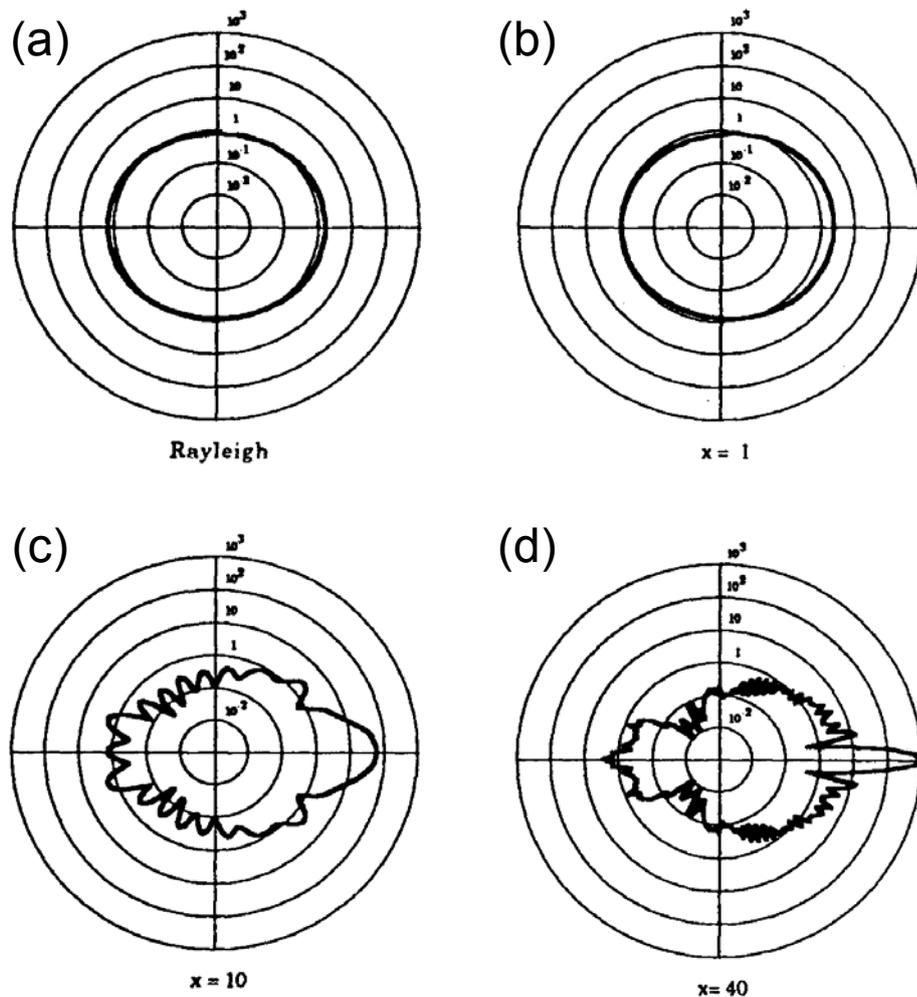


Figura 1-2 Función de fase según la teoría de Mie para $x = 0$ (a), $x = 1$ (b), $x = 10$ (c) y $x = 40$ (d) (Lenoble, 1993).

1.2.3 Ecuación de transferencia radiativa.

El estudio de la propagación de la radiación por un medio absorbente y dispersivo no homogéneo se puede realizar a partir de la expresión (1-19), conocida como ecuación de transferencia radiativa.

$$\frac{dL_\lambda(x, \theta, \varphi)}{dx} = -\sigma_{e\lambda}(x)[L_\lambda(x, \theta, \varphi) - J_\lambda(x, \theta, \varphi)] \quad (1-19)$$

En esta ecuación se considera que al propagarse por un medio una radiación, determinada por una cierta radiancia L , ésta se va a ver atenuada por los procesos de scattering y absorción, pero también va a verse incrementada por el scattering de la radiación propagada en otras direcciones y por la propia emisión del medio. Durante el presente trabajo nos restringiremos al rango espectral del visible e infrarrojo cercano, donde la emisión de los medios que consideraremos es despreciable, por lo que consideraremos que el término fuente $J_\lambda(x)$ vendrá dado únicamente por:

$$J_\lambda(x, \theta, \varphi) = \frac{\bar{\omega}_\lambda(x)}{4\pi} \int_0^{2\pi} d\varphi' \int_0^{\pi/2} p_\lambda(x, \theta, \varphi, \theta', \varphi') L_\lambda(x, \theta', \varphi') \sin \theta' d\theta' \quad (1-20)$$

1.3 Reflexión.

Cuando un flujo de densidad radiante $F_{i\lambda}$ incide sobre una superficie, parte de la radiación es reflejada, $F_{r\lambda}$, es decir, vuelve al medio del que procedía. Se pueden distinguir dos casos de reflexión, Figura 1-3.

Cuando tenemos dos medios de índices de refracción distintos, es decir cuando la velocidad de la luz en dichos medios es distinta, hablamos de reflexión especular, siguiendo en este caso la ley de Fresnel. Por otro lado, cuando en una capa de un medio se tienen en cuenta los procesos de scattering, la luz dispersada en sentido opuesto al de incidencia, puede entenderse como una reflexión difusa, es decir, la reflexión no se produce en una sola dirección sino que se distribuye de alguna manera en todas las direcciones.

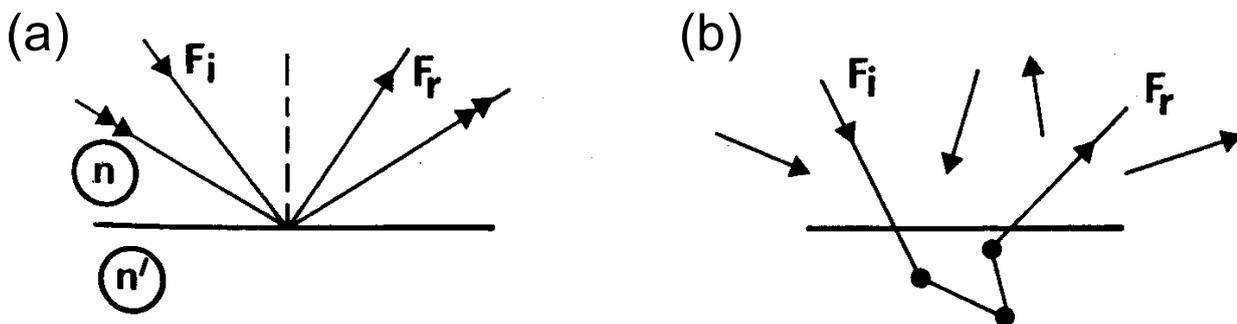


Figura 1-3 Reflexión especular (a) y reflexión difusa (b) (Lenoble, 1993).

Independientemente del mecanismo por el cual se produzca la reflexión, se denomina reflectancia y en ocasiones también albedo (AMS, 2000), a la razón entre el flujo reflejado y el flujo incidente:

$$\rho_{\lambda} = \frac{F_{r\lambda}}{F_{i\lambda}} \quad (1-21)$$

Si la densidad de flujo incidente sobre la superficie es isotrópica se puede hablar de albedo esférico. Cuando la superficie es lambertiana, de la ecuación anterior y de (1-6) se cumple:

$$\rho_{\lambda} = \frac{\pi L_{r\lambda}}{F_{i\lambda}} \quad (1-22)$$

La expresión (1-21) que nos da cuenta de la reflectancia se puede expresar también en función de la radiancia:

$$\rho_{\lambda} = \frac{\int_0^{2\pi} d\varphi_r \int_0^{\pi/2} L_{r\lambda}(\theta_r, \varphi_r) \cos \theta_r \sin \theta_r d\theta_r}{\int_0^{2\pi} d\varphi_i \int_0^{\pi/2} L_{i\lambda}(\theta_i, \varphi_i) \cos \theta_i \sin \theta_i d\theta_i} \quad (1-23)$$

La función de distribución de reflectancia bidireccional, BRDF (*bidirectional reflectance distribution function*), es la razón entre la radiancia reflejada por una superficie en una determinada dirección (θ_r, φ_r) , respecto de la irradiancia incidente sobre la superficie desde una dirección (θ_i, φ_i) (Nicodemus et al., 1977). Esta magnitud se puede expresar como:

$$f_{\lambda}(\theta_r, \varphi_r, \theta_i, \varphi_i) = \frac{dL_{r\lambda}}{L_{i\lambda} \cos \theta_i \sin \theta_i d\theta_i d\varphi_i} \quad (1-24)$$

de modo que se cumple la relación integral:

$$L_{r\lambda} = \int_0^{2\pi} d\varphi_i \int_0^{\pi/2} f_{\lambda}(\theta_r, \varphi_r, \theta_i, \varphi_i) L_{i\lambda} \cos \theta_i \sin \theta_i d\theta_i \quad (1-25)$$

y por lo tanto, conocida la BRDF, la reflectancia se puede expresar en función únicamente de la radiancia incidente:

$$\rho_{\lambda} = \frac{\int \int f_{\lambda} L_{i\lambda} \cos \theta_i d\omega_i \cos \theta_r d\omega_r}{\int_{2\pi} L_{i\lambda} \cos \theta_i d\omega_i} \quad (1-26)$$

Cuando no se considera toda la radiación incidente, o toda la radiación reflejada, se puede utilizar el término de reflectancia parcial (Snell, 1978). Ésta vendrá dada por la siguiente expresión:

$$\rho_{\lambda}^p = \frac{\int \int_{\omega_r, \omega_i} f_{\lambda} L_{i\lambda} \cos \theta_i d\omega_i \cos \theta_r d\omega_r}{\int_{\omega_i} L_{i\lambda} \cos \theta_i d\omega_i} \quad (1-27)$$

A partir de esta última expresión, se puede definir diferentes tipos de reflectancia comúnmente utilizados en la bibliografía, como pueden ser la reflectancia bi-cónica, la reflectancia direccional-hemisférica, etc. También podemos utilizarla para definir el factor de reflectancia R (1-28), como el cociente de reflectancias parciales realizadas sobre una superficie de reflectancia desconocida y sobre un patrón, es decir, sobre una superficie lambertiana de reflectancia conocida, iluminadas ambas superficies de la misma manera.

$$R_{\lambda} = \frac{\int \int_{\omega_r, 2\pi} f_{\lambda} L_{i\lambda} \cos \theta_i d\omega_i \cos \theta_r d\omega_r}{\int \int_{\omega_r, 2\pi} \frac{L_{i\lambda} \rho_{\lambda, Patron}}{\pi} \cos \theta_i d\omega_i \cos \theta_r d\omega_r} \quad (1-28)$$

Por lo tanto, la reflectancia parcial de la superficie de la que se desconoce la reflectancia quedará:

$$\rho_{\lambda}^p = R_{\lambda} \rho_{\lambda, Patron} \quad (1-29)$$

Esta última expresión se suele generalizar y utilizar como (1-30), lo cual será tanto más cierto cuanto más lambertiana sea la superficie observada. Esta definición nos permite obtener fácilmente una medida experimental aproximada de la reflectancia de una superficie.

$$\rho_{\lambda} = R_{\lambda} \rho_{\lambda, Patron} \quad (1-30)$$

1.4 Uso de esferas integrantes para la medida de la reflexión.

La medida de la transmitancia y de la reflectancia es comúnmente realizada en laboratorio utilizando esferas integrantes.

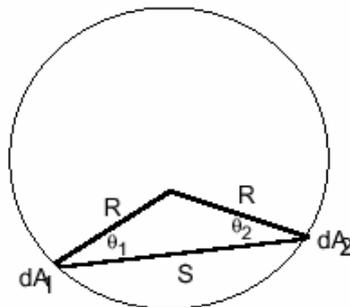


Figura 1-4 Intercambio de radiación entre dos elementos de superficie dA_1 y dA_2

Una esfera integrante o esfera de Ulbricht es una cavidad esférica recubierta en su cara interna por un material con una alta reflectancia y con un comportamiento lambertiano (Ulbricht, 1900; Casas, 1994). Para su estudio hay que recurrir a la teoría de intercambio de radiación entre superficies difusoras.

El factor de intercambio se define como la fracción de flujo que saliendo de una superficie llega a otra. En nuestro caso, y considerando que la superficie sigue un comportamiento lambertiano, a partir de (1-3) y (1-6), el porcentaje de luz que sale de dA_1 y llega a dA_2 será:

$$dF_{d1-d2} = \frac{\cos \theta_1 \cos \theta_2}{\pi S^2} dA_2 \quad (1-31)$$

Dada la geometría del problema, podemos ver que

$$S = 2R \cos \theta_1 = 2R \cos \theta_2 \quad (1-32)$$

Y por lo tanto

$$dF_{d1-d2} = \frac{dA_2}{4\pi R^2} \quad (1-33)$$

El resultado es independiente de la posición de los dos elementos de superficie y por lo tanto la fracción de flujo recibido por A_2 es el mismo para cualquier otro punto de la esfera.

Si pasamos a considerar elementos finitos de superficie, obtenemos la siguiente expresión:

$$F_{1-2} = \frac{A_2}{4\pi R^2} = \frac{A_2}{A_e} \quad (1-34)$$

donde A_e es el área de toda la esfera. Así, la fracción de energía que recibe A_2 es proporcional a la fracción de área que ocupa dentro de la esfera. Como resultado de las expresiones anteriores podemos decir que todos los puntos de la esfera son igualmente iluminados, y por lo tanto la iluminación sobre las paredes de la esfera es uniforme.

En las aplicaciones reales, una esfera de Ulbricht ha de tener orificios o puertos. En nuestro caso estos sirven para la entrada de luz, para la salida del sensor y para situar la muestra. Esto provoca que la afirmación anterior sobre la homogeneidad de la iluminación de la pared de la esfera no sea estrictamente cierta, sin embargo, en general seguirá siendo una muy buena aproximación.

En las medidas realizadas con esferas integrantes, la posición del sensor se determina teniendo en cuenta que en el campo de visión de éste (Hansen, 1989) no aparezcan otros elementos más que la superficie de la esfera, evitando recibir directamente luz de los puertos de medida o iluminación.

En lo que sigue supondremos que la muestra a medir, el patrón de referencia y la pared de la esfera son difusores perfectos, es decir, tienen un comportamiento

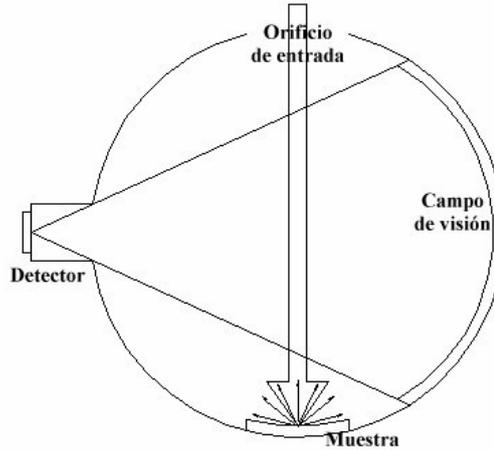


Figura 1-5 Situación de la muestra durante la medida de ρ .

lambertiano. Considerando que el flujo que entra en la esfera es Φ_0 , y que éste incide sobre la muestra de reflectancia ρ_m que queremos medir (Figura 1-5), el flujo reflejado sobre la pared de la esfera será $\Phi_0\rho_m$, y por lo tanto la cantidad de flujo que llega al receptor será:

$$\Phi_1 = \rho_m \Phi_0 f_d \eta_m \quad (1-35)$$

donde $f_d = A_d / A_e$, siendo A_d la superficie que ocupa el orificio del detector y η_m es la fracción de la muestra iluminada que queda dentro del campo de visión del detector. Tras la primera reflexión sobre la pared, un flujo $\rho_m \Phi_0 \bar{\rho}_p$ permanece en la esfera, siendo

$$\bar{\rho}_p = \rho_p \left(1 - \sum_i f_i \right) + \sum_i \rho_i f_i \quad (1-36)$$

la reflectancia promedio de la superficie de la esfera, en la que se incluye la influencia de los orificios. $f_i = A_i / A_e$ es la fracción de superficie que cada orificio ocupa respecto de la superficie total de la esfera. ρ_i es la reflectancia que se le asigna a cada uno de los orificios. De este flujo, la cantidad que le llega al receptor será:

$$\Phi_2 = \rho_m \Phi_0 f_d \bar{\rho}_v f_v \quad (1-37)$$

que también podemos escribir como:

$$\Phi_2 = \left(\bar{\rho}_p \rho_m \Phi_0 f_d \right) \left(\frac{\bar{\rho}_v f_v}{\bar{\rho}_p} \right) \quad (1-38)$$

siendo $\bar{\rho}_v$ el equivalente a $\bar{\rho}_p$, pero aplicado solamente al área de la esfera que ve el detector. $f_v = A_v / A_e$ es la fracción de esfera que ve el detector.

Tras la siguiente reflexión, al detector le llegará un flujo:

$$\Phi_3 = (\bar{\rho}_p^2 \rho_m \Phi_0 f_d) \left(\frac{\bar{\rho}_v f_v}{\bar{\rho}_p} \right) \quad (1-39)$$

Siguiendo el procedimiento, podemos ver que el flujo total que le llega al detector será:

$$\Phi_d = \Phi_1 + \Phi_2 + \Phi_3 + \dots \quad (1-40)$$

$$\Phi_d = f_d \rho_m \Phi_0 \left[\eta_m + \frac{f_v \bar{\rho}_v}{\bar{\rho}_p} (\bar{\rho}_p + \bar{\rho}_p^2 + \bar{\rho}_p^3 + \dots) \right] \quad (1-41)$$

$$\Phi_d = f_d \rho_m \Phi_0 \left[\eta_m + \frac{f_v \bar{\rho}_v}{1 - \bar{\rho}_p} \right] \quad (1-42)$$

Si dentro del campo de visión no está incluida la muestra, entonces $\eta_m = 0$ y el flujo total que llega al detector será:

$$\Phi_d = \frac{f_v f_d \rho_m \bar{\rho}_v \Phi_0}{1 - \bar{\rho}_p} \quad (1-43)$$

El método más habitual para obtener experimentalmente la reflectancia de una muestra (Hansen, 1989) consiste en comparar dos medidas, en las que se proyecta luz sobre la muestra que se pretende medir y sobre un patrón de referencia de reflectancia conocida, de tal modo que la esfera sea iluminada por el flujo reflejado en cada caso. Por su parte, para medir la transmitancia también se compara la medida realizada mientras iluminamos el patrón, con otra en la que iluminamos la muestra, pero en este caso la luz se proyecta sobre la muestra desde el exterior de la esfera, de modo que el flujo que ilumina en este caso el interior de la esfera es el transmitido por la muestra. A pesar de existir diversas configuraciones para conseguir este objetivo (Snail & Hansen, 1989), el caso más habitual es en el que tanto muestra como patrón permanecen en la esfera durante la realización de todas las medidas a fin de evitar modificar la reflectancia promedio de la pared $\bar{\rho}_p$.

Capítulo 2. Modelos de transferencia radiativa en vegetación

Existen muchos factores que determinan la reflectancia de una cubierta vegetal: el flujo solar incidente, las propiedades espectrales de los elementos que componen la cobertura vegetal, la arquitectura de la cubierta y la reflectancia del suelo (Goel, 1988). La estructura de la cubierta vegetal es compleja, distribuyéndose sus elementos de forma complicada, por lo que determinar la manera en la que la radiación interacciona con ella requiere de diversas simplificaciones. Para simular la reflectancia de la cubierta vegetal existen distintas aproximaciones, que básicamente pueden ser clasificadas en 4 categorías:

1. modelos de turbidez: tratan la cubierta 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* (*Leaf angle distribution*) son utilizados para definir la arquitectura de la cubierta, 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. Dentro de estos modelos de turbidez se puede diferenciar entre los modelos basados en la ecuación de transferencia radiativa (Suits, 1972; Verhoef, 1984) y los de tipo discreto (Kuusk, 1994).
2. modelos geométricos: utilizados principalmente cuando las cubiertas vegetales no son densas y ésta es diseñada a base de un ensamblaje de formas con dimensiones y propiedades ópticas simuladas.
3. modelos híbridos: son una combinación de los dos anteriores, de turbidez y geométricos, y es utilizado en aquellos casos en que la cubierta vegetal no se

adecúa a ninguno de los casos anteriores. La modelización sigue siendo de tipo geométrica, pero la interacción del flujo con los elementos de la cubierta es realizada mediante modelos de turbidez. Estos modelos son complejos y computerizadamente intensivos.

4. modelos de simulación por ordenador: permiten la simulación de las posiciones y orientaciones de los elementos que forman la cubierta vegetal. Suelen utilizar el método de Monte Carlo para seguir la trayectoria del fotón desde que llega a la cubierta 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).

En este trabajo, para la simulación de la reflectancia y la transmitancia espectral de las hojas, nos hemos basado en el modelo de transferencia radiativa publicado por Jacquemoud y Baret (1990), y conocido como PROSPECT (PROperties SPECTral). Para la simulación de la reflectancia de la cubierta vegetal se ha utilizado el modelo de turbidez SAILH (Scattering by Arbitrarily Inclined Leaves) desarrollado por Verhoef (1984), y modificado para incluir el efecto Hot Spot. Una descripción detallada del desarrollo de estos dos modelos se presenta en los Apéndices I y II. La selección de estos dos modelos en nuestro trabajo frente a otros se debe a que ambos han sido ampliamente testados en la bibliografía encontrada, usados tanto de forma independiente como juntos (Jacquemoud et al., 2006), y por lo tanto nos ofrecen las mayores garantías para su uso en la simulación de las propiedades ópticas de la vegetación.

2.1 Transferencia radiativa en hojas.

De los elementos estructurales de la vegetación, las hojas son en general los que mayor influencia tienen sobre la signatura espectral de la vegetación. Esto se debe principalmente a que son los elementos con una mayor superficie expuesta, y dado que normalmente la observación de la vegetación en el campo de la teledetección se realiza en ángulos cercanos a la vertical, otros elementos como los tallos van a tener una importancia mucho menor.

La interacción de la radiación electromagnética con las hojas de las plantas depende de sus propiedades químicas y físicas. La epidermis es el primer tejido que encuentra la luz, y por lo tanto ésta juega un importante papel en la reflectancia bidireccional de la hoja (Govaerts et al., 1996). La absorción de la radiación en las hojas se debe principalmente a la presencia de pigmentos fotosintéticos en los cloroplastos (clorofila a, clorofila b, carotenoides, etc.) y al agua. En menor medida, contribuyen también a la absorción otros elementos como proteínas y materiales estructurales de las paredes celulares (celulosa y lignina).

Las bandas de absorción debidas a los pigmentos se dan principalmente en la zona visible y ultravioleta del espectro, mientras que la absorción debida a las moléculas de agua se produce en la zona del infrarrojo cercano e infrarrojo medio. Los diferentes intervalos espectrales en los que cada elemento actúa se corresponden con los diferentes procesos mediante los cuales la luz es absorbida. Así, la absorción de luz por parte de los pigmentos se debe a transiciones entre los orbitales y cambios en los momentos angulares de los electrones de los átomos que componen las moléculas, mientras que en el caso del agua, la absorción se produce como consecuencia de las transiciones entre estados rotacionales y vibracionales de las moléculas.

A nivel de scattering, una de las principales características de las hojas, que los modelos de transferencia radiativa han de tener en cuenta, es su estructura interna. El mesófilo esponjoso se caracteriza por la abundancia de espacios intercelulares (Figura 2-1), llenos de aire, que facilitan el intercambio gaseoso entre planta y atmósfera. En consecuencia la luz en su recorrido en el interior de la hoja se encontrará con varios cambios de índice de refracción.

Los espectros de reflectancia y de transmitancia de las hojas verdes presentan un característico comportamiento que se muestra en la Figura 2-2. En el visible (400 - 700 nm), los valores de la reflectancia y la transmitancia son en general menores de 0.1. En este intervalo la mayor parte de luz incidente es absorbida por los pigmentos de la hoja. Se observan mínimos en la zona del azul en torno a los 450 nm, y del rojo, en torno a 670 nm, coincidiendo con los máximos de absorción de la clorofila. En el infrarrojo cercano (700 - 1300 nm), tanto los pigmentos foliares como la celulosa, que compone las paredes celulares, son transparentes, y por lo tanto prácticamente no existe

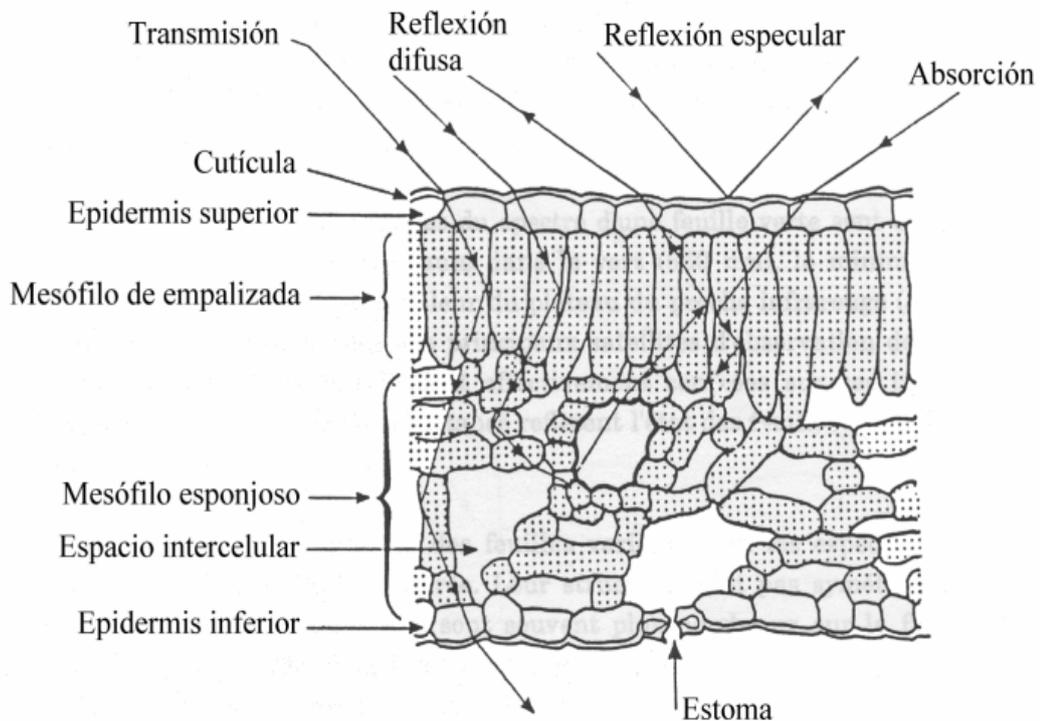


Figura 2-1 Esquema de las distintas formas en las que interacciona la luz con los diferentes tejidos de una hoja dicotiledónea.

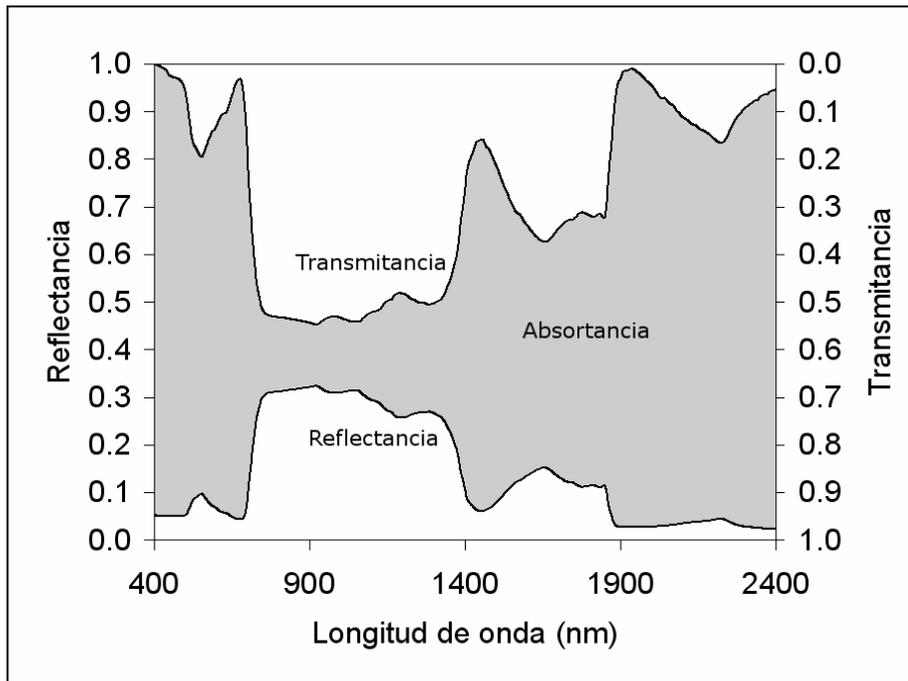


Figura 2-2 Forma típica de los espectros de absorptancia y reflectancia de una hoja, en la que se aprecia un comportamiento casi simétrico entre reflectancia y transmitancia.

absorción. En el infrarrojo medio (1300 - 2500 nm), los niveles de reflectancia y transmitancia son esencialmente determinados por el contenido de agua de la hoja (Rondeaux, 1990).

2.2 Modelo PROSPECT.

A lo largo de los últimos años, se pueden considerar dos diferentes enfoques en el estudio de la interacción entre la luz y las hojas de las plantas. Por un lado encontramos modelos descriptivos que, a través de una minuciosa caracterización de la estructura interna de la hoja y utilizando métodos numéricos de trazados de rayos (Kumar & Silva, 1973; Allen et al., 1973), obtienen resultados muy precisos, pero a costa de utilizar un gran número de parámetros y una gran cantidad de tiempo de computación. Por otro lado encontramos modelos basados en las ecuaciones de transferencia radiativa, que partiendo de un escaso número de parámetros llegan a obtener resultados razonablemente correctos.

La primera descripción que encontramos para evaluar la reflectancia de una hoja aparece en (Willstätter & Stoll, 1918). Modelos más recientes aparecen en distintos trabajos como (Allen & Richardson, 1968; Allen et al., 1969; Breece & Holmes, 1971; Woolley, 1971; Yamada & Fujimura, 1988).

En nuestro trabajo utilizaremos el modelo PROSPECT para simular la reflectancia y transmitancia foliar. Este modelo, heredero del PLATE MODEL (Allen et al., 1969), se basa en considerar que la hoja está formada por un apilamiento de N capas separadas por aire (Allen et al., 1970; Gausman et al., 1970). El objetivo de esto es dar cuenta de los espacios intercelulares que se encuentran en el mesófilo. Las capas estarán caracterizadas por un índice de refracción n y un coeficiente de absorción k . Si bien en

origen N ha de ser un número entero, en la práctica se considera como un parámetro de estructura que puede tomar valores continuos. Un valor de N igual a uno implica una hoja lo más compacta posible, que presentaría una reflectancia baja y una alta transmitancia en el infrarrojo cercano (Breece & Holmes, 1971). En el caso de plantas monocotiledóneas, como los cereales, al parámetro N se le puede asignar valores en torno a 1.5, mientras que en el caso de plantas dicotiledóneas este parámetro toma valores superiores, entre 1.5 y 2.5 (Jacquemoud & Baret, 1990). Esto es debido a las diferencias que se encuentran en la estructura del mesófilo de los dos tipos de plantas. Así mismo, para hojas dentro de la madurez, el valor de N puede superar el 2.5 debido al desorden que presenta la estructura interna.

El índice de refracción de las hojas está calculado en el trabajo de Jacquemoud y Baret utilizando una hoja de maíz seca tratada con fluoridone, para evitar cualquier rastro de pigmentos. Los valores mostrados en la Figura 2-3 (a) se consideran constantes en los distintos tipos de hojas para las que se quiera simular su reflectancia y su transmitancia.

Por su parte, el coeficiente de absorción se calcula teniendo en cuenta las distintas concentraciones en las que se pueden presentar aquellos elementos constituyentes de la hoja que presentan una mayor absorción de la luz. Desde la primera versión del modelo (Jacquemoud & Baret, 1990), se han propuesto diferentes elementos absorbentes, así como también diferentes coeficientes de absorción específicos.

Los primeros elementos considerados fueron simplemente la clorofila y el agua. Dentro del primer término se consideró tanto el efecto de la clorofila a como de la clorofila b , ambas presentes en plantas superiores en proporciones muy similares, pero también se incluyó el efecto de otros pigmentos menos importantes, como los carotenos y las xantofilas. Junto al agua y la clorofila, se utilizó un tercer término que daba cuenta de la luz absorbida por una hoja seca y tratada con fluoridone, y por lo tanto sin clorofila. Este último término se consideró a través del coeficiente de absorción k_e . Una primera modificación (Jacquemoud et al., 1995b; Jacquemoud et al., 1996) se introdujo para incluir el efecto de la absorción de la luz por parte de las proteínas y de la celulosa. Posteriormente se combinó el efecto de estos dos elementos en uno solo, la materia seca (Jacquemoud et al., 2000).

El coeficiente de absorción en esta última versión se determina según la expresión (2-1), donde K_{a+b} ($\text{cm}^2/\mu\text{g}$), K_w (cm^{-1}) y K_m (cm^2/g), son los coeficientes específicos de absorción para la clorofila, el agua y la materia seca, y C_{a+b} ($\mu\text{g}/\text{cm}^2$), C_w (cm) y C_m (g/cm^2) los contenidos por unidad de área de hoja. Estos contenidos son, junto a N las entradas del modelo PROSPECT:

$$k(\lambda) = k_e(\lambda) + \frac{K_{a+b}(\lambda)C_{a+b} + K_w(\lambda)C_w + K_m(\lambda)C_m}{N} \quad (2-1)$$

Se puede ver que en esta última expresión se mantiene el término de k_e , si bien con modificaciones respecto del usado en la primera versión del modelo.

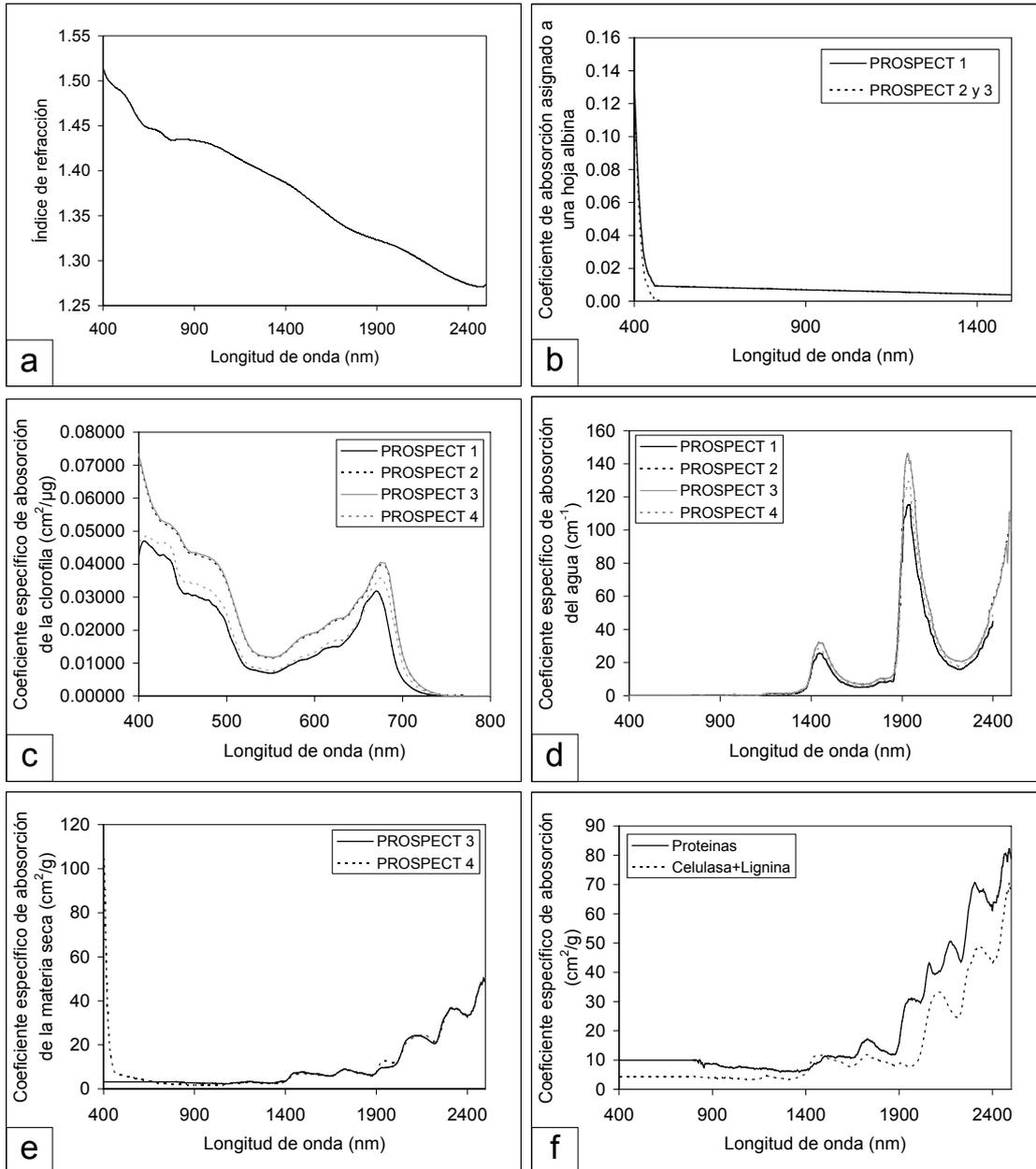


Figura 2-3 Índice de refracción utilizado en todas las versiones del modelo PROSPECT (a). Coeficiente de absorción asignado a una hoja albina utilizado hasta la tercera versión del modelo (b). Coeficientes específicos de absorción de la clorofila (c), agua (d) y materia seca (e). Coeficientes específicos de absorción para las proteínas y la celulosa + lignina utilizados en la segunda versión del modelo (f).

Se utilizan un cuarto grupo de coeficientes (Verhoef & Bach 2003; Zhang et al., 2006), en los que se elimina el término k_e , añadiendo su efecto al de la materia seca. Se incluye en este nuevo juego de coeficientes un término que hace referencia a pigmentos rojizos, como los taninos, que aparecen cuando la hoja comienza a secarse, y que son los responsables de las características tonalidades de los bosques de hoja caduca en otoño. En este caso el coeficiente de absorción se determina según la expresión (2-2), donde K_S y C_S se consideran dados en unidades arbitrarias. En este caso C_S será otra entrada del modelo PROSPECT. Una representación de todos estos coeficientes se puede ver en la Figura 2-3.

$$k(\lambda) = \frac{K_{a+b}(\lambda)C_{a+b} + K_w(\lambda)C_w + K_m(\lambda)C_m + K_s(\lambda)C_s}{N} \quad (2-2)$$

No hay que confundir el parámetro C_m utilizado en el modelo PROSPECT con el parámetro que en botánica se suele denominar contenido de materia seca LDMC (*Leaf Dry Mater Content*), y que se define como el cociente entre el peso de la hoja seca y el peso de la hoja fresca, utilizando normalmente las unidades de mg/g. Sin embargo sí está relacionado con otro parámetro conocido como Área específica de la hoja o SLA (*Specific Leaf Area*) que viene dada en unidades de kg/m^2 , y que viene a ser el inverso del parámetro C_m que utilizaremos en nuestro trabajo. Cabe destacar que la combinación de C_m y C_w nos permitirán calcular tanto SLA como LDMC.

2.3 Modelo SAILH.

En la actualidad, el modelo SAILH junto con los modelos que se derivan de él, como su extensión al infrarrojo térmico (Verhoef, 2006), o GeoSAIL (Huemmrich, 1995), para considerar cubiertas dispersas, son probablemente los modelos de simulación de reflectancia espectral de vegetación más utilizados por la comunidad científica.

Originariamente el modelo SAIL (Verhoef, 1984) fue diseñado para simular espectros de reflectancia de las cubiertas vegetales homogéneas, pudiendo considerar diferentes ángulos de iluminación y observación. Es decir, está diseñado para tener en cuenta la anisotropía en la reflectancia de la vegetación tanto con la dirección de iluminación, como con la dirección de observación. Esta anisotropía se da a pesar de considerar los elementos constituyentes, básicamente las hojas, como superficies lambertianas. Al estar las hojas orientadas de una determinada manera, la luz que reflejan no se comporta igual en todas las direcciones.

Con SAILH (Kuusk, 1985) se da un segundo paso a la hora de estudiar la anisotropía de la reflectancia de la vegetación, ya que además consideramos la estructura tridimensional interna de la cubierta. Es decir, a pesar de estar considerando una cubierta homogénea, el efecto de auto-sombra de la vegetación, produce que la reflectancia dependa de la diferencia entre el ángulo de observación y el de iluminación. Así tendremos que si se observa desde una dirección igual o cercana a la dirección de iluminación, se verán iluminadas todas las hojas de la vegetación. Pero según nos vayamos separando de esta situación, comenzaremos a ver las sombras que unas hojas proyectan sobre las otras. Habrá por tanto un máximo en el valor de la reflectancia cuando se observe desde el mismo ángulo que con el que se está iluminando. Este efecto es conocido como *Hot Spot*, e igualmente se puede observar en estudios sobre la radiancia procedente de las nubes, la reflectancia del mar o sobre cualquier otro elemento que presente una rugosidad tal que produzca sombras entre las diferentes estructuras que lo componen. En el modelo SAILH esta característica viene determinado por el parámetro *HotSpot*, el cual se utiliza en la práctica para cuantificar empíricamente la intensidad del efecto (Verhoef & Bach, 2003), si bien se relaciona en algunos desarrollos teóricos con el tamaño de la hoja relativo a la altura de la vegetación (Jupp & Strahler, 1991).

El modelo SAILH en un primer paso considera tres flujos, dos de ellos homogéneos e isotropos en el interior de la cubierta vegetal, y un tercero procedente de

la dirección en la que consideraremos se encuentra el sol. Estos flujos irán variando en función de la profundidad debido a la interacción con las hojas, es decir debido a los procesos de absorción y scattering. Gracias a este último, parte de la radiación se redistribuye contribuyendo a aumentar los otros flujos. Hasta aquí la iluminación en el interior de la esfera es isótropa, salvo en la dirección de propagación del flujo descendente que proviene del sol. En un segundo paso se considera que esta distribución de la radiación ilumina las hojas, que según su orientación redistribuye de nuevo la luz, generando un campo anisótropo. Este proceso, conocido como el método del campo autoconsistente, se puede repetir de forma sucesiva, pero al ser rápidamente convergente, el segundo paso se toma como una aproximación suficientemente correcta. A partir de esta descripción se puede plantear un sistema de ecuaciones diferenciales, que una vez aplicadas las condiciones de contorno apropiadas, podemos resolver, obteniendo la reflectancia del sistema en la dirección deseada.

Entre las condiciones de contorno que necesitamos aplicar, nos encontramos con lo que ocurre con la luz en la parte superior e inferior de la cubierta vegetal. En la parte inferior obviamente nos encontramos con el suelo, y por lo tanto parte de la luz será reflejada otra vez hacia la vegetación. Por simplicidad se considera el suelo como una superficie lambertiana, caracterizada por una cierta reflectancia, ρ_{suelo} .

La condición de contorno que aplicaremos en la parte superior del sistema se basa en las condiciones de iluminación que se tengan. Considerar la cubierta vegetal iluminada únicamente desde la dirección del sol, no es muy realista salvo que nos encontremos en un sistema sin atmósfera. En general, debido a los procesos de scattering en la atmósfera tendremos una iluminación difusa procedente de todas las direcciones. Sin embargo, considerar una distribución demasiado compleja complicaría en exceso el problema que tenemos que resolver. Una solución intermedia es considerar una iluminación formada por un flujo descendente e isótropo F_{dif} , y otro procedente del sol, F_{dir} . Esto nos permite además separar fácilmente el problema en dos equivalentes, como se muestra en la Figura 2-4. Una vez resueltos, las reflectancias procedentes de cada uno se tendrán que promediar tomando en consideración la relación entre la irradiancia solar directa medida en la horizontal, y la irradiancia difusa procedente del resto del cielo, tal como se indica en la expresión (2-3). En ésta, ρ_{dir} y ρ_{dif} indican las reflectancias obtenidas mediante el modelo SAIL al considerar únicamente la iluminación directa o la difusa respectivamente. El parámetro $DSKL$ indica el cociente entre la irradiancia difusa y la directa.

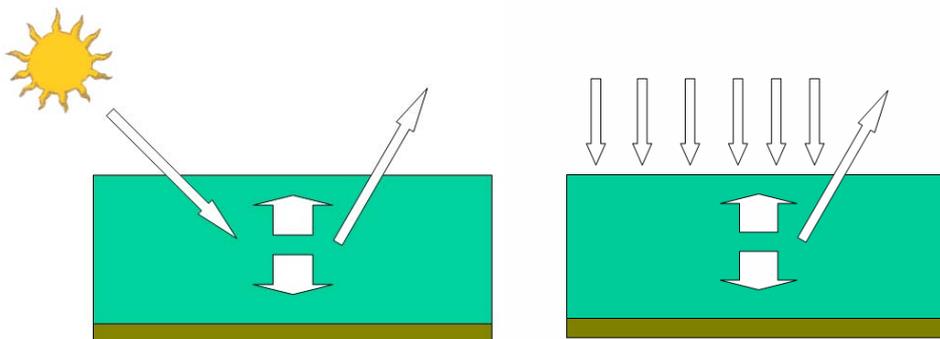


Figura 2-4 Separación del problema del cálculo de reflectancias de la cubierta vegetal en función de la iluminación directa y difusa.

$$\rho = \frac{\rho_{dir} F_{dir} + \rho_{dif} F_{dif}}{F_{dir} + F_{dif}} = \frac{\rho_{dir} + \rho_{dif} DSKL}{1 + DSKL} \quad (2-3)$$

Una de las propiedades que utiliza SAIL para describir la vegetación es la densidad de hoja en el interior de la cubierta vegetal, dada por el índice de área foliar *LAI* (Leaf Area Index). Este índice se define como la razón entre superficie de hoja considerando solamente una cara, respecto de la superficie ocupada de suelo (Myneni et al., 1989). Este es un parámetro ampliamente utilizado en la bibliografía, no sólo en la relacionada con la transferencia radiativa, sino con cualquier otro campo en el que la superficie foliar sea importante, como por ejemplo en el estudio de intercambio de gases con la atmósfera.

Hasta aquí todas las características del modelo SAIL que hemos descrito se pueden encontrar ya en su antecedente directo, el modelo de Suits (1972). La aportación fundamental que introduce el modelo SAIL, es la manera en la que describe la estructura de la vegetación, haciendo uso de una función de distribución de inclinación normal de las hojas. Para definir esta función, consideraremos que en una cubierta vegetal homogénea, Ω_L es un vector unitario normal a la superficie superior de una hoja, determinado por un ángulo cenital θ_L y un ángulo acimutal φ_L medido respecto de una cierta dirección de referencia, normalmente el norte geográfico. Este ángulo así definido está determinado dentro del hemisferio superior, siendo su integral sobre el mismo igual a 2π .

Sea $g_L(\Omega_L)$ la fracción de hojas de la cubierta vegetal que se encuentran dentro de la unidad de ángulo sólido alrededor de Ω_L . Esta función ha de ser definida de tal manera que cumpla la relación de normalización (2-4):

$$\int_{2\pi} g_L(\Omega_L) d\Omega_L = \int_0^{2\pi} d\varphi_L \int_0^{\pi/2} g_L(\theta_L, \varphi_L) \text{sen } \theta_L d\theta_L = 2\pi \quad (2-4)$$

Salvo en casos de fuerte heliotropismo, es común que, en la función de distribución de inclinación normal de las hojas, se considere la distribución azimutal como aleatoria, por lo que la relación de normalización (2-4) se transformaría en (2-5), donde $f(\theta_L)$ es la función que llamaremos función de distribución de inclinación normal de las hojas:

$$\int_0^{\pi/2} g_L(\theta_L, \varphi_L) \text{sen } \theta_L d\theta_L = \int_0^{\pi/2} f(\theta_L) d\theta_L = 1 \quad (2-5)$$

En la bibliografía es posible encontrar diferentes valores teóricos de $f(\theta_L)$, como los dados por De Wit (1965), o los de Bunnik (1978). Estos últimos son los que se aplicaron originariamente al modelo SAIL, y son los que se han venido utilizando con más frecuencia. En total se definen 6 funciones: Planófila, Plagiófila, Uniforme, Extremófila, Esférica y Erectófila, según las ecuaciones dadas en la Tabla 2-1, la cual se encuentra ordenada desde las distribuciones que generan orientaciones de hoja más horizontales, hasta las distribuciones en las que predominan las hojas verticales, según se muestra con el ángulo medio de inclinación foliar $\langle \theta_L \rangle$, definido según (2-6). En la Figura 2-5 (a) podemos ver representadas todas estas funciones de distribución.

$$\langle \theta_L \rangle = \int_0^{\pi/2} f(\theta_L) \theta_L d\theta_L \quad (2-6)$$

Tabla 2-1 Distribuciones de inclinación foliar dadas por Bunnik.

Distribución	$f(\theta_L)$	$\langle \theta_L \rangle$
Planófila	$f(\theta_L) = \frac{2}{\pi} [1 + \cos(2\theta_L)]$	27
Plagiófila	$f(\theta_L) = \frac{2}{\pi} [1 - \cos(4\theta_L)]$	45
Uniforme	$f(\theta_L) = \frac{2}{\pi}$	45
Extremófila	$f(\theta_L) = \frac{2}{\pi} [1 + \cos(4\theta_L)]$	45
Esférica	$f(\theta_L) = \text{sen} \theta_L$	58
Erectófila	$f(\theta_L) = \frac{2}{\pi} [1 - \cos(2\theta_L)]$	63

Estas funciones de distribución se utilizan dentro del modelo de manera discreta, integradas en intervalos de 10° de 0° a 80°, y en intervalos de 2° de 80° a 90°, obteniendo un conjunto de 13 frecuencias para cada una de las funciones. Este refinamiento entre 80° y 90° se hace ya que los coeficientes de scattering utilizados en el modelo son más sensibles a las variaciones de los ángulos mayores.

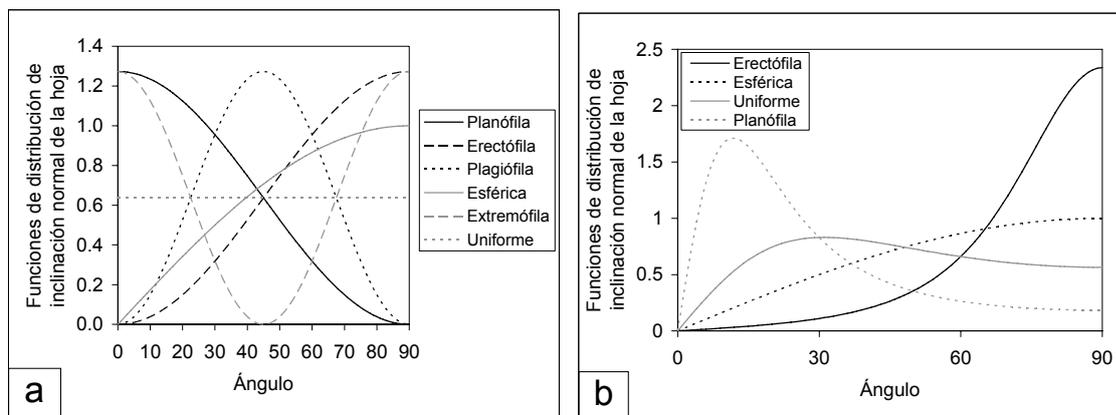


Figura 2-5 Distribuciones angulares dadas por Bunnik (1978) (a), y calculadas mediante la distribución paramétrica de Campbell (1986) (b).

Una diferente aproximación, utilizada por algunos autores (Jacquemoud et al., 1995b), respecto del uso de funciones de distribución de inclinación normal foliar tabuladas, es considerar distribuciones parametrizadas. El objeto de esto es considerar la distribución definida por un parámetro continuo que se comporte como cualquiera del resto de parámetros del modelo. En la bibliografía podemos encontrar varios ejemplos de distribuciones paramétricas, como la distribución Beta (Goel & Strebel, 1984), la Elíptica (Kuusk, 1995), y la Elipsoidal (Campbell, 1986; Campbell & Norman, 1989; Campbell, 1990). De éstas, las dos primeras son muy versátiles, pudiendo reproducir casi cualquier tipo de distribución que se quiera, pero a costa de utilizar dos parámetros. En cambio la tercera, la distribución Elipsoidal de Campbell, utiliza un único parámetro χ . Si bien esta distribución es menos potente que las otras dos, sí es capaz de reproducir las distribuciones angulares que en general se pueden encontrar en la vegetación

(Jacquemoud et al., 1995a). En (2-7) se da una expresión analítica de esta distribución (Campbell, 1990).

$$f_L(\theta_L) = \frac{2\chi^3 \text{sen}\theta_L}{\lambda(\cos^2\theta_L + \chi^2 \text{sen}^2\theta_L)^2} \quad (2-7)$$

donde

$$\lambda = \chi + 1.774(\chi + 1.182)^{-0.733} \quad (2-8)$$

El parámetro χ está relacionado con $\langle\theta_L\rangle$ mediante las expresiones (2-9) (Wang & Jarvis, 1988). En función de los ángulos medios calculados a partir de esta expresión podemos relacionar algunas de las funciones definidas por Bunnik (1978), con las obtenidas en función del valor de χ . En la Tabla 2-2 y la Figura 2-5 (b) se presentan las distribuciones planófila, uniforme, esférica y erectófila obtenidas de la fórmula de Campbell. En el caso de la distribución esférica, el resultado obtenido con esta distribución es igual al dado por Bunnik.

$$\langle\theta_L\rangle = \begin{cases} (0.0066\chi + 0.0107)^{-1} & \text{si } \chi \leq 1 \\ (0.0103\chi + 0.0053)^{-1} & \text{si } \chi > 1 \end{cases} \quad (2-9)$$

Tabla 2-2 Distribución de Campbell para distintos valores del parámetro χ .

Distribución	χ	$\langle\theta_L\rangle$
Planófila	3	28
Uniforme	1.5	47
Esférica	1	58
Erectófila	0.5	74

2.4 Sensibilidad de los modelos.

En esta sección vamos a ver cómo la respuesta de los modelos PROSPECT y SAILH depende de sus diferentes parámetros de entrada para, a continuación, responder a la pregunta de cuáles son los parámetros que más influyen en la salida de estos modelos. Conocer la importancia de cada uno de los parámetros nos puede ser útil para obviar aquellos menos relevantes, asignándoles valores estándar, sin por ello perder precisión en el resultado obtenido. Esto es especialmente útil cuando utilizamos un rango de los valores de parámetros más limitado que aquel para el que el modelo fue diseñado.

2.4.1 Sensibilidad del modelo PROSPECT.

La versión del modelo PROSPECT que principalmente hemos utilizado en este trabajo es la que utiliza la expresión (2-1), con el tercer juego de coeficientes. Por tanto, los parámetros de entrada utilizados son N , C_{a+b} , C_w y C_m . Mientras que N va a afectar a todo el espectro, Figura 2-6 (a), el efecto de los parámetros que son utilizados para calcular el índice de absorción depende de los coeficientes específicos de absorción, y

por lo tanto su importancia vendrá dada por el valor del correspondiente coeficiente específico en cada longitud de onda, Figuras 2-6 (b), (c) y (d).

Cuanto menor es el valor de N , menores son los valores de la reflectancia y mayores los de la transmitancia simuladas, sin variar en absoluto el valor de la absorbancia (Figura 2-6 (a)). N representa, como vimos en la sección 2.2, el número de capas que utiliza el modelo, y por lo tanto está relacionado con la distribución interna de los espacios intercelulares. Si el parámetro N toma valores altos, el número de reflexiones internas en la hoja es también alto, y la probabilidad de que la luz sea reconducida a la superficie superior aumenta. Esto es más evidente en los rangos espectrales en los que la absorción es menor, es decir en el infrarrojo cercano e infrarrojo medio.

La acción de la clorofila (Figura 2-6 (b)) se reduce al espectro visible (400 - 700 nm), donde el resto de parámetros tienen una influencia despreciable, lo cual permite una buena determinación de este parámetro. En este intervalo existen dos zonas de intensa absorción, centradas en 450 nm y 670 nm. En estas zonas se produce una rápida saturación de la absorbancia con el aumento de la concentración de clorofila, siendo las variaciones de la reflectancia y de la transmitancia más visibles en torno a los 550 nm y entre los 690 nm y los 750 nm (Zarco, 2000; Rock et al., 1988). Esta última zona es conocida como límite del rojo o "red edge".

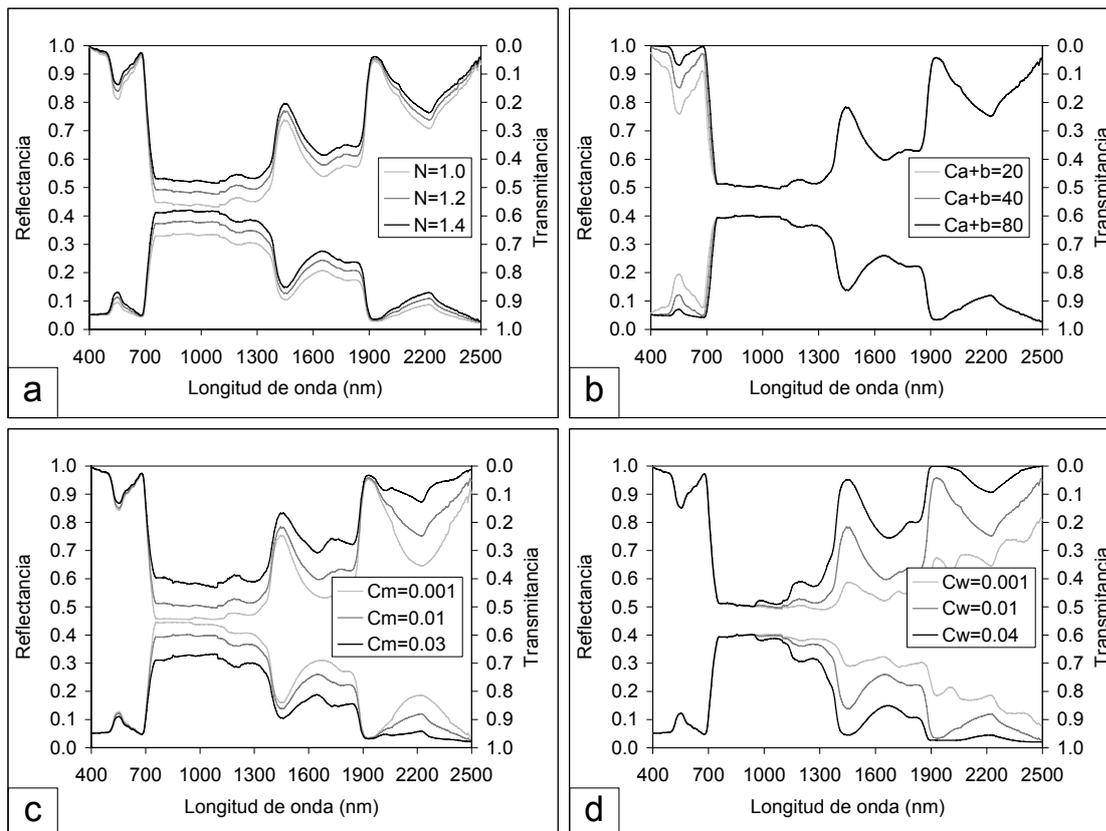


Figura 2-6 Variación de la reflectancia y la transmitancia simuladas mediante PROSPECT al modificar N (a), C_{a+b} (b), C_m (c) y C_w (d).

El modo en el que la reflectancia es modificada hasta 1400 nm, debido a la variación de C_m (Figura 2-6 (c)), es similar al modo en que lo hace debido a la variación de N , y por lo tanto, un estudio limitado a la reflectancia y que no contemple el intervalo de longitudes de onda entre 1400 y 2400, puede verse dificultado por interferencias entre estos dos parámetros. En cambio, estudiando al mismo tiempo la reflectancia y la transmitancia podemos extraer la absorptancia, que no se ve modificada por el parámetro de estructura N , pero sí por C_m .

La absorción debida al agua (Figura 2-6 (d)) se produce principalmente a partir de 1400 nm, aunque existe ya una pequeña absorción a 900 nm. Al igual que en el caso de la clorofila, en las longitudes de onda en las que el coeficiente específico de absorción alcanza valores máximos, se puede producir la saturación de la absorptancia, siendo a 1530 nm y a 1720 nm donde la absorptancia es más sensible a la variación de C_w (Fourty & Baret, 1997).

2.4.2 Sensibilidad del modelo SAILH.

El modelo SAILH no solamente presenta un mayor número de variables de entrada que el modelo PROSPECT, sino que dado que el resultado es un único valor de reflectancia, el efecto que cada uno de estos parámetros ejerce es mucho menos claro. Aún así, podemos estudiar la variación de la reflectancia en función de algunos de ellos, comparando los resultados entre sí para intentar comprender su efecto en el modelo. Para obtener los resultados que a continuación comentar, se han realizado diversas series de simulaciones en las que para los distintos parámetros se han tomado los valores dados en la Tabla 2-3, salvo que se indique lo contrario.

Tabla 2-3 Valores de los parámetros utilizados en las simulaciones presentadas en la sección 2.4.2.

Parámetro	Valor	Parámetro	Valor
LAI	2	ρ_{Suelo}	0.3
χ	1.5	θ_{Solar}	40
$HotSpot$	0.5	$\theta_{\text{Observación}}$	0
ρ_{Foliar}	0.4	$\varphi_{\text{Observación}}$	0
τ_{Foliar}	0.4	$DSKL$	0

Comenzamos con las propiedades ópticas de las hojas, sin duda el elemento que más influye en la salida del modelo SAILH. Se puede ver en la Figura 2-8 cómo, al variar los valores de la reflectancia, se obtiene un gran correlación entre las reflectancias de las hojas y de la cubierta. Sin embargo el efecto de la transmitancia foliar sobre la reflectancia de la cubierta vegetal es mucho menor, sobre todo para valores bajos de la misma. En la Figura 2-8 los valores de reflectancia y transmitancia foliares se han desacoplado, sin embargo su valor suele presentar una muy alta correlación entre sí en la mayoría de los casos.

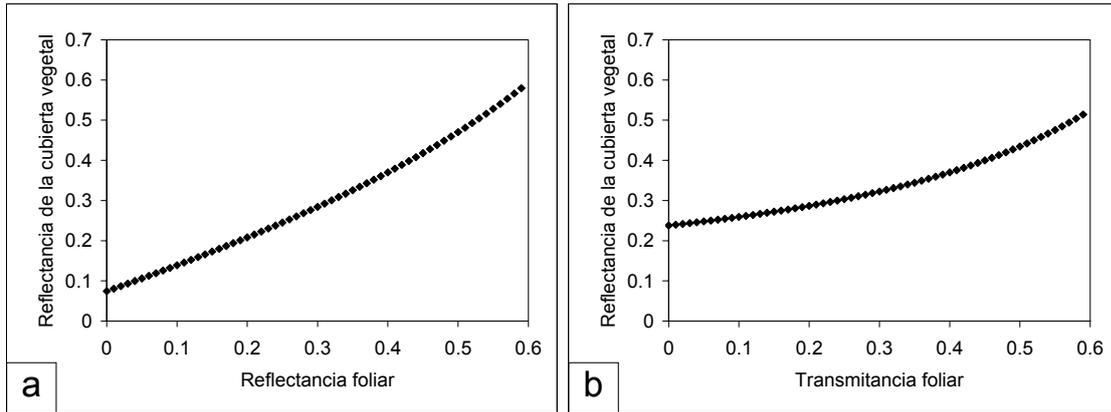


Figura 2-8 Efecto de la reflectancia y la transmitancia de las hojas sobre la reflectancia de la cubierta.

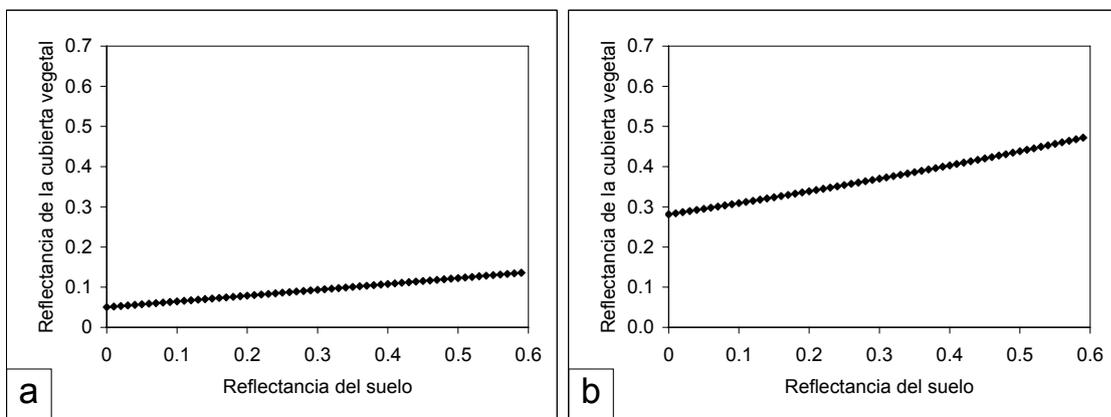


Figura 2-9 Simulación mediante SAILH de la reflectancia de la cubierta en función de la reflectancia del suelo, para el caso de una reflectancia foliar de 0.1 (a) y 0.4 (b).

El suelo es un factor que como veremos en el análisis de sensibilidad influye de forma muy importante en la reflectancia de la cubierta vegetal, a pesar de encontrarse debajo de la vegetación. Hay que considerar que la absorción de las hojas es muy grande de 400 a 700 nm, pero a partir de 700 nm ocurre todo lo contrario, y la transmitancia de la vegetación se encuentra en torno a 0.5. Para una variación de la reflectancia del suelo de 0 a 0.6, tal cómo se muestra en la Figura 2-9 (a), con reflectancia y transmitancias foliares de 0.1, típica del visible, la variación en la

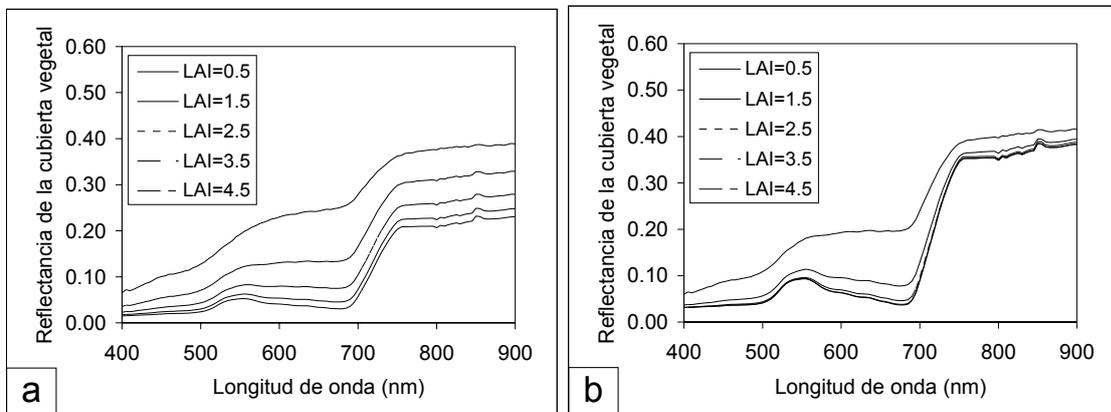


Figura 2-7 Variación de la reflectancia de la cubierta vegetal en función del valor del *LAI*, para un $\chi = 0.5$ (a) y $\chi = 3$ (b).

reflectancia de la cubierta es de 0.09, mientras que cómo se puede ver en la Figura 2-9 (b), para valores de reflectancia y transmitancias foliares de 0.4, típico en torno a 800 nm, la diferencia llega a ser de 0.19.

Pasando a analizar la influencia del valor del LAI sobre el espectro de reflectancia, vemos en la Figura 2-7 cómo también se va a producir diferente efecto en función de la absorción de las hojas. Así a 670 nm, donde la absorción de la clorofila es más acusada, vemos cómo el valor de la reflectancia cae rápidamente según crece el LAI , a diferencia de como lo hace en el infrarrojo. Pero esta variación está modulada por otros parámetros, muy especialmente por χ . En la Figura 2-7 (a) vemos el efecto producido por una variación de LAI de 0.5 hasta 4.5, utilizando el parámetro $\chi = 0.5$, que como vimos en la Tabla 2-2 corresponde a una distribución del tipo erectófila. Comparando con la Figura 2-7 (b) donde la variación de LAI es la misma, pero en el caso de $\chi = 3$, distribución del tipo planófila, se aprecia como el efecto producido por el cambio de LAI es mucho más brusco y llega rápidamente a saturarse en el segundo de los casos.

Diferenciar el comportamiento del parámetro χ es complicado, no sólo porque su efecto está muy relacionado con el del LAI , sino porque para casos de χ altos, es decir, para distribuciones planófilas, se observa un efecto de saturación, como en la Figura 2-10. Esto dificulta la tarea de distinguir entre casos en los que nos encontremos con valores similares y altos de χ . La variación de la reflectancia que se observa en la gráfica es muy significativa para valores bajos de χ , pasando de 0.24 a 0.32 cuando χ pasa de 0.5 a 2. Sin embargo para valores altos de χ esta variación es mínima, incrementándose la reflectancia sólo 0.02 cuando χ pasa de 2 a 3.

Para analizar la importancia del parámetro $DSKL$ podemos hacerlo a través del modelo GOA-UVA-VISIBLE (Cachorro et al., 1997; 2000) que nos permite calcularlo teóricamente. En la Figura 2-11 (a) se puede ver una representación del parámetro

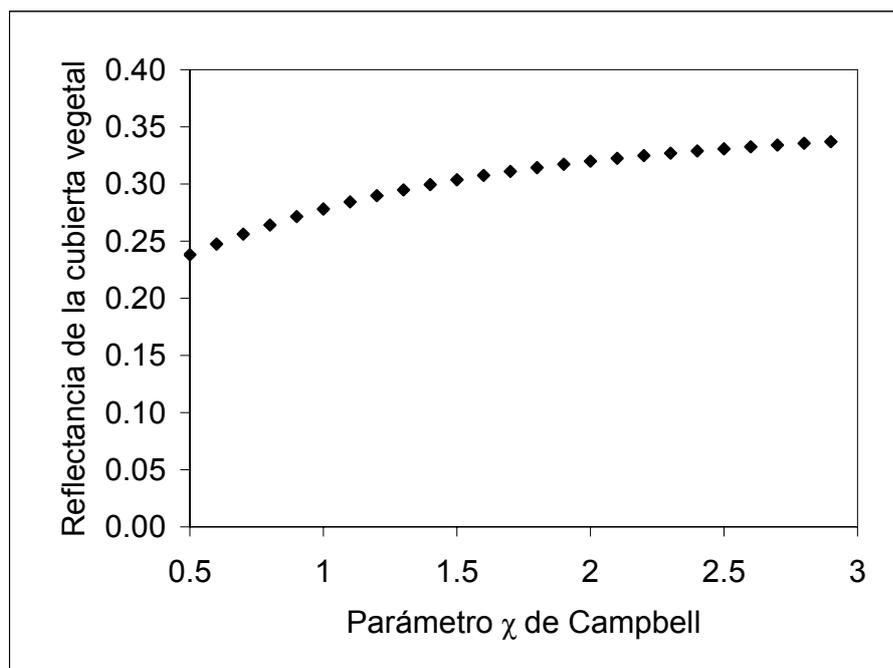


Figura 2-10 Variación de la reflectancia de la cubierta vegetal en función del valor de χ .

DSKL calculado teóricamente, en función de la longitud de onda. Los cálculos se han realizado para diferentes valores de los parámetros de Ångström. En el primer caso se han tomado $\alpha = 2$ y $\beta = 0.03$, que podría corresponder con un aerosol de fondo, de partículas pequeñas. En el segundo se ha considerado $\alpha = 0.4$ y $\beta = 0.5$, simulando un aerosol tipo desértico. Finalmente, se muestra un caso mucho más extremo, con $\alpha = 2$ y $\beta = 0.5$, que correspondería a una situación en la que estuviésemos inmersos en una nube de humo. Sin embargo, como se comprueba en la Figura 2-11 (b) este parámetro tiene escasa relevancia en la reflectancia calculada con el modelo SAILH.

Pasando a analizar la influencia angular, se puede comprobar que la dirección de observación es muy importante. En la Figura 2-12 se muestra una representación cilíndrica de la reflectancia de la vegetación en función de los ángulos cenital y acimutal de observación. Para generar esta gráfica se ha utilizado un valor de $LAI = 3$ y $\chi = 0.5$. Esta reflectancia muestra un mínimo bastante acusado, 0.22, en la posición cercana a la vertical, en torno a un ángulo cenital de observación de 90° y un ángulo cenital de 180° . El valor máximo calculado, 0.38, correspondiente a un ángulo cenital de observación cercano a los 90° y un ángulo cenital de 0° .

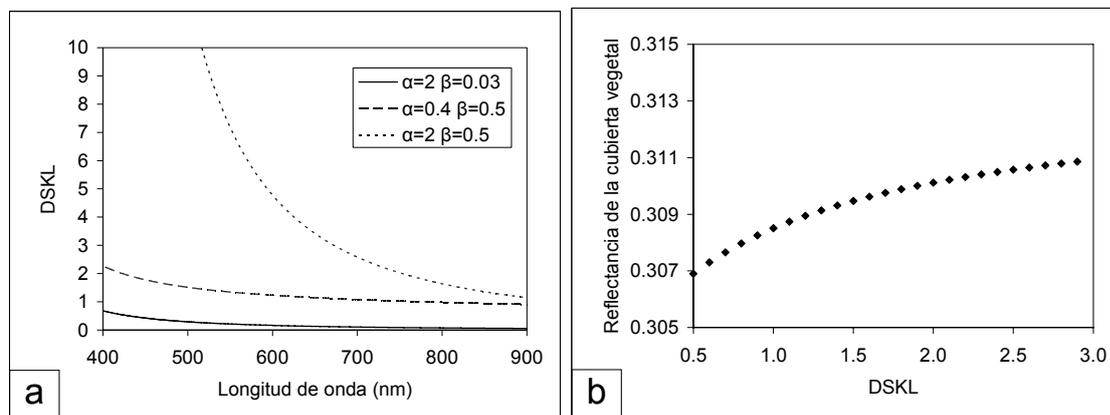


Figura 2-11 Variación del parámetro *DSKL* con la longitud de onda, para tres casos diferentes de atmósfera (a). Efecto del parámetro *DSKL* sobre la reflectancia de la cubierta vegetal (b).

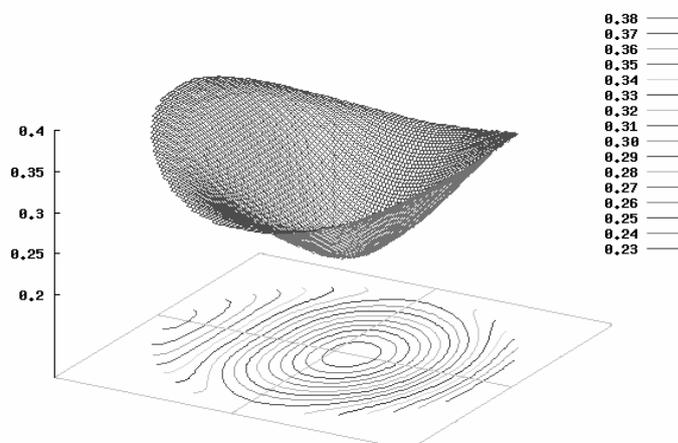


Figura 2-12 Simulación mediante SAILH de la reflectancia en función de la dirección de observación.

Si incluimos el efecto del Hot Spot y observamos las gráficas de la reflectancia de la cubierta en función del ángulo cenital solar, Figura 2-13, vemos como aparece un máximo justo cuando la dirección de iluminación y observación coinciden. En general también se aprecia un incremento de la reflectancia fuera de la zona de máxima influencia del Hot Spot.

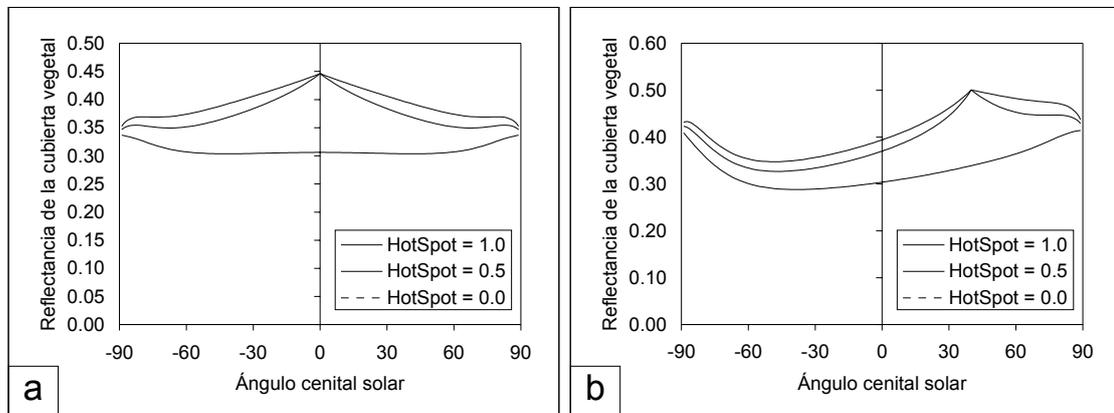


Figura 2-13 Simulación mediante SAILH de la reflectancia en función del ángulo cenital solar para diferentes valores de *HotSpot* y para un ángulo cenital de observación de 0° (a) y de 40° (b).

2.4.3 Análisis cuantitativo de sensibilidad de los modelos.

El objetivo de un análisis de sensibilidad es establecer cómo un modelo dado depende de sus factores de entrada (Saltelli et al., 1999). Un análisis de sensibilidad cuantitativo nos puede ser útil para la identificación de los parámetros más importantes de un modelo, a fin de elegir de forma correcta las variables que podremos llegar a obtener mediante métodos de inversión. Estas variables serán las que tengan un efecto mayor en la salida del modelo.

En este trabajo se ha utilizado una metodología propuesta por Saltelli (2002), la cual nos permite ordenar los parámetros de entrada. Según éste, podemos considerar que un criterio para ordenar estos parámetros es la varianza incondicional $V(Y)$, siendo Y el resultado del modelo, cuando dejamos variar todos los parámetros entre unos ciertos límites, salvo un parámetro X_i , que lo fijamos en su valor verdadero X_i^* . Es decir, el parámetro más importante será aquel X_i para el cual $V(Y|X_i=X_i^*)$ sea mínimo.

El problema está en que en general no vamos a saber cuál es el valor verdadero X_i^* . La solución aportada por Saltelli (2002) es tomar como indicador de la importancia de los parámetros el promedio de las varianzas cuando fijamos el parámetro X_i a una serie de valores comprendidos en un determinado rango, es decir, $E(V(Y|X_i))$, siendo E el valor esperado. La estadística nos dice que $V = V(E(Y|X_i)) + E(V(Y|X_i))$, así que alternativamente y de cara a simplificar el proceso, podremos tomar como criterio para ordenar los parámetros, que un parámetro es más importante cuanto mayor sea $V(E(Y|X_i))$, o normalizando, $S_i = V(E(Y|X_i))/V(Y)$. Éste es el criterio seguido en nuestro trabajo para realizar el análisis cuantitativo de la sensibilidad de los modelos.

Tabla 2-4 Análisis de sensibilidad aplicado al modelo PROSPECT utilizando N , n y k como entradas.

	S_i	
	ρ	τ
N	0.140	0.121
n	0.138	0.065
k	0.954	0.945

Tabla 2-5 Análisis de sensibilidad aplicado al modelo SAILH utilizando N , n y k como entradas.

	S_i
ρ_{foliar}	0.699
τ_{foliar}	0.312
ρ_{suelo}	0.251
χ	0.170
LAI	0.115
$HotSpot$	0.078
$\theta_{observación}$	0.036
$\varphi_{observación}$	0.036
$DSKL$	0.031
θ_{solar}	0.011

En el caso del modelo PROSPECT hemos comenzado analizando los parámetros más básicos, es decir, el índice de refracción, el índice de absorción y N . La importancia de estos modelos viene dada por los valores de S_i de la Tabla 2-4.

El parámetro más importante tanto al calcular la reflectancia como al calcular la transmitancia es, con diferencia, el índice de absorción, mientras que el menos importante va a ser, también en ambos casos, el índice de refracción. Este resultado apoya el hecho de tomar, como vimos anteriormente, el mismo índice de refracción para cualquier tipo de hoja.

Podremos obtener información más importante si consideramos los parámetros

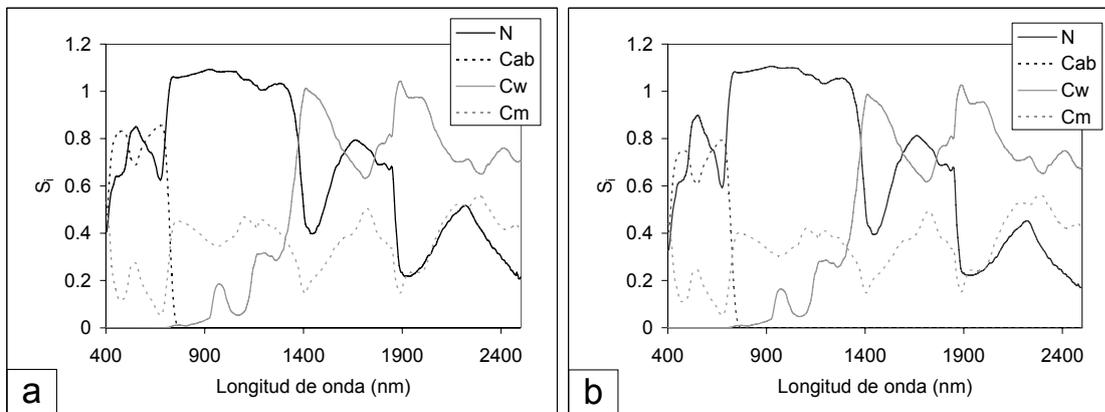


Figura 2-14 Análisis de sensibilidad de la reflectancia (a) y de la transmitancia (b) calculado con el modelo PROSPECT

de entrada N , C_{a+b} , C_w y C_m . Debido a que los coeficientes específicos de absorción toman diferentes valores en función de la longitud de onda, la importancia de cada parámetro dependerá de en qué zona del espectro lo estemos considerando. En la Figura 2-14 vemos el valor S_i para cada parámetro, en función de la longitud de onda, tanto para la reflectancia como para la transmitancia. Cabe destacar la escasa importancia de C_m y la nula de C_w en el visible, dado que como posteriormente veremos, las medidas espectrales en nuestro trabajo se han realizado en el intervalo comprendido entre 400 y 800 nm. En este intervalo los dos parámetros más importantes del modelo PROSPECT son N y C_{a+b} .

Según el análisis de sensibilidad realizado del modelo SAILH, Tabla 2-5, los factores que más influencia tienen sobre la simulación del espectro de reflectancia son la reflectancia y la transmitancia foliar, la reflectancia del suelo, el parámetro χ de la distribución angular foliar elipsoidal y el índice de área foliar. Por lo tanto para conseguir una estimación adecuada del LAI , tendremos que conocer con suficiente precisión tanto la reflectancia del suelo, como la distribución de ángulos foliares.

Al unir los dos modelos tenemos un total de 11 variables. Para realizar el análisis de sensibilidad en un cierto intervalo de longitudes de onda es necesario incluir tanto el espectro de reflectancia del suelo como el parámetro $DSKL$ en dicho intervalo. Para dar cuenta de la reflectancia del suelo, se ha utilizado la aproximación que veremos más adelante en el análisis de los datos del año 2002, consistente en multiplicar una medida del espectro de reflectancia del suelo, por un parámetro BSL . En cuanto al parámetro $DSKL$, se ha calculado de forma teórica mediante el modelo GOA-UVA-VISIBLE MODEL a partir de los parámetros de Ångström α y β .

De la Figura 2-15 se extrae como conclusión que en el visible los dos parámetros más importantes son el LAI y C_{a+b} .

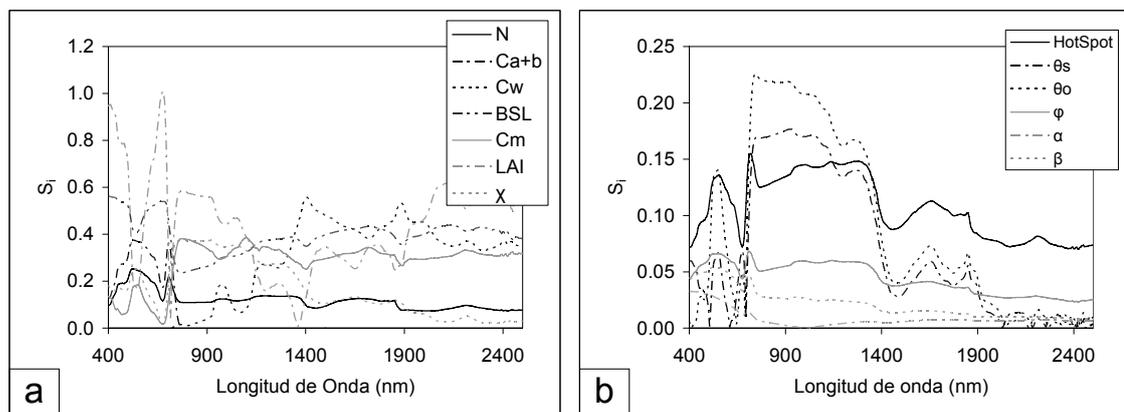


Figura 2-15 Análisis de sensibilidad del modelo PROSPECT. Parámetros más (a) y menos importantes (b).

2.5 Inversión de los modelos.

Mediante los modelos que hemos visto podemos simular el espectro de reflectancia de una cubierta vegetal en función de unos parámetros que describen tanto a la vegetación como a las condiciones de iluminación, observación y suelo.

Modelos de transferencia radiativa

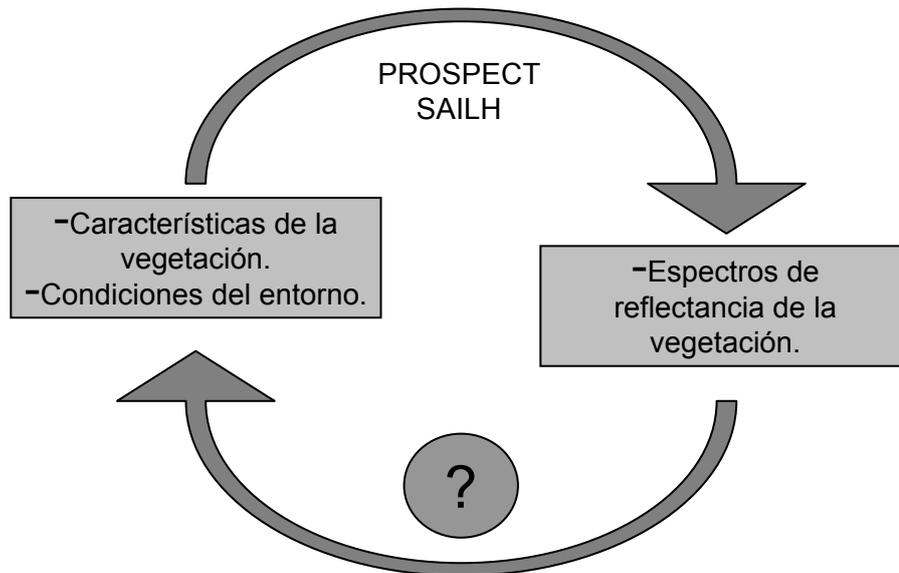


Figura 2-16 Esquema de funcionamiento de los modelos de transferencia radiativa en vegetación en modo directo y en modo inverso.

Pero éste no es nuestro objetivo, sino que lo que buscamos es poder conocer el estado de la vegetación a partir de medidas espectrales, realizadas por ejemplo desde satélite. Necesitamos por lo tanto alguna manera de invertir el funcionamiento normal de estos modelos. Realizar esta tarea en general no es posible, ya que como veremos más adelante el camino inverso es un problema mal propuesto. En lo que sigue, describiremos el mecanismo utilizado en este trabajo para realizar esta inversión.

Para realizar este camino inverso, no es posible recurrir a un desarrollo analítico debido a la no-linealidad del problema, por lo que es necesario utilizar procedimientos numéricos. En concreto el que se utiliza en este trabajo parte de definir una función de mérito que proporcione una medida de la diferencia entre los espectros de reflectancia medidos y los espectros simulados por el modelo, dado un conjunto de parámetros. En la expresión (2-10) se muestra un ejemplo de función de mérito Δ^2 , donde ρ hace referencia al espectro de reflectancia medido experimentalmente, mientras que ρ^* sería el simulado a partir de un conjunto de parámetros P .

$$\Delta^2 = \sum_{\lambda} (\rho(\lambda) - \rho^*(\lambda, P))^2 \quad (2-10)$$

Una vez determinada la función de mérito, se procederá a su minimización, siendo los parámetros buscados aquéllos para los que la diferencia entre espectros sea mínima.

Habitualmente, debido a la complejidad de la minimización de funciones dependientes de N variables, los diferentes autores han seguido diferentes procedimientos, como son el uso de valores tabulados ("Look Up Tables") o de Redes Neuronales (Dawson et al., 1998; Bacour et al., 2001; Combal et al., 2002). Este último procedimiento es ampliamente utilizado en el tratamiento masivo de datos, por ejemplo cuando se pretende extraer información de imágenes de satélite. Sin embargo en nuestro caso se ha seleccionado un método numérico de minimización, por

considerarlo más eficiente que el uso de valores tabulados y no requerir, por otro lado, una etapa de aprendizaje como en el caso de las Redes Neuronales.

Una vez descrito el funcionamiento de los modelos que vamos a utilizar y teniendo en cuenta el análisis de sensibilidad realizado, es evidente que los parámetros que se han identificado como los más influyentes en la variación de los modelos, serán aquellos que más fácilmente y con más precisión podremos obtener de las inversiones. Es por este motivo que en los capítulos sucesivos prestaremos un especial atención a dos parámetros: el LAI y C_{a+b} .

2.5.1 Relación entre la reflectancia medida y modelizada.

Para poder comparar una medida experimental con la calculada mediante el modelo es necesario verificar que ambas se refieren a la misma magnitud. La reflectancia obtenida por el modelo SAILH viene definida por la expresión siguiente:

$$\rho_{SAILH} = \frac{L(\theta_o, \phi_o)\pi}{F_{Glo}} \quad (2-11)$$

donde $L(\theta_o, \phi_o)$ indica la radiancia que sale del cultivo en la dirección de observación, mientras que F_{Glo} es la irradiancia que ilumina la vegetación. Sin embargo las medidas de reflectancia de la cubierta vegetal realizadas en el campo, y a partir de las que pretendemos obtener información de la vegetación, se han realizado según la definición de factor de reflectancia dado en la sección 1.3, es decir, el cociente entre la medida de la muestra y la medida de un panel patrón, (2-12). En este caso L'_m y L'_p representan las radiancias que proceden respectivamente del cultivo y de un panel de referencia de reflectancia conocida, ρ_p , dentro del campo de visión del sensor utilizado, determinado por el ángulo sólido ω_r , cuando ambas superficies son iluminadas de la misma manera.

$$\rho_{\lambda Medida} = R_{\lambda} \rho_{\lambda Patron} = \frac{\int_{\omega_r} L'_m \cos \theta d\omega}{\int_{\omega_r} L'_p \cos \theta d\omega} \rho_{\lambda Patron} \quad (2-12)$$

Dadas las diferencias entre estas dos reflectancias, no es en general acertado considerar su igualdad. Su diferencia vendrá determinada por el campo de visión o FOV (*Field Of View*) del sensor utilizado para realizar la medida experimental, así como por lo similar que sea la superficie medida a una superficie lambertina. En la Figura 2-12 vimos una simulación realizada con SAILH de la reflectancia del cultivo, variando tanto los ángulos cenital y acimutal de observación, considerando el resto de parámetros fijos. Podemos ver en esa figura que las variaciones de la reflectancia en función del ángulo de observación llegan a ser muy importantes, siendo la diferencia relativa entre el valor máximo calculado y el mínimo del 42%. Así pues, es importante no medir con un FOV excesivamente grande.

En la Figura 2-17 podemos ver la diferencia entre la reflectancia simulada sobre la vertical y el valor integrado en el campo de visión, en función del ángulo que determina el campo de visión, para diferentes parámetros de entrada del modelo. Las

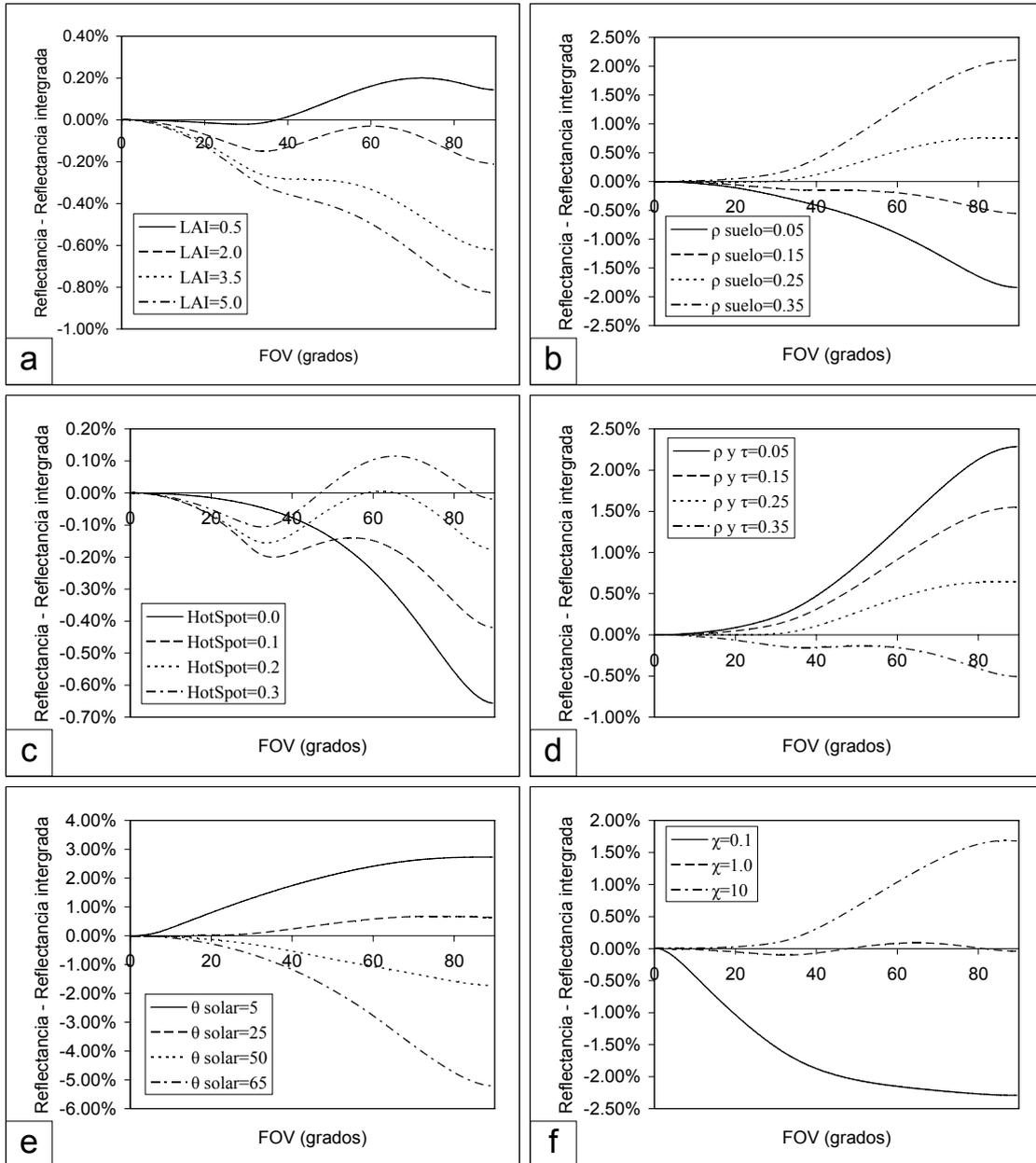


Figura 2-17 Diferencia entre la reflectancia simulada sobre la vertical y el valor integrado en el campo de visión, en función del ángulo del mismo, para diferentes parámetros de entrada del modelo.

diferencias entre estos dos valores se reducen significativamente para ángulos menores de 20°. Este ángulo será el que consideraremos el límite aceptable para el FOV del sensor con el que se realicen las medidas de factor de reflectancia, asumiendo un error del 1%.

2.5.2 Algoritmo Downhill Simplex.

Para llevar a cabo la minimización de la función de mérito, en nuestro trabajo se ha utilizado el método *Downhill Simplex*, diseñado por Nelder y Mead (1965) (Press et al., 1986), ya utilizado por otros autores en el campo de la teledetección (Kuusk, 1991).

A diferencia de otros métodos de minimización de funciones multidimensionales, éste no requiere de la evaluación de la derivada primera de la función de mérito, ni hace uso de métodos de minimización de funciones unidimensionales, requiriendo únicamente una estimación inicial.

Una descripción geométrica del método nos puede dar una clara idea de cómo funciona. Un simplex es una figura geométrica en un espacio de N dimensiones, formada por $N+1$ puntos, junto con los segmentos, polígonos, etc., que los unen. Así en un espacio de dos dimensiones nos estaremos refiriendo a un triángulo y en tres dimensiones a un tetraedro, sin ser necesario que sean regulares. Así mismo, consideraremos únicamente los casos no degenerados, es decir que contienen un volumen N -dimensional no nulo. De esta manera, dado un punto del simplex, los vectores que lo unen con el resto de los puntos forman una base del espacio.

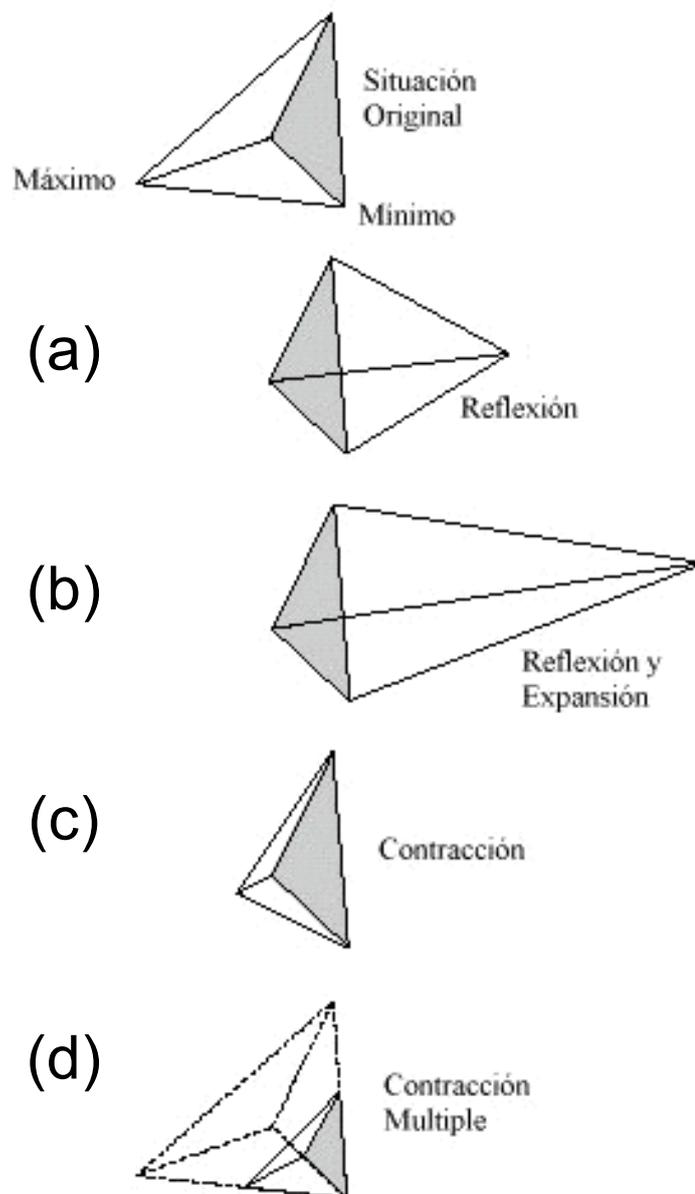


Figura 2-18 Representación de los movimientos realizados por el simplex durante el proceso de minimización (Press et al., 1986).

La estrategia a seguir será, dado un punto inicial, buscar el camino que nos conduzca descendiendo, en una topografía imaginaria de $N+1$ dimensiones, hacia un mínimo de la función. Esta búsqueda la realizaremos partiendo del punto inicial P_0 , y eligiendo otros N puntos de la siguiente manera:

$$P_i = P_0 + \lambda e_i \quad (2-13)$$

donde e_i son N vectores unitarios linealmente independientes y λ es un parámetro al que tendremos que dar un valor inicial.

A continuación se dará una serie de pasos en los que se repetirá la siguiente mecánica: tras la evaluación de la función de mérito para cada punto del simplex, se determinará en cuál de ellos toma su mayor valor. Este punto se desplaza hasta la posición simétrica respecto de la cara opuesta del simplex, como se muestra en la Figura 2-18 (a). Si al evaluar la función se ve que este nuevo punto da un valor inferior a cualquiera de los otros, se lleva a cabo una expansión en esa misma dirección, Figura 2-18 (b). Si en vez de eso, lo que se obtiene es un valor superior al resto, puede deberse a dos situaciones. La primera es que nos encontremos en el fondo de un "valle". En tal caso, al realizar una contracción, Figura 2-18 (c) encontraremos un valor menor. Si por el contrario el valor sigue siendo mayor que el resto, nos encontramos en la segunda situación, es decir, frente a un "ojo de aguja", y se realizará una contracción múltiple del simplex, Figura 2-18 (d). Todo este proceso le confiere al simplex un movimiento casi orgánico, y es por eso por lo que la rutina que lo desarrolla recibe el nombre de "amoeba", del inglés ameba.

El proceso terminará cuando la razón entre la diferencia de los valores extremos de la función de mérito evaluada entre los puntos del simplex y la distancia entre los puntos que corresponden a esos valores extremos, alcance una tolerancia aceptable, $Ftol$.

Hay que tener en cuenta que a partir de este procedimiento no vamos a obtener un mínimo global de la función de mérito, sino que el resultado será un mínimo local que dependerá de la estimación inicial que tomemos. Por lo tanto, y dado que estamos interesados en encontrar el espectro más parecido al medido dentro de los que podemos generar mediante los modelos, repetiremos el procedimiento en busca de el mínimo absoluto.

2.5.3 “Ill-Posed Problem”

De acuerdo con la definición de Hadamard (1902), el problema de una inversión está bien propuesto si y sólo si existe una solución y sólo una; y además ésta depende de forma continua de los datos de entrada. Sin embargo la inversión de modelos de transferencia radiativa en cubiertas vegetales no verifica en general la primera de las condiciones. Es ya sabido que la reflectancia de la cubierta vegetal puede ser muy similar partiendo de vegetación con propiedades diferentes (Combal et al., 2002). Decimos pues que es un problema mal propuesto (*Ill-Posed Problem*). Un ejemplo de esto son los espectros generados mediante los parámetros dados en la Tabla 2-6, y que podemos ver en la Figura 2-19. Si intentamos invertir estos dos espectros es muy posible que nos den resultados similares en ambos casos, a pesar de haber utilizado parámetros diferentes para generarlos.

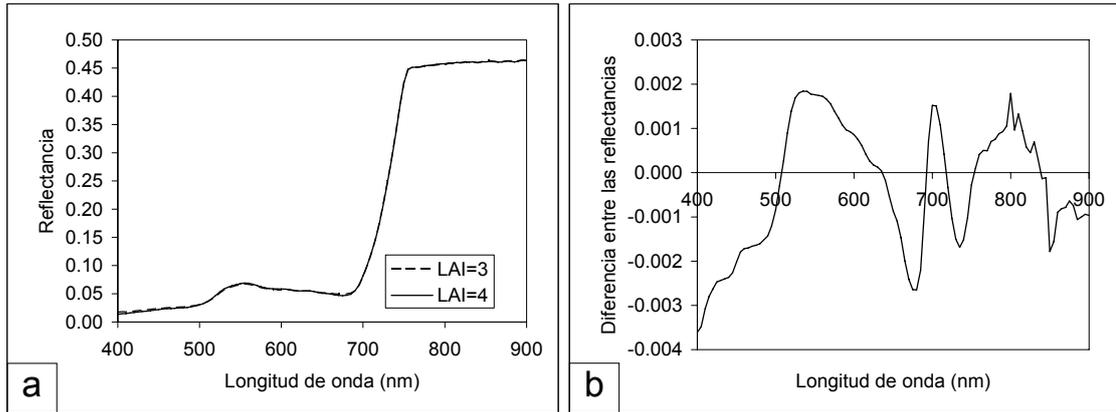


Figura 2-19 Espectros simulados mediante PROSPECT y SAILH (a), y su diferencia (b).

Tabla 2-6 Conjunto de parámetros que generan espectros muy similares mediante PROSPECT y SAILH

N	C_{a+b}	C_w	C_m	LAI	χ	$HotSpot$
1.5	40	0.02	1.00E-03	3	0.5	0.05
2	28	0.02	4.00E-08	4	0.3	0.05

A este hecho hay que añadir que el error propio de los aparatos de medida introduce cierto grado de incertidumbre en los espectros de reflectancia que podemos utilizar como entrada en el proceso de inversión, y por lo tanto es necesario disponer de procedimientos de inversión suficientemente robustos como para poder hacer frente a esto.

Con lo visto hasta ahora es evidente que la metodología que hasta ahora se ha propuesto no puede resolver este problema. Para resolver esta cuestión se plantean diferentes posibles soluciones. Una de estas propuestas es el incremento de la dimensión de los datos introducidos en la inversión (Atzberger, 2005), es decir el análisis de series de datos de reflectancia, aprovechando la consistencia espacial y temporal (Atzberger, 2004; Lauvernet et al., 2005; Atzberger, 2005; Houborg et al., 2007).

En concreto, la intención de este trabajo es verificar si el empleo de una inversión múltiple de datos puede ayudar a mejorar la obtención de propiedades de la vegetación a partir de datos espectrales.

Para sacar partido a esto es necesario utilizar información a priori del sistema, es decir, aprovechar el conocimiento que tenemos sobre la vegetación que estudiamos. Tradicionalmente esto se ha introducido en la inversión mediante una función de mérito del tipo:

$$\Delta^2 = \sum_{\lambda} (\rho(\lambda) - \rho^*(\lambda))^2 + \sum_i (c_i (P - P^*))^2 \quad (2-14)$$

donde, aparte de considerar la diferencia entre la reflectancia medida empíricamente, ρ , y la simulada mediante modelos, ρ^* , se tiene en cuenta también la diferencia entre el valor de una cierta propiedad de la vegetación para la cual conocemos un valor aproximado, P , y el valor de esa misma propiedad utilizada por el modelo para el cálculo de la reflectancia, P^* . Esta diferencia viene ponderada en la función de mérito

por un cierto valor c_i . Esta metodología nos obliga a tener una estimación suficientemente realista de alguno de los parámetros, lo cual en múltiples ocasiones no puede ser.

A lo largo de los análisis realizados en este trabajo se propone el uso de la información a priori de una manera diferente. En vez de considerar un valor concreto para una cierta propiedad de la vegetación, únicamente aportaremos nuestro conocimiento sobre cómo se comporta dicha propiedad. Este planteamiento es mucho más genérico y en general seremos capaces de aplicarlo en un mayor número de ocasiones. Para llevar esto a la práctica se propone el uso de relaciones entre los parámetros más influyentes sobre la salida del modelo, con el tiempo y con un índice de vegetación calculado a partir de imágenes de satélite, por ejemplo el *NDVI*, a fin de aprovechar la consistencia espacial y temporal de los datos. Estas relaciones se materializarán en funciones paramétricas entre el *LAI* y el tiempo (2-15) y el *LAI* y el *NDVI* (2-16), de tal manera que en el proceso de minimización de la función de mérito, descrito en el apartado 2.5, ya no haremos variar los parámetros utilizados directamente por el modelo, sino los parámetros de las funciones que los definen.

$$LAI = f_1(t) \tag{2-15}$$

$$LAI = f_2(NDVI) \tag{2-16}$$

De este modo, en vez de utilizar una función de mérito del tipo (2-10), usaremos la variación dada en (2-17), donde el índice i se extiende a cada una de las medidas pertenecientes a la serie que se quiera analizar y P da cuenta de los parámetros utilizados por las funciones tipo (2-15) y (2-16).

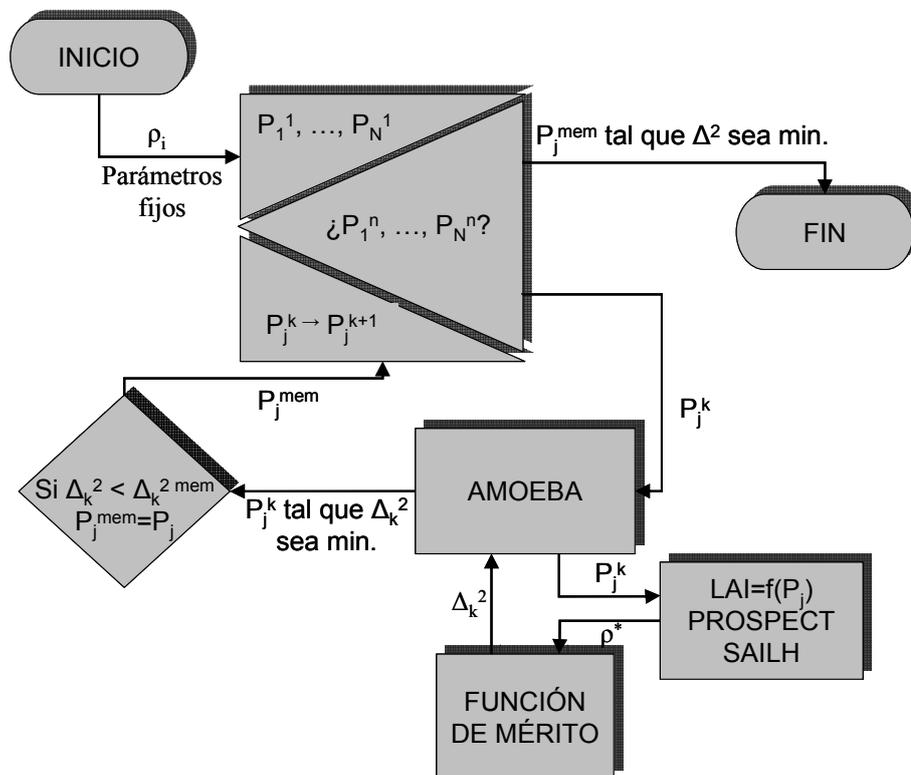


Figura 2-20 Diagrama de flujo utilizado para la inversión de los modelos.

$$\Delta^2 = \sum_i \sum_\lambda (\rho_i(\lambda) - \rho_i^*(\lambda, P))^2 \quad (2-17)$$

En la Figura 2-20 se da un diagrama de flujo con el procedimiento utilizado en la inversión. En el inicio del programa se introduce el conjunto de reflectancias medidas sobre la vegetación, ρ_i , junto con los parámetros fijos que usaremos en los modelos PROSPECT, SAILH así como en la inversión mediante la rutina AMOEBA (θ_s , θ_o , $DSKL$, N , C_m , C_w , $Ftol$, etc.). Entraremos en un bucle de repeticiones del proceso de inversión, a fin de evitar los posibles mínimos locales, en el que en cada una de las iteraciones modificaremos las estimaciones iniciales de los N parámetros P_j . A cada uno de los parámetros que dejaremos variar en la inversión, se le asigna estimaciones iniciales. Para cada conjunto de valores iniciales de los parámetros, se ejecuta la rutina AMOEBA, la cual irá evaluando una función de mérito, calculada a partir de las reflectancias modelizadas con PROSPECT y SAILH. Sin embargo, y a diferencia de lo que normalmente se realiza en otros trabajos, no serán los parámetros LAI , C_{a+b} , BSL , etc., los que AMOEBA va a modificar, sino los parámetros P_j^k a partir de los cuales vamos a definir LAI , C_{a+b} , BSL , etc. De entre todos los valores de parámetros P_j^k obtenidos en cada iteración, se seleccionaran aquellos que hagan mínimo Δ^2 .

Capítulo 3. Medidas de la campaña 2002

El objetivo de la campaña realizada en el año 2002 ha sido comprobar si es posible obtener una estimación del índice de área foliar (*LAI*) y del contenido de clorofila de las hojas a partir de medidas de reflectancia de una cubierta vegetal homogénea, en concreto de cebada, a través de la inversión de los modelos PROSPECT y SAILH, estudiando la evolución temporal de la reflectancia del cultivo, tanto durante un día, como a lo largo de la vida del cultivo. Por lo tanto, para esta campaña, se han realizado medidas sobre una única parcela de cebada de invierno, a lo largo del ciclo de crecimiento del cultivo.

En concreto, las medidas que presentamos en este capítulo se han realizado sobre una parcela de cebada de ciclo largo (*Hordeum vulgare*), situada en las proximidades del municipio de Medina de Rioseco (Valladolid), con coordenadas 41° 53' 47" N, 5° 13' 4" O. Este municipio se encuentra en la comarca de Tierra de Campos, caracterizada la rigurosidad de su clima, con temperaturas que alcanzan los -10°C en invierno y superan los 35°C en verano, y precipitaciones anuales inferiores a los 250 mm (INM, 2005). Debido a estas características, los cultivos predominantes en la zona son la cebada y el trigo, los cuales llegan a ocupar el 62% y el 8%, respectivamente, de la superficie agrícola total de la provincia de Valladolid (MAPA, 2005).

Las principales medidas de campo realizadas han sido las de reflectancia del cultivo, por ser éstas las que vamos a utilizar para alimentar la inversión de los modelos de transferencia radiativa PROSPECT-SAILH. De cara a tener una estimación de los parámetros utilizados por el modelo, se han realizado también medidas de reflectancia del suelo, irradiancia directa e irradiancia global. Finalmente, para poder verificar las salidas de la inversión de los modelos, se han realizado también medidas del *LAI*.

Así mismo se han efectuado en laboratorio medidas de reflectancia y transmitancia foliar, así como de contenido de clorofila en las hojas de cebada para estudiar la capacidad de la inversión del modelo PROSPECT, y más concretamente su capacidad de proporcionar una estimación correcta sobre este parámetro.

3.1 Medidas espectrales.

El instrumento utilizado para realizar las medidas espectrales es el espectrorradiómetro de barrido LI-1800 de la casa Li-Cor, con el receptor 1800-11, que cubre el intervalo espectral comprendido entre 300 y 1100 nm en un tiempo aproximado de unos 40 segundos. Una descripción detallada del equipo la podemos ver en trabajos anteriores del Grupo de Óptica Atmosférica (Duran, 1997; Vergaz, 2001). Este equipo, con unas dimensiones de $16.3 \times 20.1 \times 36.0$ cm y un peso de 6.4 kg, está diseñado para facilitar su portabilidad haciendo posible su utilización en campo. Una batería interna de 6V de Ni-Cd permite una autonomía para realizar unas 60 medidas, tomando datos en el intervalo espectral completo y muestreando cada 1 nm, lo que nos lleva a una duración de unas 8 horas haciendo una medida cada 15 minutos. En nuestro caso se pretende hacer un número mayor de medidas en el menor tiempo posible, por lo que esta configuración resulta claramente insuficiente. Por lo tanto se ha optado por reducir el intervalo espectral en el que se realizan las medidas, quedándonos con la zona en la que el sistema es más sensible, y que nos permite verificar las hipótesis con las que estamos trabajando. Las medidas por lo tanto se han realizado en el intervalo espectral comprendido entre 400 y 800 nm, muestreando cada 5 nm. De esta manera, al mismo tiempo que aumentamos la duración de la batería, nos permite reducir el tiempo total empleado para realizar las medidas.

Este equipo se ha utilizado tanto en medidas relativas (factor de reflectancia) como en medidas absolutas (irradiancia directa y global). Por lo tanto es preciso contar una calibración absoluta de este equipo. Esto se viene realizando de forma periódica en las instalaciones del CIEMAT (Madrid), utilizando para ello un equipo específico diseñado por la propia empresa Li-Cor; a saber, el sistema 1800-02. Este calibrador está formado por una lámpara halógena de cuarzo, cuya potencia viene regulada por una fuente de corriente estabilizada, que ilumina a través de unos diafragmas el detector del instrumento con una irradiancia conocida. De las diferencias relativas entre los últimos ficheros de calibración, podemos observar que los errores se mantienen entre el 2% y el 3% entre calibraciones sucesivas, para el intervalo que vamos a utilizar en nuestras medidas, es decir de 400 a 800 nm.

Dado que las las medidas realizadas para este trabajo no se han realizado en laboratorio, sino en el exterior, es importante conocer la dependencia del sensor con la temperatura. Si bien para longitudes de onda cercanas a 1100 nm esta dependencia se encuentra entorno al $2\% / ^\circ\text{C}$, en el intervalo que hemos seleccionado, de 400 a 800 nm, ésta es de solo $0.05\% / ^\circ\text{C}$ (Li-Cor, 1992), lo que nos permite despreciar los errores debidos a esta causa.

El receptor 1800-11 consistente en un mazo de fibras ópticas, en cuyo extremo se encuentra situado un receptor formado por un pequeño domo de teflón de 7 mm de diámetro. Este receptor se comporta como un receptor coseno, es decir, cumple con la ley de Lambert, y por lo tanto, la respuesta a una iluminación constante, uniforme, colimada y que cubra completamente la superficie del receptor ha de variar conforme al coseno del ángulo de incidencia.

Para verificar este comportamiento coseno del sensor se han llevado a cabo una serie de medidas utilizando el montaje experimental mostrado en la Figura 3-1 (a), el cual está formado por un goniómetro, una fuente de iluminación y un sistema para monitorizar la iluminación. Todo el sistema se ha alineado mediante un sistema

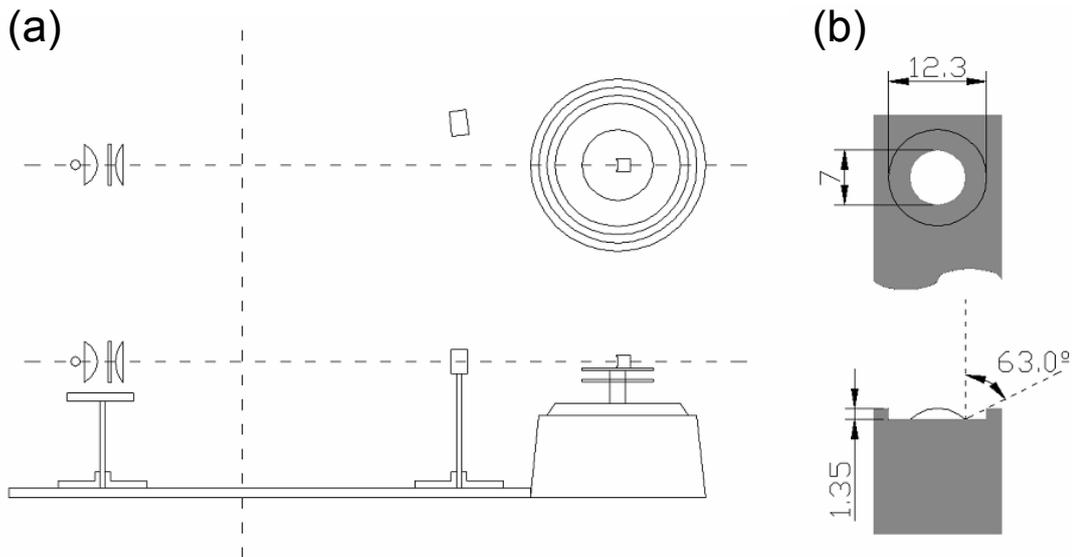


Figura 3-1 Esquema del montaje de medida del comportamiento coseno del receptor (a). Detalle del receptor coseno 1800-11 (b).

telescopio dotado de una retícula. Situar la retícula sobre el centro del sensor nos permite comprobar el movimiento del mismo al girar la plataforma del goniómetro. El eje de giro queda determinando cuando el centro del sensor y la retícula coinciden durante todo el giro. A continuación se ha situado la fuente de iluminación en el mismo eje, para lo cual también se ha utilizando la retícula del telescopio.

Como fuente de iluminación se utilizó una lámpara halógena de 150 W. Se situó el sensor suficientemente lejos, aproximadamente a 2 m, como para considerar que la iluminación es uniforme en la posición del detector. Ésta ha sido monitorizada durante la duración de las medidas mediante una fotocélula de silicio. La iluminación media medida en la posición de la fotocélula es de $15.65 \mu\text{W}/\text{m}^2$ y la desviación estándar $0.16 \mu\text{W}/\text{m}^2$, por lo que podemos dar un error del $\pm 1.0\%$ debido a la falta de estabilidad en la fuente.

Cada 5° se han realizado dos medidas, una iluminando directamente el sensor y otra interponiendo una pantalla entre la fuente de iluminación y el detector a fin de medir la luz que, reflejada por las paredes del laboratorio, pudiera llegar al detector y así eliminarla de la medida principal. Este proceso se ha repetido a lo largo de un rango de 180° . Si bien conocemos de forma relativa el ángulo de giro, no conocemos con suficiente exactitud la posición en la cual el sensor se sitúa normal al eje del sistema, posición que se ha de considerar como origen. Para determinar esta posición se han ajustado las medidas a un polinomio de segundo grado con el que se ha determinado el eje de simetría de las mismas y a partir del cual se ha asignado un ángulo absoluto a cada medida realizada. Así mismo, para normalizar las medidas integradas, se han ajustado las 7 medidas centrales a un polinomio de segundo grado del que se ha obtenido el máximo, valor por el que se han dividido todas las medidas.

Podemos ver en la Figura 3-2 (a) cómo la respuesta del detector se ajusta a la respuesta ideal del receptor coseno, desviándose menos de un 1% para ángulos menores de 30° y alrededor del 3% hasta 70° . Se puede observar en la Figura 3-2 (b) cómo el reborde que el receptor presenta en torno al domo de teflón, Figura 3-1 (b), es utilizado

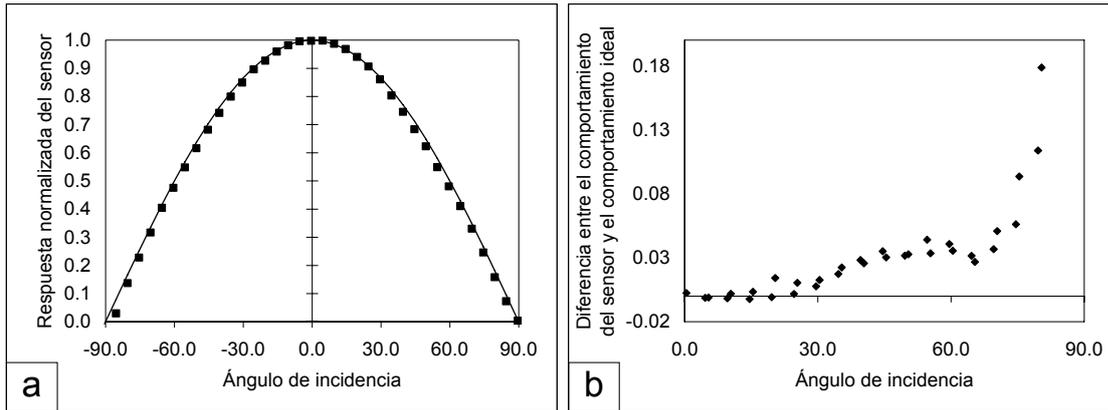


Figura 3-2 Respuesta normalizada del sensor a diferentes ángulos de incidencia, junto a la respuesta ideal (a). Diferencia entre las respuestas normalizadas experimental e ideal (b).

para mejorar la respuesta como receptor coseno en ángulos muy grandes. De hecho podemos apreciar en la Figura 3-2 (b) un ligero cambio en la tendencia de la respuesta entre 60° y 70°, coincidiendo con la aparición de la sombra del reborde sobre el domo de teflón.

3.2 Medidas de la reflectancia del cultivo.

Experiencias anteriores en medida de reflectancia de vegetación nos han mostrado que, en cultivos de este tipo, realizar medidas a mano tiende a ser complicado y la vegetación suele sufrir daños debido a la presencia de la persona que opera el equipo, sobre todo a partir de la etapa de encañado del cereal. En nuestro caso esto es especialmente importante dado que pretendemos medir a lo largo de varios meses sobre el mismo punto. Por otro lado el uso de trípodes para montar el dispositivo podría también resultar difícil e incluso la medida podría verse afectada por la cercanía del sensor a la cubierta vegetal, ya que este tipo de cultivos pueden alcanzar alturas superiores a los 1.2 m. Debido a esto se ha optado por instalar una plataforma a 3 m de altura sobre un andamio situado en la parcela de cebada y, desde ahí, realizar medidas sobre un mismo punto observando la evolución de la reflectancia del cultivo a lo largo de su ciclo de crecimiento. Una fotografía del dispositivo instalado se puede ver en la Figura 3-4.

El protocolo de medidas establecido incluye series de medida de irradiancia solar directa, irradiancia global y factor de reflectancia (panel y suelo). En los puntos siguientes se detalla la manera en la que se ha realizado cada una de estas medidas. El tiempo empleado en completar la serie es de aproximadamente 4 minutos, tiempo suficiente como para que las condiciones atmosféricas, y por lo tanto de iluminación, puedan cambiar. Para poder tener esto en cuenta se ha optado por hacer la serie por duplicado, invirtiendo el orden la segunda vez. De esta manera podemos descartar medidas en las que se detectan variaciones de más del 3% entre la primera y la segunda repetición. Si bien esto nos garantiza unas medidas correctas tanto del factor de reflectancia como de las condiciones de iluminación, impiden también que las medidas puedan realizarse con cielos parcialmente cubiertos, necesitándose por lo tanto días despejados en los que la estabilidad atmosférica nos garantice poder hacer series suficientemente largas. Este hecho sumado a que la época de medida es

fundamentalmente la primavera, época del año en el que la inestabilidad atmosférica es más acusada, da como resultado que los días hábiles de medida se reduzcan drásticamente. Por lo tanto, la serie total consta de 10 días de medidas entre febrero y junio.

En total se cuenta con 72 medidas de reflectancia del cultivo, de las cuales se han descartado 12 por no cumplir con el mínimo de estabilidad del 3%. En concreto para el día 15 de mayo se han tenido que descartar las dos medidas realizadas, debido a las malas condiciones atmosféricas. También se han descartado los días de febrero, ya que es en esas fechas cuando se produjo el brote de las plantas, no observándose prácticamente más que suelo desnudo.

Tabla 3-1 Medidas de factor de reflectancia realizadas en la campaña del año 2002.

Fecha	Hora de comienzo	Hora de finalización	Número de medidas realizadas
20/02/2002	16:37	16:37	1
25/02/2002	13:17	16:40	4
08/03/2002	15:16	16:32	6
21/03/2002	11:10	16:21	16
16/04/2002	8:39	15:06	13
24/04/2002	8:38	16:45	19
15/05/2002	11:11	11:17	2
20/05/2002	9:14	10:45	6
13/06/2002	14:06	16:17	3
28/06/2002	15:46	15:50	2

En la Figura 3-3 (a) podemos ver la reflectancia del cultivo medida para cada día de la campaña. La evolución va desde suelo prácticamente desnudo, hasta que la planta está totalmente seca, pocos días antes de la siega. Se aprecia claramente los máximos de absorción en la zona del azul, en torno a los 450 nm, y del rojo, sobre 670 nm, coincidiendo con los máximos de absorción de la clorofila. Por otro lado se muestra en la Figura 3-3 (b) la evolución del factor de reflectancia a lo largo del día 24 de abril, día en el que se dispone de la serie más larga de medidas. Se aprecia claramente cómo hay una cierta evolución a lo largo del día, obteniéndose en torno a las 13h UTM el valor máximo para 500 nm y el mínimo para 800 nm, lo que da cuenta de la anisotropía de la reflectancia de la vegetación.

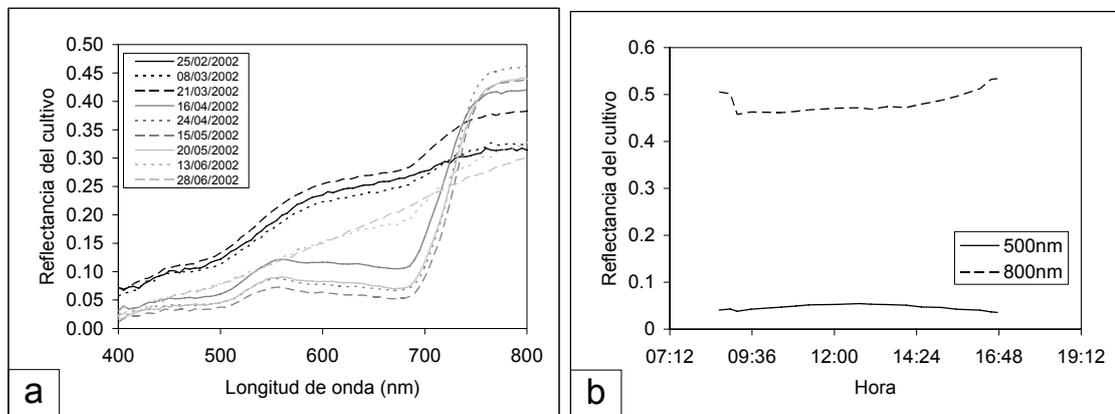


Figura 3-3 Evolución de la reflectancia del cultivo a lo largo del ciclo de crecimiento (a) y a lo largo del día para las longitudes de onda de 500 y 800 nm (b).



Figura 3-4 Plataforma para la medida del factor de reflectancia.

3.2.1 Dispositivo experimental de medida del factor de reflectancia.

Como ya se ha mencionado, la entrada de luz al espectrorradiómetro se realiza mediante el receptor remoto 1800-11, el cual presenta una buena respuesta coseno. Esta configuración es ideal para recoger luz de todas las direcciones comprendidas en el hemisferio superior delimitado por el plano del sensor, por ejemplo en el caso de la medida de irradiancia global. Sin embargo, para que la reflectancia del cultivo, obtenida a través del factor de reflectancia, pueda ser comparada con la reflectancia direccional generada por el modelo SAILH, debemos reducir el campo de visión del sensor tal como se ha visto en 2.5.1, para lo cual se ha optado por utilizar un tubo limitador de campo. Se realizaron varias pruebas con diferentes campos, desde 44.2° hasta 17.3° . Esta reducción de campo supone también una reducción de luz, la cual llega a disminuir hasta un 20%, provocando por lo tanto un aumento en el ruido final de la medida. Debido a la escasa sensibilidad del sensor y a fin de mantener un campo de visión suficientemente reducido como para poder comparar nuestra medida con la salida del modelo SAILH manteniendo el nivel de ruido en un margen aceptable, se ha limitado el campo de visión (FOV) a 23.4° mediante un tubo limitador, diseñado tal como se muestra en la Figura 3-5 (a).

En la Figura 3-5 (b) podemos ver la gráfica de iluminación en función del ángulo correspondiente al tubo utilizado para medir el factor de reflectancia. Como podemos ver, si bien el semicampo de visión toma un valor de 11.7° , el semicampo de iluminación límite es de 12.3° . Este último valor es el que debemos tener en cuenta a la hora de situar el panel de referencia que utilizaremos como patrón, evitando así que pueda llegar luz al detector procedente de puntos situados más allá del panel de referencia. El tubo limitador se ha situado al sur de la plataforma mediante un sistema

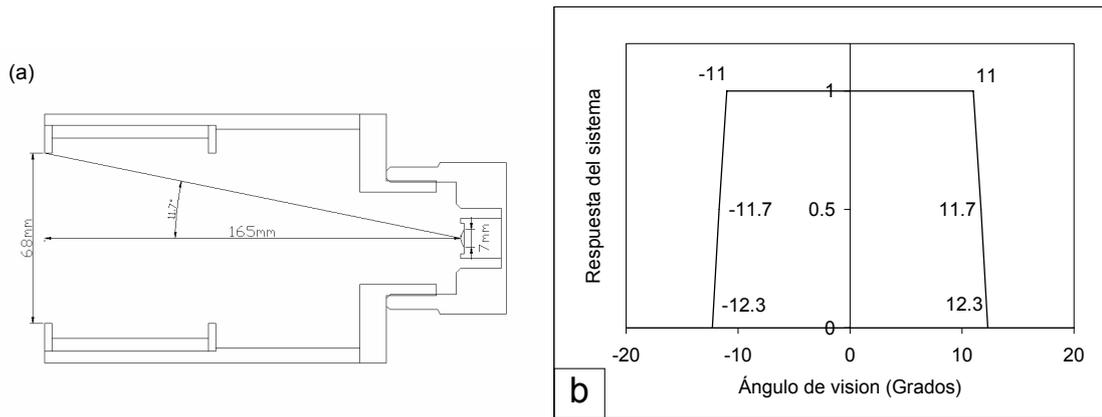


Figura 3-5 Esquema del tubo limitador para la medida del factor de reflectancia (a). Gráfica de iluminación del tubo utilizado para medir el factor de reflectancia (b).

que nos permite nivelarlo, a una altura de 3 m aproximadamente, distanciándolo unos 80 cm del andamio mediante un perfil metálico de manera que ninguna parte de la plataforma interfiera con la superficie vista por el sensor, la cual corresponde con un círculo situado en el suelo, de 65 cm de radio.

Para realizar la medida del factor de reflectancia se emplea un panel de referencia que idealmente se ha de comportar como una superficie lambertiana, es decir,

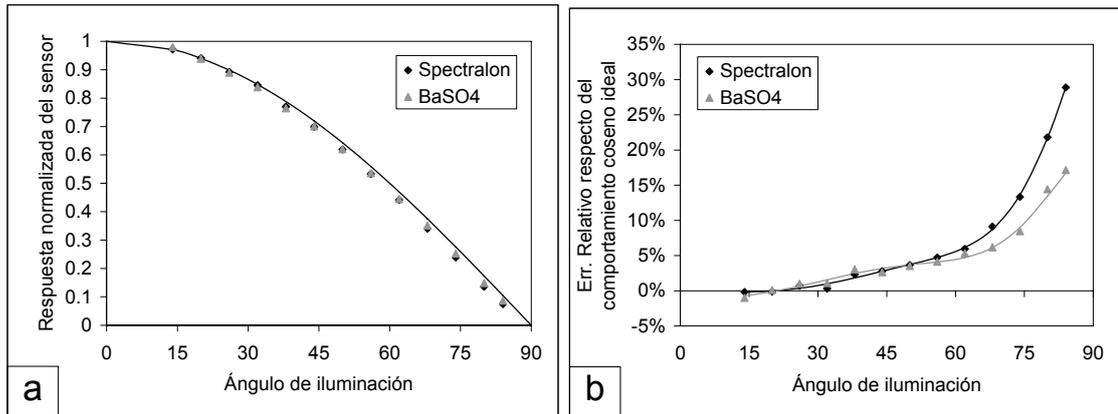


Figura 3-6 Respuesta coseno de los dos paneles a 613 nm (máximo de señal) (a). Error relativo respecto del comportamiento coseno ideal (b).

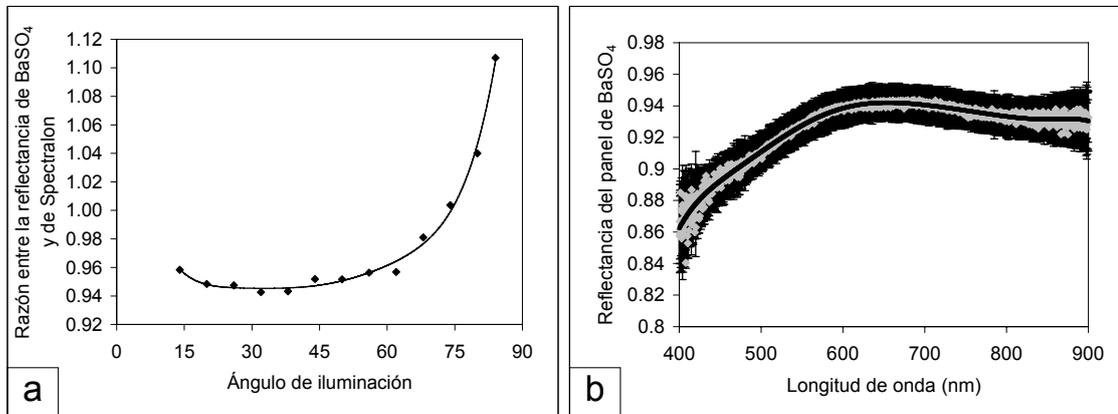


Figura 3-7 Cociente entre la medida sobre el panel de BaSO₄ y el panel de Spectralon a 613 nm (a). Reflectancia del panel de BaSO₄ (b).

que la radiancia reflejada por esta superficie es independiente del ángulo de observación, cumpliéndose la relación (1-22) entre la radiancia reflejada y la irradiancia con la que es iluminada la superficie. En nuestro caso el panel que hemos utilizado como referencia ha sido realizado sobre una base de madera de 60×60 cm a la que se ha aplicado una disolución en agua destilada de sulfato de bario (BaSO_4), sustancia típicamente utilizada para la construcción de superficies lambertianas (Deering, 1989), hasta cubrir por completo dicha superficie. Para realizar la medida de factor de reflectancia, el panel se ha situado bajo el sensor a una distancia de 90 cm, como se puede apreciar en Figura 3-4, siendo la superficie total del panel que ve el sensor un círculo de 19.6 cm de radio.

El comportamiento de la reflectancia de nuestro panel ha sido estudiado aprovechando las instalaciones de la Estación de Sondeos Atmosféricos de El Arenosillo (INTA), en Huelva. Para este estudio se ha hecho uso de un panel de Spectralon y un dispositivo que nos permite variar el ángulo de iluminación, mientras que el ángulo de observación permanece constante. La fuente utilizada ha sido una lámpara de 1000W estabilizada y calibrada según un patrón NIST. Podemos ver en la Figura 3-6 que la dependencia de la reflectancia con el ángulo de iluminación es similar en ambos paneles, al menos hasta un ángulo de iluminación de 60° . A partir de este ángulo la respuesta del panel de Spectralon cae ligeramente más rápido que en el caso del panel de sulfato de bario. La discrepancia con un difusor perfecto iluminando entre 40° a 60° está entre el 3 y el 5%.

Dado que hasta 60° la respuesta de ambos paneles es muy similar (Figura 3-7 (a)) y que en el trabajo en el campo raramente se ha medido en situaciones en las que el ángulo solar cenital supere esta cantidad, la reflectancia del panel de sulfato de bario (Figura 3-7 (b)) se ha determinado a partir del promedio del cociente entre las medidas sobre el panel de sulfato de bario y el panel de Spectralon, iluminados con una inclinación entre 20 y 56° , junto con la reflectancia de este último. El error en el cálculo de esta reflectancia es de aproximadamente 1%, teniendo en cuenta la desviación estándar del promedio de los cocientes entre las medidas del panel de sulfato de bario y el de Spectralon y el error de la reflectancia del panel de Spectralon, 0.5%, dado por el fabricante.

3.3 Medidas atmosféricas: Irradiancia Global e Irradiancia directa.

El modelo SAILH, como se vio en la sección 2.3, divide el problema de la transferencia radiativa en dos, considerando por una parte que la iluminación de la cubierta vegetal procede únicamente de una dirección y, por otro lado, que la cubierta está iluminada de modo anisótropo. De esta manera se pretende simular tanto la iluminación procedente del sol como la iluminación procedente de cualquier otra parte del cielo. Al final del proceso ambas soluciones se promedian utilizando para ello unos pesos específicos adecuados, que vendrán dados por la irradiancia solar directa horizontal y la irradiancia difusa.

La irradiancia solar directa se define como el flujo por unidad de superficie proveniente del sol que llega a un plano perpendicular a la dirección de propagación de la luz. Para realizar esta medida se ha utilizado el espectrorradiómetro de barrido LI-

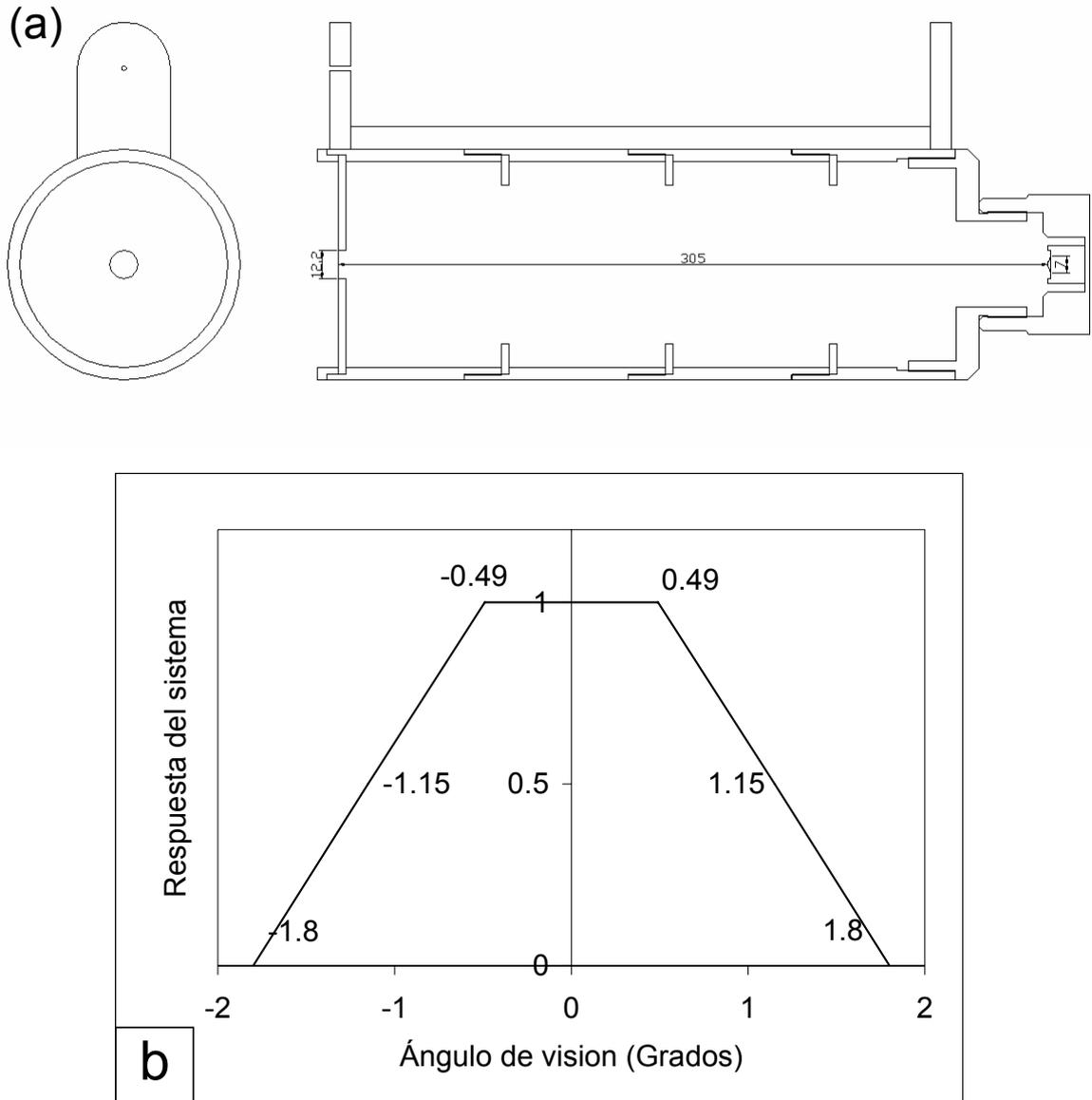


Figura 3-8 Esquema del tubo limitador para la medida de irradiancia solar directa (a). Grafica de iluminación del tubo utilizado para medir la irradiancia solar directa (b).

1800, el mismo utilizado para la medida del factor de reflectancia. Esta medida requiere eliminar la radiación que por scattering en la atmósfera nos llega en direcciones diferentes a la de la radiación solar directa. Para delimitar el campo de visión del receptor coseno se ha diseñado un tubo limitador de campo, según el esquema mostrado en la Figura 3-8 (a). Una descripción más detallada de su construcción se puede encontrar en trabajos anteriores del Grupo de Óptica Atmosférica (Durán, 1997). Si bien la medida se hace de forma manual, durante el tiempo que ésta dura el tubo permanece fijado a un trípode con el fin de evitar vibraciones y el consiguiente viñeteo. La parte posterior del tubo se ha roscado para permitir esta fijación. En la parte superior del tubo se sitúa una mirilla paralela al eje del tubo limitador que permite fácilmente apuntar al sol con errores no superiores a 0.2° .

El tubo limitador se ha diseñado con unas medidas que, junto al tamaño del sensor, nos permiten tener un campo de visión plena de 0.98° . Este campo es

suficientemente grande como para incluir por completo el disco solar, de aproximadamente 0.5° , sin que pequeñas vibraciones durante la medida puedan viñetear el sol y falsear la medida. En la Figura 3-8 (b) podemos ver la gráfica de la respuesta del sistema en función del ángulo. Como se puede ver en esta gráfica, la diferencia entre el campo de iluminación plena y el campo de iluminación límite es bastante notable, de 1.3° . Si bien esta situación no es muy deseable, se produce porque esta diferencia de la tangente de los ángulos viene únicamente determinada por la longitud del tubo y el tamaño del sensor, y dado que el tamaño del sensor es fijo, en el diseño del tubo limitador se ha tenido que llegar a un acuerdo entre la manejabilidad del sistema y el tener que reducir esta diferencia.

Dado que estamos interesados en la radiación directa que llega a la horizontal, tendremos que multiplicar la radiación directa medida, por el coseno del ángulo cenital

(a)

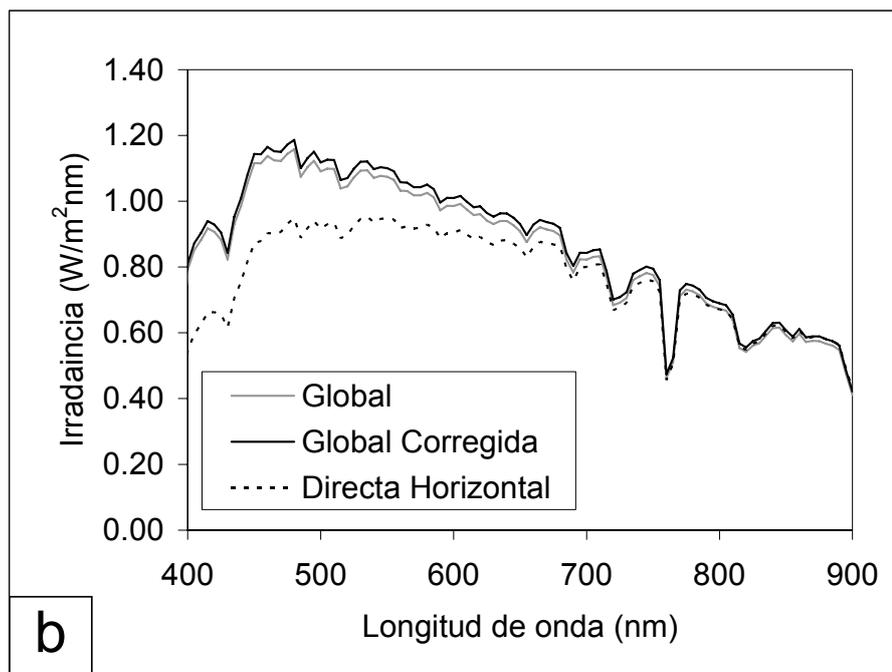
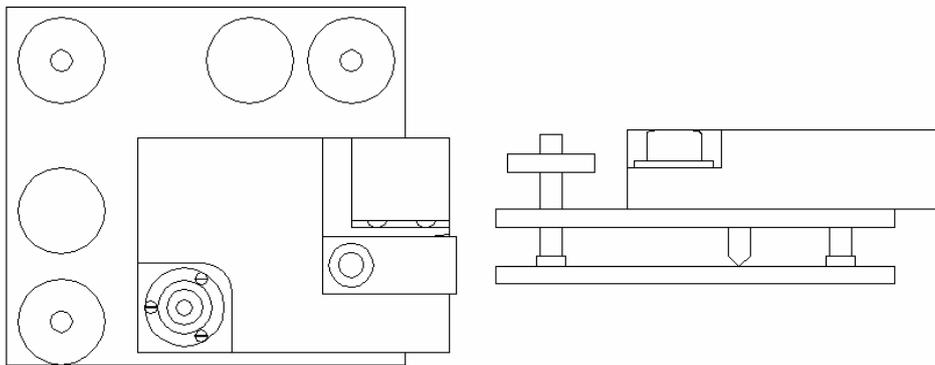


Figura 3-9 Esquema del sistema de fijación del sensor, utilizado para realizar la medida de irradiancia global (a). Efecto de la corrección de la global para una medida del 20-05-2002 (b).

solar. Este ángulo se ha calculado mediante las ecuaciones dadas por Iqbal (1983).

La radiación difusa se puede calcular como la diferencia entre la radiación global y la radiación directa que llega a una superficie horizontal. Dado que éste es el método por el que hemos optado, necesitamos realizar medidas de irradiancia global. La irradiancia global se define como el flujo total por unidad de superficie, medido en un plano horizontal. Para su medida se ha utilizado de nuevo el espectrorradiómetro de barrido LI-1800, aprovechando las propiedades como receptor coseno de sensor remoto 1800-11. Para garantizar la horizontalidad, durante esta medida se ha construido una plataforma nivelable, tal como se muestra en el esquema de la Figura 3-9, sobre la que poder introducir el receptor coseno de forma sencilla gracias a que éste va fijado mediante un sistema de muelles. Esta plataforma se situó en la parte superior del andamio de forma que el sensor estuviera por encima de cualquier otro objeto.

Como podemos observar en la gráfica mostrada en la Figura 3-9 (b), en el infrarrojo cercano la práctica totalidad de radiación global medida procede directamente del sol, es decir, no hay prácticamente radiación difundida en otras direcciones. Este hecho será tanto más cierto cuanto menor sea la turbiedad de la atmósfera, ya que las partículas pequeñas, como las moléculas de los gases atmosféricos, difunden la luz principalmente en longitudes de onda más cortas. Por consiguiente, en esta zona la magnitud de la radiación difusa puede estar en el orden del error de nuestro instrumento y, de tal manera, es fácil obtener valores negativos de ésta, lo que lleva a errores en la aplicación del modelo SAILH. Por ejemplo el pequeño error sistemático cometido al considerar el sensor utilizado como un receptor coseno ideal, provoca que la irradiancia global sea en ocasiones ligeramente inferior al valor de la irradiancia directa horizontal. Para tener en cuenta este efecto podemos utilizar los valores obtenidos al estudiar la discrepancia del receptor 1800-11 con un receptor ideal, estudiada en la sección 3.1. A partir de estos valores se ha realizado un ajuste por mínimos cuadrados de un polinomio, $K(\theta)$. Para realizar una corrección exacta de la irradiancia global debiéramos partir de la distribución angular de radiancias y corregirlas mediante $K(\theta)$. Como obviamente esto se escapa de nuestras intenciones, vamos a realizar una corrección aproximada en la que sólo se tendrá en cuenta $K(\theta)$ para el ángulo cenital solar, dado que la componente principal de la global es obviamente la irradiancia directa. El valor de $K(\theta)$ toma un valor aproximado de un 0.97 para los ángulos cenitales solares en los que habitualmente se ha medido. De esta manera el cociente entre radiación difusa y radiación directa se ha calculado según la ecuación (3-1), evitando así en la mayoría de los casos los valores negativos en el cálculo del cociente. No obstante, dado que aún con esta corrección, en ocasiones se han obtenido valores negativos en este cociente, se ha optado por filtrarlo, sustituyendo los valores negativos por ceros.

$$\frac{I_{Dif}}{I_{DirH}} = \frac{\frac{I_{Glo}}{K(\theta)} - I_{Dir} \cos(\theta)}{I_{Dir} \cos(\theta)} \quad (3-1)$$

3.4 Irradiancia global y medida sobre el panel de referencia.

Dado que estamos considerando nuestro panel de sulfato de bario como una superficie lambertiana, ha de cumplir con la relación (1-22), y por lo tanto la medida de irradiancia global y la medida que realizamos sobre el panel han de ser equivalentes

(Snell, 1989). Sin embargo la medida que realizamos sobre el panel no es directamente radiancia ya que estamos integrando sobre un ángulo sólido Ω , descrito por la geometría del tubo limitador de campo, y, más concretamente, por el ángulo $\alpha = 11.7^\circ$, por lo tanto la medida sobre el panel vendrá dada por la expresión (3-2).

$$\int_{\Omega} L_r \cos \theta_r d\omega = \int_{\Omega} \rho(\lambda) \frac{F_i}{\pi} \cos \theta_r d\omega = \rho(\lambda) \frac{F_i}{\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^{\alpha} \sin \theta_r \cos \theta_r d\theta_r d\phi_r =$$

$$= \rho(\lambda) F_i 2 \int_0^{\alpha} \sin \theta_r \cos \theta_r d\theta_r = \rho(\lambda) F_i (\sin^2 \alpha) \quad (3-2)$$

Al comparar las medidas de irradiancia global y las realizadas sobre el panel corregidas con su reflectancia, comprobamos que la correlación es muy buena. Realizando un ajuste lineal y forzando a que la recta pase por el origen de coordenadas, obtendremos un coeficiente de proporcionalidad entre estas dos medidas que en el caso mostrado en la Figura 3-10 (a), correspondiente a medidas realizadas el día 24 de abril de 2002 a las 9:12 UTM, toma un valor de 0.0494. Haciendo uso de la expresión (3-2), encontramos que el ángulo α toma un valor de 12.76° , un grado más que el valor que se había dado a partir de las medidas sobre el tubo limitador. Todos los datos disponibles de la campaña se presentan, Figura 3-10 (b), respecto de la hora a la que han sido tomados. Si bien se pueden apreciar dos puntos correspondientes a los días 21 de marzo y 16 de abril de 2002 que tienen un comportamiento claramente diferente, el resto de datos se mantiene en valores muy próximos con una media de 0.0463, lo que equivale a un valor de α de 12.43° , es decir, solo 0.73° diferente a la medida realizada directamente con el tubo limitador. En esta gráfica también se aprecia una cierta curvatura, tomando valores ligeramente más bajos a primeras y a últimas horas del día, a pesar de aplicar las correspondientes correcciones tanto al comportamiento del panel como al del receptor coseno descritas en las secciones 3.1 y 3.2. Esta curvatura podría deberse a que la medida realizada sobre el panel de referencia estuviera ligeramente perturbada por la presencia de la plataforma, lo que ocurriría también en la medida sobre la vegetación. En cualquier caso parece abierta la posibilidad de utilizar medidas de irradiancia global para calcular el factor de reflectancia, si el dispositivo experimental así lo exigiera.

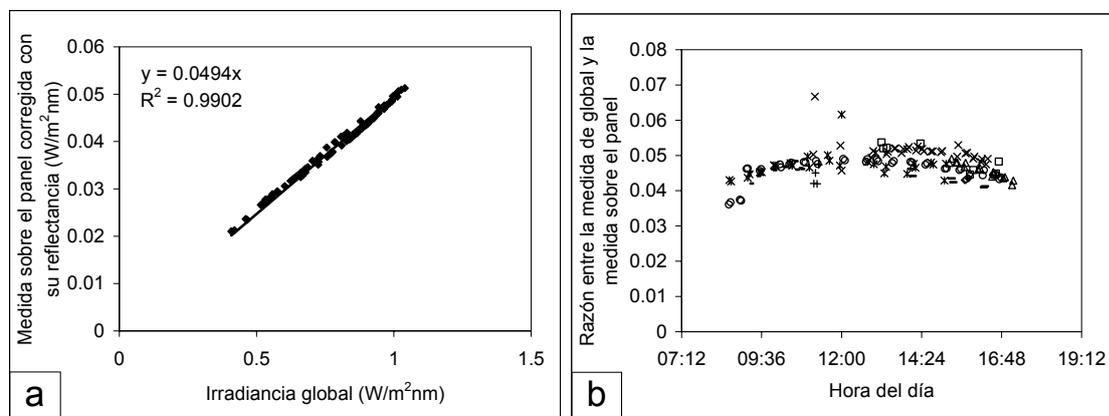


Figura 3-10 Relación entre irradiancia global y la medida sobre el panel de referencia (a). Valores disponibles a lo largo de la campaña de la razón entre estas dos medidas (b).

3.5 Reflectancia del suelo.

Durante el crecimiento de la vegetación en cubiertas homogéneas, como es el caso del cereal, no se puede realizar medidas rutinarias a fin de tener en cuenta la variación de la reflectancia del suelo, ya que éste se encuentra cubierto por la misma vegetación.

Si bien se puede considerar que la reflectancia es igual a la reflectancia de suelos libres de vegetación cercanos al cultivo, esto nos puede llevar a errores sustanciales a la hora de determinar la reflectancia del suelo que está bajo nuestro cultivo, ya que entre ambos puede haber diferencias debidas a la humedad del suelo y al estado de agregación del mismo, los dos parámetros que junto a la composición del suelo determinan su reflectancia. Ejemplo de esto es la siguiente gráfica de la Figura 3-11 en la que se presenta la reflectancia del suelo a principios de temporada, en la zona donde posteriormente se seguirían realizando las medidas de reflectancia de la cubierta vegetal, donde se tiene un suelo arado y con un alto índice de humedad y la reflectancia de un suelo a escasos metros de distancia del cultivo analizado, en el cual el contenido de agua es bastante escaso y su superficie es lisa.

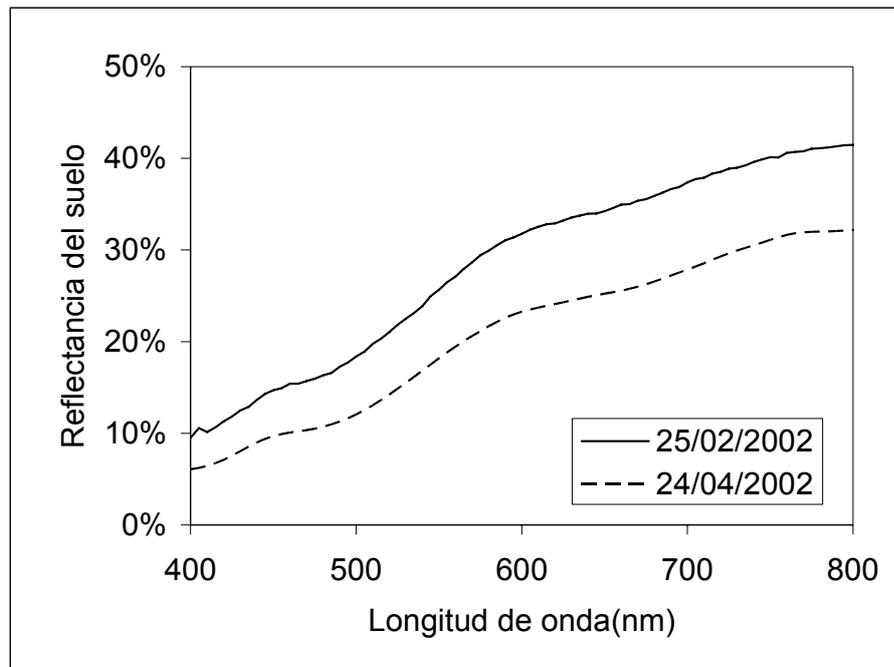


Figura 3-11 Medidas de la reflectancia del suelo realizadas durante dos días de la campaña.

3.6 Medidas de reflectancia y transmitancia foliar.

Cada día de medida se han recogido plantas de cebada, parte de las cuales se han utilizado para determinar las propiedades ópticas de las hojas utilizando para ello una esfera integrante. Tras la recogida, una vez en el laboratorio, se ha procedido a realizar las medidas espectrales necesarias para calcular la reflectancia y la transmitancia foliar entre 400 y 800 nm. Posteriormente, hasta la extracción de clorofila, las hojas se han conservado en un congelador a -8°C .

La esfera integrante utilizada ha sido construida en nuestro taller, Figura 3-12 (a), horadando mediante una fresadora dos semiesferas con un radio de 34 mm en dos cilindros de aluminio. Los dos cilindros se roscaron a fin de unirlos y dejar en su interior la cavidad esférica. Así mismo se realizaron tres orificios que permiten la entrada de luz, la colocación de las muestras y del patrón de referencia, y la colocación del sensor. Las paredes de la esfera se recubrieron con sulfato de bario (BaSO_4) por ser este compuesto uno de los que mayor reflectancia presenta. Para recubrir el interior de la esfera se realizó una disolución de BaSO_4 en agua destilada, aplicandola hasta cubrir por completo la superficie de la misma. Así mismo se pinto de negro el orificio destinado a colocar el sensor a fin de evitar reflexiones en su interior.

Como patrón de referencia se ha construido un disco de aluminio cubriendo una de sus caras con sulfato de bario. Éste irá colocado en el puerto 2, tal como se muestra en la Figura 3-12 (b), para lo cual se ha construido sobre la parte exterior de la esfera un marco que permite su colocación, fijándolo a éste mediante 3 tornillos. En la parte inferior de la esfera, anejo al puerto 3, se ha situado un soporte que nos permite colocar el receptor coseno del espectrorradiómetro LI-1800. La posición del sensor se ha calculado de forma que dentro de su campo de visión no entre ninguno de los otros dos orificios. La superficie de la pared de la esfera es de 16840 mm^2 , mientras que la superficie ocupada por los puertos es de 161, 150 y 66 mm^2 , respectivamente para los puertos 1, 2 y 3. La reflectancia del patrón de referencia se ha determinado mediante comparación con un panel de referencia de Spectralon, cuya reflectancia la proporciona el fabricante. Dado que tanto la esfera como el disco, que nos ha servido de referencia, han sido construidos en aluminio y recubiertos con sulfato de bario, aplicado de forma similar y aproximadamente con el mismo espesor, consideraremos que ambos tienen la misma reflectancia (Figura 3-13).

Para la realización de las medidas, la esfera se ha montado en un banco óptico, Figura 3-12 (b), junto con el sistema que sirve para iluminarla. Como fuente de iluminación se ha utilizado una lámpara halógena de 150 W alimentada a una tensión de 24 V. A fin de utilizar la mayor cantidad posible de luz emitida por la lámpara se ha utilizado un condensador óptico. La alimentación de la fuente se ha controlado mediante un amperímetro y un voltímetro. La luz se ha focalizado sobre la parte posterior de la

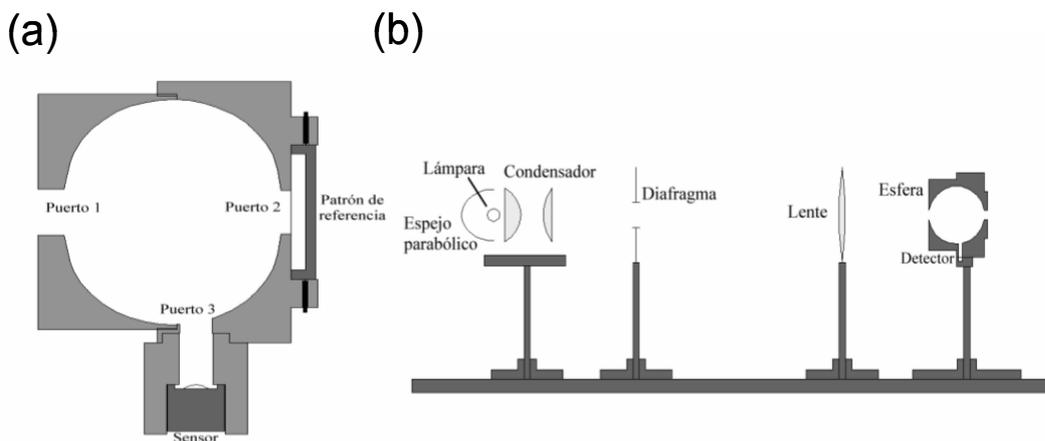


Figura 3-12 Esquema de la esfera integrante utilizada para las medidas de reflectancia y transmitancia foliar (a). Banco óptico sobre el que se ha montado tanto la esfera como el resto de elementos ópticos necesarios (b).

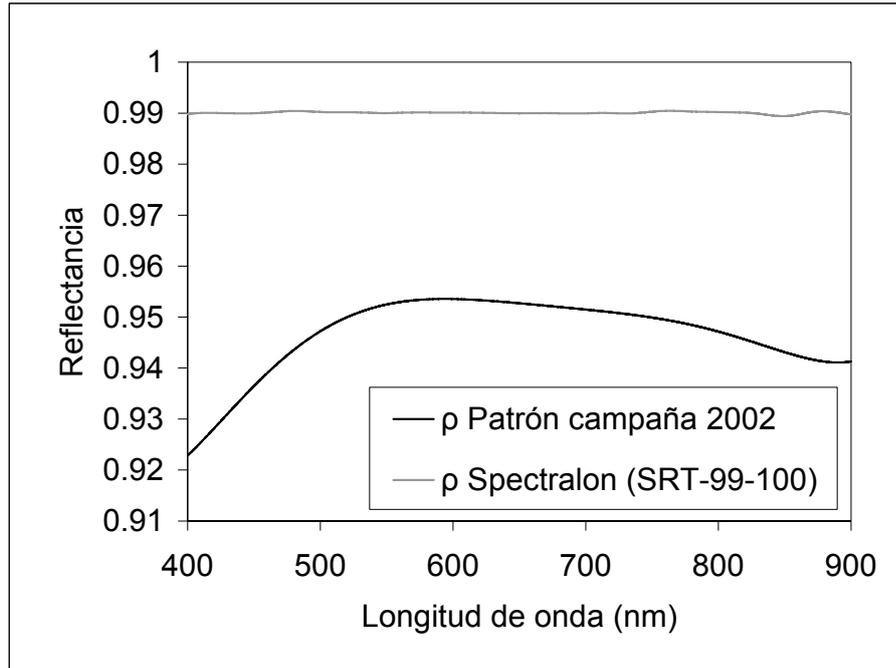


Figura 3-13 reflectancia del patrón de sulfato de bario.

esfera. Para evitar que la luz incidiera sobre las paredes de la esfera, se ha colocado un diafragma en el plano imagen del condensador.

Para determinar la reflectancia y la transmitancia de las muestras se han realizado cuatro medidas por cada muestra. En el esquema de la Figura 3-14 (a) se muestra dicha medida realizada situando la muestra en el portahojas de manera que la esfera es iluminada por la luz reflejada por la hoja. Es de esperar que parte de la luz que penetra en la esfera no incidiese directamente sobre la muestra, sino que lo hiciese en primera instancia sobre las paredes de la esfera. Por lo tanto, siguiendo las ecuaciones desarrolladas en la sección 1.4, el flujo medido por el sensor será el dado en la ecuación (1-28).

$$\phi_R = \frac{(\rho_B f_B + \rho_m f_m) \phi_0 f_d f_v}{1 - \rho_e} = \frac{(\rho_B f_B + \rho_m f_m) \phi_0 f_d f_v}{1 - ((1 - f_1 - f_2 - f_3) \rho_B + f_2 \rho_m)} \quad (3-3)$$

En esta ecuación f_1 , f_2 y f_3 se refieren a la fracción de pared ocupada por los puertos 1, 2 y 3 respectivamente, mientras que f_m y f_B se refieren a la fracción del flujo de luz que penetra en la esfera e incide directamente sobre la muestra o sobre las paredes blancas de la esfera y, por lo tanto, su suma ha de ser igual a 1.

En la Figura 3-14 (b) se muestra la medida realizada cuando se sustituye la hoja por la referencia patrón. El flujo medido en este caso vendrá dado por la ecuación (3-4). En este caso dado que, como se ha comentado previamente, tanto la reflectancia de la muestra patrón como la reflectancia de las paredes de la esfera se consideran iguales no tiene sentido hacer distinciones entre el flujo que incide directamente sobre la referencia o sobre las paredes.

$$\phi_B = \frac{\rho_B \phi_0 f_d f_v}{1 - \rho_e} = \frac{\rho_B \phi_0 f_d f_v}{1 - (1 - f_1 - f_3) \rho_B} \quad (3-4)$$

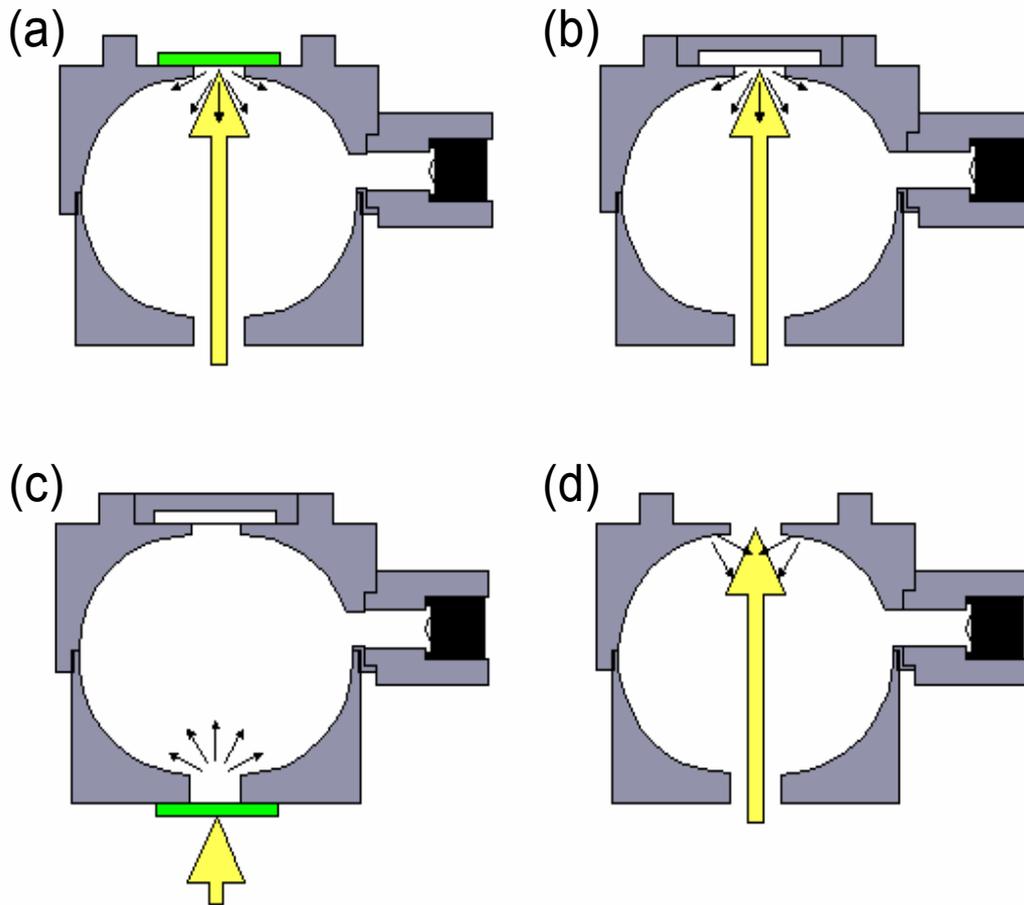


Figura 3-14 Esquema de las medidas con la esfera integrante en la campaña del año 2002.

En la Figura 3-14 (c) vemos el caso en el que se ha colocado la hoja a la entrada de la esfera mientras que el patrón de referencia se ha colocado en la parte trasera. La esfera por lo tanto estará iluminada por la luz que la hoja deje pasar llegando hasta el detector un flujo dado por (3-5).

$$\phi_T = \frac{\tau_m \phi_0 f_d f_v}{1 - \rho_e} = \frac{\tau_m \phi_0 f_d f_v}{1 - ((1 - f_1 - f_3) \rho_B + f_2 \rho_m)} \quad (3-5)$$

Por último, la Figura 3-14 (d) muestra el caso en el que no se han colocado en la parte posterior ni la hoja ni el patrón de referencia, con lo cual la esfera solo estará iluminada por la fracción de luz que incida en primera instancia sobre las paredes de ésta. De esta manera el flujo medido por el sensor será el dado por la ecuación (1-28).

$$\phi_R = \frac{\rho_B f_B \phi_0 f_d f_v}{1 - \rho_e} = \frac{\rho_B f_B \phi_0 f_d f_v}{1 - (1 - f_1 - f_2 - f_3) \rho_B} \quad (3-6)$$

El objetivo de estas cuatro medidas es calcular tanto la reflectancia como la transmitancia de las muestras, lo cual vamos a poder hacer a partir de cocientes entre las medidas que acabamos de describir. Así la transmitancia vendrá dada por la expresión (3-7) y la reflectancia por la (3-8).

$$\tau_m = \frac{\phi_T}{\phi_B} \frac{1 - (1 - f_1 - f_3)\rho_B - f_1\rho_m}{1 - (1 - f_1 - f_3)\rho_B} \rho_B \quad (3-7)$$

$$\rho_m = \frac{\rho_B f_B - \rho_B^2 f_B (1 - f_1 - f_3) - \frac{\phi_R}{\phi_T} \rho_B - \frac{\phi_R}{\phi_T} \rho_B f_B (1 - f_1 - f_2 - f_3)}{f_m (1 - f_1 - f_3)\rho_B - f_2 \frac{\phi_R}{\phi_T} \rho_B - f_m} \quad (3-8)$$

En la ecuación (3-8) aparece el término f_B , que a priori desconocemos. Este parámetro lo calcularemos a partir de la expresión (3-4) y la (1-28).

$$f_B = \frac{\phi_N}{\phi_B} \frac{1 - \rho_B (1 - f_1 - f_3 - f_3)}{1 - \rho_B (1 - f_1 - f_3)} \quad (3-9)$$

Este parámetro se mantiene prácticamente constante en el intervalo espectral en el que se han realizado las medidas, es decir, entre 400 y 800 nm. Su dispersión, si bien es bastante grande durante todo el intervalo estando en torno al 30 o 40% de la medida, se dispara entre 400 y 500 nm sobrepasando fácilmente el 100% de la medida. Debido a este ruido y dado que efectivamente este parámetro no parece tener una dependencia con la longitud de onda, su valor se ha calculado promediando entre 650 y 750 nm, donde la intensidad de la fuente es mayor y, por ende, la medida es menos ruidosa, reduciéndose la desviación de este parámetro hasta el 10%. Además se ha promediado entre toda la serie de valores obtenidos para cada día de medida. A partir de los datos de la Tabla 3-2 vemos que en promedio un 3% de la luz que entra en la esfera incide directamente sobre la pared de la misma a pesar de haber limitado el haz de luz mediante el diafragma, como se mostró en la Figura 3-12 (b).

Tabla 3-2 Fracción de esfera iluminada directamente.

Día	f_B
08/03/02	0.041
21/03/02	0.036
16/04/02	0.029
24/04/02	0.036
15/05/02	0.028
20/05/02	0.027
13/06/02	0.027
28/06/02	0.027

En la Figura 3-15 se muestran algunos ejemplos de las medidas de reflectancia y transmitancia realizadas. También se presentan las absortancias calculadas a partir de las mismas. En ellas se aprecia cómo el ruido es mucho mayor en el intervalo de 400 a 450 nm que en el resto. También podemos ver que, si bien los valores de reflectancia y transmitancia son muy parecidos, los de reflectancia son ligeramente más altos. La desviación estándar de las series de medidas de ϕ_B es un 3% de la medida, mientras que si se recalcula restringiéndonos al intervalo definido entre 450 y 800 nm baja hasta un 1.5% de la medida. Estos valores serán los que consideremos como errores de la medida

de los flujos, lo que nos lleva a unos errores tanto para la reflectancia como para la transmitancia de 0.06 en el intervalo de 400 a 450 nm y de 0.03 de 450 a 800 nm.

Dadas las características de las hojas de cebada, en muchas ocasiones las hojas han resultado de un ancho menor que los puertos de la esfera. Como no es posible realizar la medida si el puerto no está completamente cubierto por la hoja se ha tenido que recurrir a unir dos hojas hasta completar la superficie del puerto. Esto implica que en ciertas zonas las hojas han de superponerse. Si bien se ha intentado minimizar la superposición de las hojas, esto implicará un error difícil de cuantificar.

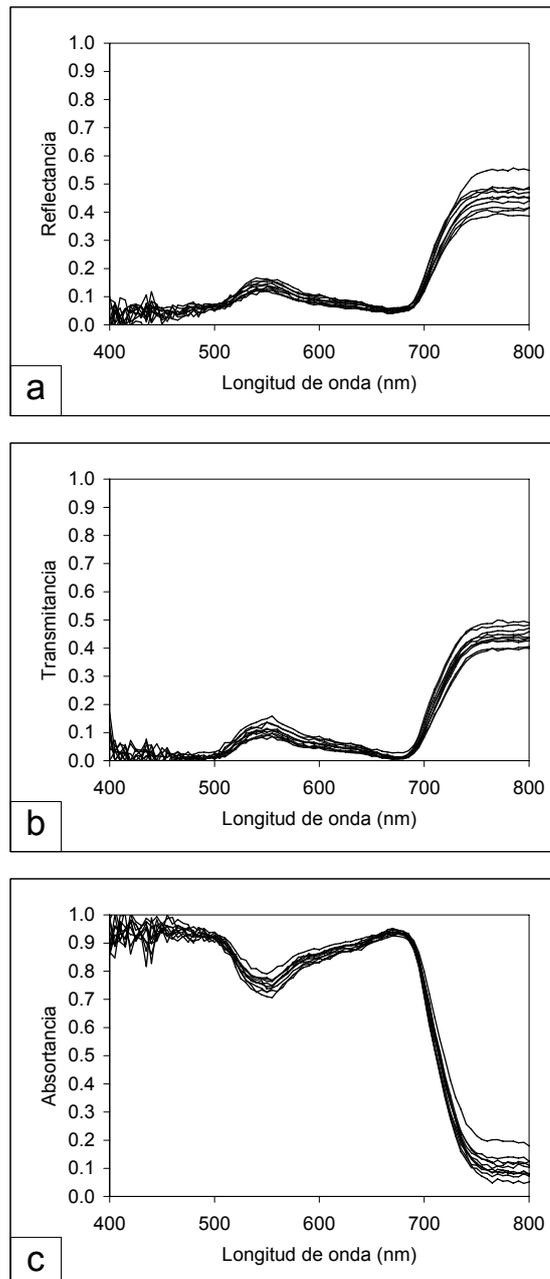


Figura 3-15 Ejemplo de las medidas realizadas el día 16-04-02 de reflectancia, transmitancia y absortancia.

3.7 Medidas del contenido de clorofila.

Nuestro objetivo es la evaluación de la capacidad de la inversión de los modelos PROSPECT y SAILH para darnos unas estimaciones correctas de parámetros biofísicos de la vegetación. Necesitamos, por tanto, contar con medidas de estos mismos parámetros. En esta sección se presenta el protocolo y las medidas de contenido de clorofila de las hojas de cebada realizadas en la campaña del 2002. Las medidas han sido llevadas a cabo en colaboración con el Departamento de Producción Vegetal y Silvopascicultura de la Escuela Técnica Superior de Ingenierías Agrarias de la Universidad de Valladolid (Campus de Palencia).

El protocolo utilizado se ha basado en el descrito por Ramos (2000). En él, el contenido de clorofila se determina en extracto vegetal con una disolución de acetona al 80%. La preparación de la muestra se realiza pesando 0.1 g de hoja. A continuación esta es macerada en un mortero junto con 2 ml de acetona pura al 80% (v/v). El tejido se ha de moler hasta que no se consiga apreciar restos de la hoja a fin de extraer de las células la práctica totalidad de la clorofila. A continuación se agregan otros 10 ml de acetona. Se transfiere cuidadosamente la disolución a un embudo provisto de un disco de papel filtro y se deja filtrar durante unos minutos. En el papel filtro ha de quedar un residuo sólido carente de clorofila. La concentración se determina a partir de la medida de absorbancia de la disolución, la cual se obtiene mediante un espectrofotómetro. En nuestro caso se ha utilizado el modelo UV/VIS V-530 de Jasco (1995).

Este equipo está diseñado para medir el espectro de transmitancia de disoluciones. El rango de funcionamiento es de 190 nm a 1100 nm, empleando dos lámparas, una de deuterio entre 190 y 350 nm y otra halógena entre 330 y 1100 nm. En nuestro caso sólo estamos interesados en el visible, por lo que sólo se ha usado la lámpara halógena. La luz de las lámparas ilumina la rendija de entrada de un monocromador, que selecciona la luz en función de la longitud de onda. Éste está diseñado siguiendo la configuración del círculo de Rowland, utilizando como medio dispersivo una red holográfica cóncava de 1200 líneas/mm. Para evitar órdenes superiores de difracción se antepone una serie de filtros a la entrada del monocromador. Una vez obtenida luz monocromática se divide en dos haces mediante una lámina separadora, conduciéndolos hacia dos cubetas de cuarzo que contienen: la muestra a medir y una referencia, habitualmente el disolvente empleado en la muestra. La luz incide sobre dos fotodiodos de silicio. La transmitancia de la muestra se obtiene realizando el cociente entre la señal medida después de atravesar la cubeta con la muestra respecto de la señal medida después de atravesar la cubeta con el disolvente. Así mismo, se puede definir la absorbancia como el logaritmo decimal de este mismo cociente con signo negativo.

$$A = -\log_{10}(I/I_0) \quad (3-10)$$

Para la realización de nuestras medidas, la cubeta destinada a la muestra se ha llenado con el extracto de clorofila y la de referencia con acetona al 80%. A partir de estos valores de absorbancia obtenidos, el contenido de clorofila se calcula mediante la ecuación (3-11) (Arnon, 1949; Bruinsma, 1963).

$$[C_{a+b}] = 8.02A_{663} - 20.21A_{645} \quad (3-11)$$

Tabla 3-3 Valores de Clorofila, corregidos y sin corregir, así como sus errores.

	21/03/02	24/04/02	15/05/02	20/05/02	13/06/02	28/06/02
C_{a+b} (mg/ml)	18	24	33	30	11	2.9
C_{a+b} ($\mu\text{g}/\text{cm}^2$)	52	68	83	73	16	2.2
C_{a+b} Corregida ($\mu\text{g}/\text{cm}^2$)	44	62	52	47	18	0.8
ΔC_{a+b} ($\mu\text{g}/\text{cm}^2$)	3	5	3	3	6	0.8

El contenido de clorofila obtenido mediante esta expresión viene expresado en mg de clorofila por ml de disolución. Sin embargo el contenido de clorofila obtenido mediante la inversión del modelo PROSPECT viene expresado en μg de clorofila por cm^2 de hoja. Debido a esto es necesario conocer la relación existente entre el peso de la hoja fresca y la superficie de la misma. Estas medidas de densidad se han realizado en ocasiones hasta con 15 horas de diferencia respecto de la medida de clorofila. Si bien la superficie de la hoja se mantiene prácticamente sin variaciones durante un periodo muy largo de tiempo, una vez cortada la misma de la planta ésta comienza a sufrir pérdida de peso debido fundamentalmente a la evaporación del agua que contiene. Por lo tanto esta densidad varía fuertemente con el tiempo. Por fortuna se ha encontrado que esta pérdida es muy lineal con el tiempo, pudiéndose determinar con un 2% de error, por lo que se han aplicado coeficientes de corrección a las densidades, dependiendo del tiempo transcurrido entre la medida de clorofila y la medida de densidad.

Cada día se han realizado extracciones de clorofila de cinco muestras diferentes. Estos valores, junto con sus errores, aparecen en la Tabla 3-3.

3.8 Medida directa del LAI.

A diferencia de campañas posteriores en esta primera no se ha contado con un equipo específico para la medida el índice de área foliar, *LAI*, por lo que se ha recurrido a un muestreo directo de plantas para posteriormente determinar el área de la misma mediante escaneado en el laboratorio (Gower et al., 1999; Jonckheere et al., 2004). Dado que las medidas de reflectancia de la cubierta vegetal se han realizado durante toda la campaña en el mismo punto, para evitar deteriorar la zona de medida no se ha muestreado plantas de ese mismo lugar si no que los muestreos se han realizado en plantas situadas unos metros alrededor de la zona estudiada. Cada día de medida se recogieron un total de 10 plantas (Tabla 3-4).

Tabla 3-4 Medidas del área media de las plantas, su densidad y el LAI, así como sus errores.

Fecha	Area/Planta (cm)	Δ Area/Planta (cm)	Plantas/ m^2	Δ Plantas/ m^2	<i>LAI</i>	Δ <i>LAI</i>	%Error (%)
08/03/2002	5.2	1.4	225	33	0.1	0.02	15%
21/03/2002	8.7	0.8	285.33	33	0.3	0.04	15%
16/04/2002	57	14	185.60	24	1.1	0.3	27%
24/04/2002	30	9	542.40	51	1.6	0.5	31%
15/05/2002	47	13	436	47	2.1	0.6	29%
20/05/2002	44	7	436	47	1.9	0.4	20%
13/06/2002	41	3	436	47	1.8	0.2	13%
28/06/2002	45.	9	436	47	2.0	0.4	22%

Tabla 3-5 Porcentaje de *LAI* asociado a hojas, tallo y espiga.

Fecha	<i>LAI</i>	Hoja (%)	Tallo(%)	Espiga(%)
08/03/2002	0.1	100	0	0
21/03/2002	0.2	100	0	0
16/04/2002	1.1	95	5	0
24/04/2002	1.6	91	8	0
15/05/2002	2.1	72	24	4
20/05/2002	1.9	62	32	6

Podemos definir el *LAI* como el área total de hojas (considerando una única cara) por unidad de superficie ocupada, por lo que conociendo la densidad de plantas y la superficie de hoja por planta podremos determinar el *LAI*. En nuestro caso, al escanear, se han incluido otros elementos de la planta como los tallos, con lo cual, de forma estricta, debiéramos estar hablando de Índice de Área de Planta (*PAI*). Sin embargo, dado que la mayor parte de autores utiliza el termino *LAI* para referirse a las medidas realizadas por ejemplo con el equipo *LAI-2000* de la casa Li-Cor, en el cual se da un caso equivalente al nuestro, al no hacer diferencia entre hojas y otros elementos de la planta, utilizaremos el termino *LAI* para referirnos a las medidas aquí descritas.

El muestreo del área de las plantas se ha realizado mediante escaneado. Una vez calibrado el sistema con patrones de área conocida, mediante análisis del histograma de las imágenes, podremos conocer el número de píxeles correspondientes a cada hoja y, a partir de aquí, el área en cm^2 de cada hoja y de cada planta. La densidad de plantas se ha obtenido mediante recuentos de plantas por surco cultivado, a partir del cual se ha determinado una media y una desviación estándar. La separación entre surcos, 12 cm, se mantiene constante ya que viene determinado por las características de la maquinaria utilizada en la siembra. Con esta metodología es posible obtener fácilmente la contribución al *LAI* de los diferentes elementos de la planta, en nuestro caso hojas, tallo y espigas, como se muestra en la Tabla 3-5.

3.9 Medida con el *LAI-2000*.

Durante la campaña del 2002 se pudo realizar el día 20 de mayo una comparación del valor del *LAI* obtenido a partir del procedimiento de medida directa descrito en el apartado anterior y el valor obtenido con el equipo *LAI-2000* de la empresa Li-Cor (Figura 3-17). Las medidas aquí mostradas no son suficientes para hacer un estudio comparativo entre las dos metodologías, pero sí podemos ver que ambos métodos nos proporcionan valores razonablemente parecidos.

El *LAI-2000*, Figura 3-16 (a), es un instrumento destinado a hacer medidas de la estructura de la cubierta vegetal (Li-Cor, 1991). Los dos parámetros principales que obtenemos a partir de las medidas realizadas con este instrumento son un índice de área foliar (*LAI*) y el ángulo medio de inclinación de las hojas, así como sus errores. Este aparato se basa en medidas ópticas, por lo que a diferencia de otros métodos para determinar el *LAI*, no implican medidas destructivas.

Podemos ver en la Figura 3-16 (b) un esquema básico del funcionamiento del sensor. La entrada de luz al sistema se realiza mediante una lente tipo “ojo de pez”, por lo cual el sistema es capaz de recoger luz hasta con un ángulo de incidencia de 74°. Mediante un espejo se envía la luz a un detector formado por 5 anillos, de tal manera que a cada uno de los anillos sólo llega luz de un rango determinado de ángulos de incidencia. A cada uno de estos anillos se le asigna un ángulo efectivo de 7°, 23°, 38°, 53° y 68° respectivamente. Antes de que la luz llegue al detector ha de pasar por un filtro, el cual sólo deja pasar luz en el intervalo definido entre 320 y 490 nm. En este rango la absorción debida a la hoja es prácticamente total y, por tanto, la luz que llega al sensor cuando se encuentra introducido entre la vegetación ha de proceder directamente del cielo. Sin embargo, el scattering dentro de la vegetación aumenta de forma ficticia el valor de la medida que se realiza entre la vegetación y provoca una estimación menor del valor del *LAI*. Este efecto se minimiza en caso de cielos cubiertos o bien a primeras horas de la mañana o últimas de la tarde. Por la misma razón se recomienda que al operar con este equipo nos situemos entre él y el sol, proyectando nuestra sombra sobre el aparato. Para eliminar la influencia de la persona se utiliza una de las máscaras mostradas en Figura 3-16 (a), que permite un campo de visión de 270°.

El funcionamiento de este equipo consiste básicamente en la determinación de la fracción de cielo visible desde el suelo para unos ciertos ángulos, $T(\theta)$. Esto se calcula para cada uno de los ángulos efectivos mediante el cociente entre una medida sobre la cubierta vegetal y otra medida debajo de ésta. Este parámetro está relacionado mediante la ley de Beer-Lambert-Bouguer dada en la ecuación (3-12), con la densidad foliar en volumen, μ .

$$T(\theta) = \exp(-G(\theta)\mu S(\theta)) \quad (3-12)$$

En esta expresión se supone una densidad de distribución angular independiente del ángulo azimutal. El parámetro $S(\theta)$ es la distancia que un rayo de luz inclinado un ángulo θ ha de atravesar en el interior de la cubierta vegetal y $G(\theta)$ es el cociente entre la superficie foliar proyectada sobre una superficie inclinada un ángulo θ y la superficie foliar total, y para el caso de distribuciones aleatorias respecto del ángulo acimutal, se encuentra relacionado con la función de distribución de orientación foliar $f(\theta)$ mediante la ecuación (Myneni et al., 1989):

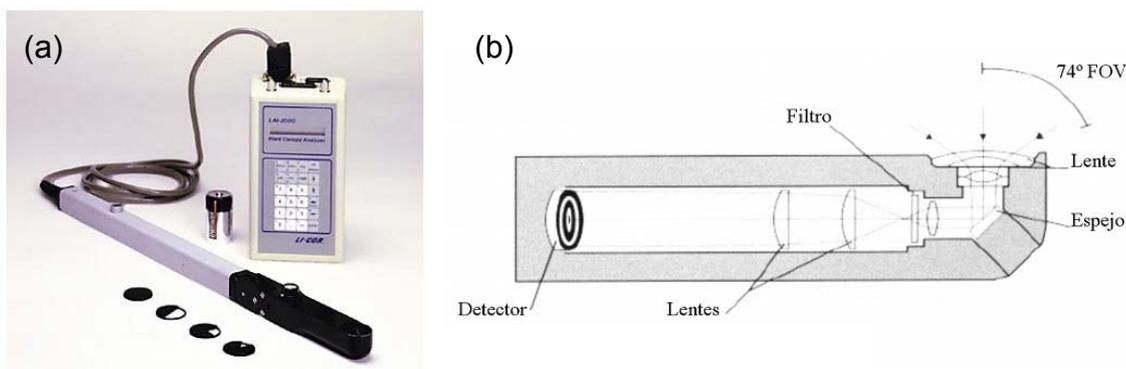


Figura 3-16 Fotografía del instrumento LAI-2000 (a). Esquema del sensor del LAI-2000 (b).



Figura 3-17 Medida con el LAI-2000 en la campaña del 2002.

$$G(\theta) = \int_0^{\pi/2} g(\theta_i) \cos(\theta_i) \Psi(\theta, \theta_i) d\theta_i \quad (3-13)$$

donde:

$$\begin{aligned} \Psi(\theta, \theta_i) &= |\cos(\theta) \cos(\theta_i)| \quad \text{si } |\tan(\theta) \tan(\theta_i)| > 1 \\ \Psi(\theta, \theta_i) &= \cos(\theta) \cos(\theta_i) \left(\frac{2\phi_i}{\pi} - 1 \right) + \\ &+ \frac{2}{\pi} \sqrt{1 - \cos^2(\theta)} \sqrt{1 - \cos^2(\theta_i)} \sin(\phi_i) \quad \text{si } |\tan(\theta) \tan(\theta_i)| \leq 1 \end{aligned} \quad (3-14)$$

con:

$$\phi_i = a \cos(-\tan(\theta) \tan(\theta_i)) \quad (3-15)$$

A partir de (3-12), y siguiendo el desarrollo de Miller (1967), es posible determinar la densidad foliar según la expresión:

$$\mu = -2 \int_0^{\pi/2} \frac{\ln(T(\theta))}{S(\theta)} \sin(\theta) d\theta \quad (3-16)$$

Si consideramos que la vegetación es una cubierta de altura constante H, se cumplirá:

$$LAI = \mu * H \quad (3-17)$$

$$S(\theta) = \frac{H}{\cos(\theta)} \quad (3-18)$$

Y por lo tanto:

$$LAI = -2 \int_0^{\pi/2} \ln(T(\theta)) \cos(\theta) \sin(\theta) d\theta \quad (3-19)$$

El cálculo del ángulo medio de inclinación de las hojas se realiza a partir de $G(\theta)$, una vez calculado el LAI , sustituyendo (3-17) y (3-18) en la ecuación (3-12). Dado que en la modelización de la reflectancia de la cubierta vegetal se ha utilizado la distribución angular elipsoidal de Campbell (1986), será esta distribución de orientación foliar la que utilizaremos para calcular el ángulo medio de orientación foliar y, en último termino, el parámetro χ de Campbell.

Según hemos visto, para operar de forma óptima con el sensor LAI-2000, la iluminación de la cubierta vegetal ha de ser únicamente mediante luz difusa, como la que encontramos a primera hora de la mañana. Por otro lado, como también se ha mencionado, se recomienda que la persona que opere el instrumento se sitúe proyectando su sombra sobre el aparato. Para analizar el efecto de estas dos condiciones, la hora del día y la sombra del operario, se han realizado medidas a diferentes horas de la mañana, proyectando la sombra sobre el aparato y evitándola. Cada valor del LAI de estas series se ha calculado a partir de 4 medidas sobre la cubierta vegetal y 16 medidas bajo la cubierta vegetal. En concreto, las medidas han sido realizadas en torno a las 10:40, 12:12 y 14:10, hora UTM. Se ha obtenido los valores 2.06 ± 0.15 , 2.14 ± 0.06 y 1.82 ± 0.09 en la serie en la que se ha proyectado la sombra sobre el aparato, y 1.55 ± 0.11 , 1.60 ± 0.18 y 1.66 ± 0.18 en la serie en la que se ha evitado que la sombra de la persona que ha realizado las medidas incidiera sobre el aparato. Como se puede ver en esta última, los tres valores se encuentran muy próximos entre sí, habiendo una diferencia entre el máximo y el mínimo de 0.11. Además se obtienen unos valores claramente inferiores respecto a la primera serie, hasta de un 25% menos. En la serie con sombra proyectada, las dos primeras medidas se mantienen en valores similares, sin embargo la tercera cae un 15%. Para el mismo día el LAI obtenido a partir del escaneado de las hojas es de 1.9 ± 0.4 , valor bastante próximo al obtenido en las dos primeras medidas de esta serie. Se puede concluir con esto que al medir con el LAI-2000 en un día claro hay que hacerlo con el sol bajo y, aún así, proyectar nuestra sombra sobre el sensor.

A partir de las 2 primeras medidas realizadas proyectando nuestra sombra sobre el LAI-2000, el valor del ángulo medio de inclinación de las hojas es de $57^\circ \pm 3$, ligeramente inferior a 61° , que es el valor promedio encontrado para las tres series del año 2003, aunque se encuentra dentro de los márgenes de error.

3.10 Relación entre LAI y el NDVI.

A partir de los valores medidos de reflectancia es posible calcular índices de vegetación, como el $NDVI$ a partir de la expresión (3-20). Dado que en la campaña del año 2003 se ha trabajado con imágenes del satélite QuickBird II, y para facilitar la comparación de los resultados entre las dos campañas, el cálculo del índice de

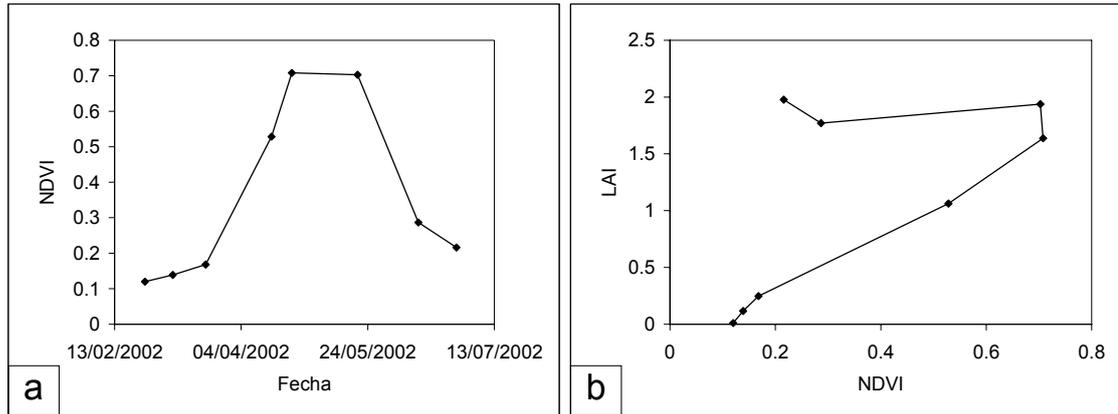


Figura 3-18 Evolución del *NDVI* frente al tiempo (a). Relación entre *LAI* y *NDVI* a lo largo de todo el ciclo de desarrollo de la planta (b).

vegetación que presentamos en esta sección se ha hecho a partir ρ_R y ρ_{IR} , obtenidos de la convolución de los espectros de reflectancia medidos sobre la vegetación y las respuestas espectrales de los canales del satélite situados en la zona del rojo y del infrarrojo. Estos valores de *NDVI* están comprendidos entre 0.1 y 0.7, lo cual cubre un amplio rango de los posibles valores. En la Figura 3-18 (a) podemos ver la evolución del *NDVI* calculado para los diferentes días de los que se tienen medidas de reflectancia.

$$NDVI = \frac{\rho_{IR} - \rho_R}{\rho_{IR} + \rho_R} \quad (3-20)$$

La relaciones que a menudo se establece entre *NDVI* y *LAI* son difícilmente exportables a cultivos diferentes de los utilizados para obtener estas relaciones. Incluso cambios de suelo pueden afectar sustancialmente a este tipo de relaciones. Sin embargo es indudable que estas relaciones existen, al menos durante ciertas fases de crecimiento de las plantas. Así, en nuestro caso se puede observar cómo durante las fases del crecimiento que van desde el brote de la planta hasta el final del encañado, se obtiene una muy buena correlación entre la evolución del *LAI* y el *NDVI*. En este periodo se dispone de cinco medidas simultáneas de *LAI* y *NDVI*, las cuales presentan una correlación con un R^2 de 0.994.

Sin embargo, si continuamos representando los datos una vez que la espiga ha salido del zurrón, nos encontramos con un claro cambio de tendencia. La variación del *NDVI* ya no responde a cambios en el *LAI*, sino más bien a la evolución del contenido de clorofila tanto de las hojas como de la espiga, manteniéndose el *LAI* constante en esta última fase o incluso reduciéndose un poco.

Capítulo 4. Medidas de la campaña 2003

Al igual que en el capítulo precedente, también aquí se presentan las medidas realizadas a fin de poder testar los algoritmos propuestos de inversión de los modelos PROSPECT y SAILH. Estas medidas se han realizado sobre cultivos herbáceos, de cebada de ciclo largo o cebada de invierno y de ciclo corto o cebada de primavera (*Hordeum vulgare*), así como de trigo de ciclo largo (*Triticum aestivum*), en parcelas situadas en las proximidades del municipio de Medina de Rioseco (Valladolid).

Si el fin de la campaña del año 2002 fue estudiar series de datos de reflectancia de la cubierta vegetal tomados a lo largo del tiempo, en la campaña del año 2003 el objetivo ha sido también estudiar datos de reflectancia de cultivo, pero en este caso distribuidos espacialmente. Al igual que en la campaña anterior, se podrían haber tomado los datos de reflectancia de los cultivos mediante un espectrorradiómetro de campo, sin embargo en este caso la toma de datos de reflectancia se ha realizado a partir de imágenes de satélite. Esta decisión está motivada principalmente por las ventajas a nivel espacial que sin duda ofrecen las imágenes de satélite. Pero también se ha pretendido aplicar las metodologías, que en este trabajo estudiamos, a un caso con aplicación real.

En esta campaña hemos seguido estudiando cultivos de cereal, pero en este caso no sólo se han tomado parcelas de cebada sino que se han incluido parcelas de trigo. A fin de estudiar la aplicabilidad de la metodología estudiada con diferentes desarrollos de las plantas, se han tomado 3 imágenes de satélite alrededor al municipio de Medina de Rioseco (Valladolid) los días 6 de abril, 17 de mayo y 5 de julio de 2003, fechas en las que los cultivos presentan estados fenológicos bien diferenciados. En la primera fecha nos encontramos con plantas pequeñas antes del encañado, siendo pues muy importante el suelo en la reflectancia total del cultivo. En la segunda fecha las plantas ya han alcanzado su máximo desarrollo, por lo cual la influencia del suelo en la reflectancia se ve reducida. En la tercera, justo en el momento previo a la siega, la hoja ya está seca.

En este caso también se han utilizado los modelos PROSPECT y SAILH para analizar las medidas. De entre todos los parámetros que podemos estudiar con estos

modelos volveremos a concentrar nuestros esfuerzos en analizar el comportamiento del LAI y C_{a+b} . Así pues, se han realizado muestreos de LAI con el fin de contrastar los resultados obtenidos mediante inversión de los modelos. En total se ha medido en tres puntos de control en cada una de las 16 parcelas estudiadas, obteniendo un total de 51 puntos. Estos muestreos se han repetido sobre los mismos puntos alrededor de las fechas de toma de las tres imágenes. Se situaron estos puntos de control mediante medidas con GPS. Así mismo se han recogido muestras de plantas para realizar medidas en laboratorio.

A fin de testar el modelo PROSPECT con medidas experimentales realizadas según el procedimiento estándar, se presentan también en este capítulo medidas de reflectancia y transmitancia foliar realizadas sobre hojas de vid, que forman parte de un muestreo realizado dentro de un trabajo paralelo del grupo (Zarco, 2005).

4.1 Imágenes del satélite QuickBird II.

Debido al tamaño medio de las parcelas en la zona de estudio, típicamente del orden de una o dos hectáreas, la utilización de satélites de mediana resolución espacial tipo LANDSAT, con 30m de resolución espacial, no parece la más adecuada. La aparición en los últimos años de satélites de muy alta resolución espacial, llegando en algunos casos incluso a resoluciones espaciales por debajo del metro, nos ha permitido contar con imágenes que nos proporcionan un gran número de datos por parcela. En concreto, se han utilizado imágenes tomadas por el satélite Quick Bird II. La aplicación de este tipo de sensores en agricultura de precisión abre la puerta a estudios de variabilidad dentro de parcelas.

El satélite QuickBird II, gestionado por la empresa DigitalGlobe, es desde la fecha de su lanzamiento, el 18 octubre de 2001, y hasta estos momentos, el satélite que proporciona una mayor resolución espacial. Dispone de un sensor pancromático, de 445

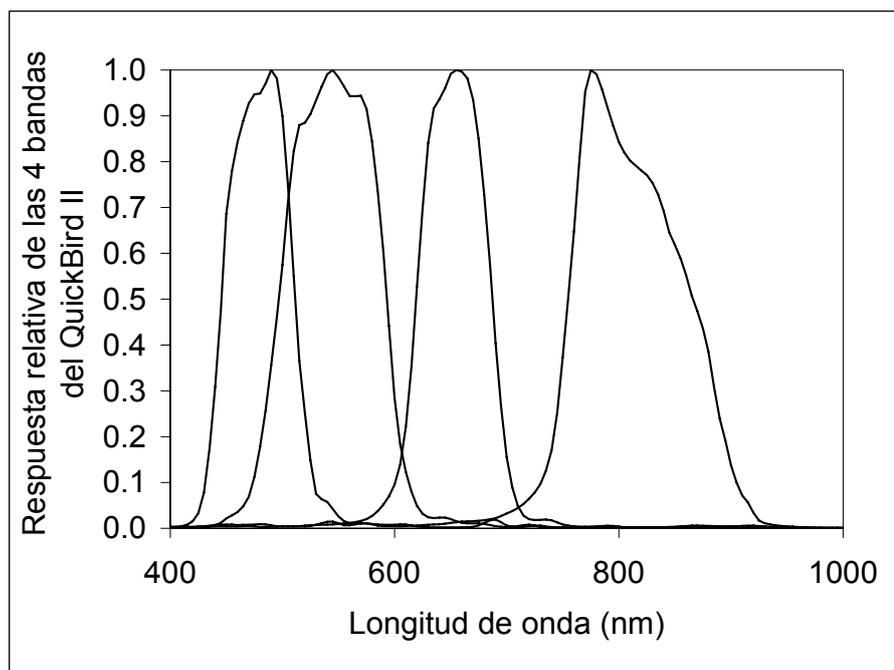


Figura 4-1 Respuesta relativa de las 4 bandas de sensor QuickBird II.

a 900 nm, con una resolución espacial que varía desde 60 cm en el nadir, hasta los 70 cm a 25° del mismo y de un segundo sensor multiespectral de cuatro bandas centradas en los 487, 548, 653 y 806 nm (Figura 4-1) con anchuras a altura mitad de 70, 80, 60 y 140 nm respectivamente. Estas bandas tienen una resolución espacial de 2.4 m en el nadir, llegando hasta 2.8 a 25° del mismo.

El satélite describe una órbita polar heliosíncrona a una altura de 450 km con un ángulo de inclinación respecto del ecuador de 97.2°, cruzando el Ecuador a las 10:30 a.m. (nódulo en descenso). La anchura de la banda de barrido observada desde el satélite es de 16.5 km, con una tiempo de revisita de entre 1 y 3.5 días en función de la latitud a la que nos encontremos.

El distribuidor de productos de este satélite en Europa es la empresa Eurimage. Se ofrecen dos productos básicos, a partir de las medidas de los sensores multiespectral y pancromático. Existe un tercer producto generado por la fusión de los dos anteriores, en el que se consiguen imágenes en color con resoluciones de 60 cm (Figura 4-2). A partir de estos productos básicos se ofrecen distintos niveles de procesado radiométrico y geométrico.

En nuestro caso se ha optado por imágenes estándar multiespectrales, las cuales incluyen correcciones sobre el sensor, geométricas y radiométricas. Las correcciones realizadas sobre el sensor se refieren a la geometría interna del sensor, distorsión del escáner y detección de errores de registro. Las correcciones radiométricas incluyen conversión a unidades absolutas. Por su parte, las correcciones geométricas evitan distorsiones en la imagen debidas a cambios de la posición del satélite, la incertidumbre en la altura, la rotación de la tierra y su curvatura, de tal manera que los píxeles del producto final tengan un tamaño uniforme, que en nuestro caso es de 2.8 m. Así mismo, para georreferenciar o asignar unas coordenadas a la imagen se utilizan modelos digitales globales de elevación del terreno con resoluciones aproximadas de 1 km, como GTOPO30, dando pues la precisión de las coordenadas con un error del orden de 23 m, si no se consideran desplazamientos topográficos, pero que puede superar los 80 m (Liedtke, 2002). Las imágenes se han recibido en coordenadas UTM, zona 30 y datum WGS84.



Figura 4-2 Comparación entre una imagen fusionada (a) y una imagen multiespectral (b).

Dadas las características del satélite quickBird II, no es posible asegurar la toma de imágenes en una fecha concreta. La única forma viable en la que se puede solicitar una imagen de este sensor es mediante la definición de una ventana temporal de en torno a un mes. En concreto, la solicitud de las imágenes se realizó definiendo los periodos del 1-03-2003 al 31-03-2003 para la primera imagen, del 30-04-2003 al 30-05-2003 para la segunda imagen y del 9-06-2003 al 30-06-2003 para la tercera. Como se puede ver las dos primeras imágenes se tomaron dentro de los plazos solicitados, pero la tercera se hizo fuera ya del plazo.

Tabla 4-1 Información del SIGPAC sobre las zonas de estudio.

Parcela	Superficie Total (m ²)	Polígono	Parcela	X (UTM)	Y (UTM)
z01	215453	1	573	328998.09	4643049.32
z02	190782	1	45	329298.17	4643498.85
z03	165638	1	43	328904.36	4643491.05
z04	82359	1	27	328422.41	4643083.77
z05	69147	1	10031	328485.76	4643721.78
z06	168934	1	41	329103.62	4642765.38
z07	70894	7	475	328357.68	4642040.73
z08	26346	8	553	327726.23	4643438.26
Z09	14652	5	5277	328899.65	4636826.51
Z10	9707	5	5212	329923.57	4637518.33
z11	22182	6	5116	329655.28	4638257.80
z12	13239	6	5115	329692.24	4638168.74
z13	127378	6	329	328908.82	4638209.26
z14-z15	331612	7	440	328060.99	4640275.06
z16	82758	4	5258	331026.02	4637618.43

Tabla 4-2 Información sobre la superficie y cultivo de las zonas de estudio.

Parcela	Superficie estudiada (m ²)	Píxeles	Cultivo
z01	30701	3916	Trigo
z02	177772	22675	Cebada
z03	69745	8896	Cebada
z04	68153	8693	Cebada
z05	10153	1295	Cebada
z06	153225	19544	Trigo
z07	91179	11630	Cebada
z08	22305	2845	Trigo
Z09	10662	1360	Trigo
z10	5990	764	Trigo
z11	61960	7903	Cebada
z12	5755	734	Cebada
z13	102751	13106	Cebada
z14	225149	28718	Cebada
z15	116894	14910	Trigo
z16	73563	9383	Trigo

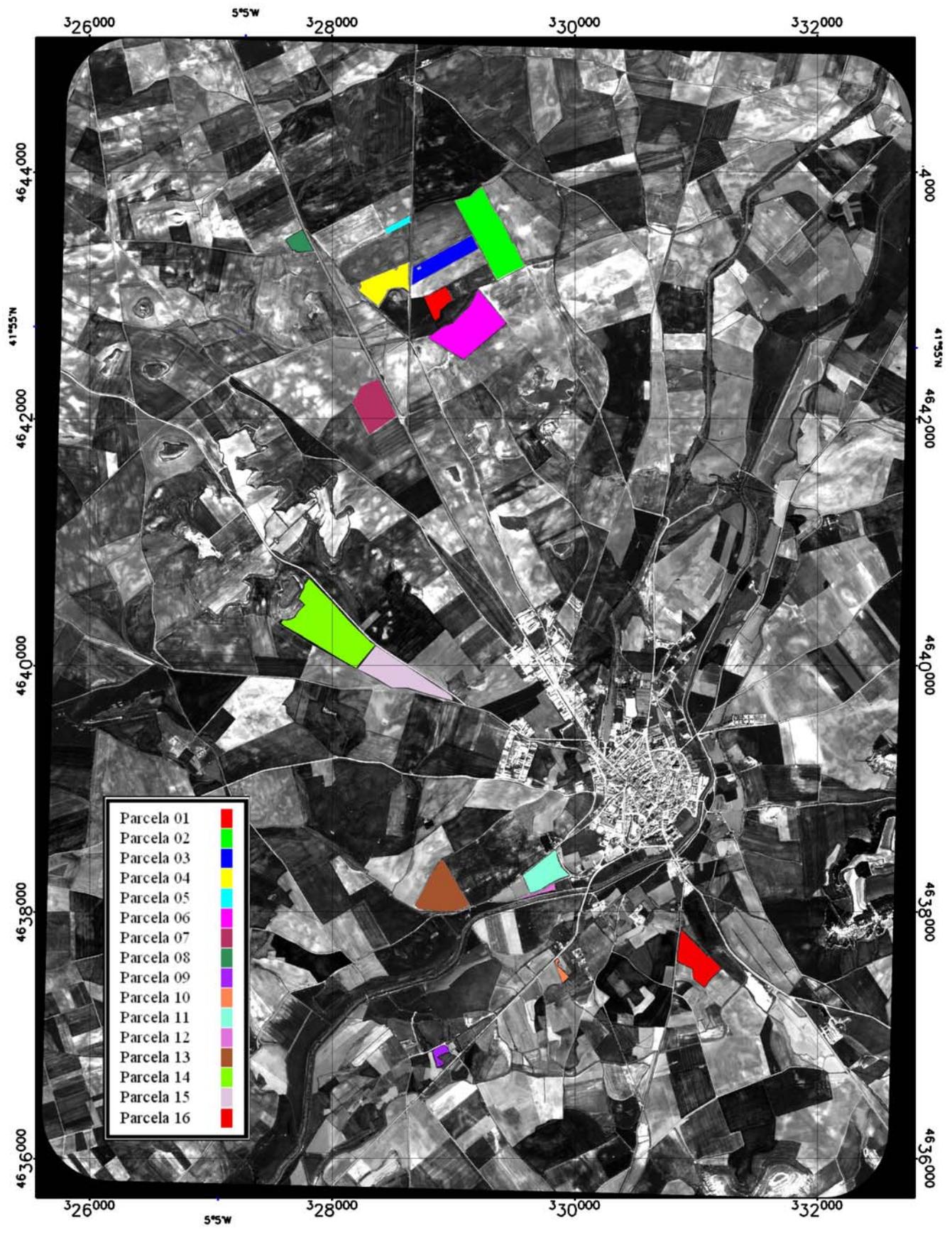


Figura 4-3 Primera banda (487nm) de la imagen de 06-04-2003, con la situación de las 16 zonas estudiadas.

Dentro de cada imagen se han analizado 16 parcelas, entre las que se encontraban cultivos de trigo y cebada. En la Tabla 4-1 podemos ver los datos descriptivos de las parcelas proporcionados por el servicio SIGPAC (2006) de la Junta de Castilla y León.

En la Tabla 4-2 se muestra la superficie estudiada de cada parcela. Por un lado podemos ver que en ciertas parcelas, por ejemplo la z01, la superficie estudiada es significativamente inferior a la superficie total de la parcela. Por otro lado, las zonas de estudio z14 y z15 pertenecen a la misma parcela. Los límites de las parcelas que podemos encontrar en el catastro no coinciden estrictamente con los límites de los cultivos. En las zonas de estudio se han eliminado los píxeles más próximos a los bordes, ya que estos pueden estar contaminados por otras especies vegetales que pueden aparecer en las lindes.

Como se puede ver en la Tabla 4-1, el tamaño total de las parcelas va desde menos de una hectárea hasta unas 22 hectáreas, ya que en el caso de la parcela que contiene las zonas de estudio z15 y z16, a pesar de tener 33 hectáreas, se encuentra dividida en dos cultivos, cebada y trigo. Sin embargo, en la Tabla 4-2 vemos que la superficies estudiadas se reducen significativamente, situándose entre la media hectárea de la zona de estudio z12 y las 22 hectáreas de la z14. En promedio las zonas estudiadas tienen una superficie de casi 8 hectáreas.

Según se comentó anteriormente, el error de las coordenadas asociadas a los píxeles de las imágenes proporcionadas pueden llegar hasta los 80 m. En nuestro caso se ha comprobado, mediante puntos de control fácilmente localizables en las tres imágenes, que la diferencia relativa de coordenadas entre la primera y la segunda imagen es de 28 m, mientras que entre la primera y la tercera es de tan sólo 5 m. Para unificar la localización de los puntos muestreados se han corregido las imágenes con el fin de eliminar estas diferencias. Para ello se han utilizado traslaciones de primer grado.

$$\begin{aligned}x' &= ax + by + c \\y' &= dx + ey + f\end{aligned}\tag{4-1}$$

4.2 Tratamiento radiométrico de las imágenes.

La corrección radiométrica incluida en las imágenes de QuickBird II, comprende una corrección de corriente oscura y una corrección para evitar posibles inhomogeneidades (Krause, 2003). Los datos están así dados en cuentas digitales que tendremos que convertir en un primer paso en radiancia, para lo cual únicamente se tendrá que multiplicar por los coeficientes de calibración dados en la Tabla 4-3.

Los coeficientes de calibración se encuentran incluidos en la información auxiliar incorporada junto a cada imagen. Sin embargo, con fecha del 6 de junio de 2003, entre la adquisición de la segunda y la tercera de nuestras imágenes, se produjo un cambio en la calibración del instrumento, sustituyendo los coeficientes calculados previamente al lanzamiento del satélite por otros basados en datos tomados ya en órbita, de acuerdo a la *Joint Agency Commercial Imagery Evaluation Team* (JACIE). Por lo tanto los coeficientes que acompañan a las imágenes de los días 6 de abril y 17 de mayo

Tabla 4-3 Coeficientes originales de calibración y los nuevos coeficientes aplicados a las imágenes.

	Coeficientes Obsoletos	Coeficientes Nuevos
B1	1.431e-02	1.60412e-02
B2	1.045e-02	1.43847e-02
B3	9.680e-03	1.26735e-02
B4	1.568e-02	1.54242e-02

de 2003 se consideran obsoletos aconsejándose la utilización de los nuevos coeficientes (Krause, 2003).

Tras multiplicar las cuentas digitales por los coeficientes de calibración se obtienen valores de radiancia integrada en la banda. A continuación se tendrá que dividir por una anchura de banda efectiva para obtener los valores de radiancia apropiados. Estas anchuras son 0.068, 0.099, 0.071 y 0.114 μm para las bandas correspondientes al azul, verde, rojo e infrarrojo cercano, respectivamente. Se obtiene de esta manera la radiancia medida por el satélite, L_{sat} , en $\text{W}/\text{m}^2 \text{sr} \mu\text{m}$.

Una vez obtenido los valores de radiancia es necesario calcular la reflectancia a nivel de satélite, según la ecuación (4-2) (Vermote et al., 1997).

$$\rho^* = \frac{\pi L_{sat}}{\cos(\theta_s) E_s} \quad (4-2)$$

En esta ecuación θ_s hace referencia al ángulo solar cenital (Iqbal, 1983), y E_s a la irradiancia solar extraterrestre que el sensor mediría en el exterior de la atmósfera. Para calcular E_s se ha convolucionado la irradiancia solar extraterrestre (Figura 4-4) dada por Gueymard (2004) con las respuestas espectrales del sensor. El resultado obtenido ha sido de 1.9901, 1.8565, 1.5524 y 1.1176 $\text{W}/\text{m}^2 \text{nm}$ respectivamente para las

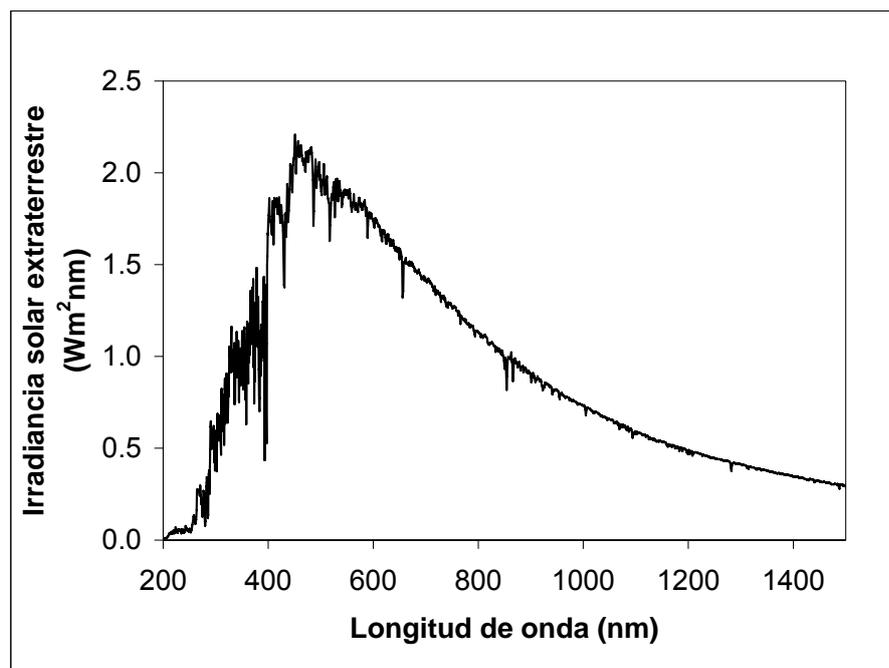


Figura 4-4 Irradiancia solar extraterrestre dada por Gueymard.

cuatro bandas. Estos valores corresponden con el valor medio de la irradiancia solar extraterrestre para todo el año, los cuales han de ser corregidos para tener en cuenta las variaciones de la distancia tierra sol. Tras este proceso, a partir de la señal medida en cuentas digitales, llegamos a obtener la reflectancia en el exterior de la atmósfera.

4.3 Corrección atmosférica de las imágenes.

Si bien ya contamos con valores de reflectancia, estos no los podemos comparar directamente con los valores de reflectancia obtenidos del modelo SAILH, ya que unos se refieren a la reflectancia medida en el exterior de la atmósfera y los otros a la reflectancia medida sobre el cultivo. Por lo tanto, para que estos espectros sean comparables, se tiene que corregir de la reflectancia medida por el satélite la perturbación introducida por la atmósfera que provoca que gran cantidad de luz procedente de la superficie terrestre se pierda por procesos de absorción y scattering, reduciéndose en torno a un 20% en 850 nm y un 50% en 450 nm. Todo este proceso se denomina corrección atmosférica.

Para realizar la corrección atmosférica de las reflectancias medidas por el sensor QuickBird II, se ha empleado el código 6S (Vermote et al., 1997), una versión mejorada del código 5S (Tanré et al., 1986). Este trabajo se ha realizado en colaboración con el *Laboratoire Interdisciplinaire des Sciences de l'Environnement* (MREN) de la *Université Côte d'Opale en Wimereux* (Francia).

El código 6S simula los procesos de absorción y scattering que se producen en la atmósfera para evaluar su contribución sobre la reflectancia medida a nivel de satélite. En concreto se considera que la luz que llega al sensor situado en el satélite puede haber sufrido cuatro procesos diferentes. En primer lugar parte de la luz procedente del sol es dispersada en la atmósfera antes de llegar a la superficie terrestre, llegando al sensor sin información del suleo. Parte de la luz que llega a la superficie observada por el satélite es reflejada hacia éste. Sin embargo al satélite también llegará, por procesos de scattering en la atmósfera, luz reflejada por otras zonas de la superficie fuera de la observada. Incluso al satélite puede llegar luz procedente de múltiples reflexiones entre la atmósfera y la superficie terrestre.

Se considera también la absorción de la luz, que en general se debe a la presencia tanto de aerosoles como de los gases atmosféricos, principalmente O₃, H₂O, O₂, CO₂, CH₄ y N₂O. La absorción debida a los aerosoles es tratada en la teoría de scattering a través de un índice de refracción complejo y la absorción de los gases como una absorción selectiva. Ambos procesos se consideran que son procesos independientes.

Todos estos procesos se traducen en la ecuación (4-3) que nos relaciona la reflectancia medida en el exterior de la atmósfera, ρ^* , y la reflectancia medida sobre la superficie terrestre, ρ . Por brevedad se ha omitido en todos los términos la dependencia con la longitud de onda.

$$\begin{aligned} \rho^*(\theta_s, \theta_v, \phi_v) &= \\ &= t_g(\theta_s, \theta_v) \left\{ \rho_a(\theta_s, \theta_v, \phi_v) + \frac{T(\theta_s)}{1 - S \langle \rho \rangle} [\rho e^{-\tau/\mu_v} + \langle \rho \rangle t_d(\theta_v)] \right\} \end{aligned} \quad (4-3)$$

En esta ecuación se desacoplan los procesos de absorción y scattering considerando de forma separada el término t_g , que hace referencia a la transmitancia de la atmósfera teniendo únicamente en cuenta la absorción de gases, calculada sobre el camino descendiente y ascendente realizado por la luz. Por su parte, todos los términos que se encuentran dentro de la llave únicamente hacen referencia a procesos de scattering.

El término $\exp(-\tau/\mu)$ hace referencia a la transmitancia directa de la atmósfera, según la ley de Beer-Lambert-Bouguer, donde $\mu = \cos(\theta)$ y τ es el espesor óptico total de scattering. Por otro lado, el término t_d hace referencia a la transmitancia difusa, calculada a partir de la relación entre la irradiancia extraterrestre, F_{ext} , y la irradiancia difusa medida en la superficie de la tierra, F_{dif} , según la ecuación (4-4).

$$t_d(\theta_V) = \frac{F_{dif}}{\mu_V F_{ext}} \quad (4-4)$$

$T(\theta_S)$ se refiere a la suma de las transmitancias directa y difusa, ρ_a a la reflectancia debida exclusivamente a la atmósfera y S al albedo esférico de la atmósfera. Los subíndices S y V hacen referencia a Solar y a Visión, indicando en cada caso la trayectoria recorrida por la luz, en dirección descendente o ascendente respectivamente.

Por último $\langle \rho \rangle$ es una reflectancia que representa un promedio espacial de todos los puntos que conforman su entorno. En este promedio ha de considerarse unos pesos que tengan en cuenta la eficiencia de cada punto del entorno. Esta reflectancia la podemos definir según la expresión (4-5), donde $e(x,y,\theta_V)$ es la contribución a la transmitancia difusa $t_d(\theta_V)$ por unidad de área de cada una de las fuentes situadas en la posición (x,y) .

$$\langle \rho \rangle = \frac{1}{t_d(\theta_V)} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \rho(x,y) e(x,y,\theta_V) dx dy \quad (4-5)$$

Debido a la complejidad de todos estos procesos y a la cantidad de información que implica conocerlos, a la hora de realizar una corrección atmosférica lo más usual es utilizar únicamente el espesor óptico de la atmósfera. En nuestro trabajo se han considerado diversas correcciones realizadas con diferente grado de información sobre la atmósfera, de cara a analizar su influencia sobre los resultados de los parámetros biofísicos, obtenidos mediante inversión de los espectros medidos por el satélite.

En primer lugar, se ha considerado el caso en el que se carece por completo de medidas experimentales simultáneas a la toma de la imagen. En este caso no queda otra opción que considerar un valor típico de visibilidad y una atmósfera estándar. El espesor óptico de aerosoles a 550 nm tomado es de 0.192, que corresponde a un valor de visibilidad de 32 km. Las posibilidades de atmósferas estándar que nos ofrece el modelo 6S son aquellas en las que predominan el aerosol marítimo, continental, desértico, estratosférico, urbano o procedente de la combustión de biomasa. Atendiendo a las condiciones de la zona de estudio se ha seleccionado el modelo continental de aerosoles.

En esta aproximación se considera además que los píxeles tanto de la zona vista por el sensor como la que la rodea tienen una misma reflectancia ρ . Por lo tanto la ecuación (4-3) pasa a tener la forma (4-6).

$$\rho^*(\theta_s, \theta_v, \phi_v) = t_g(\theta_s, \theta_v) \left\{ \rho_a(\theta_s, \theta_v, \phi_v) + \frac{T(\theta_s)T(\theta_v)\rho}{1 - S\rho} \right\} \quad (4-6)$$

Como podemos ver tanto en la ecuación (4-3) como en la (4-6), la relación entre la reflectancia medida en el exterior de la atmósfera y la reflectancia medida sobre la superficie de la tierra depende tanto del ángulo de observación como del de iluminación.

Tabla 4-4 Ángulos de observación e iluminación para las tres fechas.

	06/04/2003	17/05/2002	05/07/2002
θ_s	39.6	26.9	25.9
θ_v	15.3	3.1	10.1
θ_s	147.3	140.9	130.3
θ_v	114.9	224.3	99.7
θ	27.7	26.7	17.9

En segundo lugar, se ha visto el caso en el que se tienen medidas de irradiancia directa a diferentes longitudes de onda. A partir de ellas se puede obtener el espesor óptico de aerosoles (Vergaz, 2001). Los datos de espesor óptico de aerosoles se han obtenido de nuestra estación de medida en la E.T.S. de Ingenierías Agrarias de Palencia perteneciente a la red AERONET (Holben et al., 1998). La distancia de esta estación y el municipio de Medina de Rioseco, alrededor del cual se han tomado las zonas de estudio, se encuentran separados aproximada 45 km. Dadas las características geográficas de la zona podemos considerar que esta distancia es suficientemente corta como para considerar equivalentes las propiedades de los aerosoles en ambos emplazamientos. A partir de estos datos los parámetros de Angström (1929, 1930) obtenidos se dan en la Tabla 4-5.

Tabla 4-5 Parámetros de Angström.

	06/04/2003	17/05/2002	05/07/2002
α	1.52	1.58	1.72
β	0.030	0.067	0.063
AOT_{550}	0.076	0.171	0.177

En este caso, el modelo 6S calcula la contribución de los aerosoles a partir del espesor óptico de aerosoles a 550 nm y de una distribución de tamaños de aerosoles, para la cual se ha elegido la ley de Junge (Lenoble & Brogniez, 1984; Junge, 1963), definida según la expresión (4-7).

$$n(r) = \frac{dN}{dr} = Cr^{-\nu} \quad (4-7)$$

Esta expresión se evalúa entre 0.01 y 20 μm . El parámetro de Junge ν se define como $\alpha + 3$. En este caso también es de aplicación la ecuación (4-6).

En la tercera de las aproximaciones que se han considerado, se ha utilizado una atmósfera estándar, con un espesor óptico obtenido a partir de medidas de irradiancia directa y una distribución de Junge para las partículas del aerosol.

Por simetría, la luz difundida por la atmósfera, hacia la dirección de observación en la que se encuentra el satélite, es prácticamente equivalente a la luz que podemos medir desde la tierra con un ángulo respecto al sol igual al suplementario del ángulo definido por la posición del sol y del satélite. Más aún, dado que es posible simular esta medida mediante el modelo 6S, se puede contrastar nuestra hipótesis sobre la corrección atmosférica que estamos aplicando si se cuenta con medidas desde tierra realizadas con dicho ángulo. Podremos además hacer uso de uno de los parámetros utilizados en la corrección atmosférica para ajustar lo mejor posible la señal medida con la simulada por 6S. El parámetro que hemos utilizado para realizar este ajuste es el índice de refracción real, considerando la parte imaginaria igual a cero. Con este procedimiento no se pretende encontrar el índice de refracción que realmente puedan tener las partículas de la atmósfera, sino únicamente reproducir lo más fielmente posible la perturbación de la atmósfera sobre la señal que mide el satélite.

Basándonos en la geometría esférica, el ángulo entre el sol y el satélite lo podemos calcular a partir de la expresión (4-8). Los resultados se muestran en la Tabla 4-4.

$$\cos \Theta = \cos \theta_v \cos \theta_s + \text{sen} \theta_v \text{sen} \theta_s \cos(\phi_v - \phi_s) \quad (4-8)$$

Al igual que en el caso del cálculo del espesor óptico de aerosoles, se han utilizado datos de la estación de AERONET situada en Palencia, utilizando en este caso las llamadas medidas en el plano principal, es decir, la serie efectuada en el plano que contiene tanto la normal a la superficie de terrestre como la dirección del sol, dejando constante el ángulo azimutal y midiendo a diferentes ángulos de inclinación cenital del instrumento.

Tabla 4-6 Índices de refracción obtenidos para cada banda, junto con los promedios que se han aplicado en la corrección atmosférica de cada imagen.

	06/04/2003	14/05/2003	05/07/2003
440	1.36	1.51	1.49
670	1.38	1.45	1.49
870	1.40	1.45	1.48
1020	1.44	1.46	1.50
Promedio	1.40	1.47	1.49

Para obtener este índice de refracción se ha utilizado la subrutina OS, *Ordres Successifs de diffusion* (Vermote., 1997), del modelo 6S, modificado a fin de obtener la radiancia descendente. Este código se ha ejecutado para las cuatro bandas utilizando el parámetro de Ångström calculado para cada uno de los días en los que se han tomado las imágenes y repitiendo para valores de índice de refracción entre 1.25 y 1.60, con un paso de 0.01. Los valores del índice de refracción así obtenido se muestran en la Tabla

4-6. Para realizar la corrección en cada uno de los días se ha utilizado el promedio de los valores obtenidos para cada banda aplicando la ecuación (4-6).

Se ha considerado aún una cuarta aproximación en la corrección atmosférica en la que además de hacer uso de la medida del espesor óptico y del índice de refracción que se ha determinado, se ha utilizado la expresión (4-3) para relacionar la reflectancia medida en el exterior de la atmósfera, ρ^* , y la reflectancia medida sobre la superficie terrestre, ρ . De cara a tener una estimación de $\langle \rho \rangle$ se ha supuesto que la perturbación producida por el entorno para un cierto píxel i , $\langle \rho_i \rangle$, sea igual para cualquier otro píxel j de la imagen, $\langle \rho_j \rangle$. En este caso se ha de cumplir que $\langle \rho_i \rangle$ sea igual al promedio de las reflectancias del conjunto de los píxeles de la imagen, $\bar{\rho}$.

En la Figura 4-5 se muestra un ejemplo de las cuatro correcciones atmosféricas descritas aplicadas a un mismo punto, el primero de los analizados en la cuarta zona de estudio, junto a la reflectancia a nivel de satélite sin corrección.

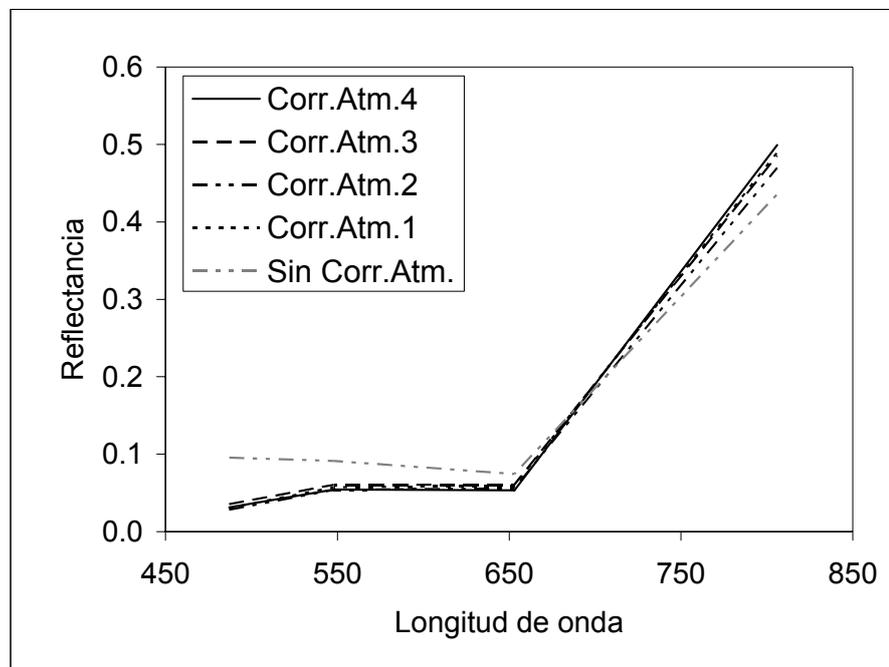


Figura 4-5 Espectros de reflectancia del primer punto analizado de la cuarta zona de estudio, tras aplicar las cuatro correcciones atmosféricas.

4.4 Errores de las correcciones atmosféricas.

A partir de la expresión (4-3) y de los valores de la reflectancia atmosférica, la transmitancia total atmosférica y del albedo esférico obtenidos mediante el modelo 6S, es posible calcular el error que en promedio se comete en las dos primeras aproximaciones respecto de la tercera. Sin prácticamente variaciones entre los tres días, se puede decir que la diferencia de reflectancia entre la primera y la tercera de las aproximaciones es de 0.005, 0.010, 0.012 y 0.024, respectivamente para los cuatro canales. Por su parte, entre la segunda y la tercera aproximación, las diferencias son de 0.007, 0.083, 0.017 y 0.037 respectivamente. Se ve claramente que la diferencia aumenta de la primera a la segunda corrección.

Para analizar la variación que supone asumir la homogeneidad en el suelo, como sucede en caso de considerar la expresión (4-6), respecto del caso heterogéneo, en el que se considera la expresión (4-3), podemos partir de las diferencias entre las reflectancias de dos píxeles, i y j , de la imagen. Partiendo del caso homogéneo esta diferencia entre reflectancias será:

$$\Delta\rho_{ij}^* = \rho_i^* - \rho_j^* = t_g(\theta_S, \theta_V) T(\theta_S) T(\theta_V) (\rho_i' - \rho_j') \quad (4-9)$$

donde

$$\rho' = \frac{\rho}{1 - S\rho} \quad (4-10)$$

Teniendo en cuenta los valores que toman S y ρ en los diferentes canales de medida, vemos que $(1 - S\rho)^{-1}$ tendrá valores entorno a 1.005 en el canal de 487 nm y entorno a 1.015 en el de 806 nm. Así que suponer la simplificación de $\rho' = \rho$ no supone más que variaciones relativas sobre la reflectancia del orden del 1%. Sin embargo esta simplificación nos ayuda en los cálculos que vamos a realizar. Asumiendo esta simplificación, podemos decir que la expresión (4-9) se reduce a:

$$\Delta\rho_{ij}^* = t_g(\theta_S, \theta_V) T(\theta_S) T(\theta_V) \Delta\rho_{ij} \quad (4-11)$$

En el caso de considerar un suelo heterogéneo, la diferencia entre la reflectancia de dos píxeles distintos será:

$$\Delta\rho_{ij}^* = \rho_i^* - \rho_j^* = t_g(\theta_S, \theta_V) T(\theta_S) e^{-\tau/\mu_V} (\rho_i' - \rho_j') \quad (4-12)$$

En este caso:

$$\rho' = \frac{\rho}{1 - S \langle \rho \rangle} \quad (4-13)$$

Si suponemos también otra simplificación sobre $(1 - S \langle \rho \rangle)^{-1}$ obtenemos la expresión:

$$\Delta\rho_{ij}^* = t_g(\theta_S, \theta_V) T(\theta_S) e^{-\tau/\mu_V} \Delta\rho_{ij} \quad (4-14)$$

Dado que $\Delta\rho_{ij}^*$ se refiere a la reflectancia a nivel de satélite, este término es el mismo tanto en la expresión (4-11) como en la (4-14) y, por lo tanto, igualando estas expresiones obtenemos:

$$\Delta\rho_{ij}^{Het} = \frac{T(\theta_S)}{e^{-\tau/\mu_V}} \Delta\rho_{ij}^{Hom} \quad (4-15)$$

Por otro lado, de las expresiones (4-3) y (4-6) vemos que en el caso de que la reflectancia de un píxel sea igual a $\langle \rho \rangle$, se obtienen idénticos resultados al considerar un suelo homogéneo o heterogéneo.

De todo esto se puede concluir que el efecto de considerar la expresión (4-3) o la (4-6) para realizar la corrección atmosférica es un ensanchamiento de los histogramas de las imágenes resultantes, pero centrados en los mismos valores de reflectancia. Por lo tanto los errores producidos al considerar el caso homogéneo respecto del caso heterogéneo, serán tanto mayores cuanto más diferente sea la reflectancia del píxel considerado respecto del promedio de reflectancia de la imagen.

Tabla 4-7 Valores medios y desviaciones estándar de las reflectancias de las tres imágenes a partir de la corrección atmosférica realizada en tercer lugar.

C3	06/04/2003		14/05/2003		05/07/2003	
Banda	Media	Desv.Estand.	Media	Desv.Estand.	Media	Desv.Estand.
B1	0.073115	0.034132	0.049803	0.025243	0.093841	0.029879
B2	0.124566	0.048499	0.08755	0.035801	0.145654	0.039936
B3	0.154485	0.077955	0.10891	0.056583	0.21401	0.062432
B4	0.446517	0.096371	0.352606	0.071413	0.364093	0.061228

Tabla 4-8 Valores medios y desviaciones estándar de las reflectancias de las tres imágenes a partir de la corrección atmosférica realizada en cuarto lugar.

C4	06/04/2003		14/05/2003		05/07/2003	
Banda	Media	Desv.Estand.	Media	Desv.Estand.	Media	Desv.Estand.
B1	0.08088	0.041765	0.055019	0.032434	0.102865	0.038181
B2	0.133549	0.05674	0.093297	0.043541	0.154286	0.048409
B3	0.161411	0.086778	0.112952	0.065017	0.220621	0.07136
B4	0.458734	0.104144	0.359004	0.078915	0.369667	0.067361

Tabla 4-9 Cociente entre la transmitancia total ascendente y la transmitancia directa ascendente.

	06/04/2003	14/05/2003	05/07/2003
B1	1.208	1.269	1.304
B2	1.154	1.203	1.225
B3	1.101	1.136	1.147
B4	1.065	1.090	1.094

A partir de las Tablas 4-7 y 4-8 y de la Figura 4-6 podemos ver cómo existen ligeras diferencias en los valores medios de la reflectancias según utilizamos el tercero o el cuarto de los procedimientos propuestos. Esto se debe a la distorsión que introduce sobre (4-15) la simplificación que realizamos según la expresión (4-10), la cual depende de los valores de la reflectancia. Y esto va a afectar ligeramente a las diferencias entre los histogramas de las imágenes.

Si además tenemos en cuenta la Tabla 4-9 donde se presentan los cocientes entre la transmitancia total ascendente y la transmitancia directa ascendente, calculado para cada uno de los canales de las tres imágenes, vemos que la expresión (4-15) se aplica a la desviación estándar mostrada en las Tablas 4-7 y 4-8 con un error menor en torno al 1%.

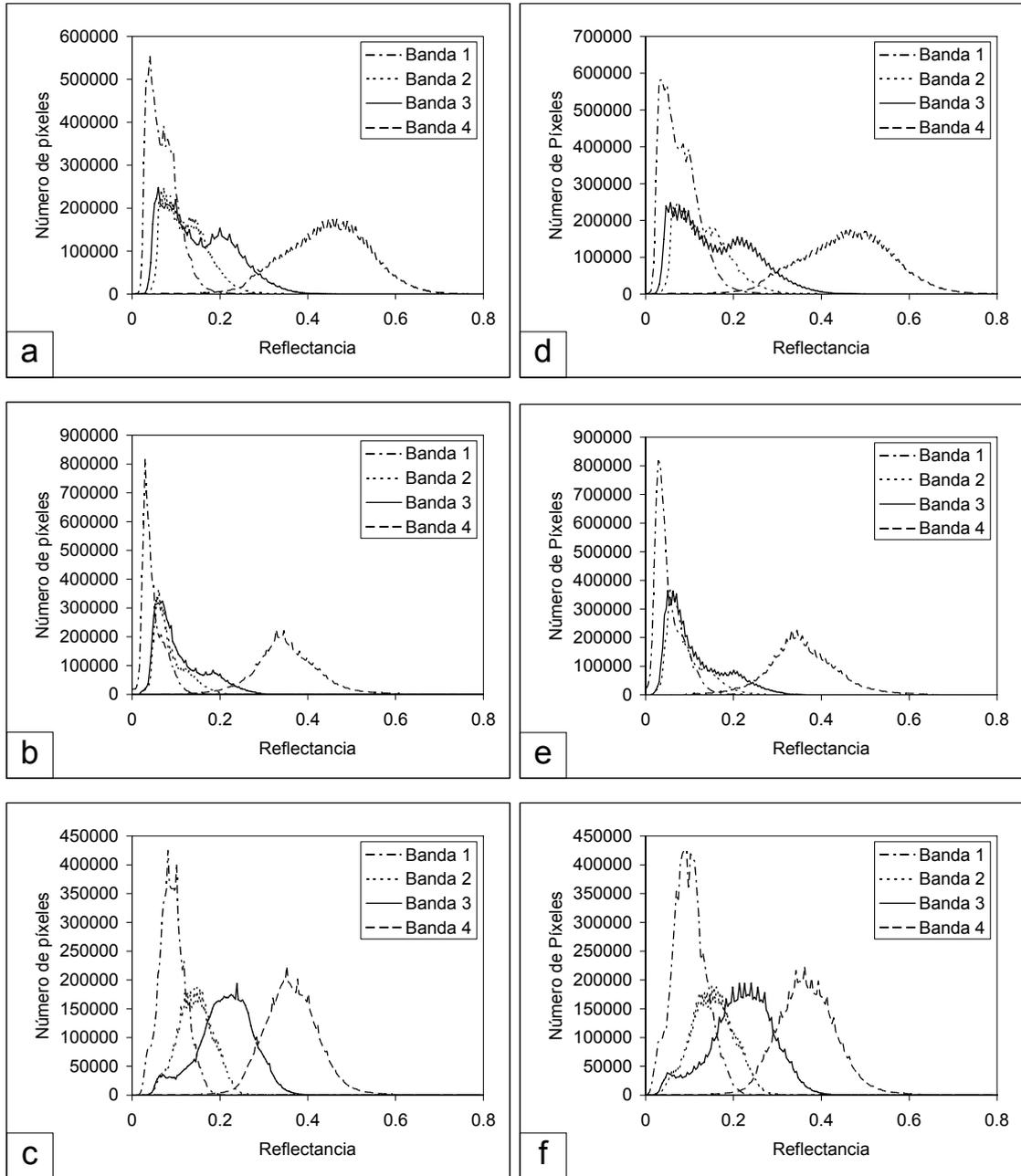


Figura 4-6 Histogramas de las imágenes de QuickBird II, corregidos según el tercer (a,b,c) y el cuarto (d,e,f) de los procedimientos propuestos.

Tabla 4-10 Promedio y máximo de las diferencias relativas entre las diferentes bandas, para las distintas correcciones atmosféricas, en la imagen de 6 de abril.

Max. diferencias relativas entre correcciones atmosféricas	Banda				Promedio de las diferencias relativas entre correcciones atmosféricas	Banda			
	B1	B2	B3	B4		B1	B2	B3	B4
C4 y C1	95%	28%	21%	14%	C4 y C1	51%	27%	20%	13%
C4 y C2	95%	26%	19%	14%	C4 y C2	50%	24%	15%	12%
C4 y C3	-90%	-38%	-43%	-2%	C4 y C3	-16%	-8%	-9%	+0%

Tabla 4-11 Promedio y máximo de las diferencias relativas entre las diferentes bandas, para las distintas correcciones atmosféricas, en la imagen de 14 de mayo.

Max. Diferencias relativas entre Correcciones atmosféricas	B1	B2	B3	B4	Promedio de las Diferencias relativas entre Correcciones atmosféricas	B1	B2	B3	B4
C4 y C1	-90%	-25%	-17%	+5%	C4 y C1	-21%	-6%	-3%	3%
C4 y C2	-95%	-32%	-29%	+4%	C4 y C2	-23%	-10%	-10%	2%
C4 y C3	-173%	-52%	-42%	-5%	C4 y C3	-56%	-23%	-19%	-1%

En las tablas 4-10 y 4-11 se pone de manifiesto la gran diferencia para el visible entre la corrección C4 y el resto de aproximaciones, haciéndose máximas estas diferencias para la banda 1. Si bien las diferencias al considerar las correcciones C3 y C4 son muy pequeñas entre los valores de las bandas del visible, para valores altos de *NDVI* esta diferencia crece cuando los valores de las bandas disminuyen, llegando a diferencias relativas de hasta el 42% en la tercera banda para el punto z16p1 en la segunda imagen, donde se alcanza un valor de *NDVI* = 0.84, muy próximo al valor máximo de *NDVI* medido (0.849).

4.5 Muestreo del LAI.

En esta campaña las medidas de *LAI* se han llevado a cabo con el LAI-2000 fabricado por la compañía LI-COR. Este aparato se describe con más detenimiento en el apartado 3.9. La medida óptima con este instrumento se realiza en condiciones de iluminación totalmente difusa. Estas condiciones se pueden tener por ejemplo con cielos completamente cubiertos. Sin embargo los muestreos se han realizado en fechas próximas a la toma de las imágenes con el satélite QuickBird II, imágenes tomadas obviamente con cielos despejados. Por lo tanto en las fechas de los muestreos las condiciones de nubosidad no podían ser las óptimas. Como alternativa las medidas se han realizado por la mañana desde las 5h UTM hasta las 9h UTM, de manera que el sol estuviera siempre suficientemente bajo como para poder realizar las medidas dando la espalda al sol, de tal forma que la sombra proyectada por el operador cubriera el sensor y la mayor parte de la vegetación que éste pudiera ver.

En cada una de las 16 zonas de estudio se han realizado medidas con el LAI-2000 en al menos tres puntos diferentes, obteniéndose un total de 51 puntos de control. Estos puntos se han seleccionado buscando diferencias claras de *LAI* en los cultivos. Para cada medida de *LAI* se han tomado dos medidas sobre la cubierta vegetal y otras 10 medidas bajo ella.

La localización de los puntos se ha realizado mediante GPS. Sin aplicar ningún tipo de corrección y con ocho satélites a la vista, la precisión de este sistema es aproximadamente de 15 m. Por otro lado, como se ha visto en el apartado 4.1, el error de las coordenadas de las imágenes de QuickBird II es en el mejor de los casos de más de 20 m. Para solventar este problema se han tomado puntos de control en lugares fácilmente reconocibles en la imagen a fin de poder corregir tanto los desplazamientos debidos al GPS como los debidos a la imagen. Es esperable que los errores cometidos de esta manera no sobrepasen los 5 m. Los puntos de control se han tomado en la misma

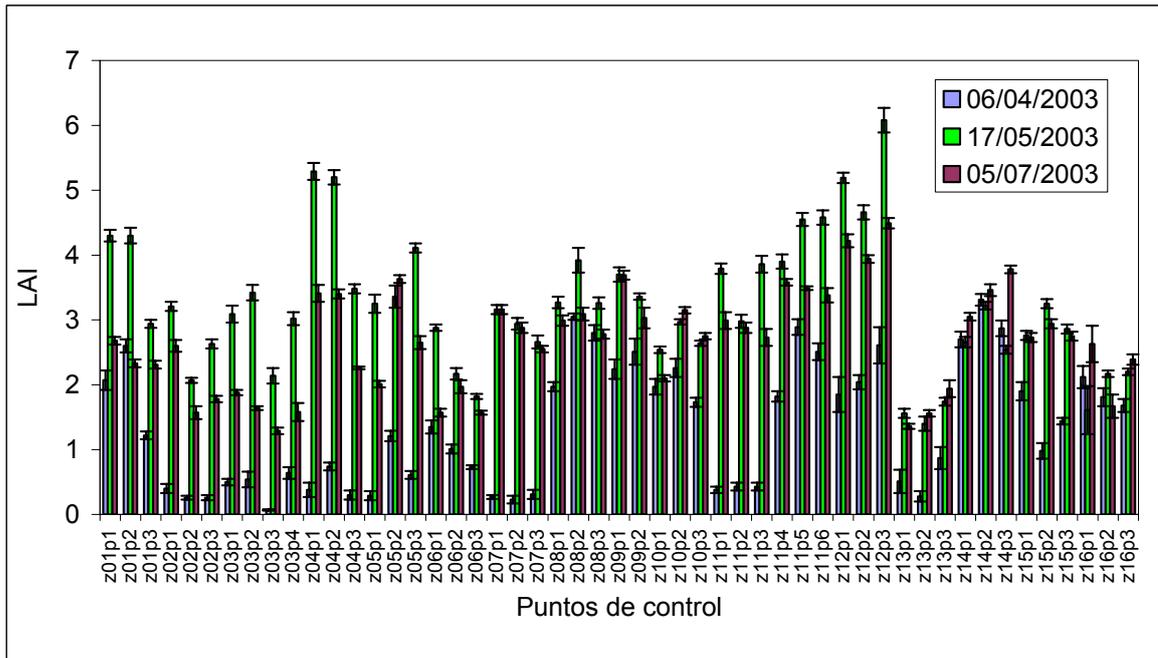


Figura 4-7 Medidas de LAI realizadas el año 2003.

posición en las tres imágenes, marcados sobre el terreno. Podremos así también analizar la tendencia de los parámetros obtenidos con el LAI-2000 a lo largo del crecimiento de los cultivos.

En la Figura 4-7 se muestran todas las medidas de LAI disponibles en las tres fechas. En general, se puede decir que las medidas realizadas el día 17 de mayo dan valores muy superiores a las realizadas el 6 de abril, con las excepciones de las parcelas 14 y 16 donde, si bien el desarrollo de la planta en la primera fecha era ya notable, no lo es más que en otros casos, pero por el contrario en estas zonas el LAI medido en la segunda fecha es de los más bajos registrados. Este comportamiento podría deberse a diferentes causas, como un terreno pobre en nutrientes. Sin embargo esto se sale fuera de los objetivos de este estudio.

Si bien en general se puede ver en las medidas del 5 de julio una clara reducción del LAI, hay casos en los que se comprueba que el LAI medido en la tercera fecha es algo superior. Estas discrepancias se deben a las diferencias de los ciclos de crecimiento de los cultivos de cereal estudiados. Por ejemplo, en el caso de la cebada de ciclo corto, puede no haberse llegado a un desarrollo pleno de la planta en la fecha en la que se ha tomado la segunda imagen. En cualquier caso, la reducción de LAI observada se debe a la reducción del área de la hoja cuando ésta se seca, a causa de la pérdida de agua.

El rango de valores de LAI obtenido en las tres fechas seleccionadas es suficientemente amplio como para contrastar las metodologías de inversión desarrollada, siendo el valor mínimo observado de 0.1 en la parcela 3 y el máximo de 6.1 en la parcela 13. Por fechas, los valores medidos van de 0.1 a 3.3 el día 6 de abril, de 1.4 a 6.1 el 17 de mayo y de 1.3 a 4.5 el 5 de julio.

4.6 Relación entre LAI y el NDVI.

Las mismas tendencias que se encontraban en las medidas del año 2002, sobre las relaciones entre el *LAI* medido y el *NDVI* calculado a partir de la reflectancia obtenida de las medidas del QuickBird II, se repiten en cada uno de los puntos observados en la campaña 2003. Así, el caso más frecuente entre los datos disponibles es equivalente al de la Figura 4-8 (a), en el que se observa un crecimiento conjunto del *NDVI* y del *LAI* a lo largo del tiempo hasta que al secarse la hoja el *NDVI* disminuye mucho más drásticamente que el *LAI*. Sin embargo se han observado variaciones de este comportamiento debidas principalmente a las diferencias entre los estados fenológicos en el que se encontraba cada uno de los cultivos en el momento de tomar las imágenes, como puede verse en la Figura 4-8.

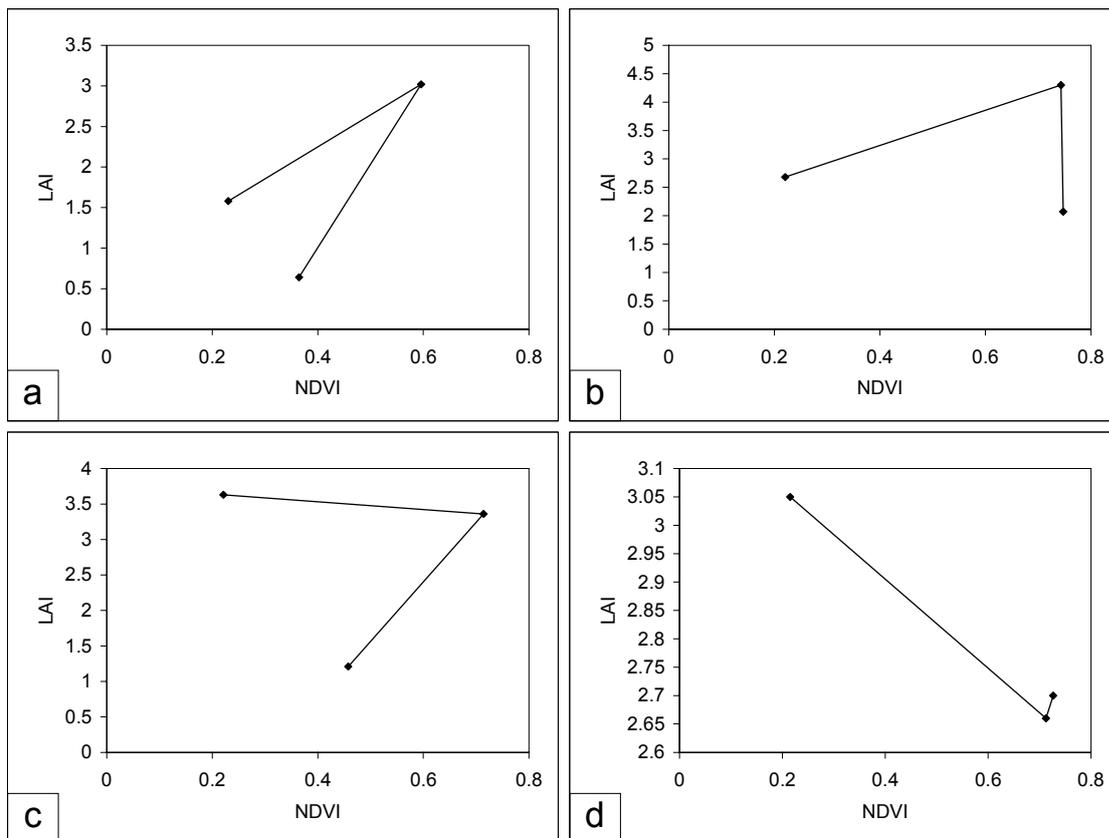


Figura 4-8 Diferentes comportamientos de las relaciones entre el *NDVI* y el *LAI*.

En la Figura 4-9 vemos todos los datos de *LAI* y de *NDVI* de forma conjunta para todos los puntos de control. En el caso de las Figuras 4-9 (a) y (b) se muestran por separado los datos obtenidos los días 6 de abril y 17 de mayo de 2003, mientras que en la Figura 4-9 (c) tenemos los mismos datos de forma conjunta. En la Figura 4-9 (d) se incorporan los datos obtenidos el día 5 de julio de 2003. Al incluir los datos en los que la planta está ya seca se rompe con la relación típica entre *LAI* y el *NDVI*. Si bien el expuesto aquí es un caso extremo, este tipo de tendencia se podrá encontrar al estudiar plantas enfermas, por ejemplo en cultivos donde la clorosis sea importante. En cualquier caso y dada la imposibilidad de tratar la reflectancia de las hojas secas mediante PROSPECT, tal como se verá en el apartado 5.2.1, no se tomarán en lo sucesivo en cuenta los datos de esta tercera fecha.

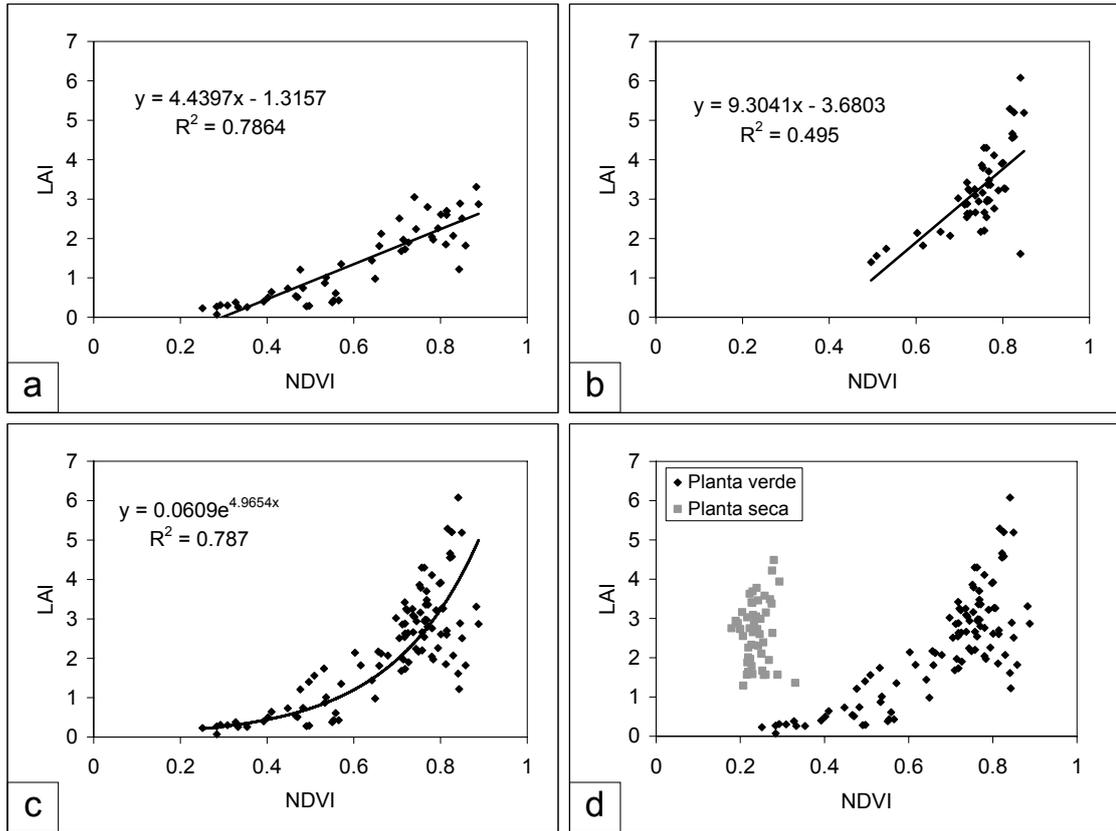


Figura 4-9 Relación el LAI medido y el NDVI obtenido a partir de los datos de QuickBird II.

Tal como se puede ver en la Figura 4-9 (a), para valores de *LAI* inferiores a 3 es aceptable asumir una relación lineal entre *LAI* y *NDVI* (Zhangshi & Williams, 1997), mientras que para valores superiores esta suposición ya no es aceptable, Figura 4-9 (b), pues se comienza a observar claramente el comportamiento asintótico que caracteriza la relación *LAI* - *NDVI* (Carlson & Ripley, 1990) y que es fruto de la propia definición del *NDVI*. Para poder establecer una relación sencilla aplicable a valores de *LAI* de hasta 6 ó 7, diversos autores establecen relaciones exponenciales (Richardson et al., 1992; Lu et al., 2004) del tipo mostrado en la Figura 4-9 (c) y en la Ecuación (4-16).

$$LAI = x_1 e^{x_2 NDVI} \quad (4-16)$$

Otros autores optan por expresiones exponenciales modificadas (Aparicio et al., 2000), tal como se muestra en la ecuación (4-17).

$$LAI = x_1 e^{x_2 NDVI} + x_3 \quad (4-17)$$

Esta última expresión es más indicada para valores pequeños de *LAI*, pero ello a costa de introducir una nueva constante x_3 . Sin embargo, esta constante se puede expresar en función de las otras dos y de la reflectancia del suelo en las longitudes de onda del rojo e infrarrojo que utilizamos para calcular el *NDVI*, ya que para valores cero de *LAI*, la expresión (4-17) resulta:

$$x_3 = -x_1 e^{x_2 \frac{\rho_{S,IR} - \rho_{S,R}}{\rho_{S,IR} + \rho_{S,R}}} \quad (4-18)$$

4.7 Distribución de ángulos de inclinación foliar.

Otro de los parámetros obtenidos mediante el LAI-2000 es el ángulo medio de inclinación foliar. Este parámetro es de los más importantes según el análisis realizado de sensibilidad del modelo SAILH.

Los valores obtenidos para las tres fechas se muestran en la Figura 4-10. A diferencia del caso del *LAI*, aquí destaca la gran homogeneidad encontrada para este parámetro. Es destacable cómo viendo los valores tan diferentes obtenidos de *LAI*, el ángulo de inclinación foliar se mantiene prácticamente sin variaciones no solo a lo largo de las tres fechas, sino entre las distintas parcelas, no observándose diferencias significativas entre los cultivos de cebada y los de trigo. Las mayores discrepancias se dan en las medidas de abril, donde debido al pequeño tamaño de la planta, se pueden esperar unos errores mayores, lo cual también se comprueba en la gráfica.

El valor del ángulo medio de inclinación foliar, promediando todos los datos medidos en parcelas de cebada entre las tres series realizadas, es de 61° con una desviación estándar de 9° , lo cual equivale a un valor de 0.8 del parámetro χ de Campbell. En la medida realizada con el LAI-2000 en la campaña del 2002 el valor obtenido es de $55^\circ \pm 5^\circ$, lo cual podría considerarse dentro del margen de error.

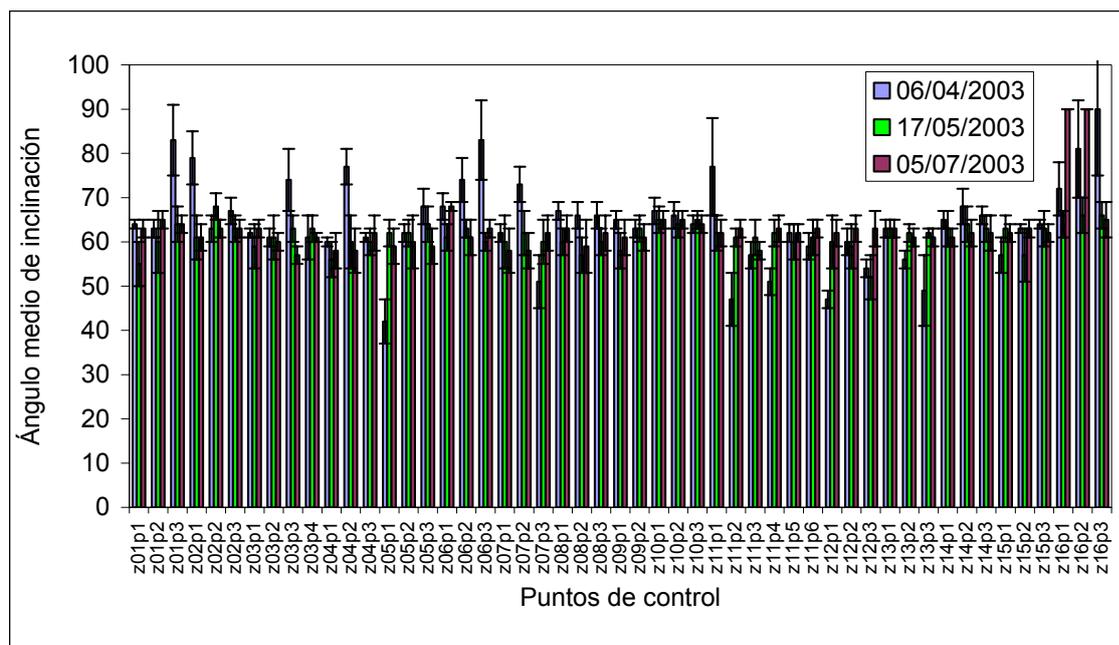


Figura 4-10 Medidas del ángulo medio de inclinación realizadas el año 2003.

4.8 Medidas de reflectancia y transmitancia foliar.

En la campaña del 2003 también se han tomado medidas de transmitancia y reflectancia foliar. Sin embargo, en este caso se ha podido contar con la esfera integrante LI-1800-12 (Li-Cor, 1991) comercializada por la casa Li-Cor. Una fotografía de esta esfera se muestra en la figura Figura 4-11. Como sensor se ha utilizado el espectrógrafo USB-2000 de la compañía Ocean Optics.

Tabla 4-12 Datos geométricos de la esfera LI-1800-12

	Area (mm ²)	Fracción de área	
Esfera	16650 mm ²		
Puerto 0	39.0 mm ²	f ₀	0.0023
Puerto 1	163.3 mm ²	f ₁	0.0098
Puerto 2	203.0 mm ²	f ₂	0.0122
Puerto 3	203.0 mm ²	f ₃	0.0122
Puerto 4	163.3 mm ²	f ₄	0.0098

Esta esfera tiene un diámetro interior de 72.8 mm. Este reducido tamaño permite obtener en la salida señal suficientemente alta sin necesidad de una iluminación muy potente. Esto junto a un filtro que ilumina la luz infrarroja a partir de 1600 nm, evita alterar los tejidos de las hojas sobre las que se realizan las medidas.

La esfera cuenta con cinco puertos para situar tanto la muestra que se pretende medir como el patrón de referencia, la lámpara y una fibra óptica para llevar la luz hasta el detector. El resto de puertos que quedan libres, se cierran con un tapón blanco o negro, según proceda en cada una de las medidas a realizar. El objetivo de utilizar estos cinco puertos es que ello nos permite realizar todas las medidas con los puertos cubiertos por elementos de la misma reflectancia, consiguiéndose que la reflectancia promedio de la pared de la esfera sea igual en todas las medidas, de forma que las expresiones que se obtienen para determinar tanto la reflectancia como la transmitancia se simplifiquen enormemente.

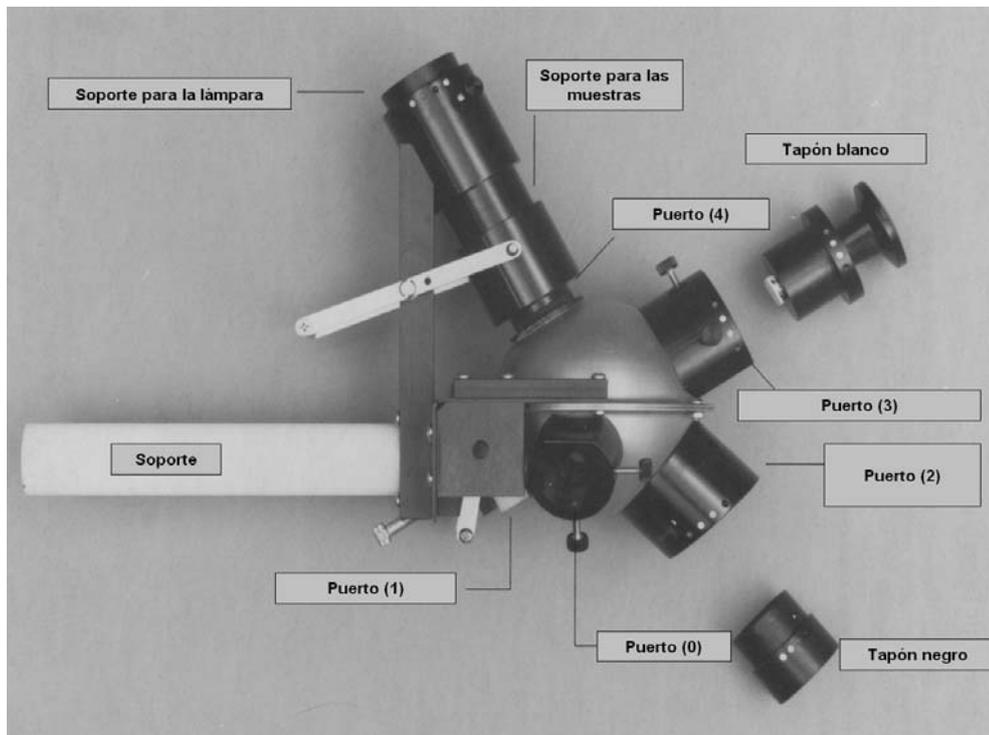


Figura 4-11 Esfera integradora LI-1800-18 utilizada en las medidas de la campaña 2003.

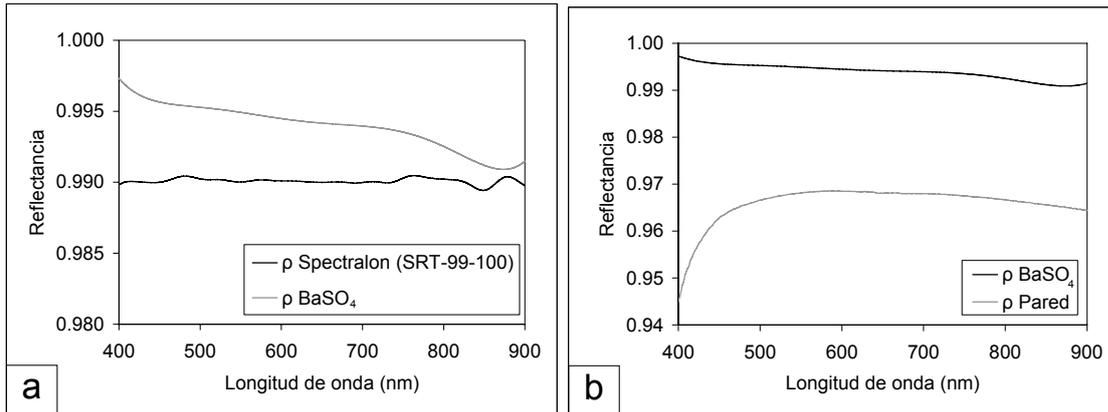


Figura 4-12 Reflectancia del patrón de sulfato de bario prensado en comparación con la reflectancia del Spectralon (a). Reflectancia de la pared de la esfera LI-1800-12 (b).

Las fracciones de superficie ocupadas por los puertos se dan en la Tabla 4-12 con un error del 3%. En total la superficie utilizada por los puertos no supera el 4.6% de superficie de la esfera. El interior de esta esfera también está recubierto de sulfato de bario.

La fuente de iluminación utilizada es una lámpara halógena de 6 V y 10 W, con una temperatura de color de 3100° K, situada en un tubo que se acopla a los puertos 2, 3 y 4 de la esfera. Una lente al final del tubo colima el haz. Además se cuenta con un filtro que elimina la radiación infrarroja por encima de los 1660 nm, con el objetivo de evitar que la radiación pueda quemar la hoja.

Junto a la esfera se tienen 2 patrones de sulfato de bario prensado, un tapón negro, que funciona como trampa para la luz, y un tapón cuya superficie encaja perfectamente en los puertos 2 y 3 y está recubierta de sulfato de bario. Se cuenta también con un tapón adicional que permite cerrar completamente la esfera cuando se retira la lámpara.

Para obtener la reflectancia del patrón de BaSO₄ se comparó con un patrón calibrado de Spectralon (SRT-99-100) de reflectancia conocida (Figura 4-12). El error estimado para la reflectancia del patrón de BaSO₄ es de 0.5% entre 400 y 800 nm, y del 1% de 800 a 900 nm.

También la reflectancia de la pared de la esfera ha sido calculada mediante la comparación de dos medidas, una de ellas realizada tras retirar una porción de la pared de la esfera integrante sobre la que no incide directamente la luz (Benford, 1920; Goebel, 1967). La esfera de Li-Cor permite esta medida gracias a que el tapón blanco tiene el mismo recubrimiento que el resto de la pared de la esfera. Las medidas realizadas son las descritas en la Tabla 4-13.

Tabla 4-13 Protocolo de medidas para el cálculo de la reflectancia de la pared

	Puerto 1	Puerto 2	Puerto 3	Puerto 4
Con Tapón	Patrón 1	Luz	Tapón Blanco	Patrón 2
Sin Tapón	Patrón 1	Luz	Tapón negro	Patrón 2

$$\Phi_{ConTapon} = \frac{f_v f_d \rho_b \rho_p \Phi_0}{1 - (1 - f_0 - f_1 - f_2 - f_4) \rho_p - (f_1 + f_4) \rho_b} \quad (4-19)$$

$$\Phi_{SinTapon} = \frac{f_v f_d \rho_b \rho_p \Phi_0}{1 - (1 - f_0 - f_1 - f_2 - f_3 - f_4) \rho_p - (f_1 + f_4) \rho_b} \quad (4-20)$$

Haciendo el cociente de estas dos medidas obtenemos la expresión (4-21) necesaria para calcular la reflectancia de la pared. El resultado del cálculo se muestra en la Figura 4-12 (b).

$$\rho_p = \frac{\left(\frac{\Phi_{ConTapon}}{\Phi_{SinTapon}} - 1 \right) (1 - (f_1 + f_4) \rho_b)}{\frac{\Phi_{ConTapon}}{\Phi_{SinTapon}} (1 - f_0 - f_1 - f_2 - f_4) - (1 - f_0 - f_1 - f_2 - f_3 - f_4)} \quad (4-21)$$

4.8.1 Medida de hojas grandes.

La esfera LI-1800-12 nos permite hacer las medidas necesarias para calcular la reflectancia y la transmitancia de las hojas, siempre que éstas tengan un tamaño suficiente como para cubrir el puerto destinado a situar la hoja. En este caso hay diferentes ecuaciones propuestas por diferentes autores que vamos a analizar.

En primer lugar consideraremos las ecuaciones más simples, propuestas por diferentes autores (Hanssen 1989, Li-Cor, 1991) para el cálculo de la reflectancia y de la transmitancia. Básicamente el protocolo propuesto para obtener la reflectancia se basa en la comparación de dos medidas, una en la cual la luz incide directamente sobre la muestra y otra en la que la luz incide directamente sobre un patrón de reflectancia conocida. La transmitancia será el cociente entre la medida en la que la esfera es iluminada por la luz transmitida por la muestra y la reflejada por el patrón. En todos los casos se busca que la reflectancia media de la pared de la esfera, definida por todos los elementos que se encuentran en la pared, no se modifique. En nuestro caso, necesitamos una cuarta medida para tener en cuenta la corriente oscura de nuestro sensor. Estas medidas se describen en la Tabla 4-14. Se muestra un esquema de la realización de cada una de las medidas en la Figura 4-13.

Dado que la reflectancia del anverso y el reverso de las hojas pueden variar significativamente, se ha tomado la precaución de girar la hoja en la medida *TSP* respecto de la posición en la que se coloca en *RSS* y *RTS*, de forma que la luz de la

Tabla 4-14 Protocolo básico para la medida de reflectancia y transmitancia de hojas grandes.

	Puerto 1	Puerto 2	Puerto 3	Puerto 4
RSS	Patrón 1	Luz	Tapón Blanco	hoja + tapón negro
RTS	Patrón 1	Tapón Blanco	Luz	hoja + tapón negro
TSP	Patrón 1	Tapón Blanco	Tapón negro	hoja + luz
DRK	Patrón 1	Tapón Blanco	Tapón negro	hoja + tapón

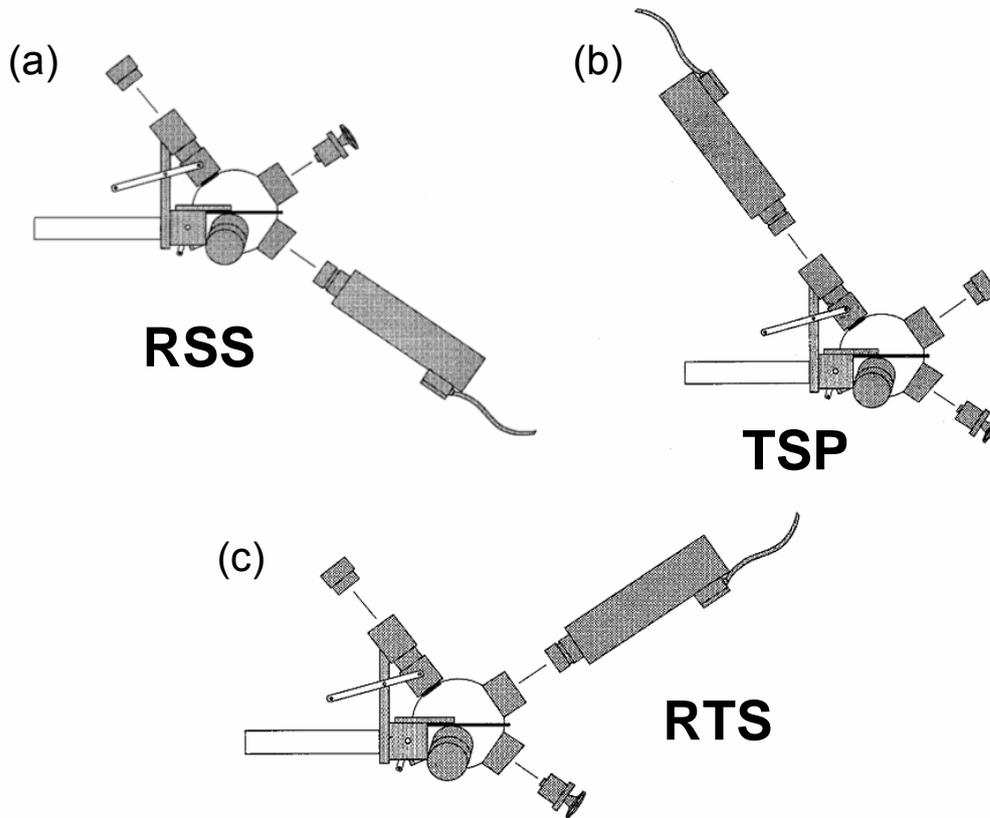


Figura 4-13 Medidas en las configuraciones *RSS* (a), *TSP* (b) y *RTS* (c), realizadas con la esfera integrante LI-1800-12.

lámpara incida siempre en el anverso de la hoja. Esto ocasiona una variación de la reflectancia promedio de la superficie de la esfera, pero ésta es suficientemente pequeña para que sea despreciada.

El flujo de luz que llegaría al detector en cada una de las configuraciones, suponiendo que la reflectancia tanto del tapón negro, del puerto del sensor, como de la lámpara es cero, sería:

$$\Phi_{RSS} = \frac{f_v f_d \rho_m \rho_p \Phi_0}{1 - (1 - f_0 - f_1 - f_2 - f_4) \rho_p - f_1 \rho_b - f_4 \rho_m} \quad (4-22)$$

$$\Phi_{TSP} = \frac{f_v f_d \tau_m \rho_p \Phi_0}{1 - (1 - f_0 - f_1 - f_2 - f_4) \rho_p - f_1 \rho_b - f_4 \rho_m} \quad (4-23)$$

$$\Phi_{RTS} = \frac{f_v f_d \rho_b \rho_p \Phi_0}{1 - (1 - f_0 - f_1 - f_2 - f_4) \rho_p - f_1 \rho_b - f_4 \rho_m} \quad (4-24)$$

Con lo que la reflectancia y la transmitancia serían:

$$\rho_m = \frac{\Phi_{RSS}}{\Phi_{RTS}} \rho_b \quad (4-25)$$

$$\tau_m = \frac{\Phi_{TSP}}{\Phi_{RTS}} \rho_b \quad (4-26)$$

Este desarrollo no cuenta con la posibilidad de que haya luz difundida directamente sobre la pared de la esfera o *Stray Light*. Esto puede ocurrir por ejemplo si hay partículas de polvo sobre la lente colimadora de la fuente de luz, en suspensión en el interior de la esfera o si se produce cualquier tipo de reflexión no deseada en el interior del tubo que contiene la lámpara. Para tener esto en cuenta se propone un segundo juego de ecuaciones (Li-Cor, 1991). Esta medida se describe en la Tabla 4-15.

Tabla 4-15 Ampliación del protocolo para la medida de reflectancia y transmitancia de hojas grandes, considerando la presencia de luz difundida directamente sobre la pared.

	Puerto 1	Puerto 2	Puerto 3	Puerto 4
RSA	Patrón 1	Luz	Tapón Blanco	Porta + tapón negro

Al incorporar esta medida *RSA* en el cálculo de la reflectancia y la transmitancia se utilizan las siguientes expresiones:

$$\rho_m = \frac{\Phi_{RSS} - \Phi_{RSA}}{\Phi_{RTS} - \Phi_{RSA}} \rho_b \quad (4-27)$$

$$\tau_m = \frac{\Phi_{TSP}}{\Phi_{RTS} - \Phi_{RSA}} \rho_b \quad (4-28)$$

En este caso los flujos que llegarían al sensor son:

$$\Phi_{RSS} = \frac{f_v f_d (f_i \rho_m + f_{SL} \rho_p) \rho_p \Phi_0}{1 - (1 - f_0 - f_1 - f_2 - f_4) \rho_p - f_1 \rho_b - f_4 \rho_m} \quad (4-29)$$

$$\Phi_{TSP} = \frac{f_v f_d f_i \tau_m \rho_p \Phi_0}{1 - (1 - f_0 - f_1 - f_2 - f_4) \rho_p - f_1 \rho_b - f_4 \rho_m} \quad (4-30)$$

$$\Phi_{RTS} = \frac{f_v f_d (f_i \rho_b + f_{SL} \rho_p) \rho_p \Phi_0}{1 - (1 - f_0 - f_1 - f_2 - f_4) \rho_p - f_1 \rho_b - f_4 \rho_m} \quad (4-31)$$

$$\Phi_{RSA} = \frac{f_v f_d f_{SL} \rho_p \rho_p \Phi_0}{1 - (1 - f_0 - f_1 - f_2 - f_4) \rho_p - f_1 \rho_b} \quad (4-32)$$

Donde f_{SL} es la fracción de luz directamente difundida sobre la pared de la esfera y f_i es la fracción de luz incidente sobre la muestra. Estos dos parámetros estarán relacionados mediante la expresión:

$$f_{SL} + f_i = 1 \quad (4-33)$$

Fácilmente se puede ver que al considerar f_{SL} distinto de cero, las expresiones (4-27) y (4-28) son una aproximación de la reflectancia y de la transmitancia según el formalismo que estamos utilizando.

Harron (2000) asumiendo $f_i = 1$ en la expresión (4-30) que da cuenta de Φ_{TSP} , propone un nuevo conjunto de ecuaciones para corregir el cálculo de la reflectancia y de la transmitancia:

$$\rho_m = \frac{\Phi_{RSS} - \Phi_{RSA}}{\Phi_{RTS} - \Phi_{RSA}} \rho_b K_R \quad (4-34)$$

$$K_R = \frac{G_1 f_i + \frac{\rho_m}{\rho_b} f_i \rho_p f_4}{G_1 f_i + f_{SL} \rho_p f_4} \quad (4-35)$$

$$\tau_m = \frac{\Phi_{TSP}}{\Phi_{RTS} - \Phi_{RSA}} \rho_b K_T \quad (4-36)$$

$$K_T = 1 + \frac{f_{SL} \rho_p \rho_m f_4}{G_1 f_i \rho_b} \quad (4-37)$$

donde:

$$G_1 = 1 - \rho_p f_p - \rho_b f_1 \quad (4-38)$$

El término f_p denota la fracción de pared respecto a la esfera completa, por lo que toma un valor de:

$$f_p = 1 - f_0 - f_1 - f_2 - f_4 = 0.966 \quad (4-39)$$

En este cálculo hemos considerado que el tapón blanco siempre está puesto en el puerto 2 ó 3 y, dado que ambos puertos tienen la misma superficie, el resultado sería el mismo.

El cálculo de f_{SL} se puede realizar utilizando las medidas RSA y RTS , propuestas por los protocolos anteriores, pero el cálculo es más sencillo si en vez de RTS , tal como se ha definido en la expresión (4-31), se emplea una medida equivalente en la que se sustituya la muestra por el segundo patrón de sulfato de bario. De esta manera eliminamos el término correspondiente a la reflectancia de la muestra, normalmente desconocida.

$$\frac{\Phi_{RSA}}{\Phi'_{RTS}} = \frac{\frac{f_{SL} \rho_p}{1 - (1 - f_0 - f_1 - f_2 - f_4) \rho_p - f_1 \rho_b}}{f_i \rho_b + f_{SL} \rho_p} \quad (4-40)$$

$$1 - (1 - f_0 - f_1 - f_2 - f_4) \rho_p - (f_1 + f_4) \rho_b$$

$$f_{SL} = \frac{C\rho_b}{\rho_p + C(\rho_b - \rho_p)} \quad (4-41)$$

donde:

$$C = \frac{\Phi_{RSA}}{\Phi_{RTS}} \frac{1 - (1 - f_0 - f_1 - f_2 - f_4)\rho_p - f_1\rho_b}{1 - (1 - f_0 - f_1 - f_2 - f_4)\rho_p - (f_1 + f_4)\rho_b} \quad (4-42)$$

El valor resultante de f_{SL} es aproximadamente 0.0025 y prácticamente constante para todas las longitudes de onda según podemos ver en la Figura 4-14.

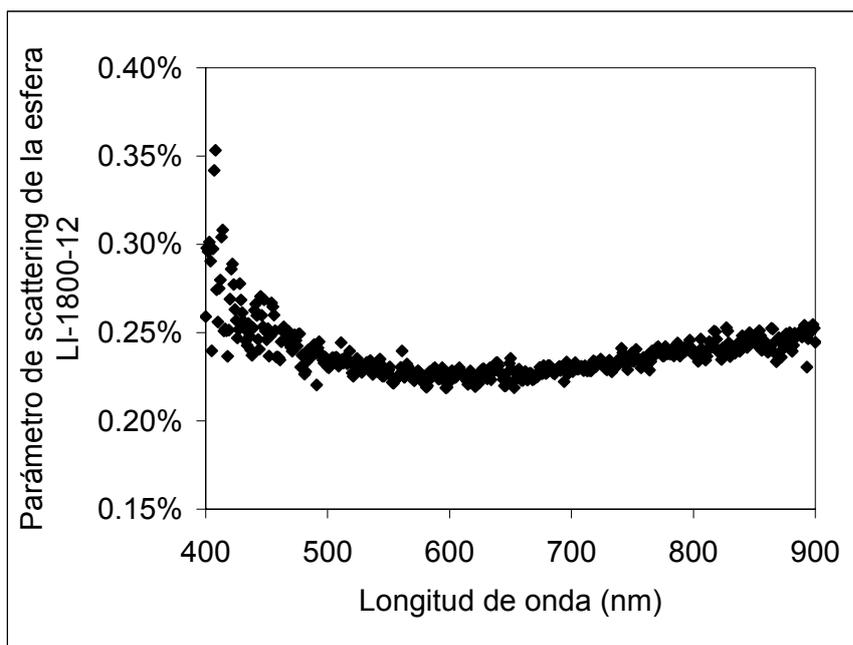


Figura 4-14 Fracción de luz difundida directamente sobre la pared de la esfera.

Este valor es sensiblemente mayor que el dado por J. Harron (2000), el cual asigna a este parámetro un valor de 0.00014. Aun así, como podemos ver en la Figura 4-15, la diferencia entre cualquiera de las aproximaciones anteriores es mínima y, en cualquier caso, mucho menor que el error cometido en el cálculo de la reflectancia del patrón.

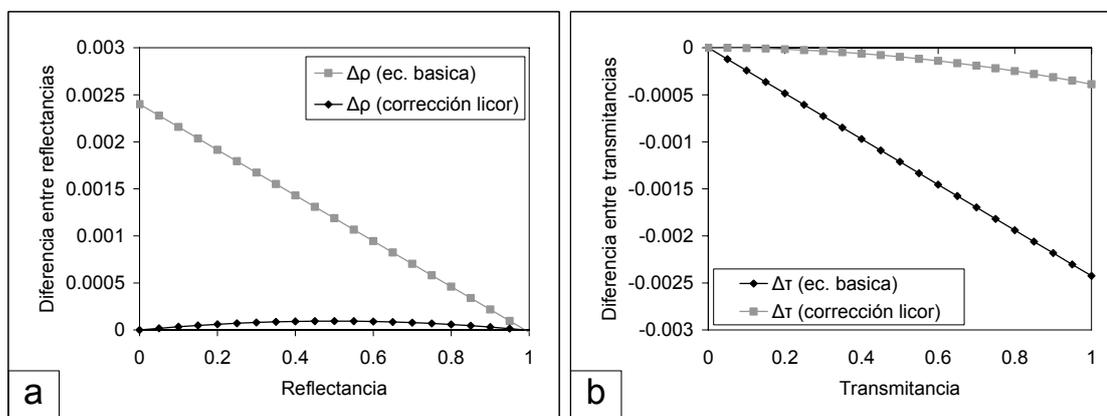


Figura 4-15 Diferencia entre la reflectancia (a) y la transmitancia (b) calculados según el protocolo básico y el protocolo ampliado, respecto del protocolo propuesto por J. Harron.

Estos cálculos se han realizado suponiendo una reflectancia del patrón del 99%, una reflectancia de la pared de la esfera del 96%, un 0.25% de luz difundida sobre la esfera y una reflectancia igual a la transmitancia. Con estos valores, junto con los datos del tamaño de los puertos, se ha calculado el valor de las medidas *RSS*, *RSA*, *RST* y *TSP* y con las propuestas por los distintos protocolos se ha calculado las reflectancias y las transmitancias mostradas. Viendo las diferencias mostradas en la Figura 4-15, no existe ninguna razón por la cual se tengan que complicar los cálculos realizados para determinar la reflectancia y la transmitancia, por tanto se usa el par de ecuaciones (4-27) y (4-28) en el caso de hojas grandes.

4.8.2 Medida de hojas pequeñas.

Debido a que el tamaño de las hojas de cebada es inferior al de los puertos de la esfera integrante, para realizar las medidas de reflectancia y transmitancia no se pueden aplicar los protocolos anteriores, por lo que se ha seguido un protocolo basado en el trabajo de J. Harron (2000), optando por limitar la superficie de hoja expuesta mediante una placa metálica con un orificio circular de 7.05 mm de diámetro, tamaño suficientemente pequeño como para que la hoja sí lo cubra. De esta manera parte de la luz incide sobre la hoja y parte sobre la chapa. La superficie del limitador se ha pintado de negro para, de esta manera, minimizar el efecto del error de la reflectancia de este elemento sobre la reflectancia final de la hoja. Las medidas realizadas con la esfera son las descritas en la Tabla 4-16.

Tabla 4-16 Protocolo para la medida de reflectancia y transmitancia de hojas pequeñas.

	Puerto 1	Puerto 2	Puerto 3	Puerto 4
RSA	Patrón 1	Luz	Tapón Blanco	Limitador + tapón negro
RSS	Patrón 1	Luz	Tapón Blanco	Limitador + hoja + tapón negro
RST	Patrón 1	Luz	Tapón Blanco	Limitador + Patrón 2
TSP	Patrón 1	Tapón Blanco	Tapón negro	Limitador + hoja + luz
DRK	Patrón 1	Tapón Blanco	Tapón negro	Limitador + hoja + tapón

Siguiendo la teoría de la esfera integrante en cada una de estas medidas el flujo que llegará al sensor será:

$$\Phi_{RSA} = \frac{f_v f_d (f_p \rho_p + f_L \rho_L) \rho_p \Phi_0}{1 - (1 - f_0 - f_1 - f_2 - f_4) \rho_p - f_1 \rho_b - f_{Limitador} \rho_L} \quad (4-43)$$

$$\Phi_{RSS} = \frac{f_v f_d (f_p \rho_p + f_m \rho_m + f_L \rho_L) \rho_p \Phi_0}{1 - (1 - f_0 - f_1 - f_2 - f_4) \rho_p - f_1 \rho_b - f_{Limitador} \rho_L - f_{muestra} \rho_m} \quad (4-44)$$

$$\Phi_{RST} = \frac{f_v f_d (f_p \rho_p + f_m \rho_m + f_L \rho_L) \rho_p \Phi_0}{1 - (1 - f_0 - f_1 - f_2 - f_4) \rho_p - f_1 \rho_b - f_{Limitador} \rho_L - f_{muestra} \rho_m} \quad (4-45)$$

$$\Phi_{TSP} = \frac{f_v f_d (f_p \rho_p + f_m \rho_m + f_L \rho_L) \rho_p \Phi_0}{1 - (1 - f_0 - f_1 - f_2 - f_4) \rho_p - f_1 \rho_b - f_{Limitador} \rho_L - f_{muestra} \rho_m} \quad (4-46)$$

En las ecuaciones anteriores hay que distinguir por un lado entre $f_{Limitador}$ y $f_{muestra}$, que se refieren a la fracción de la pared de la esfera ocupada por el limitador y por la muestra respectivamente y, por el otro, f_L y f_m que se refieren a la fracción de luz que incide directamente sobre el limitador y sobre la muestra. Cada uno de estos términos tendrá que verificar las siguientes expresiones:

$$f_{Limitador} + f_{muestra} = f_4 \quad (4-47)$$

$$f_p + f_m + f_L = 1 \quad (4-48)$$

Para calcular $f_{Limitador}$ y $f_{muestra}$ basta con tener en cuenta el tamaño del orificio del limitador ($39.0 \pm 1.1 \text{ mm}^2$) y el tamaño del puerto 4 ($163 \pm 2 \text{ mm}^2$). Sin embargo realizar medidas para determinar la superficie directamente iluminada es más complicado. Para esto se ha optado por realizar mediciones de las manchas de iluminación según la configuración *RSS*, utilizando papel fotográfico e impresionándolo directamente, habiéndolo situado en la misma posición en la que se sitúan las muestras de hoja. Dada la sensibilidad del papel se ha variado el proceso fotográfico típico, iluminándolo durante 20 minutos, pero eliminando el baño en revelador, pasándolo directamente al baño de paro y posteriormente al fijador. De esta manera se evita que se sobreexponga el papel fotográfico. En la imagen Figura 4-16 (a) podemos ver el resultado, siendo el tamaño del área iluminada de $80.2 \pm 1.4 \text{ mm}^2$. El orificio del portahojas está completamente incluido en el interior de la zona iluminada. Para el caso de la configuración *TSP* el área se ha calculado teniendo en cuenta que el ángulo de iluminación en este caso es normal a la muestra, mientras que en el caso de la configuración *RSS* el ángulo de incidencia es de 8° . Sin embargo las variaciones son suficientemente pequeñas como para tenerlas en cuenta, ya que son inferiores al error de la medida.

Digitalizando la imagen mostrada en la Figura 4-16 a 8 bits se ha podido verificar que la iluminación sobre la hoja es prácticamente homogénea y, por tanto, no hay ninguna problema en suponer que la fracción de flujo que ilumina la muestra a través del portahojas es el cociente entre el área total iluminada y el área del orificio del mismo.

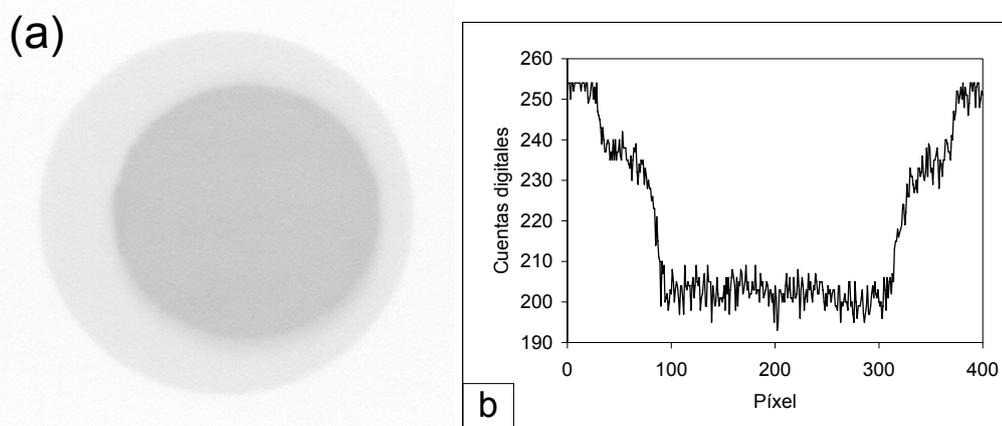


Figura 4-16 Mancha de la iluminación en la configuración *RSS* (a). Perfil horizontal de la mancha de la iluminación en la configuración *RSS* (b).

A partir de los flujos que llegan al sensor, las expresiones para calcular la reflectancia y la transmitancia son las siguientes:

$$\rho_m = \rho'_m \frac{G_2 - \rho'_m f_{muestra}}{G_2 - \rho_b f_{muestra}} \quad (4-49)$$

$$\rho'_m = \frac{\Phi_{RSS} - \Phi_{RSA}}{\Phi_{RTS} - \Phi_{RSA}} \rho_b \quad (4-50)$$

$$\tau_m = \frac{\Phi_{TSP}}{\Phi_{RTS} - \Phi_{RSA}} \rho_b \frac{G_2 - \rho'_m f_{muestra}}{G_2 - \rho_b f_{muestra}} \frac{G_2 f_m + f_{muestra} (f_L \rho_L + f_p \rho_p)}{G_2 f_m} \quad (4-51)$$

donde:

$$G_1 = 1 - \rho_p f_p - \rho_b f_b - \rho_L f_L \quad (4-52)$$

Para verificar el cálculo de la reflectancia y de la transmitancia realizado mediante el protocolo para hojas pequeñas, se han empleado muestras homogéneamente coloreadas. El resultado final se puede ver en la Figura 4-17. El error observado es del 1% para la reflectancia y hasta del 3% para el caso de la transmitancia.

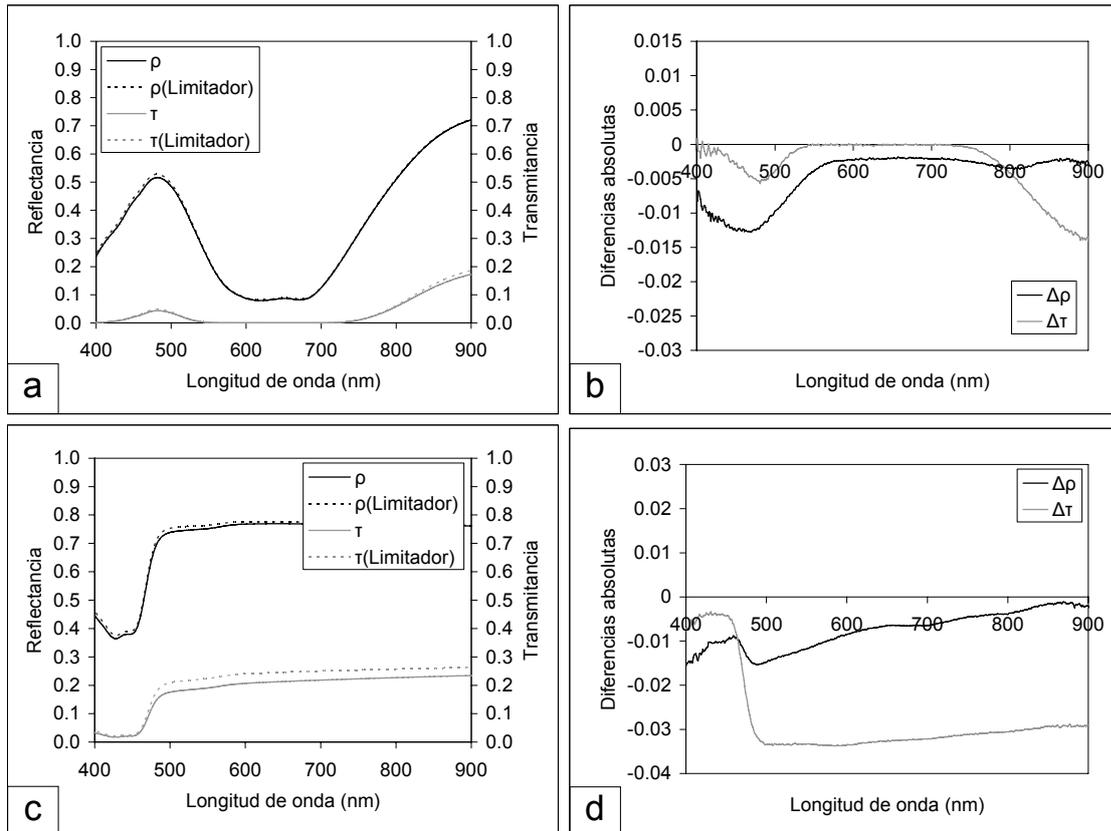


Figura 4-17 Comparación de la reflectancia y la transmitancia de una muestra azul (a y b) y de otra amarilla (c y d), calculados con los protocolos de hoja grande y hoja pequeña.

4.9 Comparación entre las dos esferas utilizadas en las campañas.

Se han comparado las medidas realizadas con la esfera utilizada en la campaña del 2002 y la utilizada en el 2003, el modelo LI-1800-12 de Li-Cor. Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 4-18.

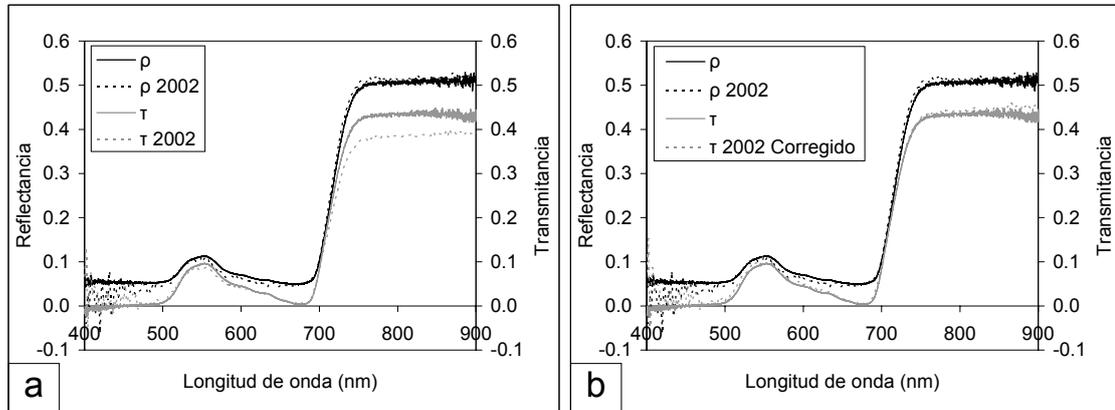


Figura 4-18 Comparación de la reflectancia y la transmitancia de una hoja calculadas a partir de medidas realizadas con la esfera utilizada en la campaña 2002 y la esfera LI-1800-12 (a). Corrección de la transmitancia (b).

Esta diferencia se puede explicar debido a la presencia de reflexiones en el borde del puerto 1, lo cual afecta al flujo de entrada, Φ_0 , y por tanto a la medida de Φ_{BLA} , Φ_{REF} como Φ_{RUI} de la misma manera, pero de forma diferente en la medida de Φ_{TRA} . De esta manera la simplificación que se realiza en la (3-7) no tendría validez, y por lo tanto tendríamos que aplicar la expresión:

$$\tau_m^{Corregido} = \tau_m \frac{\Phi_0^{BLA}}{\Phi_0^{TRA}} \quad (4-53)$$

De forma que se puede encontrar un factor de corrección constante para todas las longitudes de onda, al que se le ha dado un valor de 1,15 en función de la comparación entre las dos esferas. El error tanto en el cálculo de la reflectancia como en el de la transmitancia se puede considerar menor del 2% en el intervalo de 450 a 900 nm y hasta de un 5% de 400 a 450 nm.

4.10 Espectrógrafo USB-2000.

Para realizar las medidas con la esfera integrante LI-1800-12 se ha empleado el espectrógrafo USB-2000, construido por la empresa Ocean Optics Inc. El diseño de este instrumento está centrado en la portabilidad. Sus dimensiones son 89 mm × 64 mm × 34 mm y un peso de 200 g. Este espectrógrafo cuenta con una entrada USB mediante la cual se puede conectar a un ordenador portátil, llevándose a cabo a través del mismo el control, la obtención de datos y su alimentación eléctrica. La entrada de luz está preparada para acoplar una fibra óptica mediante una conexión SMA 905.

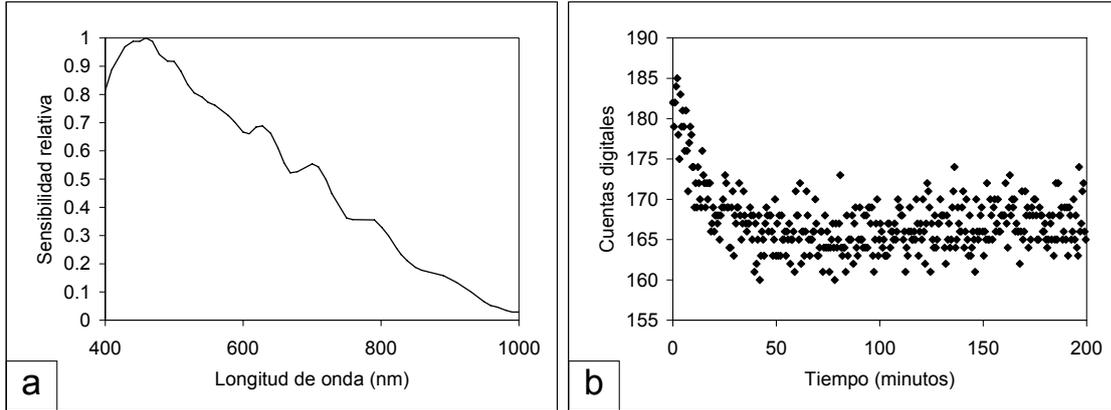


Figura 4-19 Sensibilidad del sensor (a). Dependencia de la corriente oscura con el tiempo (b).

El diseño óptico de este espectrógrafo corresponde a un Czerny-Turner cruzado y asimétrico, con espejos de longitud focal 42 mm para la entrada y 68 mm para la salida. La entrada de luz se realiza a través de una rendija de 200 μm de anchura y 1 mm de altura. Como sistema dispersor se utiliza una red de difracción de 600 líneas/mm, optimizada para una longitud de onda de 500 nm. Como detector se emplea un CCD lineal de silicio de 2048 elementos, el modelo ILX511 de Sony, con un tamaño de píxel de 14 $\mu\text{m} \times 200 \mu\text{m}$.

La sensibilidad del detector en la longitud de onda óptima es de 86 fotones/cuenta digital (2.9×10^{-17} julios/cuenta digital), siendo la sensibilidad relativa en función de la longitud de onda la mostrada en la Figura 4-19 (a). Sobre el detector se incorpora unos filtros a partir de 590 nm para eliminar segundos órdenes de difracción. En total, la resolución espectral del sistema formado por la rendija de entrada, la red de difracción y los píxeles del sensor, es de 7.8 nm (FWHM). La salida digital se da en un rango de 12 bits.

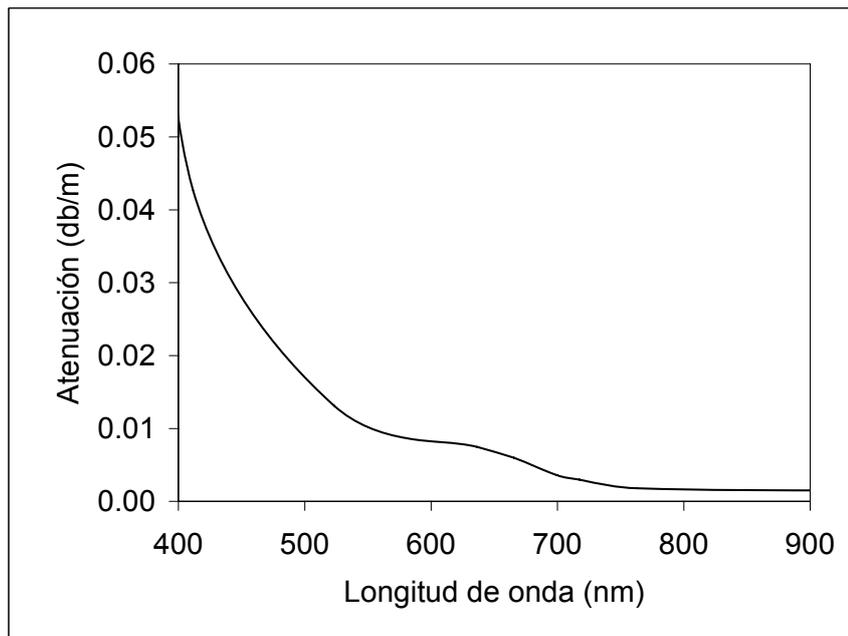


Figura 4-20 Atenuación de la fibra óptica utilizada.

Analizando el ruido, Figura 4-19 (b), vemos que la evolución de éste en la primera media hora es demasiado rápida, por lo que se recomienda un periodo de calentamiento de media hora. En general para todos los píxeles tenemos una desviación estándar de la corriente oscura de 3 cuentas digitales, coincidiendo con el valor nominal de 2.5 a 4.0 dado por el fabricante. El aparato no cuenta con un obturador mecánico, así que en nuestro caso se ha optado por hacer medidas de corriente oscura retirando la fuente de iluminación de la esfera y cerrando todos los puertos.

La fibra óptica utilizada es la P600-2-VIS-NIR de la empresa Ocean Optics Inc., de 2 m de longitud y con un núcleo de 600 µm de diámetro. La apertura numérica de esta fibra es de 0.22, lo que equivale a un ángulo de aceptación de 24.8°. La atenuación producida por la fibra óptica se puede ver en la Figura 4-20.

Si bien este sistema no posee ninguna parte móvil que pudiera sufrir desgaste y dar lugar a errores en la colocación de la matriz CCD respecto a la red holográfica, sin embargo debido a los procesos de dilatación y contracción es conveniente seguir la evolución del sistema a fin de poder asignar una longitud de onda a cada píxel del detector. Para esto se ha llevado a cabo una calibración del USB-2000 con la fuente de iluminación de baja presión de argón – mercurio, de la empresa Ocean Optics, modelo “HG-1”, que produce una serie de intensas líneas espectrales en el rango de 253 – 922 nm.

Tabla 4-17 Relación entre longitud de onda y píxeles del sensor utilizada para su calibración.

Longitud de Onda (nm)	Píxel	Longitud de Onda (nm)	Píxel
365.015	50	772.376	1260
404.656	160	794.818	1332
435.833	247	800.616	1355
546.074	565	811.531	1388
696.543	1020	826.452	1438
706.722	1053	842.465	1488
727.294	1115	852.144	1523
738.393	1151	912.297	1732
750.387	1190	922.45	1767
763.511	1232		

La relación entre el número de píxeles y la longitud de onda (Tabla 4-17) se puede establecer a través de un polinomio de tercer grado mediante regresión lineal, obteniendo un error típico de 0.41 nm:

$$Y = 347.135842 + 0.36231532X - 1.71992E - 05X^2 - 2.01758E - 09X^3 \quad (4-54)$$

donde X es el numero de píxeles e Y la longitud de onda.

4.11 Medidas de contenido de clorofila

La metodología empleada en la campaña del año 2002 presenta ciertos problemas, debiendo ser corregidos los valores obtenidos tal como se presentó en el

apartado 3.7. Por lo tanto se ha modificado la metodología empleada en la campaña del año 2003.

Tras recoger las muestras, y una vez en el laboratorio, las hojas se han conservado en un frigorífico a 4°C y se ha procedido a continuación a realizar las medidas necesarias para calcular la reflectancia y transmitancia foliar. Posteriormente, hasta la extracción de clorofila, se han conservado en un congelador a -8°C. De cada hoja, de la que se tienen medidas de reflectancia y transmitancia foliar, se ha recortado un círculo con un troquel de 0.7 cm de diámetro. Cada círculo se ha machacado en un mortero, junto con 4 ml de acetona al 80%, hasta disolver por completo el tejido, vertiendo el extracto a un tubo de ensayo. Tras lavar por dos veces el mortero con otros 4 ml de acetona, se ha añadido todo al tubo. En total se ha utilizado 12 ml de disolvente. Se han utilizado tapones de caucho para evitar la evaporación de la acetona. Se ha observado que durante el proceso de maceración de la hoja se pierde un promedio de 0.8 ml, lo cual se ha tenido en cuenta a la hora de realizar los cálculos.

Los tubos así preparados se guardaron en el frigorífico, en oscuridad, entre 24 y 48 horas para que la acetona tenga tiempo suficiente para extraer toda la clorofila del tejido vegetal y evitando que la clorofila pueda degradarse. Posteriormente se han realizado medidas con un espectrofotómetro modelo Jasco UV/VIS V-530, para obtener los valores de absorbancia de los extractos de clorofila. El tiempo de calentamiento del espectrofotómetro ha sido de 20 minutos. Las medidas se han realizado de 400 a 700 nm en intervalos de 1 nm. Se han realizado medidas cada 30 minutos al aire para controlar posibles variaciones en las condiciones de medida. En los casos en los que hubiera variaciones superiores a ± 0.001 a 500 nm se ha repetido la línea base.

La disolución se ha filtrado con papel de filtro, pasándolo a otro tubo con ayuda de un embudo. El extracto resultante se ha introducido en una de las cubetas. La cubeta se ha de homogenizar en cada medida de un nuevo extracto. La otra cubeta se ha

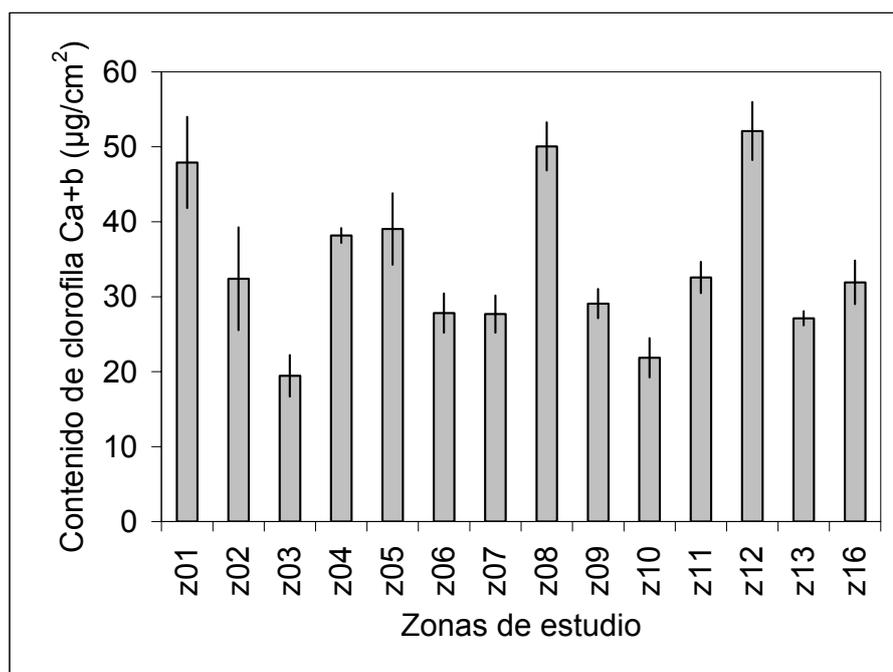


Figura 4-21 Promedios de contenido de clorofila registrados en cada parcela.

llenado con acetona al 80%. De las medidas de absorbancia se ha obtenido la concentración de clorofila mediante las ecuaciones dadas por Wellburn (1994).

$$[C_{a+b}] = 17.32A_{646} + 7.18A_{663} \quad (4-55)$$

En total se han analizado unas 130 hojas, muestreadas en torno a la fecha de la toma de la segunda de las imágenes del sensor QuickBird II, de las que se ha medido la reflectancia y la transmitancia foliar así como su contenido de clorofila. Los valores de contenido de clorofila encontrado están entre los 6.8 y los 78.8 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$, con un promedio de 34.9 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ y una desviación estándar de 13.7 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$. En la Figura 4-21 se presentan los promedios de clorofila registrados en cada parcela. Problemas con las muestras de las zonas 14 y 15 hicieron imposible su análisis.

4.12 Campaña Vid-2003.

Las medidas de las propiedades ópticas sobre hojas de cebadas o trigo han presentado siempre el problema de que la hoja no es en general suficientemente grande como para cubrir el puerto de la esfera, y por lo tanto ha sido necesario recurrir a metodologías alternativas. Por este motivo y para comprobar la capacidad del modelo PROSPECT de proporcionar mediante inversión unos valores de contenido de clorofila correctos, se ha decidido utilizar hoja de trabajos realizados por el grupo de forma paralela a este con otros cultivos, como olivares (Zarco et al., 2004) y viñedos (Zarco et al., 2005).

En concreto, en julio de 2003 se realizaron medidas en viñedos situados en la denominación de origen de Ribera de Duero. En esta campaña uno de los objetivos ha sido la validación del modelo PROSPECT para hojas de vid, como ejemplo de hojas grandes, a las que se les puede aplicar las ecuaciones descritas en la sección 4.8.1. Este trabajo está enmarcado en otro más amplio, en el que partiendo de imágenes tomadas con el sensor aerotransportado CASI, se ha hecho un estudio sobre variabilidad de la clorosis férrica en la zona de estudio.

Aunque este estudio sobre la vid no forma parte de esta memoria, nos ha parecido adecuado referirnos a ella por cuanto se ha desarrollado de forma paralela al estudio de los cereales utilizando las mismas metodologías.

Sin prácticamente variaciones, se puede aplicar lo descrito en el apartado 4.11, a excepción de la superficie tomada por hoja, que en este caso ha sido de círculos de 1.6 cm de diámetro. En esta campaña se han realizado medidas de reflectancia y transmitancia, así como de contenido de clorofila mediante extracción con acetona de un total de 714 hojas. Los valores de contenido de clorofila se encuentran entre los 3.1 y los 107.5 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$, con un promedio de 51.6 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ y una desviación estándar de 17.9 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$.

Capítulo 5. Análisis de los datos a nivel de hoja

Tanto en la campaña del año 2002 como en el año 2003 se han realizado muestreos foliares de los cultivos de cereal analizados, sobre los que se han realizado medidas de reflectancia y transmitancia foliar, así como medidas de clorofila mediante extracción con acetona. Así mismo se cuenta también con datos de hojas de vid procedentes de una campaña realizada en el año 2003.

Durante la campaña del año 2002 las medidas ópticas y las medidas de contenido de clorofila se han realizado sobre grupos de hojas diferentes, mientras que durante la campaña del 2003 estas medidas se han realizado sobre las mismas hojas, por lo que nos restringiremos a evaluar la aplicabilidad del modelo PROSPECT con estos últimos datos.

5.1 Análisis de datos de hojas de vid

Durante la campaña 2003 se realizó un trabajo paralelo (Zarco et al., 2005) sobre cultivos de vid, en el cual se realizó un exhaustivo muestreo de 714 hojas, dentro de las cuales se incluye un cierto número de hojas que presenta diferentes grado de clorosis, es decir, que tienen un menor contenido de clorofila. Por lo tanto se cuenta con un mayor rango de valores de contenido en clorofila. En este trabajo se realizaron tanto medidas de las propiedades ópticas de las hojas, como de su contenido de clorofila. Las hojas de vid, a diferencia de lo que ocurre en el cereal, sobre todo con las hojas de cebada, tienen un tamaño suficientemente grande, como para no presentar nunca problemas a la hora de cubrir el puerto de medida de la esfera integrante durante las medidas necesarias para obtener la reflectancia y transmitancia foliar, y por lo tanto se ha utilizado el procedimiento estándar para la esfera integrante LiCOR, según lo expuesto en el apartado 4.8.1, utilizando las ecuaciones (4-27) y (4-28).

Se ha recurrido a estas medidas realizada sobre hojas de vid para comprobar la capacidad del modelo PROSPECT para estimar mediante inversión el contenido de clorofila de forma correcta. Evitaremos así que los resultados que se obtengan puedan verse afectados por la aplicación de la metodología descrita en el apartado 4.8.2.

Para realizar el análisis de estos datos, consideraremos la tercera y la cuarta versión del modelo PROSPECT, es decir, considerando las expresiones (2-1) y (2-2) para calcular el coeficiente de absorción. El proceso que utilizaremos para estimar los parámetros biofísicos de la hoja a partir de su espectro de reflectancia y de transmitancia, será el de minimización de una función de mérito mediante el algoritmo iterativo *Downhill simplex*. La función de mérito que utilizaremos es la función propuesta por Jacquemoud y Baret (1990), y que se muestra en la Ecuación (5-1).

$$\Delta^2 = \sum_{\lambda} [(\rho(\lambda) - \rho^*(\lambda, P))^2 + (\tau(\lambda) - \tau^*(\lambda, P))^2] \quad (5-1)$$

En esta ecuación, los términos $\rho(\lambda)$ y $\tau(\lambda)$ hacen referencia a la reflectancia y transmitancia foliar experimentales, mientras que $\rho^*(\lambda, P)$ y $\tau^*(\lambda, P)$ hacen referencia a la reflectancia y transmitancia foliar modelizadas, siendo P los parámetros del modelo PROSPECT. El sumatorio se extiende desde 400 hasta 900nm. El valor del parámetro $Ftol$, utilizado para delimitar el proceso iterativo del algoritmo *Downhill Simplex*, es de 0.001.

Los parámetros que obtendremos del modelo PROSPECT son N , C_{a+b} , C_m y en su caso C_s . Sin embargo dado que en el intervalo espectral analizado la absorción de luz debida al contenido de agua es prácticamente nula, fijaremos C_w a cero durante el proceso de inversión. El resto de parámetros se dejarán variar libremente, partiendo de diferentes estimaciones iniciales, según los valores de la Tabla 5-1. Estos valores se han tomado en función de los encontrados en trabajos similares (Verhoef & Bach, 2003). Y como cada parámetro lo reiniciamos con tres valores diferentes, el proceso de minimización se reiniciará un total de 81 o 27 veces, según se consideren o no los pigmentos marrones en el proceso.

Tabla 5-1 Valores a los que se ha iniciado cada uno de los parámetros considerados como incógnitas en el proceso de inversión.

Parámetro	Valores de iniciación de los parámetros		
N	1	2	3
C_{a+b} ($\mu\text{g}/\text{cm}^2$)	1	50.5	100
C_m (g/cm^2)	0	0.025	0.05
C_s	0.5	0.75	1

Los valores de contenido de clorofila obtenidos mediante estos procesos, se muestran en la Figura 5-1 frente a los valores medidos experimentalmente mediante extracción por acetona para el caso en el que hemos utilizado la tercera versión. Como se puede ver se obtienen resultados muy precisos durante todo el rango de contenido de clorofila de que se dispone de muestras, obteniéndose un $R^2 = 0.93$, y un $RMSE$ de $4.01 \mu\text{g}/\text{cm}^2$, lo que implica un $PRMSE$ de 11.6%, dado que el promedio de las muestras utilizadas es de $34.6 \mu\text{g}/\text{cm}^2$. El proceso de minimización converge relativamente rápido, necesitando en promedio aproximadamente unos cien pasos. Sin embargo de las 27 veces que hemos comentado que se reinicia el proceso, es habitual que algunas veces el proceso converja a valores arbitrarios. De esta manera la desviación estándar

promedio es el 93% del valor hallado de contenido de clorofila, mientras que si nos restringimos a los 20 procesos en los que se obtienen valores mínimos de la función de mérito, esta desviación se reduce a sólo un 2%. Es decir, seguimos estando frente a un problema “mal propuesto”, sin embargo, en la mayor parte de los casos, el valor que encontremos mediante la minimización de la función de mérito, será el valor adecuado.

No ocurre lo mismo en el caso mostrado en la Figura 5-2 (a). En este caso estamos empleando el modelo PROSPECT incluyendo los pigmentos marrones. Como se puede ver por la dispersión de puntos, la precisión de los resultados decae drásticamente. Se puede apreciar cierta tendencia a la sobrestimación del contenido de clorofila en aproximadamente unos 20 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$, llegándose a obtener un valor máximo de 106 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$. El coeficiente de determinación múltiple obtenido es mucho menor que en el caso anterior, $R^2 = 0.55$, y el error cuadrático medio mucho mayor, $RMSE = 20.8 \mu\text{g}/\text{cm}^2$. Se ha realizado una segunda prueba utilizando la versión modelo PROSPECT que considera los pigmentos marrones, pero esta vez fijando el valor de C_s a cero. En este caso, tal como se presenta en la Figura 5-2 (b), la comparación entre los valores de clorofila determinados mediante extracción con acetona, y los estimados mediante la inversión, muestra muy buena correlación, y una dispersión equivalentes a la obtenida en el caso (a), $R^2 = 0.93$, pero con una sobreestimación de los valores de C_{a+b} obtenidos mediante inversión de en torno al 30%, con los que el $RMSE$ se dispara hasta un 18.8 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$, siendo el valor máximo obtenido de 107 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$.

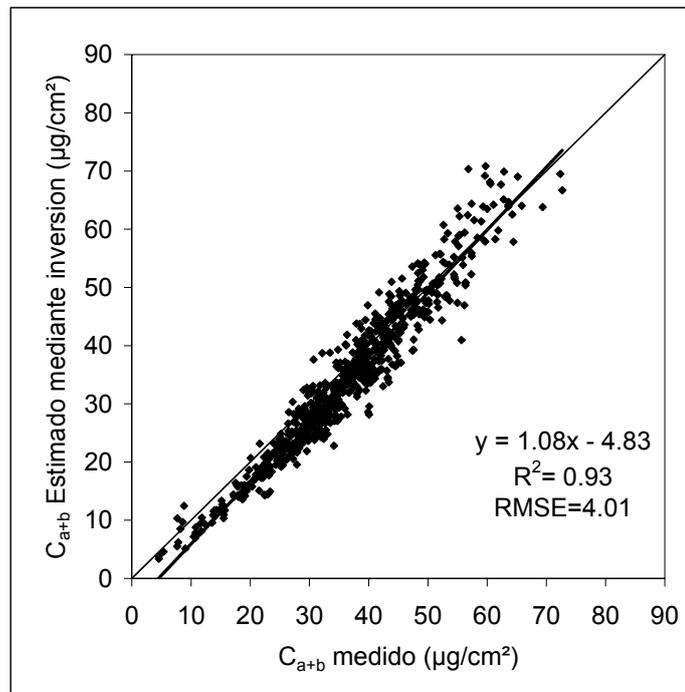


Figura 5-1 C_{a+b} obtenido al utilizar la tercera versión del modelo PROSPECT.

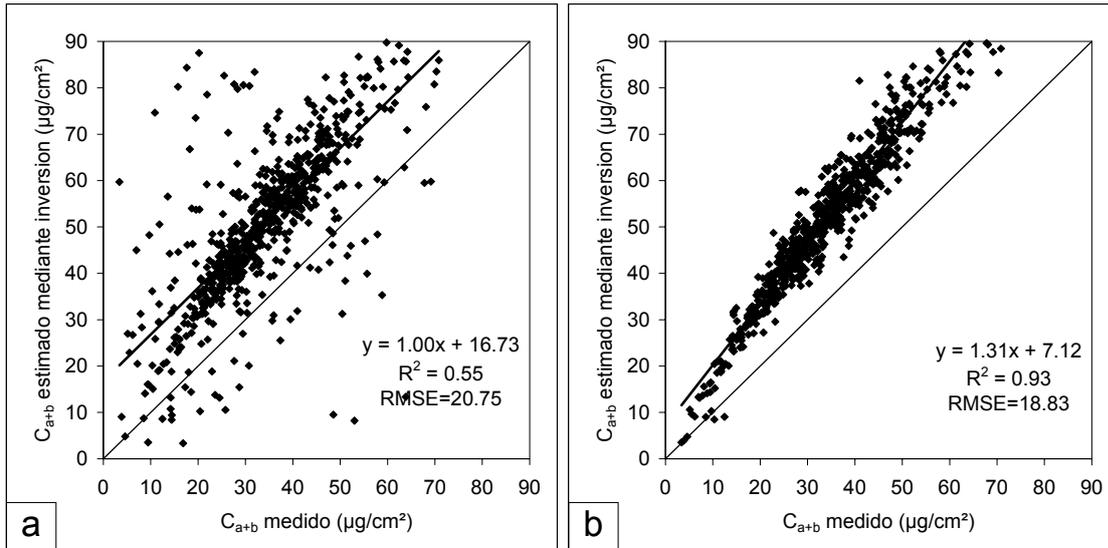


Figura 5-2 C_{a+b} obtenido al incluir los pigmentos marrones (a), y al considerar $C_s=0$ (b), frente al valor experimental.

Vemos por lo tanto que mediante la aplicación del modelo PROSPECT, en su tercera versión, tan ampliamente aplicado en la bibliografía, se obtienen unos resultados consecuentes, con un error del 11%. Sin embargo la utilización de los nuevos coeficientes propuestos para el modelo PROSPECT, incluyendo los pigmentos marrones, no parece dar unos resultados apropiados. Debido a estas desviaciones encontradas entre las medidas y el modelo, se ha descartado el uso de estos coeficientes en el resto del trabajo en este y en los siguientes capítulos, restringiéndonos al uso de la tercera versión del modelo PROSPECT.

Por último, hay que hacer notar cómo la dispersión de los valores estimados respecto de las medidas se va haciendo más grande conforme va aumentando el valor del contenido de clorofila, y ello es debido a la mayor sensibilidad del modelo para valores bajos de C_{a+b} , como se vió en la sección 2.4.1.

En la Figura 5-3 se muestran los histogramas de los valores de los parámetros N , C_{a+b} y C_m obtenidos al utilizar la tercera versión del modelo PROSPECT. Se aprecia de estos histogramas como de los 3 parámetros aquí analizados, N es el que presenta un valor mejor definido para todas las hojas analizadas. Considerando todas las muestras se obtiene un valor medio de 1.64 con una desviación estándar de 0.14. Y como el muestreo recoge hojas con diferente desarrollo, parece que este valor de 1.6, que está vinculado con la estructura interna de la hoja, puede ser aplicable en general a las hojas de vid. Por su parte los valores del parámetro C_{a+b} se extienden desde 8 hasta 74 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$, con un valor medio de 36.3 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ y una desviación estándar de 11.9 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$. En este histograma se puede apreciar un segundo modo, centrado sobre 12 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$, que corresponde con el conjunto de hojas cloróticas incluidas en el muestreo. En cuanto a los valores del parámetro C_m , también se encuentran muy ampliamente distribuidos, encontrándose valores desde 0.0002 hasta 0.0054 g/cm^2 , con un valor medio de 0.0020 g/cm^2 y una desviación estándar de 0.0009 g/cm^2 . La amplitud de estos valores parece dejar claro que estos valores son característicos de cada hoja, estando muy probablemente relacionados con el estado de madurez de la misma.

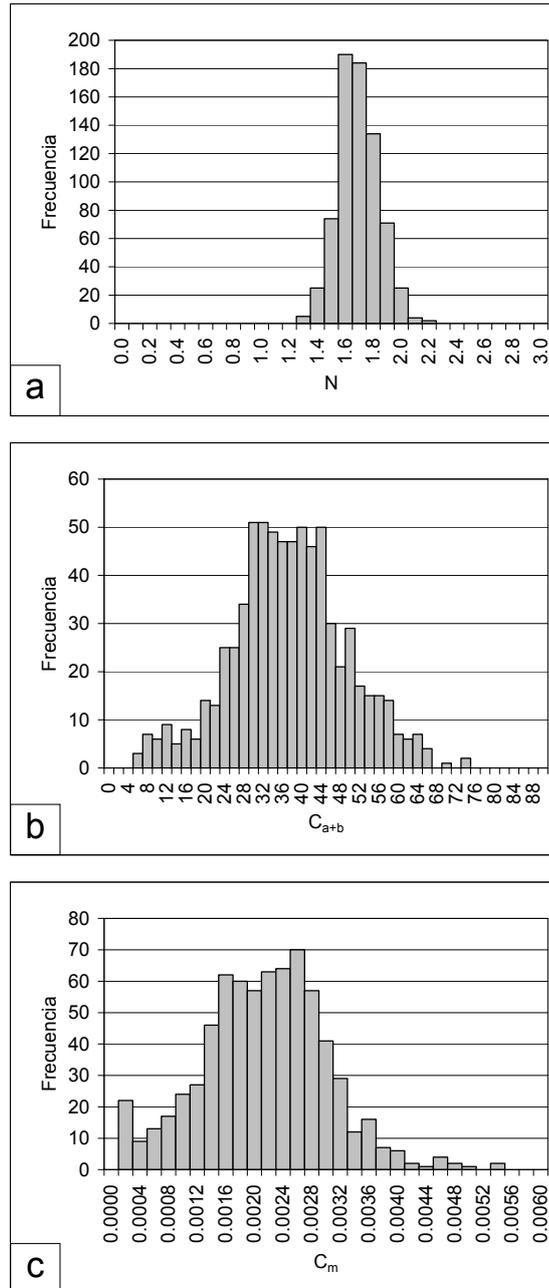


Figura 5-3 Histogramas de los parámetros N , C_{a+b} y C_m obtenidos al utilizar la tercera versión del modelo PROSPECT con hojas de vid.

5.2 Análisis de datos de hojas de cereal.

En esta sección se presentan los resultados procedentes de analizar la información espectral de los elementos principales de la cubierta vegetal de los cultivos estudiados tanto en el año 2002 como en el 2003, es decir, las hojas. A partir de la bibliografía, los valores típicos para cereales como el trigo y la cebada de los parámetros utilizados por el modelo PROSPECT son los dados en la Tabla 5-2. En ésta los valores de C_w y C_m han sido calculados a partir de valores de SLA (*Specific Leaf Area*) y $LDMC$ (*Leaf Dry Matter Content*) (Vile et al., 2005); el valor de N es el dado por Jacquemoud y Baret (1990), y C_{a+b} es el valor medio obtenido de los datos dados

por Serrano (Serrano et. al. 2000). Estos valores nos servirán como referencia para el análisis de las medidas que hemos realizado en el laboratorio.

Tabla 5-2 Valores típicos para cereal de los parámetros utilizados por PROSPECT.

Parámetro	Valor Típico
N	1.5
C_{a+b} ($\mu\text{g}/\text{cm}^2$)	29
C_w (g/cm^2)	0.01
C_m (g/cm^2)	0.003

5.2.1 Campaña 2002.

Los espectros de reflectancia y transmitancia foliar medidos a lo largo del ciclo de crecimiento de la cebada, se han analizando mediante la inversión del modelo PROSPECT. Hemos procedido de manera equivalente a como se hizo en la sección anterior.

Los espectros medidos hasta el mes de mayo son fácilmente reproducibles al realizar la inversión del modelo PROSPECT, tal como se puede ver en la Figura 5-4 (a). Estos espectros corresponden a hojas de cebada sanas. Sin embargo en las dos últimas fechas esto ya no es así. En esta época las hojas se han secado, y como se puede ver en la Figura 5-4 (b), el modelo PROSPECT ya no es capaz de reproducir este tipo de

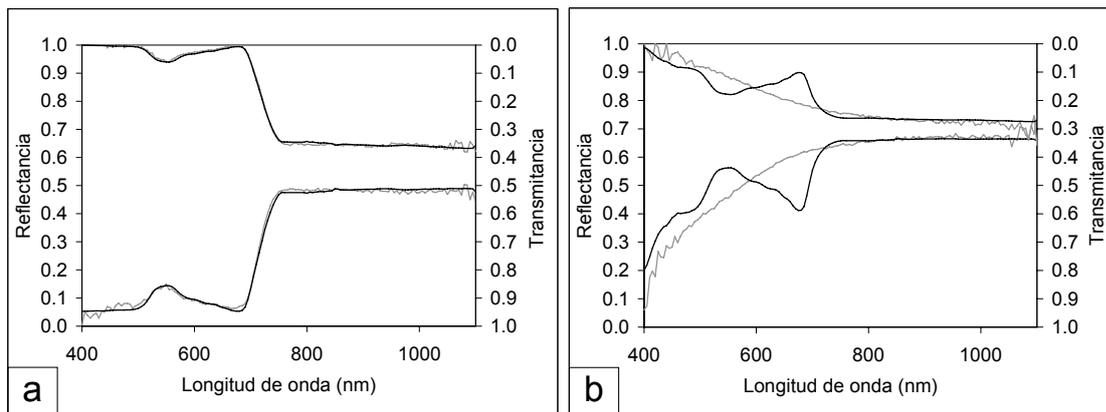


Figura 5-4 Comparación de los espectros medidos y los obtenidos mediante la inversión para una hoja verde del día 15-05-02 (a) y una hoja seca del día 28-06-02 (b).

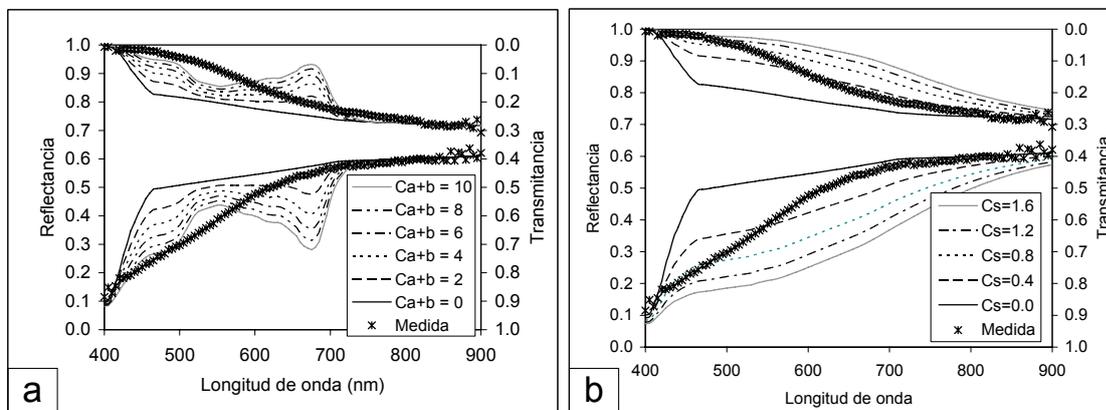


Figura 5-5 Comportamiento del modelo PROSPECT al intentar reproducir el espectro de una hoja seca de cereal sin tener en cuenta los pigmentos marrones (a) o teniéndolos en cuenta (b).

espectros. Según esto, se puede considerar que los valores de contenido de clorofila obtenidos mediante la inversión del modelo son erróneos.

La tercera versión del modelo PROSPECT no está pensada para trabajar con hojas secas, ya que en la senectud, la clorofila de las hojas se descompone en diversos pigmentos marrones que no son tenidos en cuenta en esta versión (Jacquemoud & Baret, 1990).

Para comprobar la falta de acuerdo entre el modelo y las medidas de hojas secas, y suponiendo que el modelo siga siendo válido fuera de la zona de influencia de los pigmentos, se han ajustado los parámetros N y C_m para hacer que coincidan entre 800 y 900 nm un espectro de reflectancia y transmitancia medidos y la salida de PROSPECT. Fijados estos parámetros, se ha representado en la Figura 5-5 (a) la salida del modelo para diferentes valores de clorofila. El resultado es que esta versión es totalmente incapaz de dar un espectro similar al medido.

Este proceso se ha repetido utilizando la versión de PROSPECT en la que se toma en cuenta los pigmentos marrones, ajustando N y C_m entre las longitudes de onda de 800 y 900 nm, manteniendo a cero el valor de C_{a+b} , y tomando diferentes valores de C_s . Los resultados se han representado en la Figura 5-5 (b). Como se puede ver, a pesar de considerar el efecto de absorción de los pigmentos que aparecen al secarse la hoja, en este caso tampoco se puede lograr un ajuste entre medida y modelo.

Dados estos resultados, en los siguientes capítulos, cuando se analicen los valores de reflectancia de la cubierta vegetal, omitiremos aquellos datos en los que las hojas se encontrasen ya secas. Sin embargo, a pesar de que el modelo no es capaz de reproducir correctamente estos espectros, se presentan dentro de los resultados globales los valores obtenidos mediante la inversión para las fechas del 13 y 28 de junio de 2002.

En la figura Figura 5-6 (a) se presentan tanto los valores de contenido de clorofila obtenidos mediante extracción con acetona en laboratorio, como los obtenidos mediante inversión del modelo PROSPECT a partir de los espectros de reflectancia y transmitancia medidos. Se puede ver cómo dentro de los datos de cada día hay una dispersión bastante importante, tanto en el caso de las medidas realizadas en el laboratorio, de hasta $7.2 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ para el día 15 de mayo de 2002, como en el caso de los resultados obtenidos por inversión. Aún así, podemos ver como los valores medios diarios obtenidos mediante las dos técnicas se correlacionan bastante bien, Figura 5-6 (b), con un $R^2 = 0.98$ y un $RMSE = 6.1 \mu\text{g}/\text{cm}^2$. Diferentes autores (Oppelt, 2002; Cayón, 2001) muestran que el contenido de clorofila, en hojas de trigo y de cebada, se mantiene sin variaciones prácticamente durante todo su desarrollo, hasta la madurez de las mismas, momento en que la hoja se seca y la clorofila se degrada. En nuestro caso se observa cómo, durante el periodo en el que la hoja se mantiene verde, el contenido medio de clorofila es de aproximadamente $45 \mu\text{g}/\text{cm}^2$, salvo en las fechas del 24-04-2002 y el 15-05-2002, en las cuales los valores obtenidos son algo más altos.

El resultado para los otros dos parámetros obtenidos de la inversión, el parámetro de estructura N y el contenido de materia seca C_m , se muestra en la Figura 5-7. El parámetro N se mantiene relativamente estable durante el periodo en el que la hoja permanece verde, con un valor medio de 1.7 durante todo este periodo y una desviación estándar de 0.2. En las dos últimas fechas, cuando la hoja ya se ha secado, el valor medio de N sube hasta 2.8, con una desviación de 0.5. Estos valores concuerdan

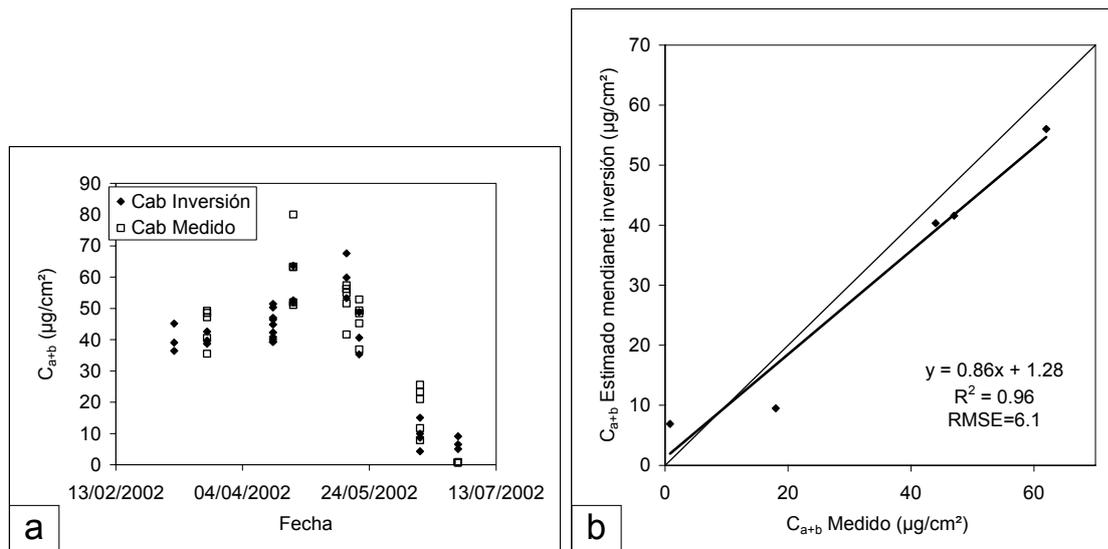


Figura 5-6. Valores de C_{a+b} , obtenidos en laboratorio y mediante inversión del modelo PROSPECT (a). Correlación entre los valores medios (b).

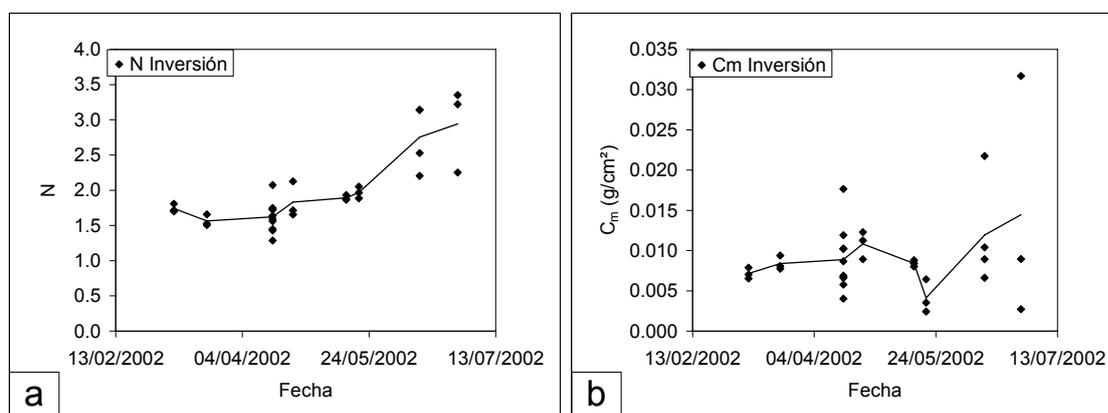


Figura 5-7. Parámetro de estructura N (a) y contenido de materia seca C_m , (b) obtenido mediante inversión del modelo PROSPECT a partir de la serie temporal de medidas del año 2002. En trazo continuo se representa la evolución de los valores medios.

perfectamente con los valores dados por Jacquemoud y Baret (1990), los cuales asignan valores de 1.5 y 3 respectivamente para hojas monocotiledóneas verdes y maduras. Se puede apreciar que la desviación estándar del parámetro de estructura N es sensiblemente más pequeña que en el caso de la clorofila. Respecto de los valores hallados del parámetro C_m , cabe destacar la gran dispersión de las medidas, de $0.006 \text{ g}/\text{cm}^2$ cuando el valor medio es de $0.009 \text{ g}/\text{cm}^2$, sensiblemente superior al valor de $0.003 \text{ g}/\text{cm}^2$ dado por Vile (Vile et al., 2005).

5.2.2 Campaña 2003.

En esta campaña se ha procedido de manera similar que en la anterior. Sin embargo, en la campaña 2003 se han realizado medidas en las mismas hojas tanto de reflectancia y transmitancia foliar, como de contenido clorofílico mediante extracción con acetona, lo cual nos ha permitido evaluar la aplicabilidad del modelo PROSPECT con estos datos.

5.2.2.1 Análisis de los datos tomados el 17 de mayo de 2003.

Se presentan a continuación en la Figura 5-8 los resultados obtenidos de invertir la tercera versión del modelo PROSPECT con datos de reflectancia y transmitancia foliar tomados en torno al día 17 de mayo. Los valores del parámetro N obtenidos de las inversiones de las distintas muestras, son en general muy similares, con un promedio de 1.6 y una desviación estándar de 0.2, Figura 5-8 (a). Sin embargo el parámetro C_{a+b} se encuentra distribuido de modo más disperso, Figura 5-8 (b), con un promedio de 32 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ y una desviación estándar de 9 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$. Por su parte, el valor medio obtenido del parámetro C_m es de 0.002 g/cm^2 , con una desviación estándar de 0.003 g/cm^2 . En este último caso como se ve en Figura 5-8 (c), la distribución no es simétrica, siendo 0.0002

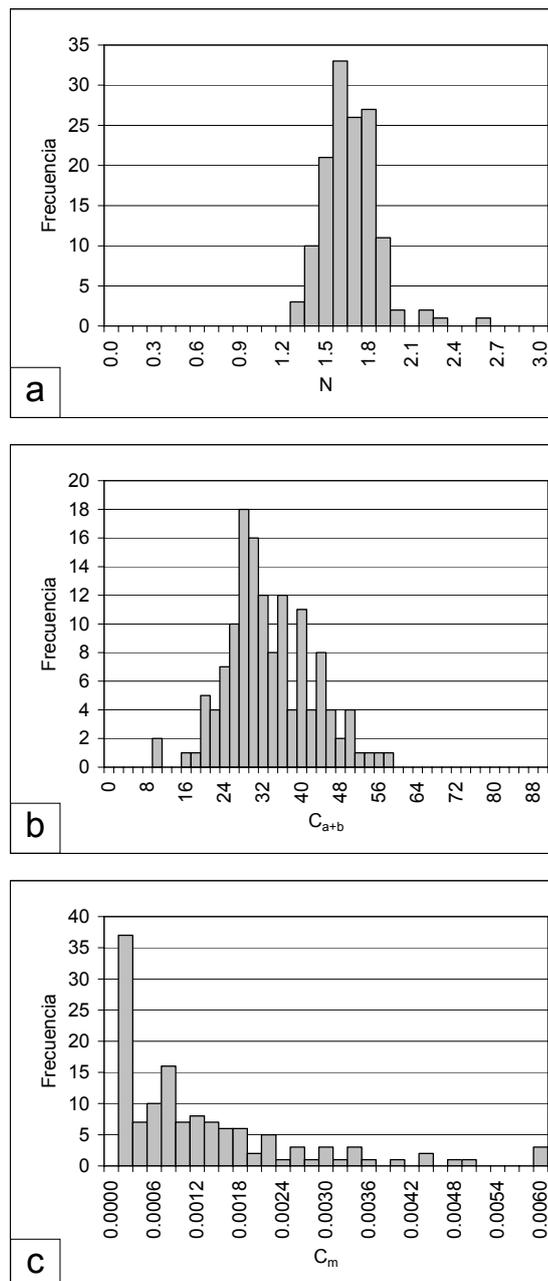


Figura 5-8 Histogramas de los parámetros N , C_{a+b} y C_m obtenidos al utilizar la tercera versión del modelo PROSPECT sobre los datos del 17 de mayo de 2003.

Tabla 5-3 Valores de los parámetros obtenidos por inversión del modelo PROSPECT, separados para los cultivo de trigo y cebada.

	N		C_{a+b} ($\mu\text{g}/\text{cm}^2$)		C_m (g/cm^2)	
	Promedio	D.Estandar	Promedio	D.Estandar	Promedio	D.Estandar
Cebada	1.6	0.2	32	9	0.0017	0.0030
Trigo	1.6	0.2	34	8	0.0013	0.0015

g/cm^2 el valor de la moda, y alcanzándose valores de hasta $0.022 \text{ g}/\text{cm}^2$. Podemos ver como los valores medios encontrados coinciden con los datos mostrados en la Tabla 5-2.

Los análisis anteriores se han realizado sobre las hojas de cebada y trigo, sin hacer diferenciación. Pues al analizar de forma separada los resultados de los diferentes parámetros para estos dos cultivos, no se han encontrado diferencias significativas entre ellos, como se muestra en la Tabla 5-3.

Como se puede ver en la Figura 5-9, al comparar los valores de contenido de clorofila obtenidos mediante extracción con acetona en laboratorio y los valores obtenidos mediante la inversión del modelo PROSPECT a partir de las medidas de reflectancia y transmitancia realizadas, según la metodología descrita en el apartado 4.8.2, se obtienen buenos resultados para el caso de hojas con contenidos en clorofila medios o bajos, en donde el error cuadrático medio es de $4.5 \mu\text{g}/\text{cm}^2$, similar al caso de las hojas de vid analizadas en el apartado 5.1. Sin embargo este error se dispara hasta $14.8 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ para hojas con contenido de clorofila mayor que $50 \mu\text{g}/\text{cm}^2$. Considerando la totalidad de los datos el error cuadrático medio resultante es de $7.3 \mu\text{g}/\text{cm}^2$.

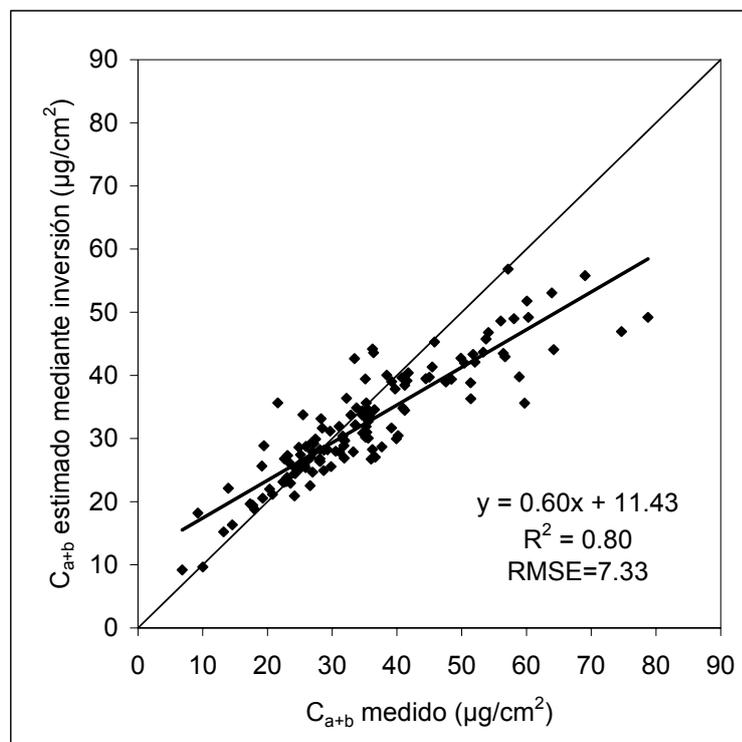


Figura 5-9. Correlación entre los valores de C_{a+b} obtenidos en laboratorio y mediante inversión del modelo PROSPECT.

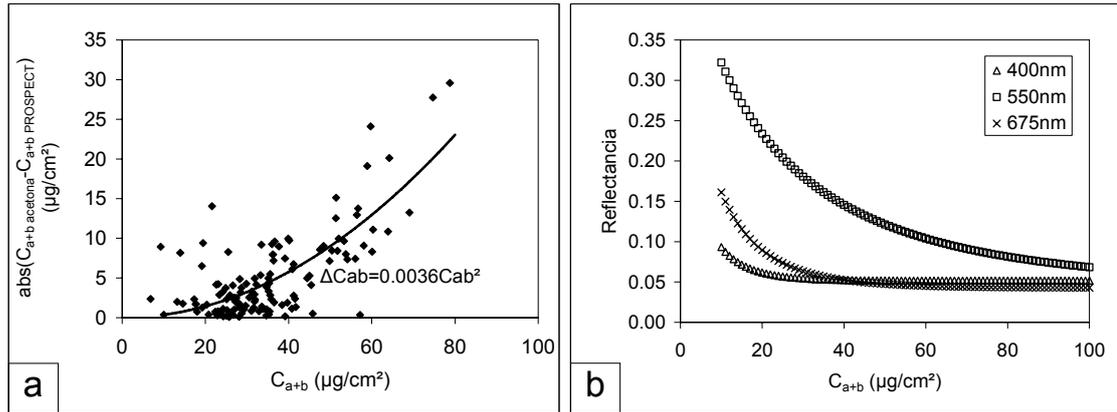


Figura 5-10. Error ΔC_{a+b} en función de C_{a+b} (a). Dependencia de la reflectancia a 400, 550, y 675 nm con C_{a+b} , obtenido mediante el modelo PROSPECT (b).

Este resultado parece indicar la presencia de un cierto error en el cálculo de la reflectancia y la transmitancia foliar. La variación en la reflectancia y la transmitancia debido a un incremento en la clorofila, es menor cuanto mayor es el contenido de clorofila, y por lo tanto los errores en el cálculo de la reflectancia y transmitancia serán mucho más visibles cuando el contenido de clorofila sea alto.

Ajustando el valor absoluto de la diferencia entre la clorofila obtenida mediante acetona y la obtenida mediante inversión de PROSPECT a una función proporcional al cuadrado del contenido de clorofila, Figura 5-10 (a), podemos estimar el error en la obtención de clorofila mediante inversión, en función del contenido de clorofila, obteniendo la relación $\Delta C_{a+b} = 0.0036 C_{a+b}^2$. A partir de esta relación, se puede ver cómo a $35.0 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ corresponde un error de $4.4 \mu\text{g}/\text{cm}^2$, que se coincide con el *RMSE* encontrado para valores menores de $50 \mu\text{g}/\text{cm}^2$; y a $65 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ el error es de $15.2 \mu\text{g}/\text{cm}^2$, que se coincide a su vez con el *RMSE* encontrado para valores mayores de $50 \mu\text{g}/\text{cm}^2$.

Utilizando el modelo PROSPECT podemos calcular cómo varía la reflectancia en función del contenido de clorofila. Esta variación se representa en la Figura 5-10 (b) para las longitudes a las que se alcanzan máximos del coeficiente específico de absorción, K_{a+b} , en el visible (400 y 675 nm), y su mínimo (550 nm). Para las longitudes de onda donde el coeficiente de absorción se hace máximo, la variación de la reflectancia con el contenido de clorofila es prácticamente nula a partir de $40 \mu\text{g}/\text{cm}^2$. Sin embargo para 550nm, donde el coeficiente de absorción se hace mínimo, obtendremos el máximo de variabilidad para todo el rango de valores de contenido de clorofila. A partir de aquí podemos estimar el error que corresponde a la reflectancia, conocido el error para cada valor de contenido de clorofila. Para los valores de 35 y 65 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$, y sus errores asociados, encontramos un error de 0.038 y 0.048 para la reflectancia a 550 nm. Estos valores del error son del mismo orden que los estimados mediante la comparación de reflectancia y transmitancia de muestras de papel coloreado realizada en el apartado 4.8.2, donde el error máximo encontrado estaba sobre 0.035.

Como podemos ver, debido a la saturación de la reflectancia y la transmitancia para valores altos de clorofila, es necesario calcular con errores inferiores a 0.01 la reflectancia y la transmitancia para poder obtener buenas estimaciones de clorofila, cuando sus valores sean superiores a $50 \mu\text{g}/\text{cm}^2$. Vemos así que los errores encontrados

al aplicar la metodología descrita en la sección 4.8.2, son excesivamente altos como para asegurar unos valores correctos de clorofila.

5.2.2.2 Análisis de los datos tomados el 5 de Julio de 2003.

Para concluir el análisis de hojas de la campaña de 2003, se incluyen aquí los resultados obtenidos del análisis de las hojas muestreadas en torno al 5 de Julio, coincidiendo con la toma de la tercera de las imágenes del sensor QuickBird II. En esta época el cereal se encuentra en la última fase de su desarrollo, con el grano maduro y sus hojas secas. Este muestreo se ha realizado a fin de estudiar la posibilidad de aplicación de las metodologías utilizadas en el presente trabajo a cultivos de cereal en esta última fase.

Si bien, como ya se ha mostrado, el modelo PROSPECT no es válido para realizar un estudio de hojas secas, se ha optado por analizar únicamente el intervalo espectral comprendido entre 805 y 900nm. De esta manera evitamos la influencia de los pigmentos que pudieran encontrarse en la hoja y de posibles restos de humedad. Por lo tanto los únicos parámetros analizados son el parámetro de estructura N y el contenido de materia seca C_m (Figura 5-11). Al igual que en el caso de hojas verdes, se ha utilizado la tercera versión del modelo PROSPECT.

El promedio de los valores obtenidos del parámetro N es de 2.8 (desviación estándar 0.3). Como se ve, este parámetro es claramente superior al 1.6 obtenido en el caso de hojas verdes de cereal. Esto concuerda bien con el comportamiento del parámetro N descrito por Jacquemoud y Baret (1990), según el cual, para plantas monocotiledóneas, como el cereal, su valor debe encontrarse entre 1.5 y 2 en el caso de hojas jóvenes, mientras que para hojas secas, debido a la desestructuración que se produce en el interior de las hojas, este parámetro debe tomar valores en torno a 3. Por su parte el contenido de materia seca medio encontrado es de 0.008 g/cm² (desviación estándar 0.004 g/cm²), cuatro veces superior al valor obtenido en el muestreo realizado en mayo.

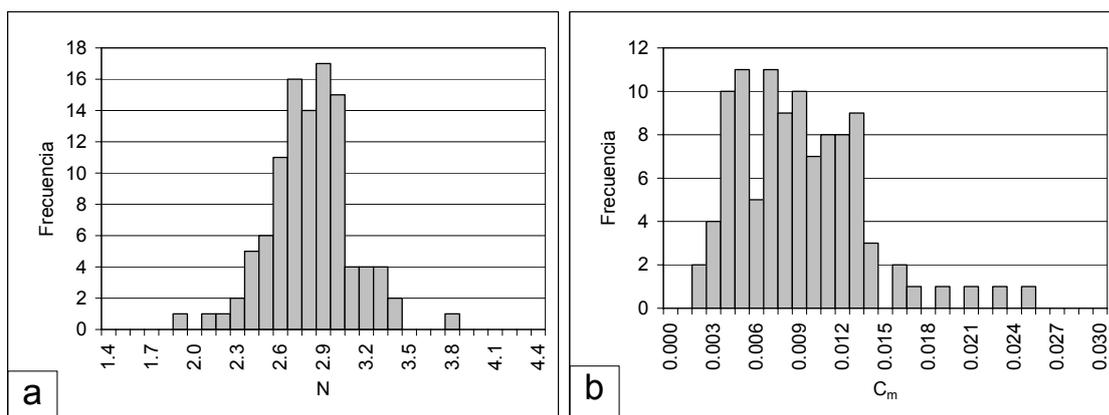


Figura 5-11 Histogramas de los parámetros N (a) y C_m (b) obtenidos al utilizar la tercera versión del modelo PROSPECT sobre los datos del 5 de julio de 2003.

Capítulo 6. Análisis de la campaña 2002

Los procedimientos habituales para obtener información sobre el estado de la vegetación, normalmente *LAI* o contenido clorofílico, partiendo de información espectral procedente bien de imágenes tomadas desde satélites o medidas a nivel de suelo, se pueden dividir en dos:

1. Usar relaciones empíricas que ligan ciertos índices de vegetación con los parámetros de los que se busca información.
2. Usar inversiones de modelos de transferencia radiativa.

Ambos procedimientos vienen apoyados por puntos a favor, pero a su vez también tienen sus puntos débiles. En concreto la principal virtud del uso de inversiones de modelos de transferencia radiativa es la obtención de parámetros que tienen un sentido físico y que están basados en una serie de leyes de aplicación general. Por el contrario la inversión de estos modelos requiere un cálculo computacional muy elevado, y en general se puede incluir dentro de los llamados “problemas mal propuestos” (*ill-posed problem*), es decir, que pueden existir diferentes conjuntos de parámetros que al ser introducidos en los modelos utilizados en forma directa, dan lugar a espectros de reflectancia similares, y por lo tanto, al intentar realizar el proceso inverso con estos espectros, la solución no puede ser única. Por su parte, el uso de índices de vegetación nos proporciona una magnitud que se puede calcular rápidamente para la totalidad de una imagen de satélite, y que está bien correlacionada con parámetros biofísicos tales como el *LAI* o el contenido clorofílico. Sin embargo estas correlaciones son empíricas y dependen normalmente de la reflectancia del suelo, así como de otros parámetros que en general varían entre las diferentes especies vegetales, e incluso a lo largo del ciclo fenológico de la planta. Por lo tanto, estos índices dan una información limitada.

Para realizar el análisis de datos de reflectancia de la vegetación presentados en el Capítulo 3, se ha optado principalmente por la utilización de inversiones de modelos de transferencia radiativa, en concreto el modelo PROSPECT unido al modelo SAILH, buscando metodologías que permitan relacionar de forma unívoca los espectros

medidos y los parámetros biofísicos de la cubierta vegetal. Para conseguir tal fin, la forma de actuar ha sido introducir en el sistema más información, bien directamente a través de los valores de ciertos parámetros que conozcamos de forma previa (de forma exacta o aproximada), o introduciendo limitaciones en su variación de unas medidas a otras.

Tabla 6-1 Series de reflectancia experimental analizadas.

Día	Hora comienzo	Hora finalización	Numero de medidas
08/03/2002	15:16	16:32	5
21/03/2002	13:36	16:21	12
16/04/2002	8:39	14:11	11
24/04/2002	8:58	16:45	18
20/05/2002	9:29	10:45	4

A partir de las medidas espectrales de reflectancia del cultivo de cebada, realizadas en la campaña del 2002 y que aparecen en la Tabla 6-1, se quieren obtener parámetros biofísicos que describan el estado del cultivo por medio de la inversión de los modelos de transferencia radiativa PROSPECT y SAILH.

Sin entrar en la forma específica de la inversión, que podría ser a través de algoritmos de inversión como el utilizado en el presente trabajo, o bien mediante las llamadas LUT (*LookUp Tables*), o Redes Neuronales, se sabe que este problema tiene difícil solución en cuanto que diferentes combinaciones de los parámetros de entrada del modelo de transferencia radiativa dan resultados similares (*Ill-Posed Problems*). Es decir, sin información extra, es difícil suponer que los resultados de la inversión puedan ser los correctos.

Para analizar este problema, se han realizado diferentes planteamientos a la hora de afrontar la inversión:

1. Inversión de espectros de forma independiente, sin suponer ninguna información sobre los valores de los parámetros a invertir (sección 6.2).
2. Inversión múltiple de espectros medidos durante intervalos de tiempo cortos, es decir en un mismo día. Durante este periodo supondremos que las propiedades biofísicas del cultivo (LAI , C_{a+b} , distribución angular foliar, reflectancia del suelo, *HotSpot*) se mantienen constantes (sección 6.3).
3. Inversión múltiple de espectros medidos durante intervalos de tiempo largos, es decir durante los meses en los cuales la planta se desarrolla. Durante este periodo supondremos que ciertos parámetros (LAI , C_{a+b} , distribución angular foliar, *HotSpot*) evolucionan a lo largo del crecimiento del cultivo de alguna manera que pueda ser representada mediante una función sencilla: constante, lineal, arco tangente. Es decir, se intenta comprobar sin conocer los valores, si su comportamiento a lo largo del tiempo aporta suficiente información en el problema, como para que éste pueda ser resuelto (sección 6.4).

Dado que las medidas analizadas se encuentran limitadas al intervalo espectral de 400 a 900 nm, y la absorción del agua en este intervalo es totalmente despreciable. Por lo tanto, en todas las inversiones realizadas, el valor del contenido de agua (C_w) se ha fijado a cero.

6.1 Introducción del parámetro BSL en la inversión.

Si de forma intuitiva se puede pensar que la importancia del suelo se ve minimizada por la presencia del cultivo que lo cubre, conviene recordar que la vegetación no absorbe apenas en el infrarrojo y, por lo tanto, a partir de 700 nm su transmitancia es muy alta. De esta forma la reflectancia del suelo influye de manera importante en la reflectancia total de la cubierta vegetal, y por lo tanto su correcta determinación es fundamental a la hora de obtener otros parámetros mediante inversión.

Como se puede comprobar en la Figura 3-11 de la sección 3.5, la reflectancia del suelo cambia de forma importante de unas fechas a otras debido básicamente a las variaciones de su humedad. Sin embargo entre ambos espectros de reflectancia existe una correlación muy alta, de $R^2 = 0.98$, lo que nos ha llevado a caracterizar la reflectancia del suelo a lo largo de la evolución del cultivo a través de la expresión (6-1).

$$\rho_{suelo} = BSL \rho_{suelo_24-04-2002} \quad (6-1)$$

donde $\rho_{suelo_24-04-2002}$ es el espectro de reflectancia medido el día 24 de abril, y BSL es un factor de proporcionalidad.

La diferencia promedio entre el espectro de reflectancia medido el día 25 de febrero y el obtenido mediante la expresión (6-1), con el parámetro BSL adecuado, es de 0.0095, siendo el valor máximo de esta diferencia de 0.018 para la longitud de onda de 510 nm.

De esta manera caracterizaremos la reflectancia del suelo a través de un único parámetro, con aproximadamente un error de 0.01.

6.2 Resultados de la inversión de espectros de reflectancia individuales.

En primer lugar vamos a analizar los resultados obtenidos en la inversión de los modelos de transferencia radiativa PROSPECT y SAILH, en la cual no estamos haciendo suposiciones sobre los valores de los parámetros de estos modelos, ni se establecen relaciones entre ellos.

El algoritmo de inversión utilizado es el denominado *Downhill Simplex*. Mediante este algoritmo se busca de forma iterativa un mínimo de una función de mérito, a partir de una estimación inicial. En este primer caso, la función de mérito que vamos a considerar es la siguiente:

$$\Delta^2 = \sum_{\lambda} (\rho(\lambda) - \rho^*(\lambda, P))^2 \quad (6-2)$$

donde ρ y ρ^* son la reflectancia espectral medida y modelizada respectivamente. El término P representa el conjunto de parámetros biofísicos que tratamos de determinar, es decir N , C_{a+b} , C_m , LAI , χ , $HotSpot$ y BSL . Recordemos que el parámetro χ proviene de la parametrización de la función de distribución de ángulos de inclinación foliar y el BSL de la parametrización de la reflectancia del suelo, tal como se describe en la

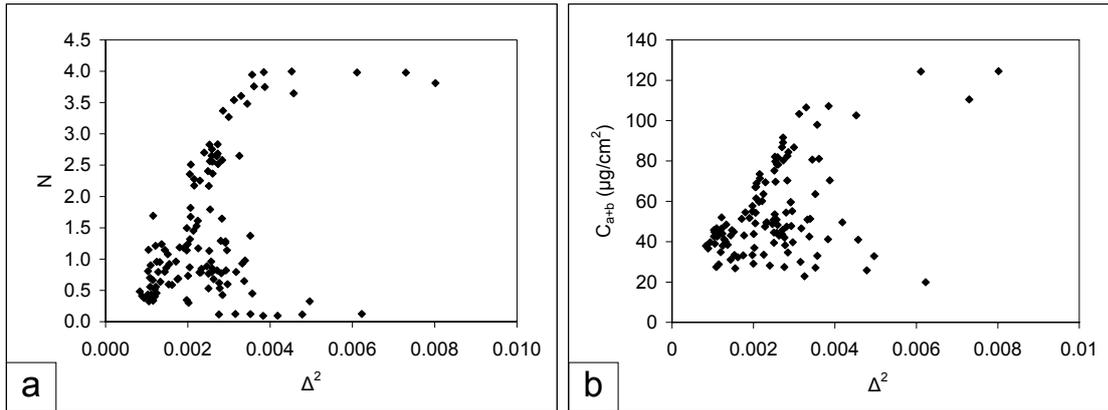


Figura 6-1 Valores del parámetro N (a) y C_{a+b} (b) en función del valor final de Δ^2

sección anterior. Siguiendo este procedimiento, el mínimo de la función que encontremos no será en general un mínimo absoluto, sino más bien un mínimo relativo. Al mismo tiempo, dadas las características del algoritmo, dos estimaciones iniciales diferentes pueden producir resultados diferentes. Una forma habitual de superar esta dificultad es la de repetir el proceso de inversión partiendo de diferentes estimaciones iniciales (Press et al., 1986). En nuestro caso, el proceso se ha reiniciado utilizando todas las combinaciones posibles de los valores dados en la Tabla 6-2.

Tabla 6-2 Valores utilizados en las estimaciones iniciales para los distintos parámetros.

N	C_{a+b}	C_m	LAI	χ	<i>HotSpot</i>	<i>BSL</i>
1	10	0.001	0.1	0.1	0	0.5
3	90	0.005	3	10	1	1

Esto nos lleva a comenzar 256 procesos de minimización. Si tenemos en cuenta que estamos trabajando con intervalos espectrales de 400 a 900 nm, con un muestreo de 5 nm, se requieren en total en torno a 10^5 llamadas a las rutinas PROSPECT y SAILH. Como vemos, sólo se están utilizando 2 valores por parámetro, sin embargo aumentar este valor conlleva incrementos de cálculo que a menudo no son viables. Por ejemplo aumentar a 3 el número de estimaciones iniciales por parámetro, equivale a realizar $3^8 = 6561$ minimizaciones.

En la Figura 6-1 se muestran los parámetros N y C_{a+b} resultantes de las 256 inversiones realizadas sobre el espectro medido el día 24-04-2002 a las 12:44. El resultado se presenta ordenado según del valor final de la función Δ^2 . Como se puede ver la variabilidad de los resultados es demasiado grande como para pensar que la inversión pueda ser independiente de la estimación inicial.

Para obtener una única estimación de estas 256 inversiones, supondremos que el mínimo absoluto corresponde al menor de los mínimos locales encontrados de la función Δ^2 . En la Figura 6-2 se muestran los resultados de esta hipótesis sobre las medidas del día 24-04-2002. En esa figura observamos la variación o dispersión diaria de los parámetros biofísicos debido a este proceso de inversión. Se pone pues de manifiesto la inestabilidad del proceso de inversión al tratar de encontrar el “mínimo absoluto” de la función mérito.

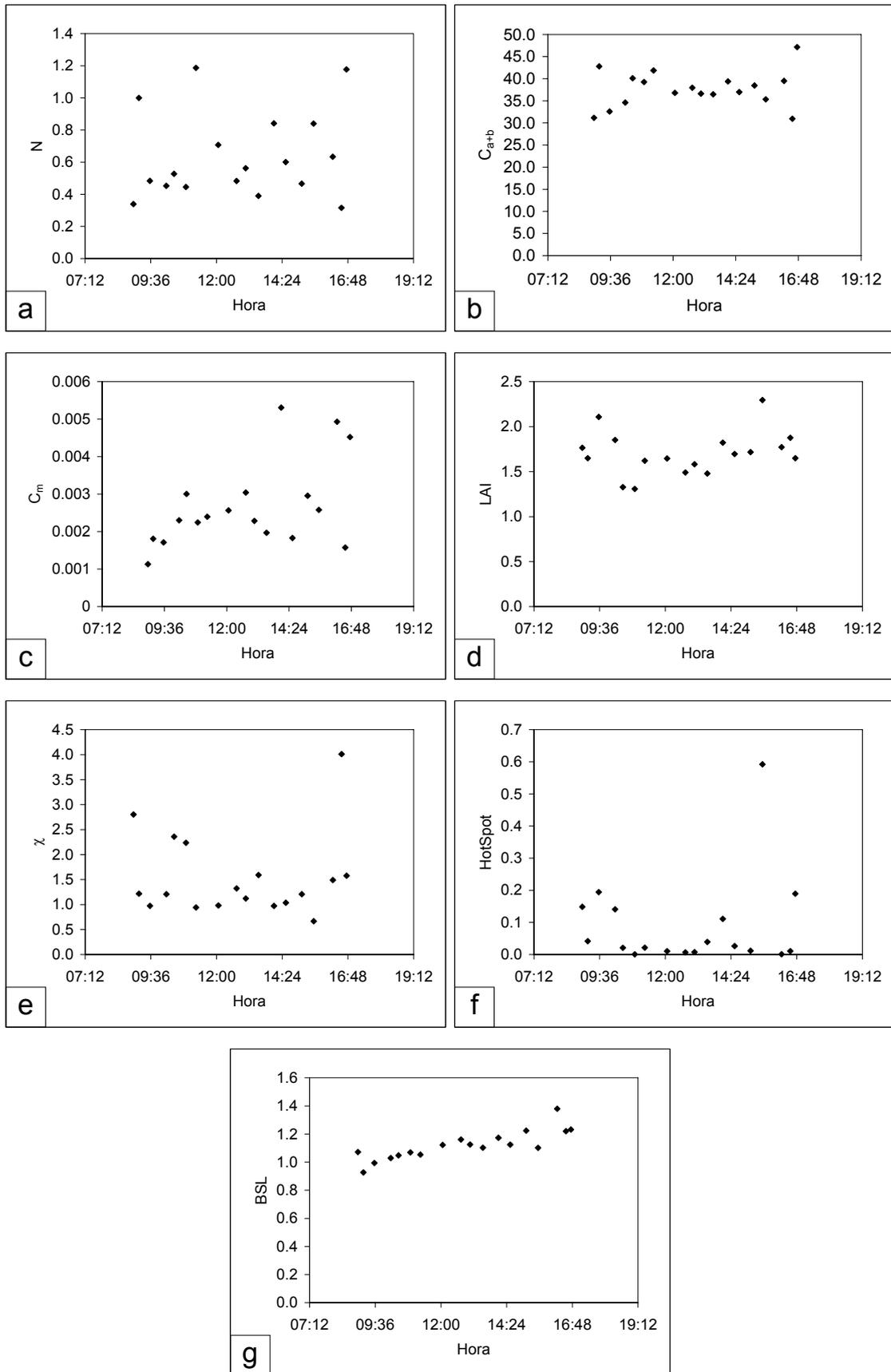


Figura 6-2 Valores resultantes de las inversiones de las medidas del día 24-04-2002, para cada uno de los parámetros biofísicos del modelo.

Los valores promedios en esta serie diaria son del orden de los valores esperables, salvo para el caso del parámetro N , donde el valor típico en hojas de cereal como la cebada está en torno a 1.5 (Jacquemoud & Baret, 1990) tal como se ha comprobado en el capítulo anterior. Sin embargo las variaciones observadas en un mismo día hacen poco creíbles los resultados obtenidos mediante esta metodología.

De las anteriores gráficas, podemos observar que los tres parámetros con menor dispersión, C_{a+b} , LAI y BSL , son a su vez tres de los parámetros más importantes según lo visto en el análisis de sensibilidad realizado en la sección 2.4.3. Sin embargo, el parámetro χ que como ya vimos tenía una elevada influencia en el modelo SAILH, tiene aquí una dispersión mucho mas alta que estos otros tres parámetros.

En la Figura 6-2 hemos mostrado los resultados para el día de la campaña en el que se dispone de un mayor número de medidas. En la Figura 6-3 se resume la información para los cinco días de la campaña, mostrando los valores de las desviaciones estándar respecto de la media diaria de los resultados de las inversiones.

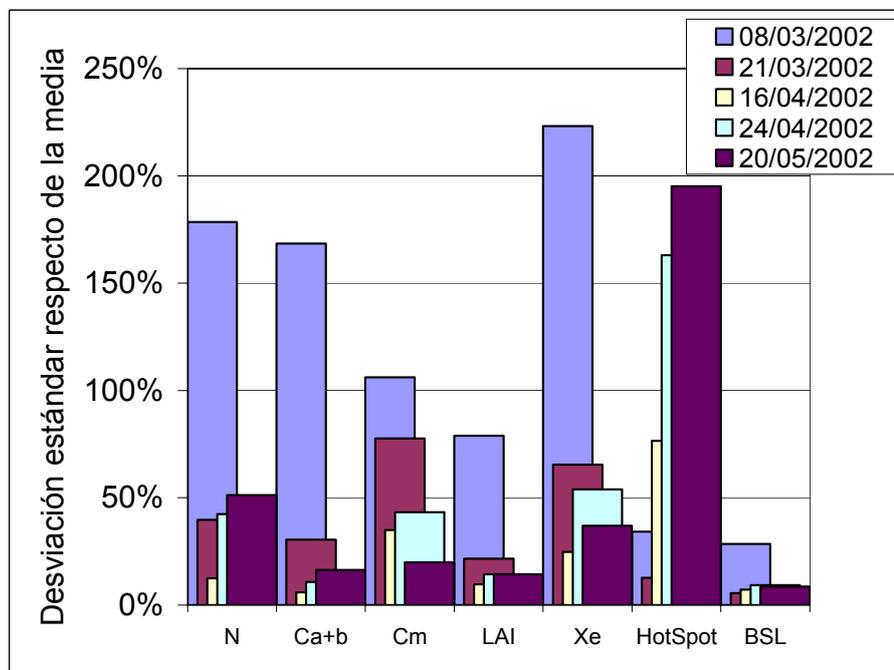


Figura 6-3 Desviación estándar respecto de la media de los resultados de las inversiones para los datos de los cinco días.

En primer lugar se observa cómo para la fecha del 08/03/2002, en la que el desarrollo de la planta es muy reducido, la variabilidad de los datos es muy grande. En segundo lugar, se puede ver como la tendencia observada en los valores del 24/04/2002 de los parámetros C_{a+b} , LAI y BSL , se puede generalizar al resto de fechas. Así mismo, a partir de esta gráfica parece apreciarse una tendencia a la estabilidad cuando la cubierta tiene un valor de LAI en torno a la unidad, en este caso coincidiendo con la fecha 16/04/2002.

El hecho de que χ presente una dispersión tan alta, indica a priori que la inversión no es capaz de hacer una estimación correcta de este parámetro. Por lo tanto, y teniendo en cuenta que éste es uno de los parámetros más influyente en el resultado, cabe pensar que los resultados de los otros parámetros tampoco van a estar próximos a los valores esperados.

Hasta aquí se han mostrado los resultados de la inversión, destacando la gran dispersión de los mismos. En la Figura 6-4 se comparan los datos experimentales con el *LAI* obtenido mediante inversión, obteniéndose un $R^2 = 0.53$ y un $RMSE = 0.56$. Así mismo se presenta la evolución temporal de los resultados del *LAI* en la Figura 6-5 (a).

En la Figura 6-5(b) se muestra la evolución del parámetro C_{a+b} obtenido mediante la inversión de los modelos PROSPECT y SAIL a partir de las medidas de reflectancia de la cubierta vegetal. Se incluye también los valores medidos en laboratorio, así como los valores resultantes de la inversión de la transmitancia y reflectancia foliar mediante el modelo PROSPECT. Se observa una discrepancia clara entre los resultados de la inversión de PROSPECT-SAILH y los valores medidos de clorofila, principalmente entre las medidas de marzo, donde los valores de *LAI* se encuentran por debajo de 0.3.

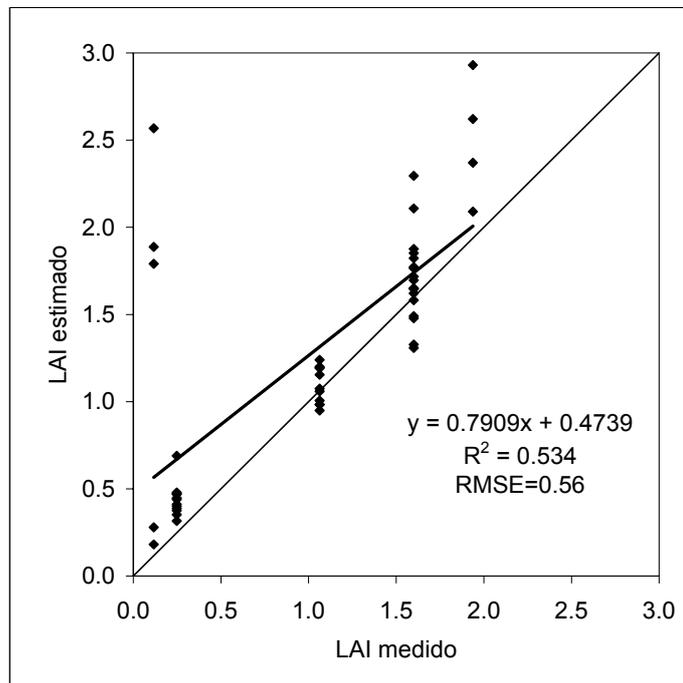


Figura 6-4 Comparación entre el *LAI* medido y el estimado mediante inversión sin realizar ninguna suposición.

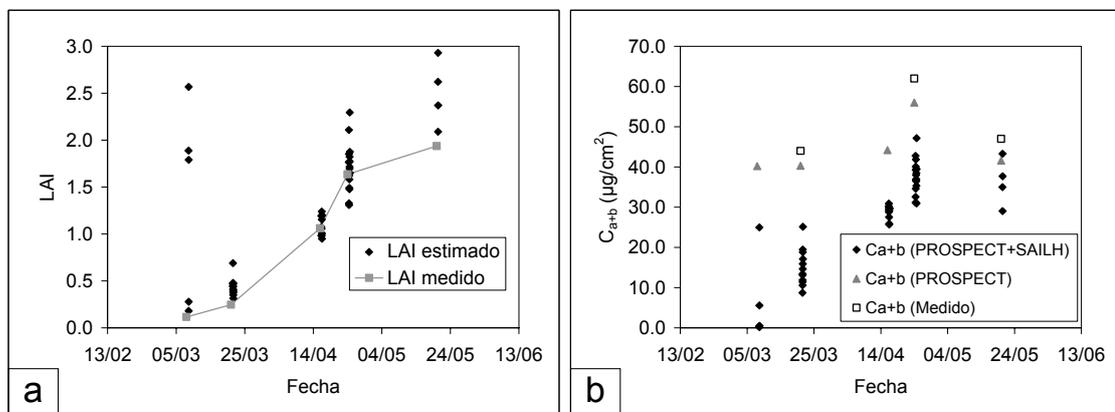


Figura 6-5 Resultados de los parámetros *LAI* (a) y C_{a+b} (b) de las inversiones de los modelos y de las medidas experimentales de la campaña 2002

Estos resultados nos centran en la complejidad del problema. A diferencia de lo que ocurría en el caso de la inversión del modelo PROSPECT, en donde se contaba como datos de entrada con la reflectancia y la transmitancia foliar, en el caso de la inversión de la reflectancia de la cubierta vegetal, hay menos información, y más parámetros desconocidos.

6.2.1 Resultado al fijar los valores de N y C_m .

El procedimiento más utilizado para evitar el problema de la falta de unicidad en la solución de las inversiones, es la de asignar a un número suficiente de parámetros valores conocidos. En esta sección, así como en secciones siguientes, se utiliza este procedimiento para asignar valores típicos a parámetros que tienen una influencia

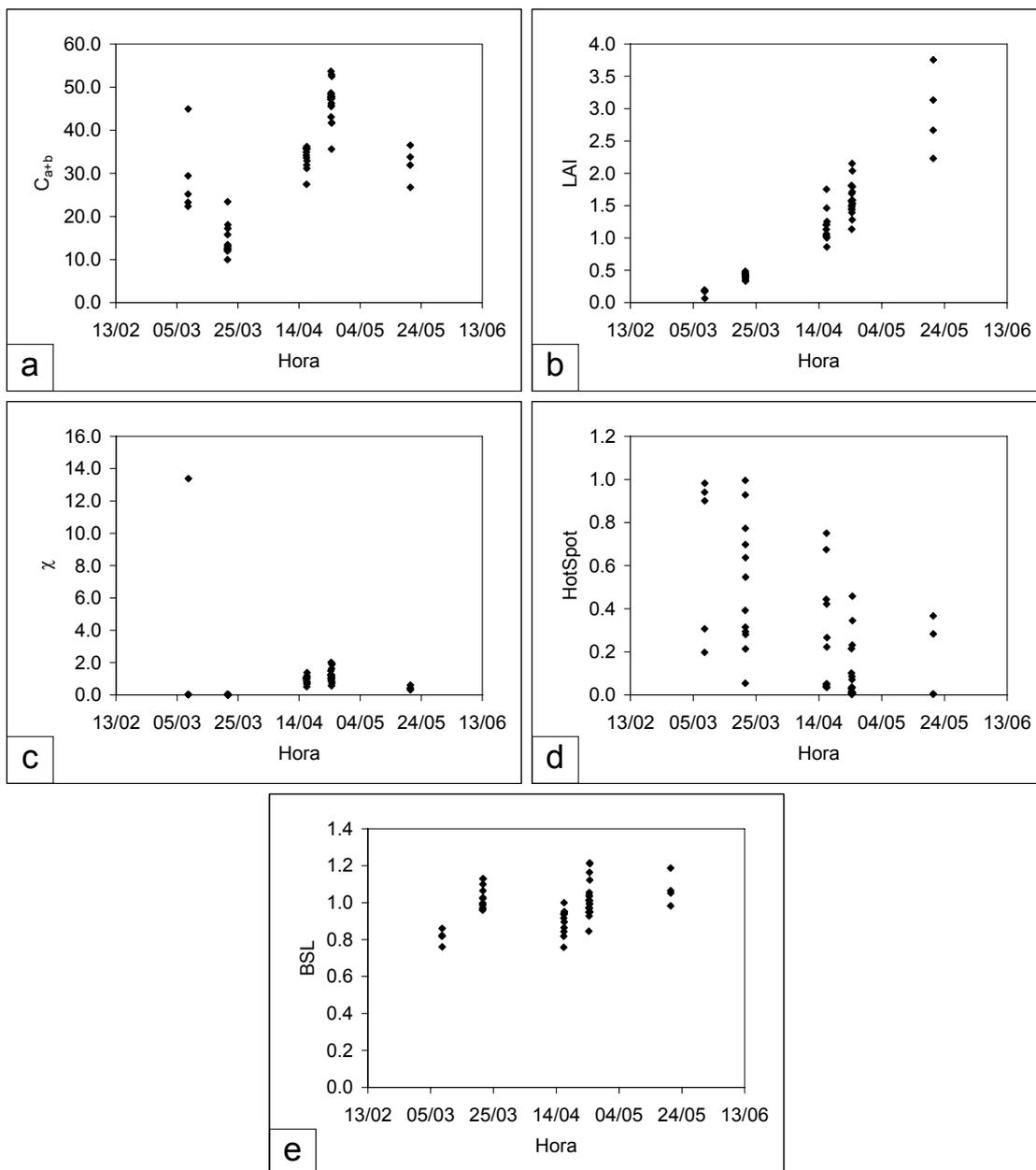


Figura 6-6 Resultados de los parámetros obtenidos mediante inversión de PROSPECT y SAILH, fijando los valores de N y C_m .

menor en el resultado, tal como se vio en la sección 2.4. En concreto se han fijado los parámetros N y C_m partiendo de datos dados por la bibliografía. El parámetro N ha sido fijado a 1.5 (Jacquemoud & Baret, 1990), mientras que C_m ha sido fijado a 0.003 g/cm^2 (Vile et al., 2005), obtenido a partir del área específica foliar para gramíneas.

El resultado para los parámetros C_{a+b} , LAI , χ , $HotSpot$ y BSL , obtenidos mediante este proceso, se puede ver en la Figura 6-6. La primera impresión al observar esta gráficas es la enorme variabilidad para cada uno de los parámetros, dentro del mismo día.

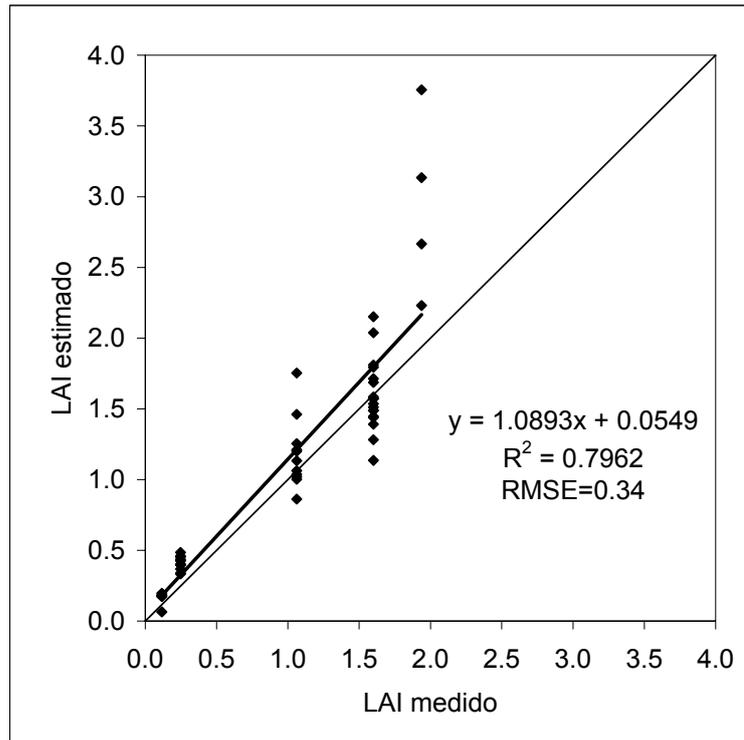


Figura 6-7 Comparación entre el LAI medido y el estimado mediante inversión de PROSPECT y SAILH, fijando los valores de N y C_m .

En la Figura 6-7 vemos la comparación entre los valores de LAI obtenidos de la inversión y los medidos. Comparando con los resultados mostrados en la Figura 6-4, se puede comprobar una mejor correlación así como una clara mejora para los datos de los meses de marzo, donde los valores de LAI no superan el 0.5. Sin embargo, como ya mencionamos se sigue apreciando una gran variabilidad dentro de los resultados del mismo día, sobre todo para las fechas de abril y mayo.

6.2.2 Resultado al utilizar las medidas de reflectancia y transmitancia foliar.

Otra aproximación que vamos a contemplar, es la utilización de medidas de reflectancia y transmitancia foliar en vez de simular las propiedades ópticas de la hoja mediante el modelo PROSPECT. De esta manera se realizará la inversión solamente del modelo SAILH. El resultado para los parámetros LAI , χ , $HotSpot$ y BSL , obtenidos mediante este proceso, se puede ver en la Figura 6-8.

Si bien el parámetro *LAI* obtenido de la inversión (Figura 6-10) da buenos resultados para las primeras fechas, para el último día de la campaña (15-05-02) se obtiene una clara discrepancia. Esto concuerda con el hecho de que el valor de χ estimado para esta fecha, de 0.4, correspondiente a un valor medio de inclinación foliar de 74° , era bastante inferior al valor esperado, entre 0.8 y 1, es decir, entre 63° y 64° del valor medio de inclinación foliar. Así mismo, comparando con el resultado de la sección anterior (Figura 6-1), se ve una mejora en la dispersión de los datos obtenidos. Sobre todo en las tres últimas fechas, correspondientes a los meses de abril y mayo.

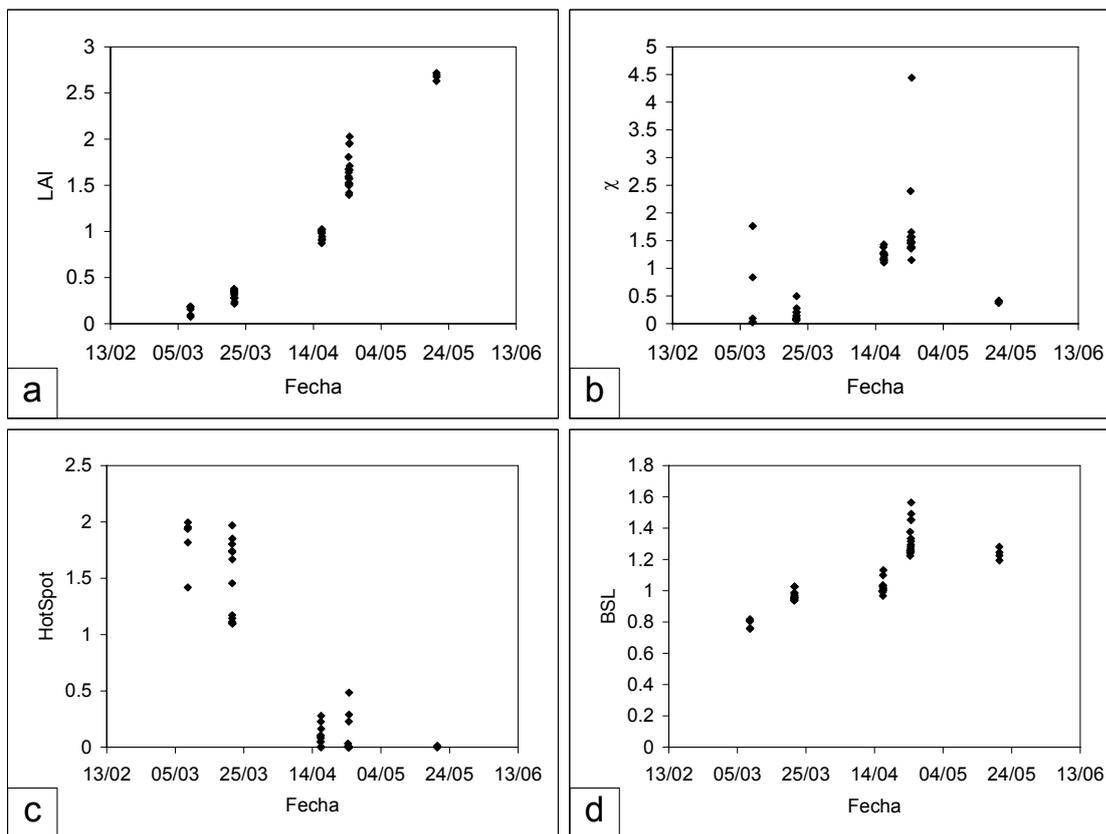


Figura 6-8 Resultados de los parámetros obtenidos de la inversión de los datos de la campaña 2002 mediante el modelo SAILH.

La inversión del modelo SAILH de forma aislada, utilizando medidas de reflectancia y transmitancia foliar, no nos es útil para extraer información de la reflectancia de la cubierta vegetal, dado que requiere demasiada información, que además en general no se tendrá. Sin embargo sí nos permite reducir suficientemente el número de parámetros a invertir, sin realizar ninguna suposición o simplificación, como para empezar a apreciar la influencia del ángulo de elevación solar sobre los resultados. En la Figura 6-9 se puede ver el resultado para el día 24 de abril, que corresponde al día con la serie de medidas más larga disponible. En esta gráfica se puede ver que existe una dependencia con la hora de medida para el parámetro *LAI*. Así mismo para el parámetro *BSL* parece existir también cierta dependencia con la hora, al menos en las medidas de la tarde.

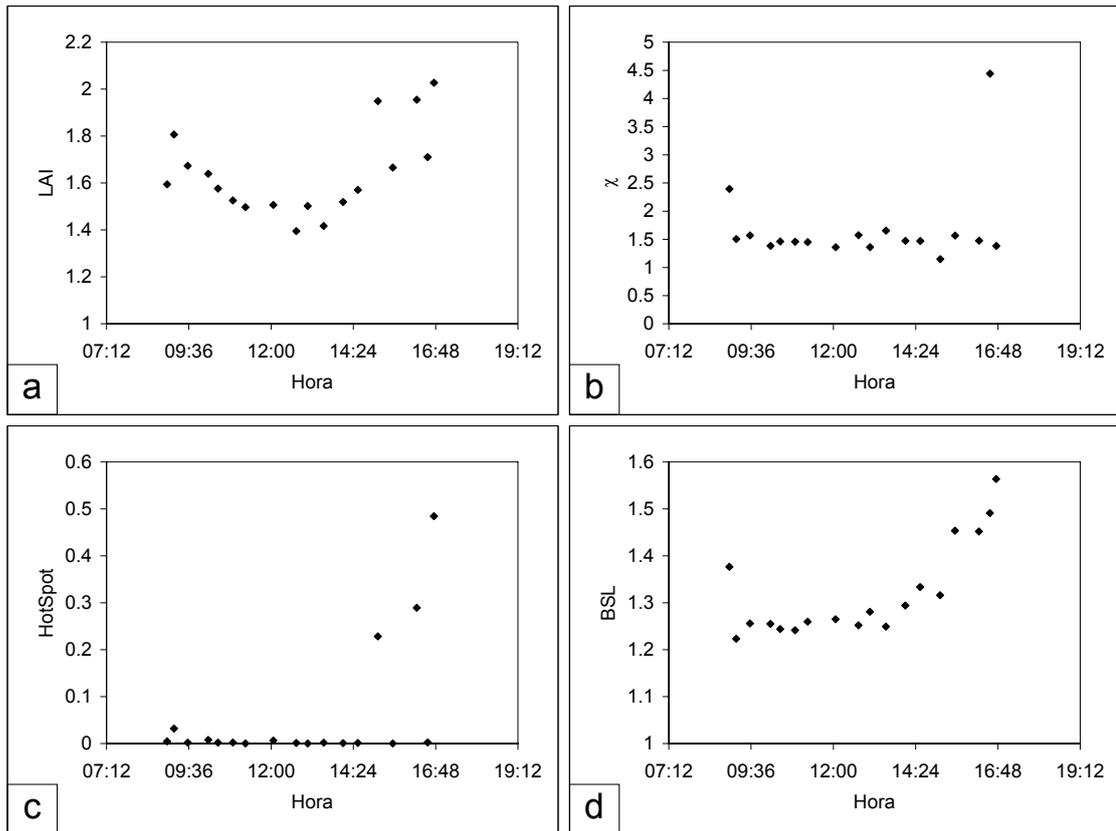


Figura 6-9 Resultados de los parámetros obtenidos de la inversión de los datos del día 24-04-2002 mediante el modelo SAILH.

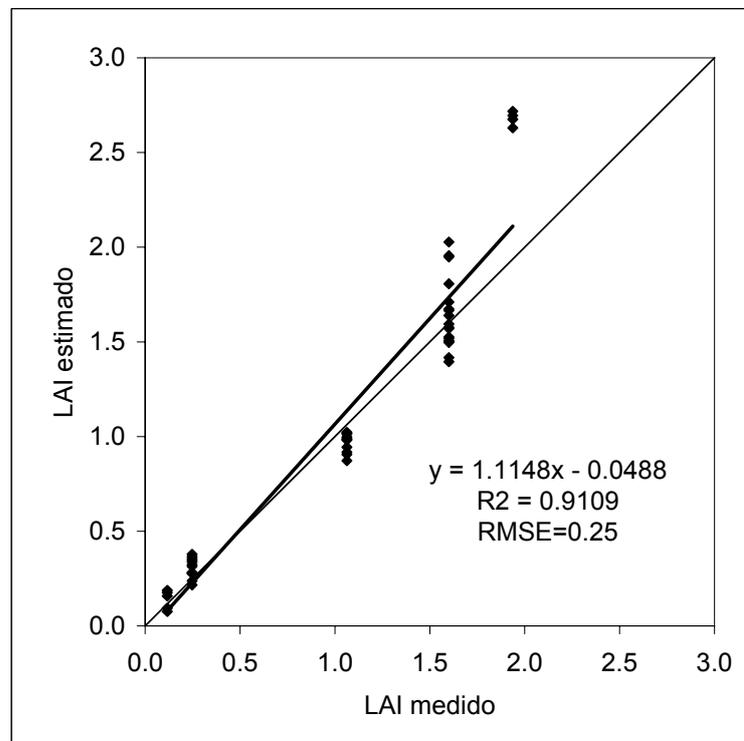


Figura 6-10 Comparación entre el LAI medido y el estimado mediante inversión del modelo SAILH.

6.3 Análisis de series cortas de espectros de reflectancia.

A partir del resultado de la sección anterior se puede empezar a intuir que una inversión simultánea de los datos obtenidos durante un mismo día puede llevarnos a una mejor estimación de las propiedades de la vegetación. Junto a esto, se puede ver en la bibliografía que el análisis de datos espectrales de reflectancia de cubiertas vegetales se ve mejorado sustancialmente cuando se realiza simultáneamente la inversión múltiple de datos de reflectancia (Goel & Strebel, 1983; Bacour et al., 2001; Vega et al., 2005).

El procedimiento propuesto en esta sección consiste en la inversión de los datos, minimizando mediante el algoritmo Down Hill Simplex, una función de mérito.

$$\Delta_1^2 = \sum_i \sum_{\lambda} (\rho_i(\lambda) - \rho^*_i(\lambda, P))^2 \quad (6-3)$$

Donde el sumatorio en i se refiere a las diferentes horas a las que se han realizado las medidas para cada uno de los cinco días, lo cual supone una única inversión para cada día de medida. Es decir, estamos forzando a que para todas las horas del día, todos los parámetros de los modelos, salvo los que se refieren a las condiciones atmosféricas y a la iluminación de sol, permanezcan constantes.

A partir de aquí, introduciremos una segunda función de mérito, utilizada también en la bibliografía (Bacour et al., 2001), con el fin de comprobar la influencia de estas funciones sobre el resultado. Esta segunda función de mérito se define en la Ecuación (6-4). La principal diferencia que introduce respecto de la función Δ_1^2 , es una normalización de la reflectancia, evitando la mayor influencia de las longitudes de onda del infrarrojo, sobre el resultado final de la función de mérito.

$$\Delta_2^2 = \sum_i \sum_{\lambda} \left(\frac{\rho_i(\lambda) - \rho^*_i(\lambda, P)}{\rho_i(\lambda)} \right)^2 \quad (6-4)$$

En primer lugar podemos ver los resultados obtenidos para la función de mérito Δ_1^2 . La Figura 6-11 muestra el resultado del LAI estimado frente al LAI medido. Como valor del error de la inversión, no evaluado hasta ahora, se ha considerado la desviación estándar de los 10 procesos de inversión en los cuales, partiendo de estimaciones iniciales diferentes, la función resultante Δ_1^2 ha sido mínima. Los resultados del resto de parámetros se dan en la Tabla 6-3 y en la Figura 6-13. Así mismo los valores de la función de mérito Δ_2^2 se pueden ver en las Figuras 6-12 y 6-13, así como en la Tabla 6-4.

Con ambas funciones de mérito, se obtienen resultados sensiblemente mejores que los mostrados en la sección 6.2, donde la inversión de cada espectro de reflectancia se había realizado de forma independiente. Pero también se comprueba que la dispersión de los resultados, así como la desviación de los valores respecto de los valores experimentales, y por lo tanto la estabilidad del proceso de inversión, sigue siendo muy grande.

Tabla 6-3 Resultados obtenidos mediante inversión múltiple de los datos diarios, utilizando Δ_1^2 .

Dia	C_{a+b}	LAI	χ	HotSpot	BSL	Δ_1^2
08/03/02	34.4	0.1	3.8	0.0	0.75	0.0243118
21/03/02	35.4	0.1	1.7	0.1	0.91	0.0677145
16/04/02	34.2	1.2	0.9	0.3	0.88	0.0340883
24/04/02	47.3	1.4	1.5	0.0	1.01	0.325244
20/05/02	36.1	2.3	0.6	0.1	1.02	0.0137627

Tabla 6-4 Resultados obtenidos mediante inversión múltiple de los datos diarios, utilizando Δ_2^2 .

Dia	C_{a+b}	LAI	χ	HotSpot	BSL	Δ_2^2
08/03/02	34.2	0.1	2.5	1.0	0.73	1.06852
21/03/02	23.3	0.2	1.6	0.0	0.91	2.3368
16/04/02	35.8	1.2	0.8	0.1	0.99	1.37923
24/04/02	43.6	1.6	1.0	0.0	1.08	15.8746
20/05/02	30.8	2.8	0.4	0.0	1.15	2.24345

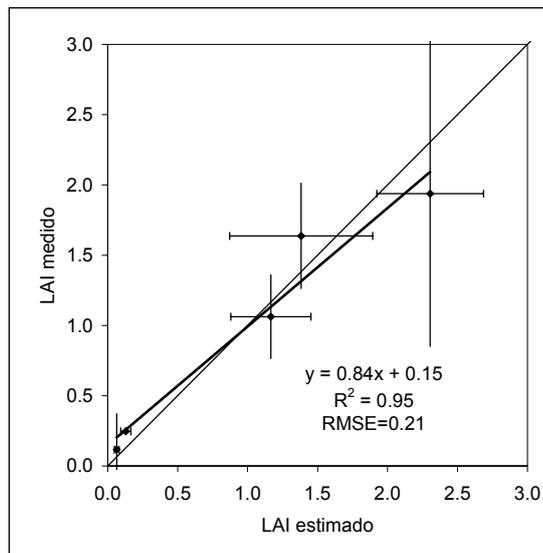


Figura 6-11 Comparación entre el LAI medido y el estimado mediante inversión múltiple de los datos diarios, utilizando Δ_1^2 .

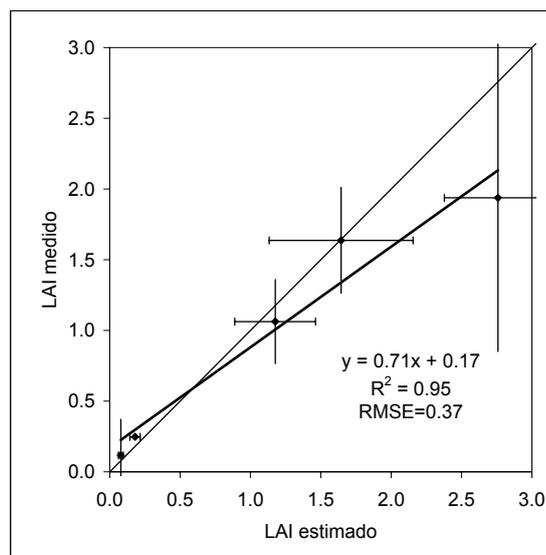


Figura 6-12 Comparación entre el LAI medido y el estimado mediante inversión múltiple de los datos diarios, utilizando Δ_2^2 .

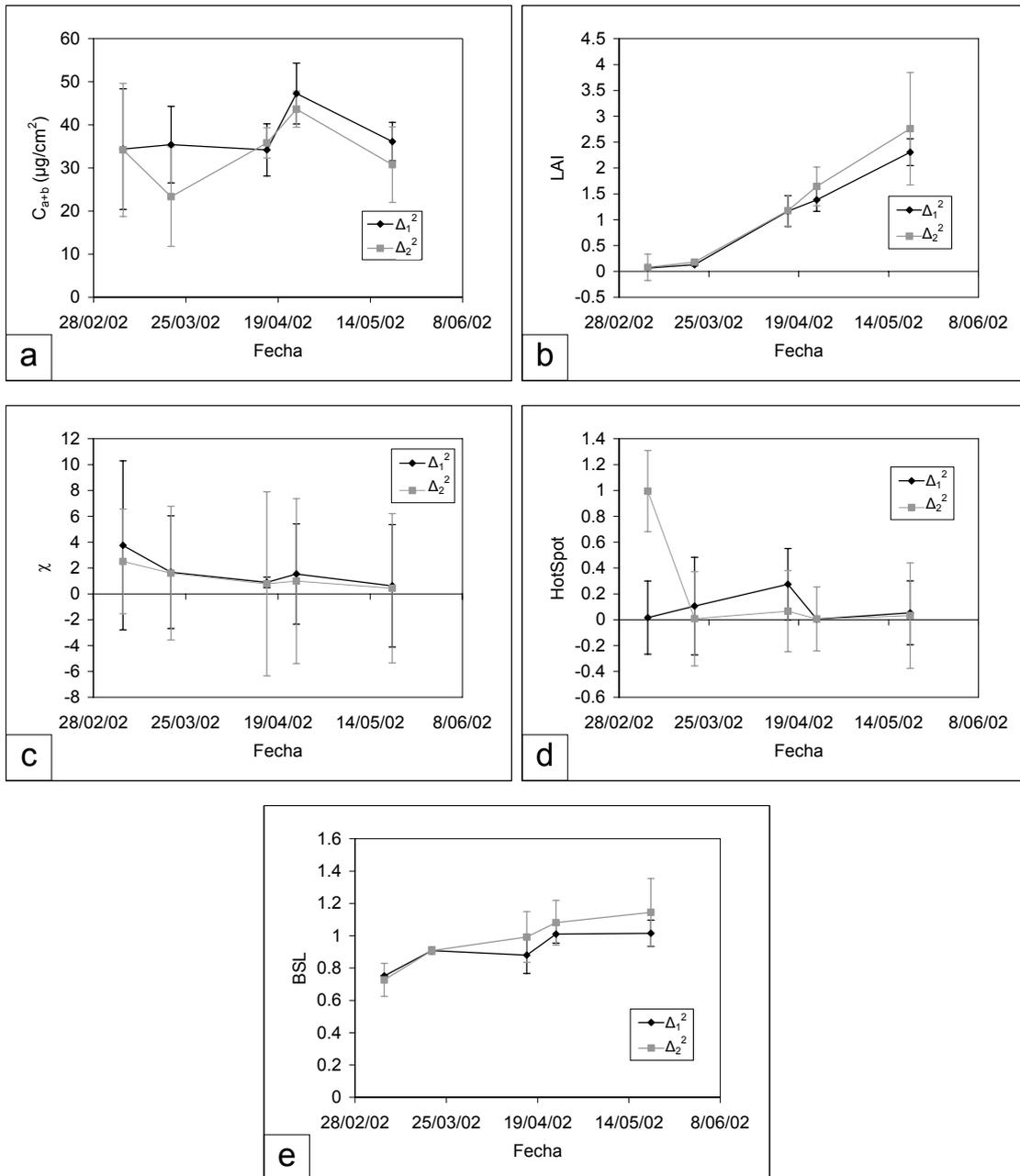


Figura 6-13 Evolución de los parámetros a lo largo de la campaña, obtenido mediante inversión múltiple de los datos diarios.

6.4 Análisis de series largas de espectros de reflectancia.

A fin de aumentar la precisión de las inversiones, y al mismo tiempo disminuir la variabilidad de los resultados, se considera aquí un tercer procedimiento, consistente en el análisis de series largas, es decir series que comprenden el periodo completo de crecimiento de la planta.

Al analizar estas series largas de datos, es necesario realizar un planteamiento diferente al del apartado 6.3. Si bien habrá algunas propiedades de la vegetación que se puedan considerar constantes durante el tiempo estudiado, habrá otras que variarán en las diferentes fechas consideradas. Obviamente este es el caso del índice de área foliar, muy ligado al crecimiento de la planta. Se puede ver de las medidas mostradas en la

sección 3.8 como en una primera fase del crecimiento del cereal, éste se realiza de forma lenta. Sin embargo, al llegar las etapas de encañado y ahijado, el crecimiento se acelera, para estancarse al comienzo de la etapa reproductiva de la planta.

Para simular este proceso en el crecimiento, y por lo tanto el valor del índice de área foliar, se ha utilizado una sencilla función arcotangente, dependiente de tres parámetros, que dé cuenta por un lado del valor máximo del LAI (parámetro C_1), y por otro lado de la fecha del ahijado y de su duración (parámetros C_2 y C_3). Por lo tanto el LAI se considerará una función dependiente del día del año ($DIAJ$), y tendrá la siguiente forma:

$$LAI(DIAJ) = C_1 \left(\text{atan}(C_2(DIAJ + C_3)) + \frac{\pi}{2} \right) \quad (6-5)$$

En la inversión por lo tanto, no se considerará directamente el valor de LAI , sino que se considerará los valores de los parámetros C_1 , C_2 y C_3 .

Al igual que en la sección 6.3, para los parámetros N y C_m se considerarán valores fijos dados por la bibliografía, respectivamente 1.5 y 0.003 g/cm². Por su parte los parámetros C_{a+b} , χ y $HotSpot$ se considerarán fijos, pero desconocidos, y por lo tanto serán incluidos en la inversión. Esta aproximación sobre el comportamiento de C_{a+b} , está basado en los valores obtenidos en la sección 3.7, donde vemos que con la desviación estandar de las medias diarias entre marzo y mayo es de 8 µg/cm², para un promedio de 51 µg/cm², mientras que la desviación estandar media diaria es de 4 µg/cm². Por su parte, de las medidas realizadas en la campaña 2003 y mostradas en la sección 4.7, queda clara la estabilidad de este parámetro, no solo entre parcelas, sino durante la evolución del cultivo. Por su parte el parámetro $HotSpot$, se considera también constante en función de los resultados de la sección previa 6.3. En cuanto al parámetro BSL , al estar influenciado por el clima, en concreto por la lluvia y la humedad ambiental, no se hará sobre él ninguna suposición, por lo que se considerará en la inversión un valor BSL diferente por cada día de medidas considerado en el proceso.

Para realizar la inversión se han utilizado dos funciones de mérito, como en el apartado 6.3. En este caso, el sumatorio en i no solo se extenderá a las horas del día, sino también a la fecha en la que se hayan realizado cada una de las medidas. El parámetro P de la reflectancia modelizada corresponderá en este caso no simplemente a los parámetros biofísicos utilizados por el modelo, sino a los parámetros que definan estos valores, como es el caso de C_1 , C_2 y C_3 , en total 10 parámetros.

$$\Delta_1^2 = \sum_i \sum_{\lambda} (\rho_i(\lambda) - \rho^*_i(\lambda, P))^2 \quad (6-6)$$

$$\Delta_2^2 = \sum_i \sum_{\lambda} \left(\frac{\rho_i(\lambda) - \rho^*_i(\lambda, P)}{\rho_i(\lambda)} \right)^2 \quad (6-7)$$

6.4.1 Resultado considerando un solo dato por día.

Para analizar la serie larga partiremos en primer lugar de una serie utilizando únicamente una medida para cada uno de los cinco días considerados en el análisis. Los datos empleados en esta inversión han sido aquellos que se han adquirido en la mitad de la serie diaria. Dado que las series no se han iniciado y finalizado a las mismas horas, cada una de estas medidas se han realizado en un momento diferente del día, tal como se puede ver en la Tabla 6-5. Para este análisis se han seleccionado las medidas realizadas en la mitad de las series de cada uno de los días.

Debemos hacer notar que la elección de estos datos es arbitraria y por tanto los resultados obtenidos van a depender de estos valores. Sin embargo, los resultados de la inversión obtenidos con otra elección de los datos de cada día muestran unos resultados genéricos similares procedentes en el fondo de la pérdida de información, al contemplar un solo dato por día.

Tabla 6-5 Medidas utilizadas en la inversión múltiple con un dato de cada día de la serie.

08/03/2002 15:42
21/03/2002 14:42
16/04/2002 11:00
24/04/2002 12:44
20/05/2002 09:55

El resultado de este proceso de inversión se puede ver en la Figura 6-14, donde se muestra el valor medido de LAI frente al valor estimado mediante inversión utilizando las funciones de mérito Δ_1^2 y Δ_2^2 respectivamente. Desde la Tabla 6-6 hasta la Tabla 6-11 se muestra tanto los resultados del resto de parámetros de los modelos PROSPECT y SAILH que se han obtenido en la inversión, como los valores de la dispersión del proceso de inversión, tal como se ha descrito en el apartado 6.3.

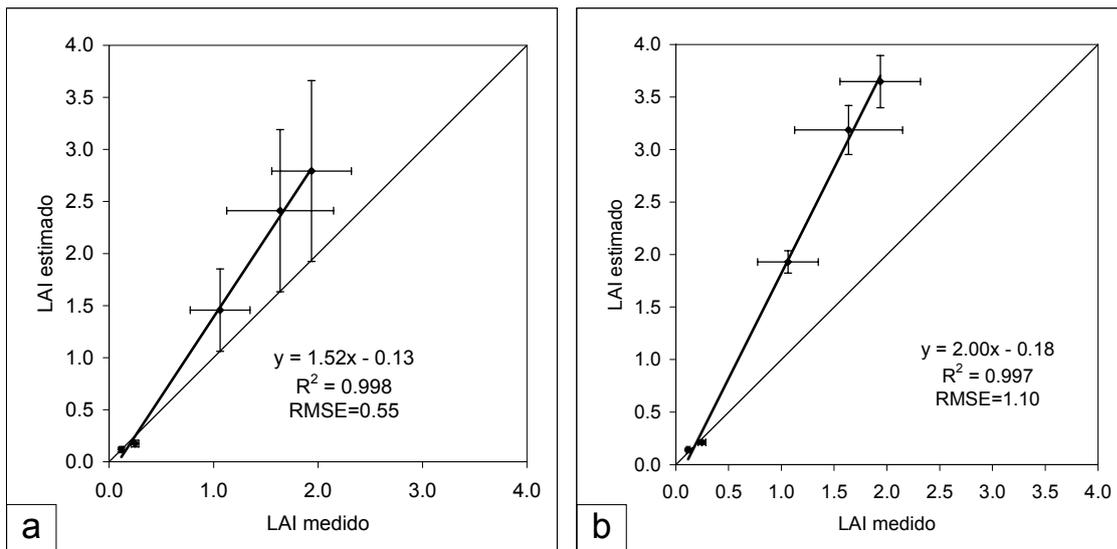


Figura 6-14 Comparación entre el LAI medido y el estimado mediante inversión múltiple de un dato de cada día de la serie, utilizando Δ_1^2 (a) y Δ_2^2 (b).

Tabla 6-6 Resultados obtenidos mediante inversión múltiple de un dato de cada día de la serie, utilizando Δ_1^2 .

Dia	DiaJ	C_{a+b}	LAI	χ	HotSpot	BSL
08/03/2002	67	31.6	0.12	0.55	0.15	0.77
21/03/2002	80	31.6	0.17	0.55	0.15	0.92
16/04/2002	106	31.6	1.46	0.55	0.15	0.98
24/04/2002	114	31.6	2.41	0.55	0.15	1.04
20/05/2002	140	31.6	2.79	0.55	0.15	0.95

Tabla 6-7 Dispersión de los resultados obtenidos mediante inversión múltiple de un dato de cada día de la serie, utilizando Δ_1^2 .

	08/03/2002	21/03/2002	16/04/2002	24/04/2002	20/05/2002
Desv.Est. LAI	0.02	0.03	0.40	0.78	0.87
Desv.Est. BSL	0.01	0.01	0.05	0.08	0.10

Tabla 6-8 Dispersión de C_{a+b} , χ y HotSpot obtenidos mediante inversión múltiple de un dato de cada día de la serie, utilizando Δ_1^2 .

Desv.Est. C_{a+b}	5.61
Desv.Est. χ	0.16
Desv.Est. HotSpot	0.32

Tabla 6-9 Resultados obtenidos mediante inversión múltiple de un dato de cada día de la serie, utilizando Δ_2^2 .

Dia	DiaJ	C_{a+b}	LAI	χ	HotSpot	BSL
08/03/2002	67	33.3	0.14	0.40	0.96	0.75
21/03/2002	80	33.3	0.21	0.40	0.96	0.89
16/04/2002	106	33.3	1.93	0.40	0.96	0.90
24/04/2002	114	33.3	3.19	0.40	0.96	0.88
20/05/2002	140	33.3	3.65	0.40	0.96	0.84

Tabla 6-10 Dispersión de los resultados obtenidos mediante inversión múltiple de un dato de cada día de la serie, utilizando Δ_2^2 .

	08/03/2002	21/03/2002	16/04/2002	24/04/2002	20/05/2002
Desv.Est. LAI	0.01	0.02	0.11	0.23	0.25
Desv.Est. BSL	0.01	0.02	0.03	0.03	0.06

Tabla 6-11 Dispersión de C_{a+b} , χ y HotSpot obtenidos mediante inversión múltiple de un dato de cada día de la serie, utilizando Δ_2^2 .

Desv.Est. C_{a+b}	1.04
Desv.Est. χ	0.03
Desv.Est. HotSpot	0.22

A partir de los resultados obtenidos con las dos funciones de mérito, se observa una sobrestimación del índice de área foliar, con diferencias notables sobre los valores experimentales. En ambos casos este resultado viene acompañado con estimaciones del

parámetro χ muy inferiores al valor esperado, cercano a 0.8. Sin embargo se consigue para las dos funciones de mérito correlaciones muy altas entre los datos experimentales y los datos estimados.

6.4.2 Resultado considerando todos los datos medidos

A continuación se presentan los datos obtenidos mediante la inversión múltiple de datos, siguiendo la metodología descrita en la sección anterior, pero utilizando todos los datos disponibles a lo largo de la campaña (Tabla 6-1). De esta manera se pretende comprobar el efecto de las restricciones temporales sobre los parámetros de los modelos.

Los resultados sobre la estimación del LAI los podemos ver en la Tabla 6-12 para la función de mérito Δ_1^2 , y la Tabla 6-15 para Δ_2^2 . Así mismo, en la Figura 6-15 podemos ver la comparación entre LAI medido y LAI estimado mediante ésta inversión, para las funciones de mérito Δ_1^2 , y Δ_2^2 .

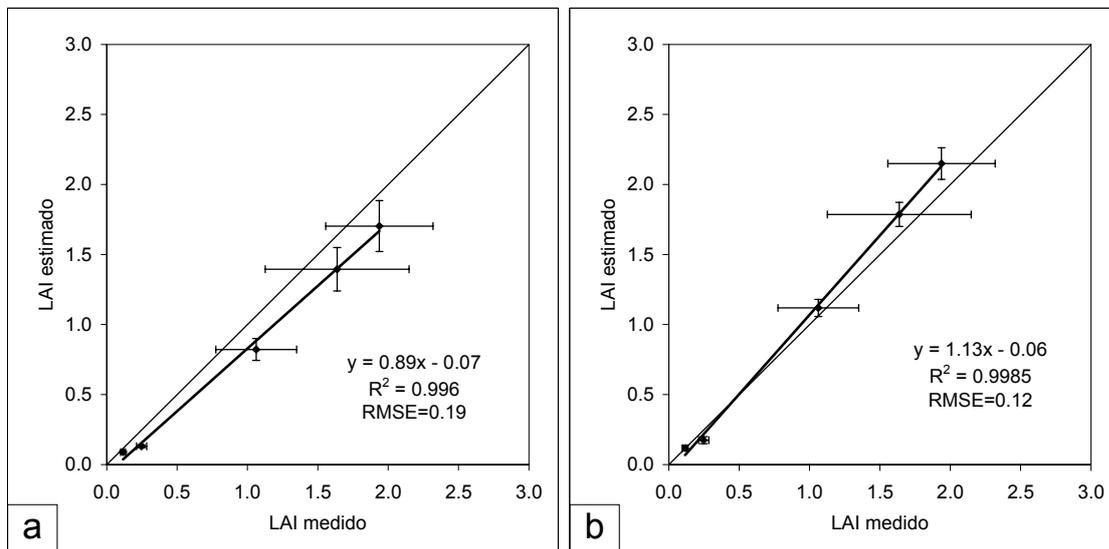


Figura 6-15 Comparación entre el LAI medido y el estimado mediante inversión múltiple de todos los datos de la campaña, utilizando Δ_1^2 (a) y Δ_2^2 (b).

Tabla 6-12 Resultados obtenidos mediante inversión múltiple de todos los datos de la campaña, utilizando Δ_1^2 .

Dia	DiaJ	C_{a+b}	LAI	χ	HotSpot	BSL
08/03/2002	67	43.2	0.09	1.58	0.01	0.77
21/03/2002	80	43.2	0.13	1.58	0.01	0.91
16/04/2002	106	43.2	0.82	1.58	0.01	0.93
24/04/2002	114	43.2	1.39	1.58	0.01	1.00
20/05/2002	140	43.2	1.70	1.58	0.01	0.79

Tabla 6-13 Dispersión de los resultados obtenidos mediante inversión múltiple de todos los datos de la campaña, utilizando Δ_1^2 .

	08/03/2002	21/03/2002	16/04/2002	24/04/2002	20/05/2002
Desv.Est. LAI	0.01	0.01	0.08	0.16	0.18
Desv.Est. BSL	0.01	0.01	0.02	0.03	0.04

Tabla 6-14 Dispersión de C_{a+b} , χ y *HotSpot* obtenidos mediante inversión múltiple de todos los datos de la campaña, utilizando Δ_1^2 .

Desv.Est. C_{a+b}	3.87
Desv.Est. χ	0.31
Desv.Est. <i>HotSpot</i>	0.04

Tabla 6-15 Resultados obtenidos mediante inversión múltiple de todos los datos de la campaña, utilizando Δ_2^2 .

Dia	DíaJ	C_{a+b}	LAI	χ	<i>HotSpot</i>	BSL
08/03/2002	67	39.2	0.12	0.84	0.05	0.77
21/03/2002	80	39.2	0.17	0.84	0.05	0.92
16/04/2002	106	39.2	1.12	0.84	0.05	0.99
24/04/2002	114	39.2	1.79	0.84	0.05	1.07
20/05/2002	140	39.2	2.15	0.84	0.05	0.98

Tabla 6-16 Dispersión de los resultados obtenidos mediante inversión múltiple de todos los datos de la campaña, utilizando Δ_2^2 .

	08/03/2002	21/03/2002	16/04/2002	24/04/2002	20/05/2002
Desv.Est. LAI	0.02	0.03	0.06	0.09	0.11
Desv.Est. BSL	0.02	0.03	0.07	0.10	0.15

Tabla 6-17 Dispersión de C_{a+b} , χ y *HotSpot* obtenidos mediante inversión múltiple de todos los datos de la campaña, utilizando Δ_2^2 .

Desv.Est. C_{a+b}	2.02
Desv.Est. χ	0.08
Desv.Est. <i>HotSpot</i>	0.09

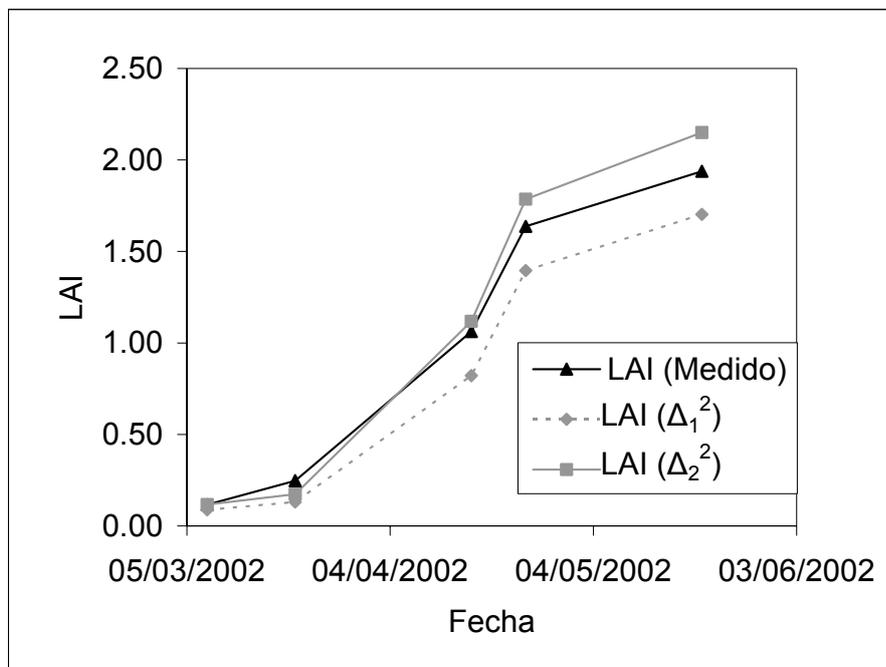


Figura 6-16 Comparación de la evolución del parámetro LAI obtenidos mediante inversión múltiple de todos los datos de la campaña, utilizando Δ_1^2 y Δ_2^2 , y las medidas experimentales.

Se aprecia al analizar estos resultados que con la utilización de la serie total de datos, junto a las restricciones sobre las propiedades de la vegetación, se consigue una mejora de los mismos respecto de los obtenidos en la sección 6.3. Esta mejora se puede resumir en una disminución en los valores del *RMSE* y un aumento en el índice de correlación al comparar el *LAI* estimado y el experimental. Se aprecia en concreto como para la medida del 20 de mayo, la estimación obtenida está mucho más cercana al valor experimental que en los métodos analizados previamente. Pero sobre todo se aprecia una reducción en la dispersión de los valores obtenidos de las 10 mejores repeticiones de la inversión (recuérdese que para cada resultado-inversión se tiene un número de estimaciones iniciales o repeticiones de la inversión de n^p , con n el número de valores con los que vamos a iniciar cada parámetro y p el número de parámetros a determinar), como se ve en las Tablas 6-13, 6-14, 6-16 y 6-17, lo que nos indica claramente una estabilización del proceso de inversión.

Viendo la clara mejora de los resultados respecto de los de la sección 6.4.1, junto con los buenos resultados también obtenidos de la sección 6.3, parece claro que el uso de múltiples medidas en las que únicamente se varíe el ángulo de iluminación es un factor muy importante a la hora de realizar una adecuada inversión de datos, incluso considerando el parámetro χ , que como hemos visto durante todo el capítulo, se obtiene en general con incertidumbres mucho mayores que los parámetros *LAI*, C_{a+b} o *BSL*.

Los resultados obtenidos con las funciones de mérito Δ_1^2 y Δ_2^2 son muy similares, obteniéndose para la primera función una sobrestimación del *LAI*, mientras que para la segunda se obtienen una subestimación de este parámetro, ambas en torno al 10% (Figura 6-16). En el conjunto de la serie el *RMSE* obtenido es ligeramente menor para Δ_2^2 .

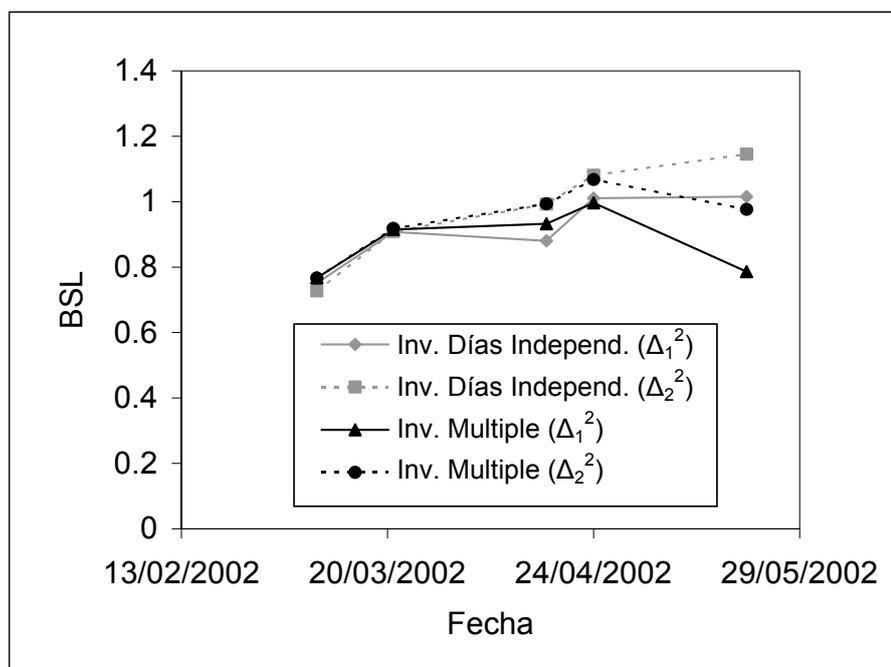


Figura 6-17 Comparación de la evolución del parámetro *BSL* obtenido de las inversiones múltiples realizadas en esta sección y en la sección 6.3.

Para las dos funciones de mérito se consiguen resultados de reflectancia de suelo muy similares si se realiza la inversión de forma independiente cada día, o al realizar la inversión de toda la serie de forma conjunta, salvo en la fecha de 20 de mayo, donde se aprecia una estimación muy diferente de la reflectancia del suelo (Figura 6-17). Este hecho coincide con la discrepancia en el valor del *LAI* encontrada entre los dos métodos en esta misma fecha.

6.4.2.1 Estudio de los resultados del parámetro BSL.

Como se puede apreciar de la Figura 6-17 el parámetro *BSL* toma diferentes valores a lo largo del crecimiento del cultivo, variando desde 0.8 a 1.2.

Esta incertidumbre en el valor del parámetro dificulta enormemente la inversión, ya que al no tener en principio ninguna estimación del mismo, y al ser éste uno de los parámetros fundamentales a la hora de determinar la reflectancia en el infrarrojo, necesariamente tendremos que incluirlo como incógnita en cada uno de los días de los que se disponga información a introducir en la inversión, tal como se ha hecho en el estudio de los datos de la campaña del 2002. Esto implica que la ventaja que proporciona el incluir muchos días en el sistema de inversión, se ve contrarrestada por el aumento de parámetros a invertir, introduciendo por un lado una mayor inestabilidad en el resultado, y por otro, aumentando el tiempo de cómputo de la inversión.

La reflectancia del suelo en general depende del porcentaje en el que se encuentren sus diferentes componentes, principalmente materia orgánica, arcillas, arenas y limos, el grado de agregación y de su humedad (Marshall & Colmes, 1988). Por lo tanto para una zona determinada dentro del cultivo, la evolución de la reflectancia del suelo a lo largo del estudio vendrá determinada por la humedad del mismo.

La variación del contenido de agua en el suelo depende en general de multitud de parámetros, que por un lado tienden a aumentar su contenido, como son las precipitaciones y el riego, y otros que tienden a reducir su contenido, como son la evapotranspiración, el drenaje o la escorrentía. Sin embargo, la reflectancia del suelo viene dada exclusivamente por la capa más superficial del mismo, y el efecto de todos estos parámetros se verá muy reducido, dando una mayor importancia a parámetros meteorológicos.

En concreto se ha encontrado una correlación de $R^2 = 0.64$, entre el parámetro *BSL* obtenido mediante inversión múltiple de todos los datos de la campaña utilizando la función Δ_2^2 , y la evaporación potencial, E_A (Figura 6-18 (a)), que ha sido calculada a partir de la siguiente ecuación (Penman, 1948).

$$E_A = 0.26(1 + 0.54u)(e_s - e) = 0.26(1 + 0.54u)e_s(1 - HR) \quad (6-8)$$

Donde u es la velocidad del viento, e la presión de vapor de agua, e_s la presión de saturación de vapor de agua y HR la humedad relativa.

Los datos de la evaporación potencial han sido calculados a partir de datos medios diarios de humedad relativa y temperatura, medidos en la estación meteorológica de Villanubla, situada a una distancia de 25 km respecto de la zona de

medida. La velocidad del viento se ha tomado con un valor constante de 14 m/s, y la presión de saturación de vapor de agua se ha calculado a través de la expresión dada por Richards (1971).

$$e_s = P \exp(13.3185t - 1.9760t^2 - 0.6445t^3 - 0.1299t^4) \quad (6-9)$$

$$t = 1 - 373.15 / (T + 273.15) \quad (6-10)$$

Donde T es la temperatura expresada en grados Celsius, y P la presión atmosférica a nivel de la estación.

Se han obtenido aún mejores resultado, $R^2 = 0.81$, correlacionando el parámetro BSL directamente con el promedio diario de la humedad relativa del aire, tal como se muestra en la Figura 6-18 (b) y en la Figura 6-19. En la Tabla 6-18, así como en las gráficas siguientes, se han incluido datos para los días 20 y 25 de febrero, con el fin de ampliar el rango en los que se está comprobando la relación del parámetro BSL con la humedad relativa y la evaporación potencial. Durante estos días, próximos a la emergencia de la planta, los espectros de reflectancia medidos corresponden prácticamente a la reflectancia del suelo, por lo que el parámetro BSL para estos días se ha obtenido mediante correlación lineal frente al espectro de reflectancia utilizado como base en las inversiones realizadas en este capítulo.

Tabla 6-18 Valores de la Humedad relativa y la evaporación potencial.

	HR (%)	P (mb)	T (°C)	evaporación potencial (mm/día)
20/02/2002	63	930.6	4.2	8.7
25/02/2002	68	923.3	7.4	5.5
08/03/2002	62	925.5	10.6	13.9
21/03/2002	55	931.9	14.7	21.5
16/04/2002	55	920.5	9.2	15
24/04/2002	39	928.6	18.2	36.4
20/05/2002	42	917.1	19.7	38.1

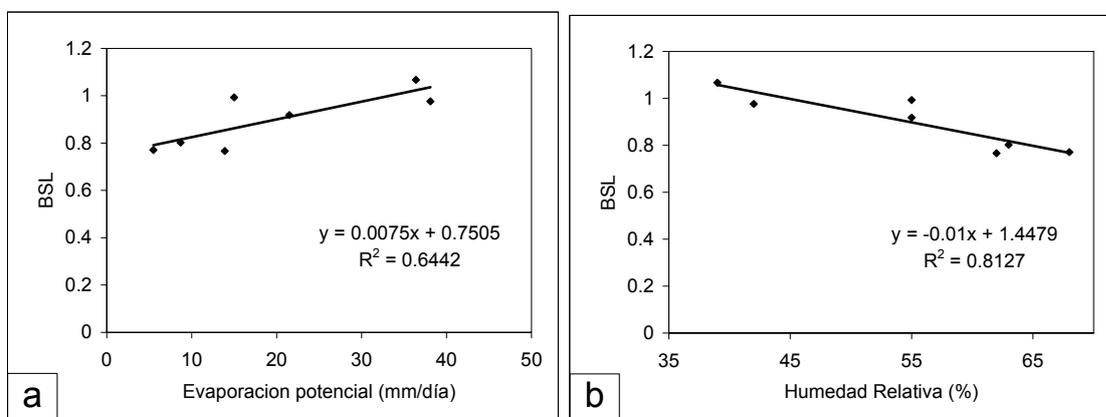


Figura 6-18 Relación entre la humedad relativa del aire, la evaporación potencial y el parámetro BSL obtenido mediante inversión múltiple de todos los datos de la campaña, utilizando Δ_2^2

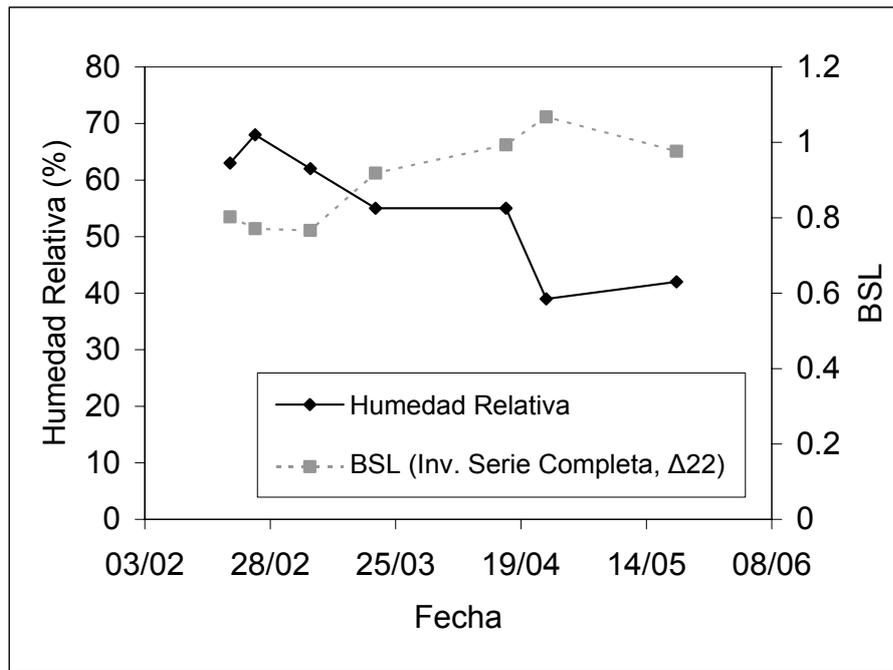


Figura 6-19 Evolución de la humedad relativa del aire y el parámetro *BSL*.

Esta relación, si bien no puede considerarse de aplicación general, ya que obviamente vendrá modulada por la transpiración de la planta y las precipitaciones, sí refleja una tendencia que puede permitir reducir la incertidumbre en la evolución del parámetro *BSL*.

Capítulo 7. Análisis de la campaña 2003

En el presente capítulo se pretende estudiar el problema de la inversión de reflectancias de cultivos desde un punto de vista diferente al realizado en la campaña 2002. Si el resultado de la primera campaña ha sido una mejora en la estimación de los parámetros biofísicos al realizar una inversión conjunta de las medidas a lo largo de la campaña de crecimiento, en la campaña 2003 el objetivo es estudiar la posibilidad de mejorar las estimaciones de parámetros biofísicos de cubiertas vegetales introduciendo en la inversión información espacial.

En esta línea, los sensores situados en satélites son una de las herramientas más apreciadas para la monitorización de vegetación, ya que por sus características permiten el estudio de amplias zonas de forma económica y durante largos periodos de tiempo. En concreto permiten la realización de mapas del parámetro *LAI*, uno de los más importantes parámetros de las cubiertas vegetales. Sin embargo, estudios recientes (Morissette et al., 2006) son concluyentes al afirmar que son necesarios más estudios para mejorar la precisión de los algoritmos utilizados para derivar el *LAI* de los datos obtenidos mediante teledetección.

Actualmente, la metodología más extendida para estimar el *LAI* es el uso de índices de vegetación, mediante relaciones empíricas. En concreto el índice diferencial normalizado de vegetación o *NDVI* (*Normalized Difference Vegetation Index*) es sin duda el índice de vegetación más ampliamente utilizado, ya que se ha demostrado ampliamente su relación con el *LAI* (Turner et al., 1999; Wang et al., 2005). Así mismo se han encontrado numerosas relaciones que lo ligan a otros parámetros fundamentales de la vegetación, como son la producción primaria neta (Goward et al., 1985; Paruelo et al., 1997; Tucker et al., 1986), o la radiación absorbida fotosintéticamente activa (Asrar et al., 1984; Kumar & Monteith, 1982; Sellers, 1987). Sin embargo, una estimación precisa del *LAI* a partir del *NDVI* requiere de la calibración de los datos utilizando muestreos en campo (Green et al., 2000). Además es necesario aplicar correcciones específicas para diferentes tipos de vegetación, e incluso para diferentes estados fenológicos de un mismo tipo de vegetación, debido a las diferencias estructurales de la cubierta vegetal (Gutman, 1991). Más aún, la comparación de índices de vegetación

procedentes de diferentes sensores situados en satélites muestran buenas correlaciones entre si, pero estas relaciones no son unívocas (Steven et al., 2003).

Para analizar los datos espectrales vamos a utilizar una metodología híbrida entre el uso de índices de vegetación y la inversión de modelos de transferencia radiativa, a fin de aumentar la precisión de los resultados obtenidos mediante relaciones empíricas y generalizando la metodología para diferentes cubiertas vegetales en las que los modelos utilizados sean de aplicación. Así mismo se pretende sortear el hecho de que la inversión de modelos de transferencia radiativa lleva asociado el llamado problema mal propuesto (*ill-posed problem*), haciendo uso de la información que podemos obtener de imágenes de sensores espectrales situados en satélites o en plataformas aerotransportadas, por medio de una inversión múltiple de los datos de la parcela.

La hipótesis principal de partida de nuestro trabajo, al igual que en el capítulo anterior, es que la inversión simultánea de espectros de reflectancia de vegetación que guardan ciertas relaciones entre sí, aporta suficiente información como para resolver el problema de la inversión de modelos de transferencia radiativa. En esta ocasión las relaciones que nos van a permitir desarrollar esta hipótesis se basan en la suposición de que en una parcela de unas pocas hectáreas, las variaciones de la reflectancia se deben a la variaciones del índice de área foliar. En concreto que para cada una de las parcelas estudiadas, supondremos que el índice de área foliar está relacionado directamente con el valor de un índice de vegetación estándar, en concreto el *NDVI*, y que esta relación es de tipo exponencial tal como se describe en la Ecuación (4-17), a pesar de desconocer los valores de las constantes que determinan la relación específica. Dado que parámetros como el contenido de clorofila, la reflectancia del suelo o la distribución angular de las hojas, también modifican los valores de *NDVI*, considerar esta relación biunívoca entre *LAI* y *NDVI* implica que el resto de parámetros que describen la cubierta vegetal se han de mantener constantes. Esto podrá considerarse cierto siempre que las parcelas que se analicen sean suficientemente pequeñas.

7.1 Justificación de la selección del sensor.

Pretendemos buscar una relación entre en *NDVI* y el *LAI* para cada una de las parcelas de estudio, y por ello será necesario partir de un rango de valores de *NDVI* lo más grande posible. Tanto la necesidad de restringirnos a estudiar parcelas pequeñas como la necesidad de trabajar con rangos de valores amplios, implica que se necesita trabajar con imágenes con una alta resolución espacial. Por esta razón, de entre la amplia gama de sensores situados en satélite disponible actualmente, se ha seleccionado el sensor QuickBird II, por ser éste el sensor que proporciona la mayor resolución espacial, con 2.4 m para los datos espectrales, y de 0.6 m para la banda pancromática. La utilización de este sensor por lo tanto nos permite obtener un gran número de datos por parcelas, que típicamente en la zona de estudio pueden tener una extensión del orden de la hectárea. Otras plataformas tipo Landsat, con resoluciones espaciales de 30 m, nos proporcionarían solamente 9 píxeles dentro de una parcela de una hectárea, mientras que con QuickBird II, con sus 2.4 m de resolución, obtendríamos en el mismo caso más de 1700 píxeles. De esta manera, un sensor de estas características va a ser capaz de dar cuenta de las diferentes inhomogeneidades que puedan aparecer dentro de un cultivo, que con resoluciones espaciales menores quedarían enmascaradas, lo que

haría más difícil encontrar una relación adecuada entre el *NDVI* y el *LAI*, al disminuir el intervalo de variación.

El ancho de banda de las transmisiones de los satélites delimita la cantidad de información que podemos recibir de ellos. En consecuencia, el hecho de aumentar la resolución espacial tiene como contrapartida reducir la cantidad de información espectral. Así podemos ver cómo en general los sensores de alta resolución espacial, es decir, con resoluciones inferiores a los 5 m, están dotados de 4 bandas espectrales, y en ocasiones con una quinta banda pancromática. Este es el caso de los sensores ORBView-3, QuickBird II, IKONOS-2 y SPOT 5a. En el otro extremo, encontramos los sensores hiperespectrales, dotados con decenas e incluso centenares de bandas, pero con resoluciones espaciales del orden de decenas o centenas de metros.

Como vemos, la utilización de alta resolución espacial, nos va a reducir la información espectral, y por lo tanto esta herramienta podría no ser la adecuada para el análisis de la vegetación. Hay que tener en cuenta además que dada la reciente aparición de este tipo de sensores, los trabajos que podemos encontrar en las revistas especializadas que los utilizan, son escasos y poco concluyentes. Para tener una base firme sobre la validez del sensor de alta resolución espacial para la inversión de modelos de transferencia radiativa en vegetación, hemos reprocesado los datos medidos en la campaña del 2002. Estos datos se han convolucionado con la respuesta de los filtros del sensor QuickBird II, con el fin de simular la medida del sensor. La diferencia promedio entre la medida de reflectancia realizada con el espectrorradiómetro a las longitudes de onda de 487, 548, 653 y 806 nm (las longitudes nominales de las bandas del QuickBird II) y los datos obtenidos mediante la convolución es de -0.005, +0.010, -0.005 y +0.013, respectivamente para las cuatro bandas. Estos valores son suficientemente pequeños como para permitirnos equiparar las medidas del QuickBird II a la reflectancia obtenida por los modelos sin necesidad de convolucionar por la respuesta del sensor, lo que nos permite una drástica reducción en los cálculos a realizar, y por lo tanto en el tiempo necesario para realizar la inversión.

Los modelos PROSPECT y SAILH se han ejecutado para las 4 longitudes de onda nominales del sensor QuickBird II, dadas en la sección 4.1. Los resultados de este proceso se muestran en la Figura 7-1. Comparando con la Figura 6-15, se puede ver que la exactitud del procedimiento no se ve afectada al reducir el número de bandas incluidas en el procesado.

Los errores mostrados en la Figura 7-1 se han calculado como la desviación estándar de los 10 procesos de inversión lo que da como resultado una menor función de mérito. Por lo tanto el significado de este error estará más relacionado con la estabilización del proceso de inversión que con la precisión de los resultados estimados, que tendrá más que ver con el *RMSE*.

A la vista de los resultados anteriores podemos decir que el sensor QuickBird II es apropiado para nuestros intereses, así como para el análisis de vegetación.

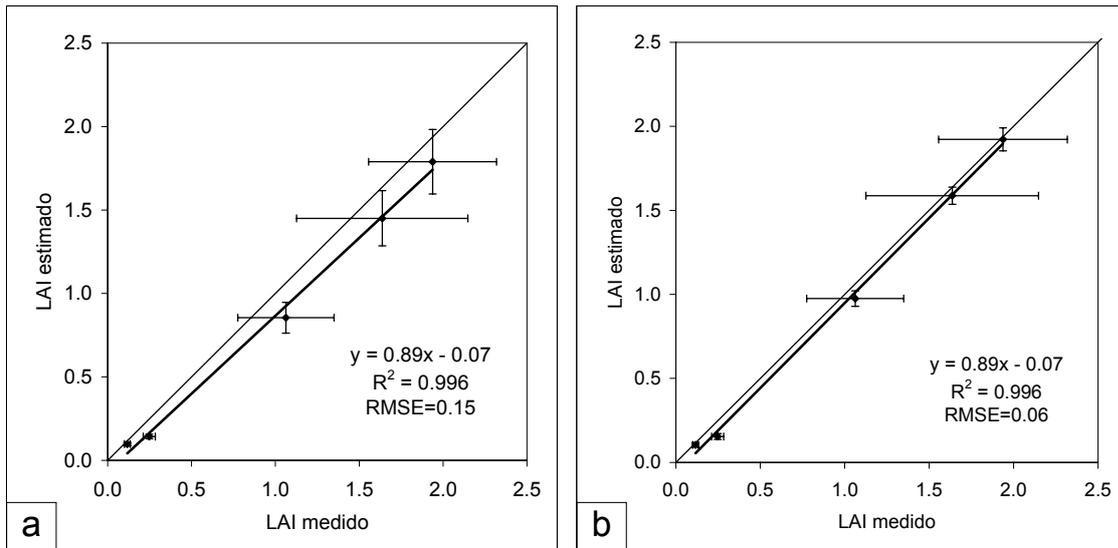


Figura 7-1 Valores del *LAI* medido frente al estimado mediante Δ_1^2 (a) y Δ_2^2 (b), utilizando solo 4 bandas.

7.2 Parámetro BSL.

A diferencia de lo que ocurría en el caso del estudio realizado en la campaña 2002, donde el muestreo se realizó siempre en el mismo punto, en la campaña del 2003 éste se ha realizado sobre diferentes puntos. Por lo tanto, en este caso las variaciones de la reflectancia del suelo no solamente serán debidas a la variación de la humedad del mismo, sino que puede haber variaciones en los porcentajes en los que se encuentran los distintos constituyentes del suelo.

Para analizar esta nueva situación se ha partido de la librería de espectros de reflectancia de suelos que incorpora el paquete informático ENVI. Esta librería está basada en la JHU (Johns Hopkins University) Spectral Library, accesible *on line* a través de la página web <http://speclib.jpl.nasa.gov>. La librería comprende 25 espectros de suelos medidos con espectrofotómetro Beckman UV 5240 de doble haz, en el intervalo comprendido entre 0.4 y 14 μm (Figura 7-2 (a)).

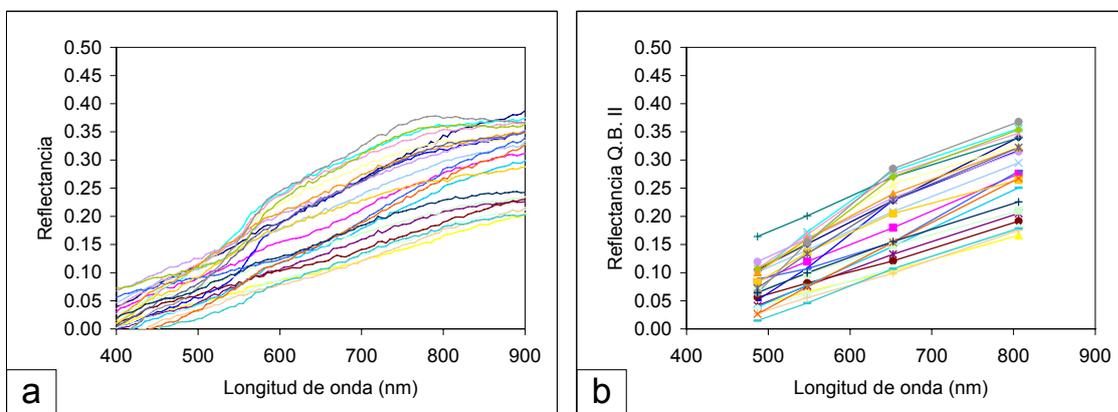


Figura 7-2 Espectros de reflectancia de suelos (a), y simulación de la respuesta del sensor QuickBird II (b). (Reproducido de la ASTER Spectral Library por cortesía del Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, Pasadena, California. ©1999, California Institute of Technology. Todos los derechos reservados.)

A partir de los espectros de reflectancia de la JHU Library, de otros espectros medidos por nuestro grupo y de las funciones de paso de las bandas del sensor QuickBird II, se han simulado las respuestas del sensor a estos suelos, tal como se muestra en la Figura 7-2 (b). Entre las distintas bandas así calculadas se han buscado correlaciones (Figura 7-3), encontrando que la banda B3, de 630 a 690 nm, es con la que menor error se obtiene al correlacionar con las otras 3 bandas.

Tabla 7-1 Errores estándar para la estimación de la ordenada las estimaciones lineales.

	B1	B2	B3	B4
B1 Err.	-	0.013	0.023	0.026
B2 Err.	0.016	-	0.016	0.022
B3 Err.	0.039	0.021	-	0.018
B4 Err.	0.044	0.031	0.018	-
Promedio Err.	0.033	0.022	0.019	0.022

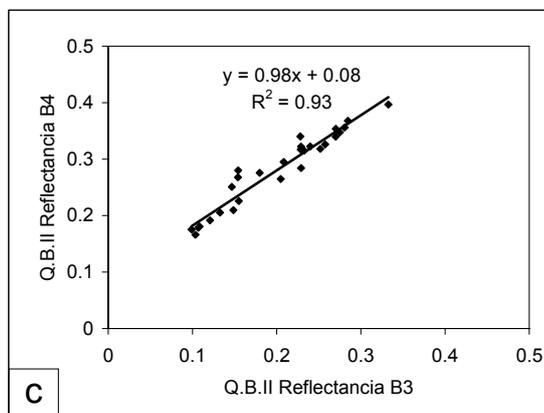
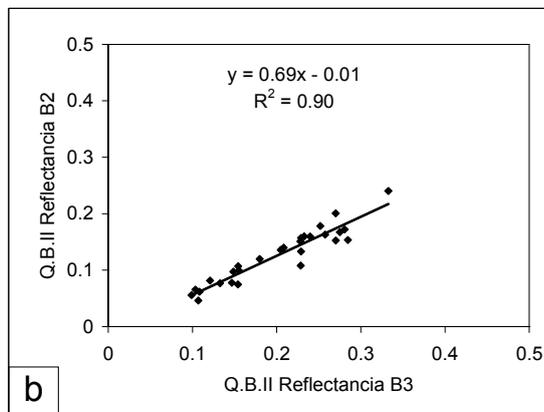
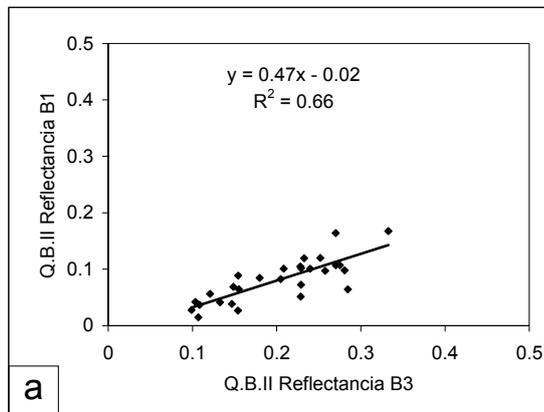


Figura 7-3 Correlación entre la tercera y la primera (a), segunda (b) y cuarta (c) bandas, al analizar la respuesta del sensor QuickBird II sobre la reflectancia de suelos.

Las relaciones (7-1), (7-2), (7-3) y (7-4), que obtenemos de las correlaciones entre bandas, vamos a utilizarlas a la hora de caracterizar el espectro de reflectancia del suelo, necesario en el modelo SAILH, mediante un único parámetro *BSL*, que coincide con el valor medido en la tercera banda del sensor. El error cometido al determinar a partir de la tercera el resto de bandas, será de 0.02, tal como se puede ver en la Tabla 7-1.

$$B_1 = 0.47BSL - 0.02 \quad (7-1)$$

$$B_2 = 0.69BSL - 0.01 \quad (7-2)$$

$$B_3 = BSL \quad (7-3)$$

$$B_4 = 0.98BSL + 0.08 \quad (7-4)$$

Dadas las anteriores expresiones, se puede comprobar qué valores del parámetro *BSL* superiores 0.939, o menores de 0.043, carecen de sentido físico por obtenerse valores de reflectancia superiores a la unidad (ecuación 7-4), o inferiores a cero (ecuación 7-1).

7.3 Inversión estándar de datos.

Al igual que en el caso de la campaña del 2002, se puede llegar a obtener relativamente buenos resultados utilizando un esquema estándar de inversión, es decir, invirtiendo un único espectro de reflectancia de la cubierta vegetal, siempre que en este proceso no se pretenda obtener más de uno o dos parámetros, y contemos con suficiente información como para hacer una estimación correcta del resto. En las Figuras 7-4 y 7-5 se muestra el resultado, al realizar la inversión de este tipo sobre los puntos de control tomados respectivamente sobre las imágenes de los días 6 de abril y 17 de mayo de 2003, donde solamente se han dejado variar libremente durante el proceso de inversión

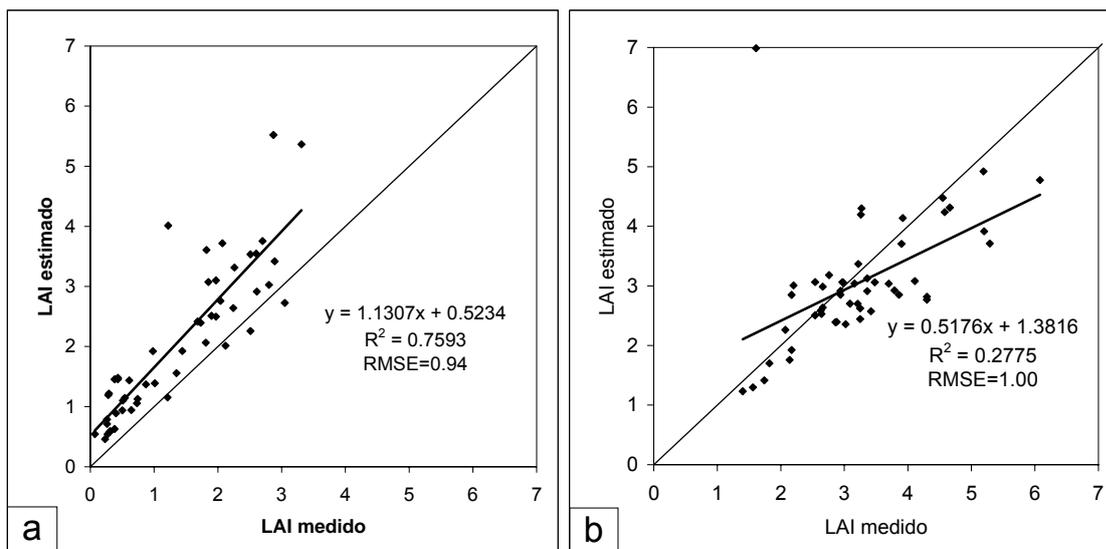


Figura 7-4 *LAI* obtenido al aplicar un esquema estándar de inversión a los puntos de control, frente al *LAI* medido, en el caso de la imagen del día 06-04-03 (a), del día 17-05-03 (b).

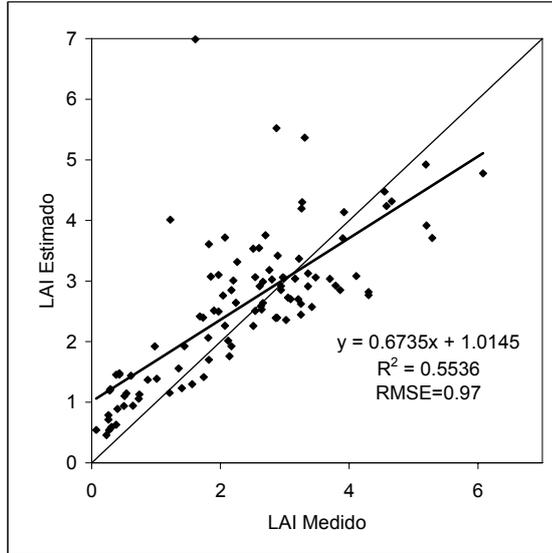


Figura 7-5 LAI obtenido al aplicar un esquema estándar de inversión a los puntos de control, frente a LAI medido, uniendo los resultados de los días 06-04-03 y 17-05-03.

los parámetros *LAI* y *BSL*, manteniendo el resto de parámetros fijos. De estos parámetros fijos, los valores de N , C_{a+b} y C_m se han tomado de la inversión del modelo PROSPECT (sección 5.2.2), mientras que χ se ha obtenido de las medidas realizadas en campo con el LAI-2000. El efecto del Hot Spot se ha despreciado, asignando al parámetro *HotSpot* un valor de 0.

En el resultado de esta inversión se puede observar cómo se obtiene una correlación aceptable en el caso de la inversión de la imagen del día 6 de abril de 2003, mientras que en el caso de la imagen del día 17 de mayo de 2003 obtenemos peores resultados (Figura 7-4). En concreto cabe destacar una estimación de $LAI = 7.0$ en uno de los puntos de control en la parcela 16, donde se había medido un valor de 1.6.

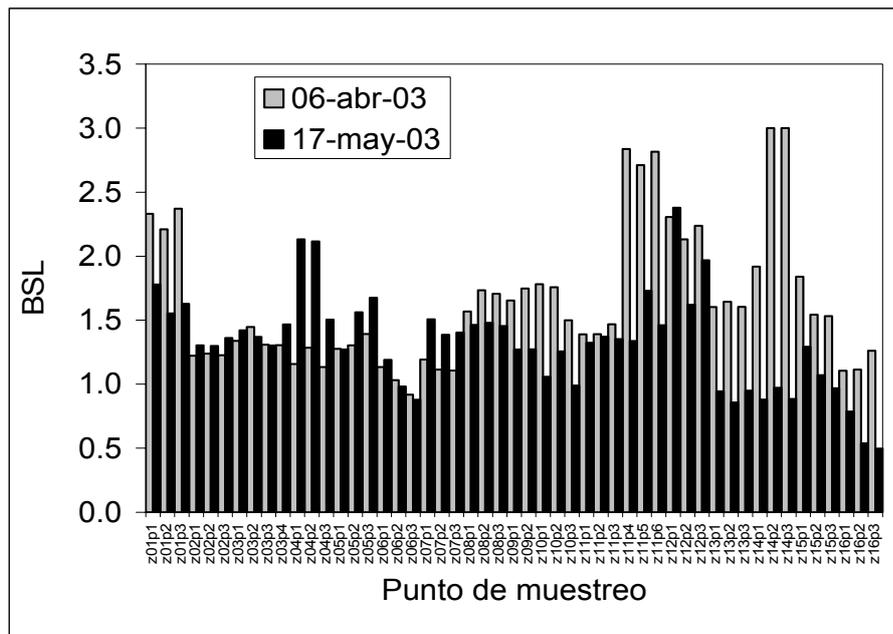


Figura 7-6 Valores del parámetro *BSL* al aplicar un esquema estándar de inversión a los puntos de control.

De estos resultados hay que decir que si bien los datos de *LAI* obtenidos guardan una correlación lógica con los datos de *LAI* medidos, no ocurre así con los valores de *BSL* que se derivan de la inversión. Como se ha visto en la sección 7.2, es esperable que los valores de ese parámetro se encuentren dentro del intervalo [0.043, 0.939]. Sin embargo los valores que se obtienen de *BSL* son los mostrados en la Figura 7-6.

Si bien estos valores podrían llegarse a considerar como aceptables, exigen conocer demasiada información del sistema, y por lo tanto su aplicabilidad se va a ver reducida. El objetivo de la metodología que queremos desarrollar en este capítulo es no sólo mejorar los resultados aquí obtenidos, sino hacerlo con suposiciones mucho menos restrictivas.

7.4 Selección de los datos a invertir.

Para comprobar la metodología que estamos proponiendo, se podría utilizar la inversión múltiple de los puntos de control. Sin embargo estos han sido tomados sin un criterio específico, y por lo tanto no es esperable que con ellos cubramos un amplio rango de valores de *NDVI*, como se comenta en la sección 7.1. Por lo tanto utilizaremos datos de toda la parcela, y en cada caso utilizaremos los valores medidos en los puntos de control para verificar la metodología.

Por otro lado, si bien es conveniente contar con un amplio rango de valores de *NDVI*, aumentar en exceso el número de datos utilizados en una inversión múltiple conlleva también aumentar el número de cálculos a realizar durante el proceso. Como se mostró en la sección 4.1, el número de píxeles de las distintas zonas de estudio va desde los 734 a los 28718. Analizar simultáneamente tal cantidad de información requeriría un tiempo de cálculo extraordinariamente largo. Además cabe suponer que la reflectancia de muchos de estos píxeles sea muy similar entre sí, por lo que estaríamos manejando una cantidad enorme de datos redundantes.

Para solventar esta situación se ha optado por agrupar de cada una de las parcelas los píxeles que sean similares entre sí mediante un algoritmo de clasificación, empleando la información de las cuatro bandas. De este modo se pretende agrupar la información en un número suficientemente grande de clases como para dar cuenta de la variabilidad que podamos encontrar dentro de la parcela, y por otro lado suficientemente pequeño como para que el proceso de inversión se pueda realizar en un tiempo razonablemente corto. El algoritmo de clasificación elegido es el de K-medias, por ser éste simple, eficiente y ser uno de los algoritmos más empleados en la bibliografía. Este algoritmo es un proceso iterativo en el que sucesivamente se va asignando cada punto del espacio de clasificación a cada uno de los K grupos, caracterizados por su centro, que se recalculará al final de cada una de las iteraciones. El número de repeticiones se ha fijado en 5 ya que se ha observado que un mayor número no modifica significativamente las clases generadas.

El número de clases a utilizar es un parámetro a nuestra elección, que como ya hemos comentado, nos interesa que sea lo suficientemente grande como para preservar la variación de la información, pero suficientemente pequeño como para permitir que el proceso de inversión se realice en un tiempo lo más corto posible. Dado que a priori no contamos con información necesaria para saber cuál es el número óptimo de clases, se ha optado por repetir el proceso utilizando diferente número de clases, a fin de estudiar

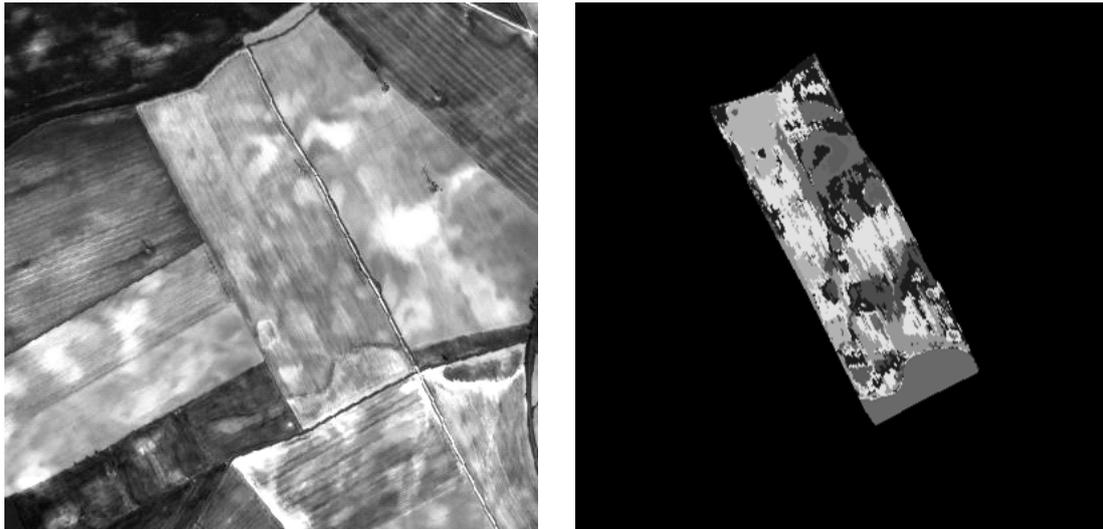


Figura 7-7 División de la zona 2 en 10 clases.

su influencia sobre el resultado final de la inversión. El número de clases elegidas fueron 5, 10, 15, 20 y 25. No obstante, ocurre en algún caso que ciertas clases no contienen ningún píxel, con lo que el número efectivo de clases se reduce en uno. Las clases tienden a agruparse espacialmente dentro de la parcela de modo no aleatorio, de manera que cada píxel tiende a estar rodeado de píxeles pertenecientes a la misma clase. Esto muestra estructuras espaciales que podrían estar relacionadas con variaciones propias del terreno (Figura 7-7).

7.5 Inversión múltiple de datos.

Como ya hemos comentado, para realizar esta inversión partimos de considerar que, en una parcela típica, las variaciones de la reflectancia se deben principalmente a variaciones del índice de área foliar, el cual está relacionado con el valor de *NDVI* mediante una expresión exponencial, dada por la Ecuación (4-17), de la que desconocemos las constantes. Se ha visto también que la constante x_3 se puede establecer en función de las otras dos constantes x_1 y x_2 , junto con la reflectancia del suelo. Utilizando la expresión (7-5), se puede establecer el valor de x_3 en función de x_1 , x_2 y *BSL*.

$$x_3 = -x_1 e^{x_2 \frac{0.08 - 0.02BSL}{0.08 + 1.98BSL}} \quad (7-5)$$

El resto de parámetros vamos a considerarlos constantes dentro de cada una de las parcelas. De estos parámetros consideraremos conocidos N con un valor de 1.5 (Jacquemoud & Baret, 1990) y C_m con un valor de 0.003 g/cm^2 (Vile et al., 2005). Recordemos que no vamos a considerar el efecto de Hot Spot, por lo que se ha fijado el parámetro *HotSpot* a 0. En cuanto a C_w , al efecto de absorción del agua en el intervalo en el que vamos a trabajar es despreciable y lo dejaremos fijo en 0. Junto con el *LAI*, los parámetros C_{a+b} y *BSL* serán las incógnitas en la inversión. Realizaremos diferentes pruebas en las que el parámetro χ se considerará en unos casos como conocido, con un valor de 0.8 obtenido de las medidas realizadas en las parcelas de estudio mediante el LAI-2000, mientras que en otros casos lo consideraremos como una incógnita más de la

inversión. De este modo pretendemos conocer de forma precisa la importancia de este parámetro sobre la inversión. La relación entre la radiación directa y difusa se han calculado mediante el modelo GOA-UVA-VISIBLE (Cachorro et al., 1997; 2000), usando datos experimentales de espesor óptico de aerosoles y del contenido de vapor de agua de la atmósfera, procedentes de la estación de AERONET (Holben et al., 1998) situada en Palencia, que dista aproximadamente unos 50 km de la localidad de Medina de Rioseco.

Como en el caso del análisis de datos de la campaña del año 2002, vamos a realizar la inversión múltiple de los datos de cada parcela, utilizando el algoritmo *Downhill Simplex* (Nelder & Mead, 1965) para minimizar una función de mérito, en la que se considera la diferencia entre los valores medidos y los simulados mediante los modelos PROSPECT y SAILH. Consideraremos nuevamente, al igual que en el capítulo anterior, dos funciones de mérito diferente. En esta ocasión estas funciones adoptarán la forma dada por las ecuaciones 7-6 y 7-7.

$$\Delta_1^2 = \sum_{i=1}^N \sum_{\lambda=1}^4 (\rho_i(\lambda) - \rho_i^*(\lambda, P))^2 \quad (7-6)$$

$$\Delta_2^2 = \sum_{i=1}^N \sum_{\lambda=1}^4 \left(\frac{\rho_i(\lambda) - \rho_i^*(\lambda, P)}{\rho_i(\lambda)} \right)^2 \quad (7-7)$$

En estas dos funciones de mérito, el primer sumatorio se extiende a los N espectros que se van a analizar, correspondiente en este caso con los valores medios de las clases obtenidas según el apartado 7.4. El segundo sumatorio recorre las cuatro longitudes de onda para las que el sensor QuickBird II proporciona datos espectrales. $\rho_i(\lambda)$ indica los valores medidos de reflectancia, mientras que $\rho_i^*(\lambda, P)$, los valores modelizados. En este caso los parámetros P de la reflectancia modelizada no sólo implican los parámetros biofísicos empleados por los modelos PROSPECT o SAILH, C_{a+b} , χ y reflectancia del suelo, sino también se refieren a los parámetros x_1 y x_2 , empleados en determinar la relación entre LAI y $NDVI$.

Como ya se comentó anteriormente, teniendo en cuenta que típicamente el valor de la reflectancia de la vegetación en el infrarrojo cercano es mucho mayor que el valor de reflectancia en el visible, la normalización mediante la reflectancia medida realizada en la función de mérito Δ_2^2 , pretende evitar una influencia mayor de la longitud de onda del infrarrojo frente a las del visible.

Como viene siendo también habitual, el proceso de minimización de las funciones de mérito se reinicia varias veces para cada parcela, con diferentes estimaciones iniciales (Tabla 7-2). Dado que el valor del LAI varía suficientemente mediante la modificación de x_1 y de BSL , x_2 se ha mantenido constante en este proceso. En concreto en el caso de considerar χ fijo, el proceso se ha reiniciado 8 veces, mientras que al considerar χ como una incógnita más, el proceso se ha reiniciado 16 veces.

Tabla 7-2 Valores a los que se ha iniciado cada uno de los parámetros considerados como incógnitas en el proceso de inversión.

C_{a+b}	BSL	χ	x_1	x_2
30	0.4	0.7	0.1	0.01
40	0.6	0.9	2	0.01

Tabla 7-3 Resultados de la inversión para los días 6 de abril y 17 de mayo de 2003, al considerar el valor de χ fijo, utilizando la función de mérito Δ_2^2 , partiendo de 25 clases.

Zona de estudio	Datos del día 6 de abril de 2003					Datos del día 17 de mayo de 2003				
	C_{a+b}	X_1	x_2	BSL	Δ_2^2	C_{a+b}	x_1	x_2	BSL	Δ_2^2
z01	32.9	1.97	1.12	0.55	1.806	38.8	7.55	0.47	0.57	0.732
z02	17.3	68.17	0.04	0.39	0.468	32.7	0.55	2.50	0.34	1.967
z03	15.8	2.70	0.94	0.41	0.391	34.0	1.78	1.32	0.45	0.597
z04	15.0	6.34	0.43	0.36	0.689	39.0	1.96	1.35	0.64	1.350
z05	15.2	15.87	0.18	0.39	0.282	38.6	4.77	0.67	0.58	0.156
z06	24.5	47.19	0.06	0.35	0.732	33.5	17.75	0.19	0.29	0.769
z07	15.0	0.46	3.32	0.40	0.652	38.2	1.26	1.81	0.60	2.849
z08	30.8	2.24	1.01	0.60	1.007	39.9	0.22	3.73	0.25	3.715
z09	35.3	1.31	1.51	0.73	1.234	39.1	9.09	0.40	0.35	1.022
z10	30.5	15.06	0.22	0.54	0.838	40.1	11.77	0.33	0.44	1.065
z11	21.9	2.27	1.05	0.54	1.790	39.0	1.44	1.69	0.64	2.802
z12	28.4	3.09	0.93	1.01	2.942	43.9	0.98	2.14	0.95	5.092
z13	16.8	7.72	0.39	0.57	0.691	37.2	0.96	1.88	0.30	0.395
z14	35.9	1.76	1.28	0.57	2.287	42.5	0.01	7.48	0.11	4.666
z15	26.5	17.72	0.17	0.46	0.526	39.2	0.85	2.02	0.31	1.621
z16	31.2	9.69	0.30	0.41	0.755	42.3	0.02	6.00	0.12	3.890

A partir de esta inversión se han obtenido unos parámetros específicos para cada parcela. En la Tabla 7-3 se presentan los resultados para las imágenes de los días 6 de abril y 17 de mayo de 2003, al considerar el valor de χ fijo y utilizar la función de mérito Δ_2^2 .

Se puede ver en la Tabla 7-3, cómo en la parcela z12 se obtienen, tanto para el día 6 de abril como para el 17 de mayo, valores del parámetro BSL fuera del intervalo comprendido entre 0.043 y 0.939, que como ya se comentó anteriormente es donde este parámetro tiene sentido físico. Esto coincide con el hecho de que es precisamente en esta parcela donde se han medido los valores más altos de LAI . Al alcanzarse valores de LAI de hasta 6.08, como en el punto 3, la influencia de la reflectancia del suelo se

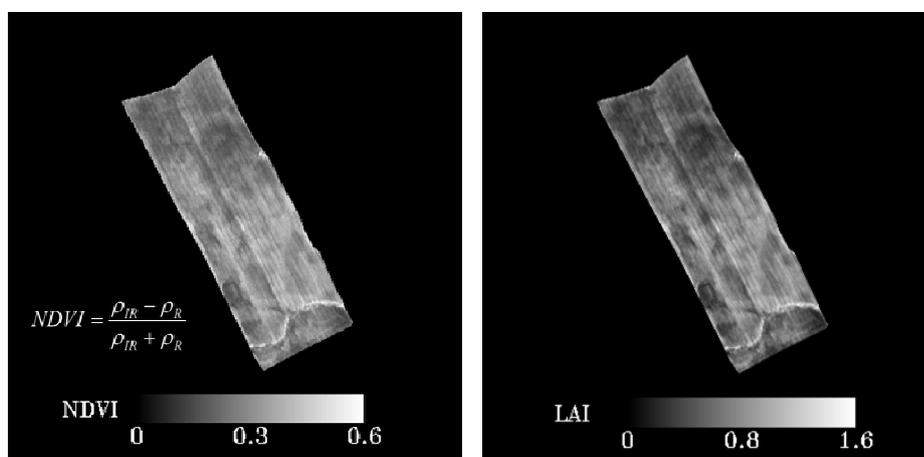


Figura 7-8 $NDVI$ calculado a partir de la reflectancia en la zona 2, y el LAI calculado a partir del $NDVI$ y de los parámetros x_1 , x_2 y BSL obtenidos de la inversión.

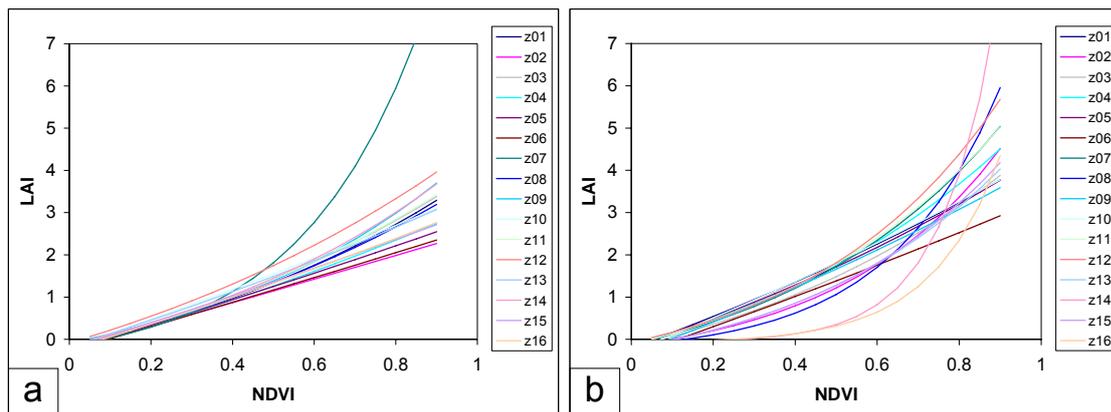


Figura 7-9 Relaciones entre el NDVI y el LAI calculadas a partir de los parámetros x_1 , x_2 y BSL obtenidos de la inversión de los datos del 6 de abril (a) y del 17 de mayo de 2003 (b).

minimiza, y por lo tanto se dificulta la obtención del parámetro BSL . Sin embargo se puede comprobar cómo en el resto de casos los valores obtenidos están dentro de lo esperable, a diferencia de lo que se mostró en la Figura 7-6.

A partir de los parámetros x_1 , x_2 y BSL obtenidos para cada parcela, queda establecida la relación entre el $NDVI$ y el LAI , pudiéndose calcular rápidamente el LAI para cada píxel dentro de la parcela, como se muestra en Figura 7-8. Estas relaciones entre $NDVI$ y LAI se presenta en la Figura 7-9.

Para la imagen del 6 de abril vemos como en la parcela $z07$ se rompe por completo la tendencia clara en las relaciones encontradas entre $NDVI$ y LAI . Esto se debe al reducido rango de valores de $NDVI$ que para esta primera fecha podemos encontrar en esta parcela. Según lo visto en la Figura 7-9 (a), el valor medio de LAI medido en esta parcela es el más bajo de todos, con un valor de 0.27, mientras que los valores de $NDVI$ derivados de los espectros de las clases en las que se ha dividido esta parcela van de 0.46 a 0.65. Por lo tanto el comportamiento que se aprecia para valores de LAI mayores de uno, no afecta al resultado.

Se puede observar en las gráficas anteriores cómo a partir de los datos de 6 de abril las relaciones halladas tienden a ser más lineales que en el caso de las relaciones halladas para los datos de 17 de mayo. Este resultado era de esperar, ya que el rango de valores de LAI en la primera fecha es menor que en la segunda. No obstante, el rango en el que se encuentra la relación entre el $NDVI$ y el LAI , y el rango de aplicación de la misma es igual, por lo que el resultado en cada caso, si bien no será de aplicación general, si será de aplicación para los datos de la parcela para la que se ha encontrado la relación.

Los valores de LAI estimados a partir del $NDVI$, han sido contrastados con los datos muestreados en campo, en 51 puntos de control, distribuidos en 16 parcelas de trigo y cebada en torno a las fechas de toma de las imágenes, mediante el LAI-2000 Plant Canopy Analyser de la empresa Li-COR. Estos valores experimentales de LAI se encuentran dentro del intervalo de 0.1 a 3.3 para la fecha del 6 de abril de 2003, y en el intervalo de 1.4 a 6.8 para el 17 de mayo de 2003.

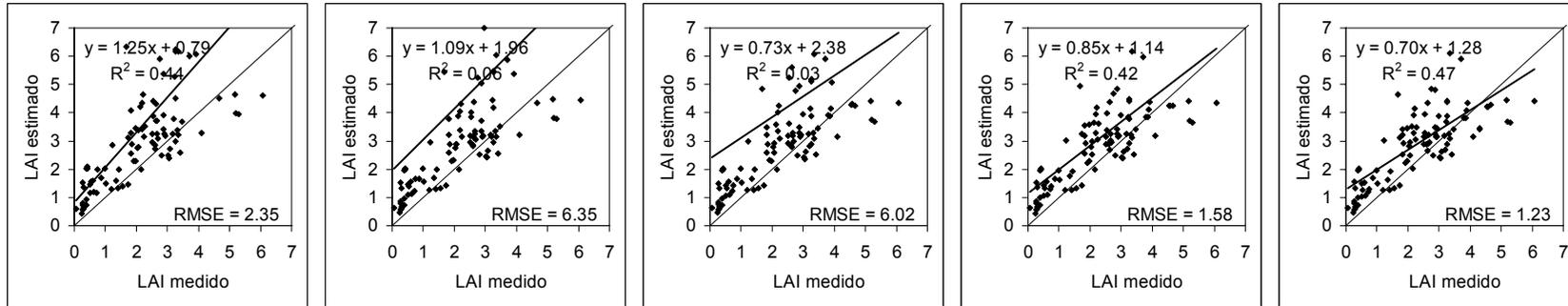


Figura 7-10 Resultados utilizando Δ_1^2 , e invirtiendo los parámetros LAI , C_{a+b} y BSL (fijando $\chi=0.8$), usando 5, 10, 15, 20 y 25 clases.

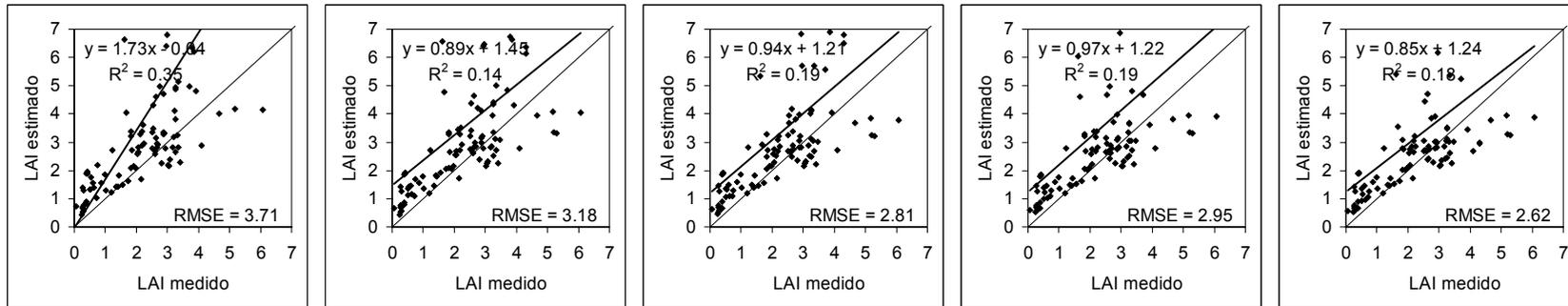


Figura 7-11 Resultados utilizando Δ_1^2 , e invirtiendo los parámetros LAI , C_{a+b} , BSL y χ ($0.4 < \chi < 1.0$), usando 5, 10, 15, 20 y 25 clases.

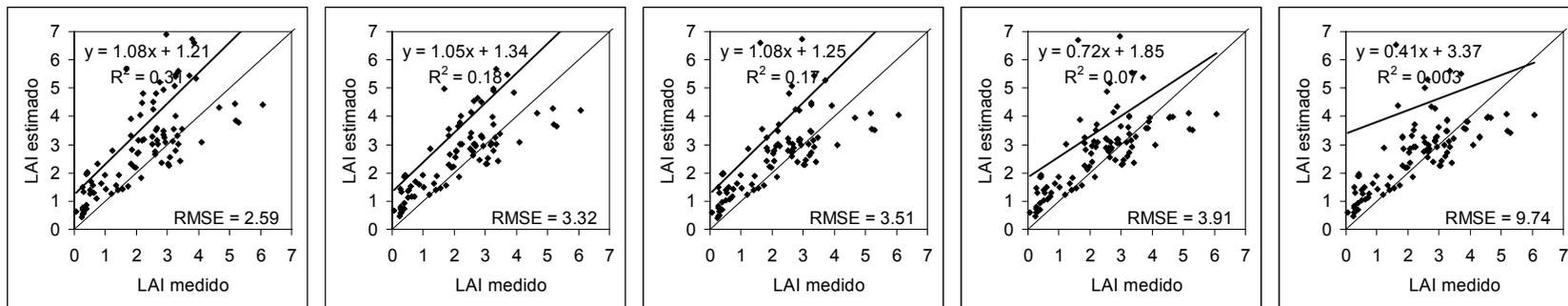


Figura 7-12 Resultados utilizando Δ_1^2 , e invirtiendo los parámetros LAI , C_{a+b} , BSL y χ ($0.7 < \chi < 0.9$), usando 5, 10, 15, 20 y 25 clases.

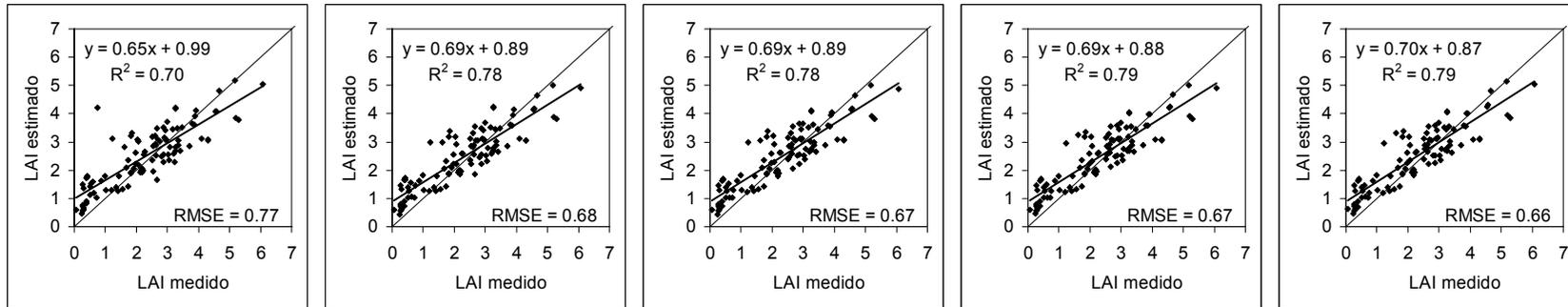


Figura 7-13 Resultados utilizando Δ_2^2 , e invirtiendo los parámetros LAI , C_{a+b} y BSL (fijando $\chi=0.8$), usando 5, 10, 15, 20 y 25 clases.

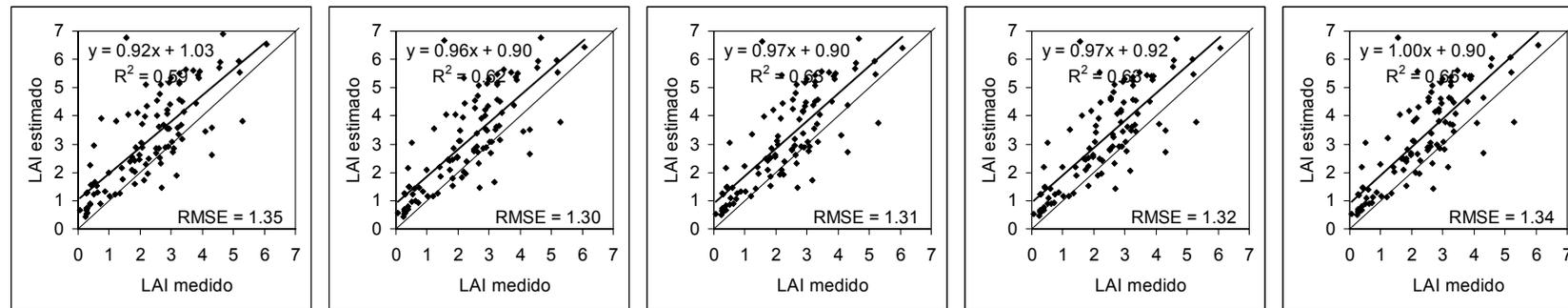


Figura 7-14 Resultados utilizando Δ_2^2 , e invirtiendo los parámetros LAI , C_{a+b} , BSL y χ ($0.4 < \chi < 1.0$), usando 5, 10, 15, 20 y 25 clases.

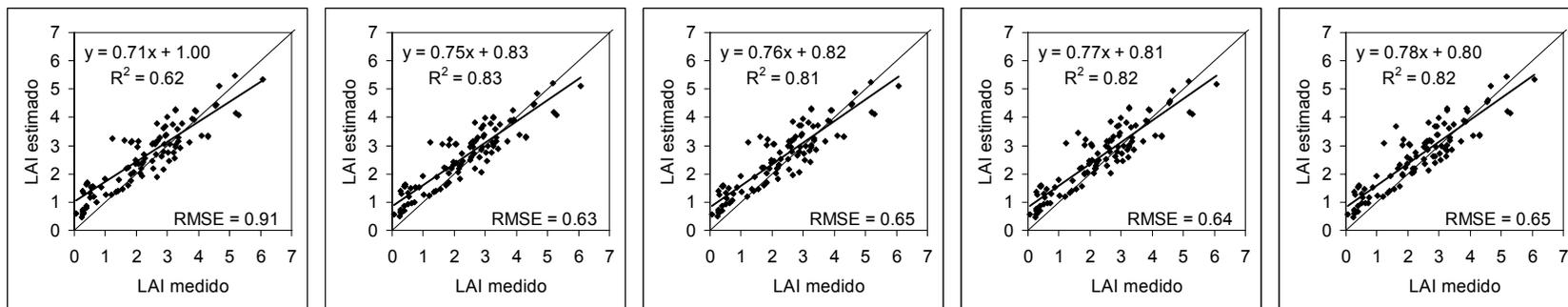


Figura 7-15 Resultados utilizando Δ_2^2 , e invirtiendo los parámetros LAI , C_{a+b} , BSL y χ ($0.7 < \chi < 0.9$), usando 5, 10, 15, 20 y 25 clases.

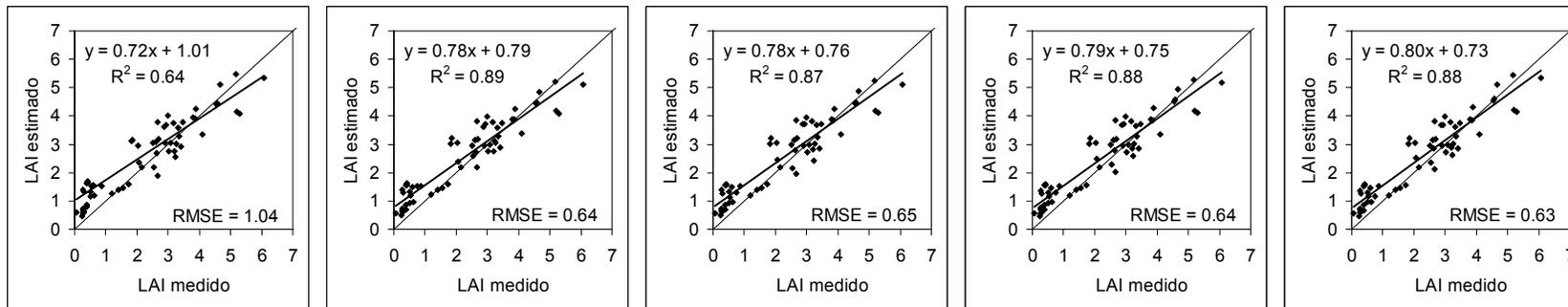


Figura 7-16 Resultados utilizando Δ_2^2 , e invirtiendo los parámetros LAI , C_{a+b} , BSL y χ ($0.7 < \chi < 0.9$), considerando solo las parcelas de cebada.

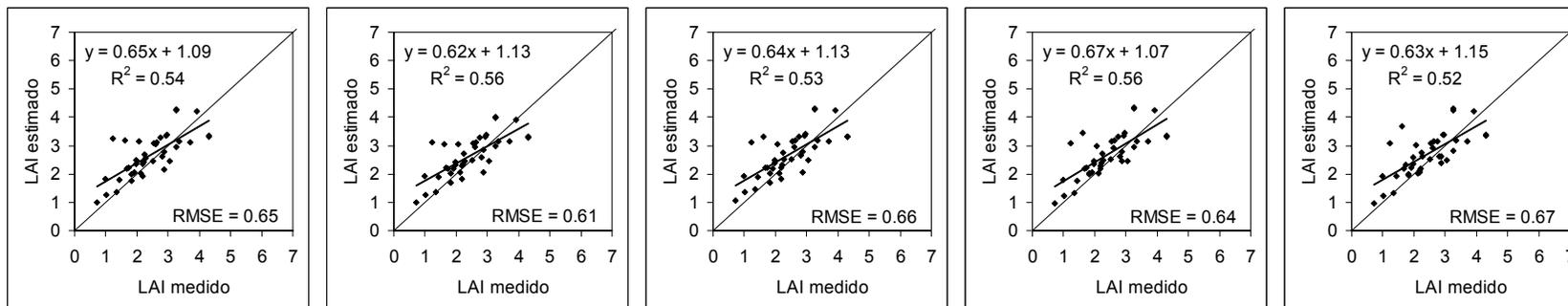


Figura 7-17 Resultados utilizando Δ_2^2 , e invirtiendo los parámetros LAI , C_{a+b} , BSL y χ ($0.7 < \chi < 0.9$), considerando solo las parcelas de trigo.

En las Figuras 7-10, 7-11 y 7-12 se muestran las correlaciones obtenidas entre el *LAI* medido y el *LAI* obtenido de la inversión al emplear la función de mérito Δ_1^2 , mientras que en las Figuras 7-13, 7-14 y 7-15 se muestran los resultados cuando se emplea la función Δ_2^2 . En cada una de estas figuras aparecen los resultados obtenidos cuando utilizamos como espectros de entrada los valores medios de las clases generadas mediante la partición de las parcelas al usar el algoritmo K-medias, cuando K toma valores de 5, 10, 15, 20 y 25. Estas series, para cada función de mérito, se han repetido en tres casos diferentes. En el primero el parámetro χ se ha mantenido fijo e igual a 0.8 durante el proceso iterativo de la inversión, y se ha dejado variar los parámetros C_{a+b} , x_1 , x_2 y *BSL*. Sin embargo, en el segundo y tercer caso, se ha dejado variar también el parámetro χ . La diferencia entre estos dos últimos casos está en el rango en el que se ha permitido variar al parámetro, siendo en un caso $0.4 < \chi < 1.0$, y en el otro $0.7 < \chi < 0.9$.

El primer punto que cabe destacar al observar los resultados, es la enorme diferencia de precisión de los datos de *LAI* obtenidos con las dos funciones de mérito que hemos empleado. Se observa una muy considerable mejora de los resultados al emplear la función de mérito normalizada Δ_2^2 . Como se observa en las figuras 7-10, 7-11 y 7-12, la correlación entre las medidas experimentales y el *LAI* obtenido al utilizar la función Δ_1^2 es bastante baja, sin que el coeficiente de determinación múltiple, R^2 , sobrepase en ninguno de los casos mostrados, el valor de 0.47. Esto nos lleva a errores cuadráticos medios de hasta 9.74. Esta situación es muy diferente a la observada al analizar los datos de la campaña del año 2002 durante el capítulo anterior, donde no se apreciaba una diferencia significativa entre la precisión de los datos de *LAI* obtenidos al utilizar la función de mérito normalizada y no normalizada.

Centrándonos por lo tanto en los resultados obtenidos mediante la función Δ_2^2 , podemos ver también notables diferencias dependiendo de qué parámetros dejemos variar durante el proceso de inversión. Se observa un claro empeoramiento de las correlaciones mostradas en la Figura 7-14 respecto del caso de la Figura 7-13. Es decir al permitir al parámetro χ , junto con C_{a+b} , x_1 , x_2 y *BSL*, variar entre 0.4 y 1.0 se obtienen peores resultados que si fijamos este parámetro a un valor de 0.8. Sin embargo la situación en la que se obtienen mejores resultados es la mostrada en la Figura 7-15. En este caso también estamos dejando al parámetro χ variar durante la inversión, pero esta vez limitando su movilidad solo al intervalo definido entre los valores 0.7 y 0.9. Es decir, estamos forzando a χ a tomar valores muy próximos al valor de 0.8, que es el promedio medido experimentalmente en el campo. Este hecho parece poner de manifiesto la importancia del parámetro χ dentro del proceso de inversión. Dejar variar χ libremente nos conduce a situaciones de inestabilidad, obteniendo resultados impredecibles. Sin embargo permitir una pequeña variación de este parámetro respecto del valor esperado, permite obtener una mayor precisión en los resultados del resto de parámetros. En concreto vemos como en las correlaciones de *LAI* mostradas, se aprecia un aumento del coeficiente R^2 , pasando de un 0.79, en el mejor de los casos, a un 0.83, y un descenso del *RMSE*, de 0.66 a 0.63.

En cuanto al efecto que tiene el número de clases utilizadas al segmentar la parcela en busca de los espectros a introducir en la inversión, vemos que al utilizar únicamente 5 clases se obtienen los peores resultados. El *RMSE* aumenta hasta un 44%, y el R^2 disminuye hasta un 25% respecto del obtenido en la correlación en la que se parte de 10 clases, y que se muestra en la Figura 7-15. Por otro lado vemos que a partir de las 10 clases no se encuentran mejoras significativas, llegándose al caso de que en la última serie los mejores resultados se obtienen al usar solo 10 clases. Este hecho es

interesante en cuanto que nos hace ver que un aumento en el número de datos introducidos como entrada del proceso de inversión no nos lleva a mejoras en los resultados, pero sí a aumentar el tiempo de cálculo necesario. Por lo tanto parece lógico concluir que el número de clases óptimo que habrá que emplear en parcelas similares a las estudiadas en este trabajo, es de 10.

En la Figura 7-16 se muestran las correlaciones obtenidas entre el *LAI* medido y el *LAI* resultante al utilizar la función de mérito Δ_2^2 , de forma equivalente a lo que se mostró en la Figura 7-15, pero considerando solo las parcelas de cebada. Se comprueba que los resultados son bastante similares, incluso se mejora el coeficiente, llegando a obtenerse valores de 0.89. De la misma forma, en la Figura 7-17 se muestran las correlaciones al limitarnos a las parcelas de trigo. En este caso se ve que los coeficientes R^2 son considerablemente peores, pero esto se debe en buena parte a la reducción del rango de valores observados.

Resumiendo, podemos ver como con la metodología de inversión aquí expuesta se consigue un incremento en la calidad de los resultados de *LAI*, llegándose a obtener hasta un valor de R^2 de 0.83, y de 0.63 en el *RMSE*, sobre datos comprendidos entre los valores de *LAI* de 0.07 y 6.08, lo que nos lleva aun *PRMSE* de un 27%. Es importante ver estos resultados frente a los encontrados en otros trabajos publicados, como el de Atzberger (2004), en el cual se llega a obtener resultados de R^2 de 0.85 y *RMSE* de 0.59, pero utilizando datos simulados directamente con los modelos PROSPECT y SAILH, utilizando 6 bandas (simulando datos de Landsat TM), y utilizando “redes neuronales” para realizar la inversión, en la que también se introduce el análisis simultáneo de diferentes espectros.

Tal como se hizo en el capítulo anterior, se ha calculado un error del *LAI* como

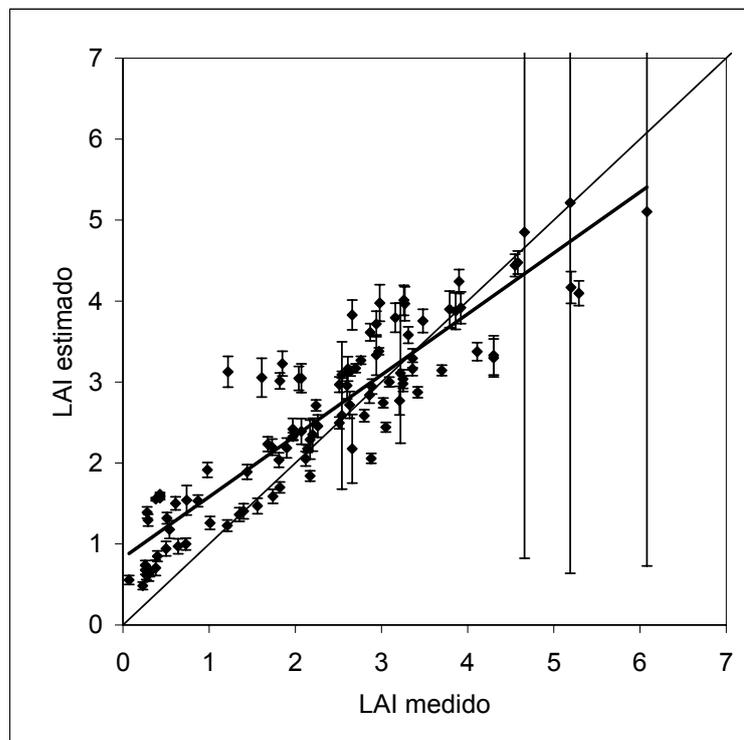


Figura 7-18 Resultados utilizando Δ_2^2 , e invirtiendo los parámetros *LAI*, C_{a+b} , *BSL* y χ ($0.7 < \chi < 0.9$), usando 5, 10, 15, 20 y 25 clases.

la desviación estándar de la salida de los procesos con estimaciones iniciales diferentes de los parámetros. Sin embargo, a diferencia de lo que hacíamos en el capítulo anterior, donde sólo tomábamos los 10 procesos para lo cuales la función de mérito se hacía menor, aquí cogeremos los 16 resultados, es decir, todos. En la Figura 7-18 podemos ver estos errores cuando utilizamos la función de mérito Δ_2^2 , con 10 clases, e invirtiendo los parámetros LAI , C_{a+b} , BSL y χ ($0.7 < \chi < 0.9$). Por un lado cabe destacar que en la mayoría de los casos este error se encuentra alrededor de 0.13. Sin embargo existen tres puntos donde este error se dispara hasta un valor de 4. Estos tres puntos corresponden a la parcela 12, al analizar la imagen del día 17 de mayo de 2003. Esta parcela se corresponde con los valores más altos medidos de LAI . A pesar de esto, los resultados vienen a indicar la alta estabilidad del proceso aquí expuesto, ya que salvo en uno de los casos analizados, todos los procesos, independientemente de las condiciones iniciales, nos dan unos resultados similares. Es decir, no sólo se consigue un resultado preciso, sino también estable.

Otro de los parámetros que se han analizado es el contenido de clorofila. Como ya se ha indicado, el análisis de clorofila se ha realizado sobre un muestreo realizado en torno al día 17 de mayo de 2003. En la Figura 7-19 se comparan estas medidas con los valores obtenidos mediante inversión, utilizando la función Δ_2^2 , para las diferentes condiciones aplicadas a χ , cuando partimos de 10 clases. Vemos como los valores estimados cuando $\chi = 0.8$ y cuando solo le dejamos variar entre 0.7 y 0.9, se encuentran muy próximos, con una diferencia promedio de $0.99 \mu\text{g}/\text{cm}^2$. Los valores estimados de esta manera varían muy poco de una parcela a otra, variando desde 32 a $44 \mu\text{g}/\text{cm}^2$. Los valores medios, considerando todas las parcelas son 38 ± 3 , 31 ± 3 y $37 \pm 3 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ respectivamente, mientras que el valor medio medido es de $36 \pm 10 \mu\text{g}/\text{cm}^2$. El $RMSE$ para los tres casos es muy similar: 9, 10 y $9 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ respectivamente. Esta homogeneidad en los resultados parece lógica, teniendo en cuenta que ha sido una de las condiciones impuestas en el proceso de inversión.

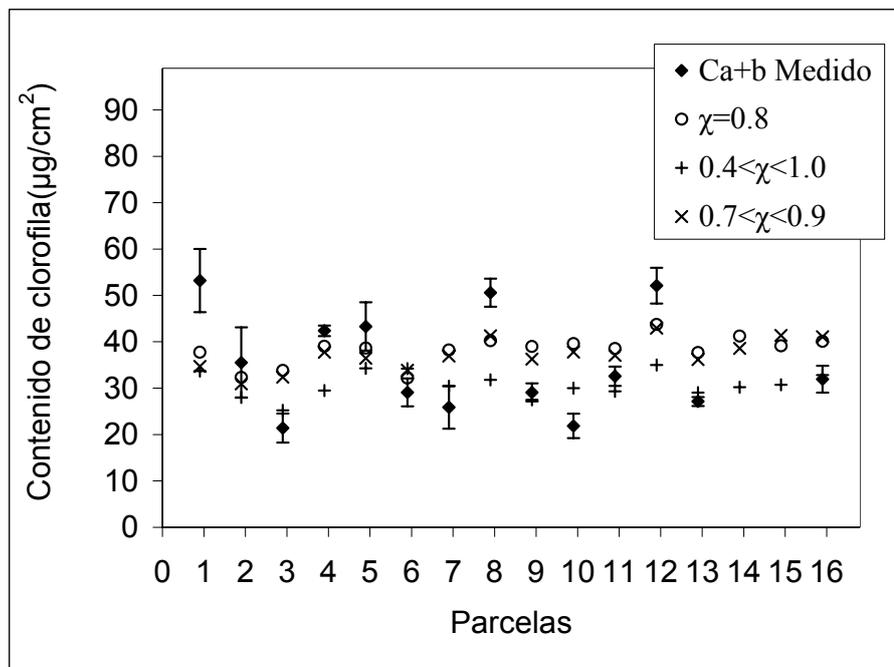


Figura 7-19 Resultados del contenido de clorofila utilizando Δ_2^2 , para las diferentes suposiciones sobre χ , usando 10 clases.

7.6 Influencia de la corrección atmosférica sobre el LAI estimado.

Por último en este capítulo vamos se presentan los resultados de la influencia de la corrección atmosférica sobre el valor estimado del *LAI* mediante inversión, utilizando las diferentes aproximaciones vistas en la sección 4.3 a la hora de realizar está corrección sobre la señal medida por los sensores situados a gran altura del suelo, como es el caso de aquéllos situados en satélites. Vimos en esa sección como, aún utilizando el mismo algoritmo, el 6S (Vermote et al., 1997), es posible caracterizar la atmósfera utilizando valores climatológicos o estándar, o bien valores medidos. Si bien la primera opción ha sido hasta hace poco tiempo la única válida, debido a la dificultad de realizar determinadas medidas a fin de caracterizar la atmósfera, en la actualidad existen diversas fuentes de información, con datos realizados desde tierra como en el caso de AERONET (Holben et al., 1998), o desde satélites como el TOMS, MODIS o SeaWIFS (Torres et al, 1998; Kaufman & Tanre, 1998; Gordon & Wang, 1994). Como ya se dijo,

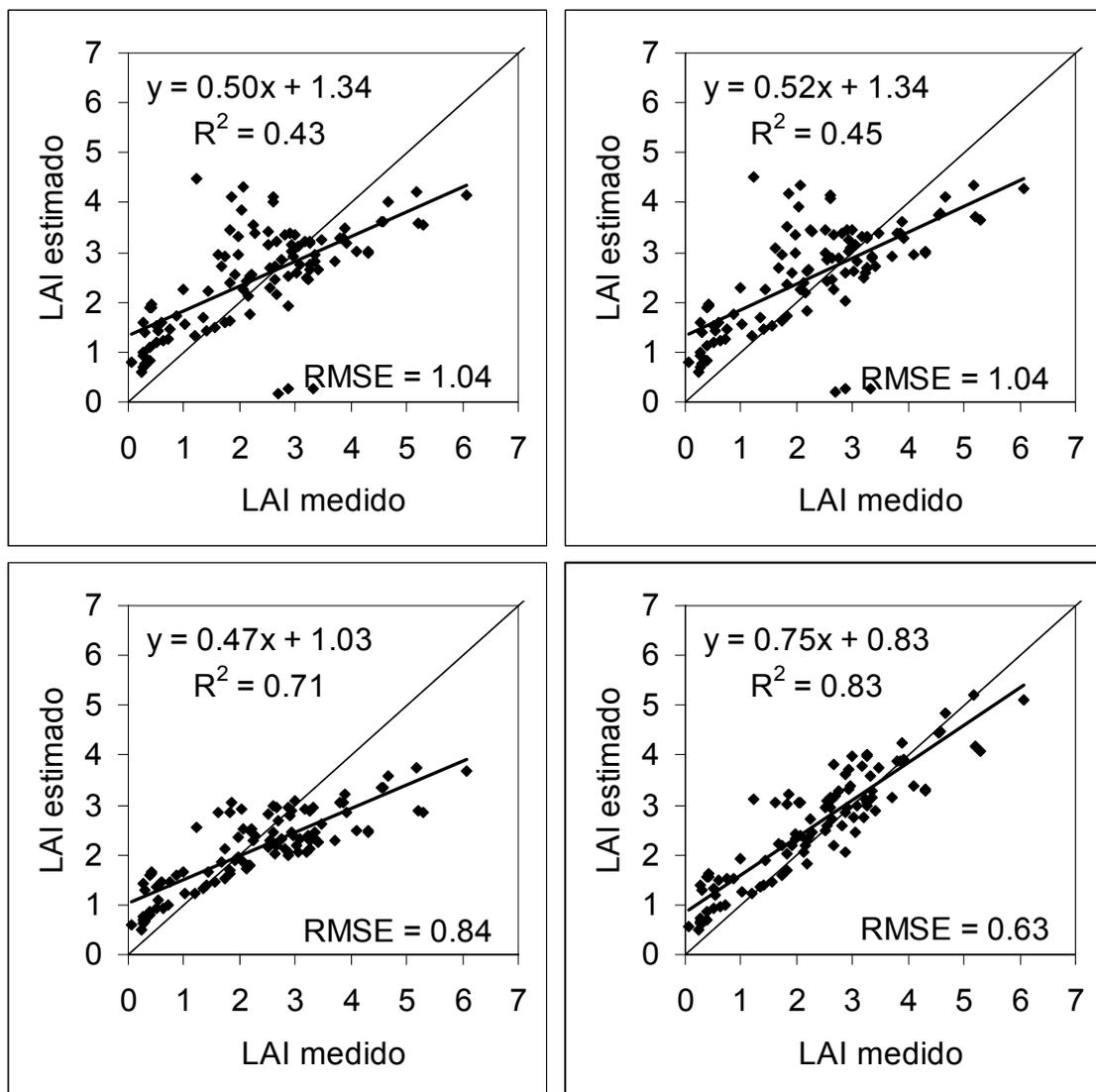


Figura 7-20 Resultados al aplicar las cuatro correcciones atmosféricas, utilizando Δ_2^2 , e invirtiendo los parámetros *LAI*, C_{a+b} , *BSL* y χ ($0.7 < \chi < 0.9$), usando 10.

las aproximaciones que hemos considerado son:

1. Considerar una atmósfera estándar con un modelo continental de aerosoles (C1).
2. Considerar una atmósfera estándar, utilizando la ley de Junge, con un espesor óptico obtenido a partir de medidas de irradiancia directa (C2).
3. Considerar una atmósfera estándar, utilizando un espesor óptico obtenido a partir de medidas de irradiancia directa, y un índice de refracción a partir de medidas de radiancia realizadas sobre el plano principal (C3).
4. Considerar una atmósfera estándar, utilizando un espesor óptico obtenido a partir de medidas de irradiancia directa, y un índice de refracción a partir de medidas de radiancia realizadas sobre el plano principal, y el efecto del entorno considerando una reflectancia promedio (C4).

Se puede ver en la Figura 7-20 cómo las diferentes aproximaciones sobre la corrección atmosférica van mejorando los resultados obtenidos del *LAI*, destacando claramente los resultados obtenidos mediante la corrección C4. Este resultado pone de manifiesto la importancia de una buena corrección atmosférica, siendo necesario ir más allá del mero uso del simple espesor óptico, como tantas veces se ve en la bibliografía.

CONCLUSIONES

El presente trabajo de investigación sobre estimación de parámetros biofísicos y bioquímicos mediante inversión de reflectancia permite llegar a las conclusiones descritas a continuación.

Los métodos tradicionales de análisis e interpretación de la información espectral de la vegetación adquirida por sensores remotos situados en plataformas aéreas y satélites presentan problemas que dificultan su implantación en sistemas de gestión de recursos. En primer lugar, los métodos basados en el uso de índices de vegetación no aportan una información que se pueda generalizar, y sus limitaciones dificultan el avance de la teledetección en la cuantificación de parámetros a escala global. En segundo lugar, los métodos derivados del estudio de la transferencia radiativa tropiezan con el llamado *ill-posed problem*, es decir, distintas combinaciones de parámetros de la vegetación pueden originar resultados similares de la reflectancia de la cubierta. Su inversión, por lo tanto, no genera un resultado único, siendo métodos poco robustos frente a los errores propios de las medidas.

Con este trabajo se proponen dos nuevos métodos de análisis de información espectral de la cubierta vegetal basados en el análisis múltiple de espectros de reflectancia, aprovechando la consistencia temporal y espacial de los mismos. Estas metodologías se diferencian de otras anteriormente propuestas por introducir la información a priori no solo a través del uso de valores concretos de los parámetros biofísicos característicos de la vegetación, sino considerando su comportamiento respecto al tiempo y a la variación espacial determinada por el índice de vegetación NDVI.

El presente trabajo, se diferencia también de la mayoría de las anteriores propuestas sobre regularización de la inversión de modelos de transferencia radiativa en el hecho de no ser únicamente una propuesta teórica como el resto, sino de presentarse avalada por datos experimentales. Las metodologías aquí propuestas se han aplicado con éxito tanto a medidas realizadas manualmente sobre la vegetación, como a datos de satélite. En concreto, a partir de una serie temporal de medidas de reflectancia sobre un cultivo de cebada a lo largo de su ciclo de crecimiento, se obtuvo el *LAI*, el cual fue contrastado mediante medidas de control y obteniendo un coeficiente de determinación de $R^2 = 0.998$ y un $RMSE = 0.12$. En una segunda campaña se realizó análisis múltiples de datos de reflectancia obtenidos mediante satélite, aprovechando la consistencia espacial que deben presentar las medidas realizadas dentro de una misma parcela. En este segundo caso se validó la información mediante 102 medidas de control repartidas en dos fechas diferentes, obteniendo un coeficiente de determinación de $R^2 = 0.83$ y un $RMSE = 0.63$.

Los métodos presentados no solo obtienen unos resultados precisos, sino que presentan respecto a los métodos tradicionales una mayor estabilidad frente a las estimaciones iniciales utilizadas, y sobre todo, frente al número de variables a invertir, habiéndose obtenido estos resultados mediante la inversión de 5 y 10 variables, según los diferentes casos.

Esta metodología demuestra la viabilidad de la estimación de propiedades biofísicas de la vegetación desde la nueva generación de satélites de alta resolución, aplicándose con éxito al satélite QuickBird II.

Es de destacar también la importancia de la realización de medidas de las propiedades ópticas foliares para el análisis y la verificación de las propiedades de la vegetación. En este sentido, se ha empleado la metodología para la medida de la reflectancia y transmitancia en hojas pequeñas, basada en el trabajo de J. Harron, utilizándola por primera vez sobre hojas de cebada y adaptando la metodología a dicha variedad foliar. El procedimiento proporciona unos resultados con un error del 1% para la reflectancia y del 3% para la transmitancia.

El análisis de sensibilidad realizado sobre los modelos PROSPECT y SAILH pone de manifiesto la importancia de la reflectancia del suelo y de la distribución de inclinación foliar, junto con los parámetros C_{a+b} y N , que clásicamente se vienen destacando en la bibliografía.

Para finalizar, se ha desarrollado un estudio de la influencia de la corrección atmosférica sobre el resultado de las metodologías aplicadas en la caracterización de la vegetación, comprobando que la obtención de parámetros característicos de la misma se ve claramente influenciada por las diferentes simplificaciones asumidas en dicha corrección, siendo conveniente el considerar la influencia de suelos heterogéneos.

LÍNEAS FUTURAS

Del trabajo realizado hasta el momento, se plantean unas posibles líneas de estudio que necesitan ser desarrolladas para mejorar el análisis y la interpretación de la información espectral de la vegetación:

El modelo SAILH es un modelo sencillo aplicable a cubiertas homogéneas, no siendo posible pues su aplicación a bosques o cultivos dispersos. Es por lo tanto interesante estudiar la aplicabilidad de las metodologías aquí desarrolladas a modelos más complejos.

En este trabajo se han analizado por separado series de datos espaciales y temporales, pero cabe pensar que el análisis conjunto de series espacio-temporales permita mejorar tanto los resultados como la estabilidad de la inversión de datos espectrales.

Así mismo, el desarrollo de modelos de reflectancia foliar que cubran por completo el ciclo de vida de la hoja hasta su secado permitiría extender el periodo de análisis de series temporales.

Aprovechando el exhaustivo estudio realizado sobre esferas integrantes, se está trabajando en el desarrollo de técnicas que nos permitan medir las propiedades ópticas foliares cuando el tamaño de la hoja no es suficientemente grande como para cubrir el puerto de la esfera integrante minimizando el uso de medidas.

La aplicación de las técnicas de análisis múltiple de series de datos no es exclusiva del campo de la teledetección pudiendo servir para mejorar la información que actualmente se obtiene de otros sistemas. En concreto se prevé su aplicación en el análisis de las medidas atmosféricas de aerosoles, la otra gran línea de trabajo del Grupo de Óptica Atmosférica.

Apéndice I. Modelo PROSPECT

En este apéndice se desarrolla completamente el modelo PROSPECT presentado en la sección 2.2. Algunas partes de este desarrollo vienen indicadas en la publicación original de este modelo (Jacquemoud & Baret, 1990), sin embargo, dado que en muchos aspectos el modelo se basa en modelos anteriores, como el “plate model” (Allen et al., 1969), hay que recurrir a diferentes fuentes para tener una idea completa del modelo. Por este motivo se ha creído apropiado presentar aquí su desarrollo completo.

Partiremos del estudio de la transmitancia de una superficie dieléctrica. Sea $\tau_{av}(\alpha, m)$, la transmitancia de la superficie que separa dos dieléctricos. Consideremos que el flujo incidente está limitado a un cierto ángulo sólido ω definido por el ángulo máximo de incidencia α , tal como se muestra en la Figura I-1.

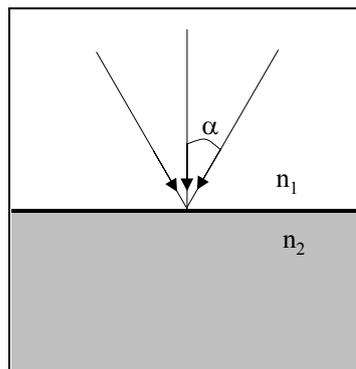


Figura I-1 Incidencia de la luz sobre una superficie limitada a un ángulo máximo α .

El índice relativo de refracción se define como el cociente entre los dos medios, $m = n_2/n_1$. Para el cálculo de esta transmitancia partimos de las relaciones de Fresnel para la transmitancia de la interfase de una superficie dieléctrica (Allen, 1973), tanto en el caso de que el vector eléctrico sea perpendicular al plano de incidencia, $\tau_s(x, m)$, como que éste se encuentre contenido en el plano de incidencia, $\tau_p(x, m)$.

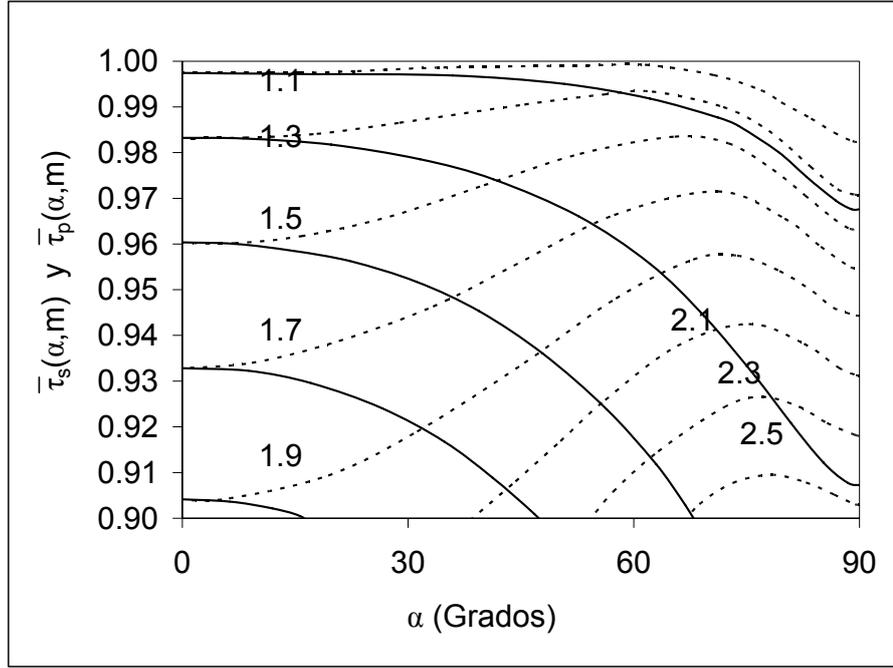


Figura I-2 Valores de $\bar{\tau}_s(\alpha, m)$ (trazo discontinuo) y $\bar{\tau}_p(\alpha, m)$ (trazo continuo) en función de α , para diferentes valores de m .

$$\tau_s(x, m) = \frac{4(1-x)^{1/2}(m^2-x)^{1/2}}{\left[(1-x)^{1/2} + (m^2-x)^{1/2} \right]^2} \quad (\text{I-1})$$

$$\tau_p(x, m) = \frac{4n^2(1-x)^{1/2}(m^2-x)^{1/2}}{\left[m^2(1-x)^{1/2} + (m^2-x)^{1/2} \right]^2} \quad (\text{I-2})$$

donde $x = \text{sen}^2(\theta)$, siendo θ el ángulo acimutal de incidencia. Integrando para todas las posibles direcciones de incidencia dentro del ángulo sólido ω .

$$\bar{\tau}(\alpha, m) = \frac{\int \tau(\theta, m) \cos \theta d\omega}{\int \cos \theta d\omega} \quad (\text{I-3})$$

El cálculo de las integrales, suponiendo simetría acimutal, nos da los valores de $\bar{\tau}_s(\alpha, m)$ y $\bar{\tau}_p(\alpha, m)$ que se representan en la Figura I-2.

Para luz con polarización mixta, se puede calcular la transmitancia como:

$$\tau_{av}(\alpha, m) = \mu \bar{\tau}_s(\alpha, m) + (1 - \mu) \bar{\tau}_p(\alpha, m) \quad (\text{I-4})$$

donde μ tomará el valor 1/2 para luz no polarizada. Los valores que se han calculado, solo son validos en caso de que $m > 1$. En caso contrario tendremos que considerar la siguiente expresión:

$$\tau_{av}(\alpha, m) = m^2 \tau_{av}(\alpha, 1/m) \quad (\text{I-5})$$

Una vez conocida la transmitancia de la superficie, la reflectancia será:

$$\rho_{av}(\alpha, m) = 1 - \tau_{av}(\alpha, m) \quad (I-6)$$

Para el estudio de la transmitancia y reflectancia de una lámina, a diferencia del modelo de Allen (1969), que considera que la luz que incide sobre la hoja proviene de todas las direcciones, el modelo PROSPECT considera que la medida de la reflectancia y de la transmitancia se realiza utilizando un haz colimado y perpendicular a la hoja. Sin embargo, debido a la rugosidad de la superficie, se considera que la luz penetra en la hoja dentro de un rango de direcciones, determinadas por un ángulo máximo de incidencia α se estima un valor para este ángulo de 60° (Jacquemoud & Baret, 1990).

Si sobre una lámina de coeficiente de transmisión t e índice de refracción n , incide un cierto flujo de luz I_0 , se producirá un cierto número de reflexiones internas que darán lugar a la reflectancia y a la transmitancia de la lámina. Teniendo en cuenta las ecuaciones (I-5) y (I-6), podremos calcular cada uno de los términos de estas reflexiones (Figura I-3).

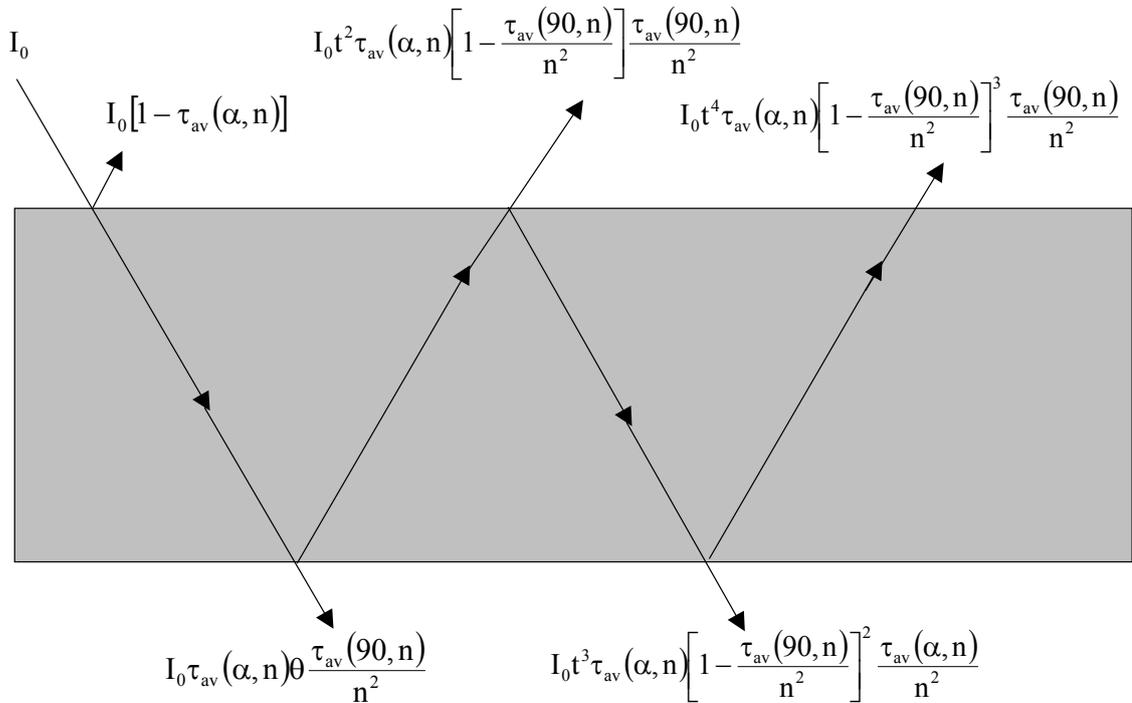


Figura I-3. Esquema de los diferentes términos que componen la transmitancia y la reflectancia total de una lámina.

Sumando todas las contribuciones de flujo ascendente y dividiendo por el flujo incidente I_0 , obtenemos la expresión de la reflectancia de la lámina:

$$\rho_\alpha = [1 - \tau_{av}(\alpha, n)] + t^2 \tau_{av}(\alpha, n) \left[1 - \frac{\tau_{av}(90, n)}{n^2} \right] \frac{\tau_{av}(90, n)}{n^2} + \dots + t^4 \tau_{av}(\alpha, n) \left[1 - \frac{\tau_{av}(90, n)}{n^2} \right]^3 \frac{\tau_{av}(90, n)}{n^2} + \dots \quad (I-7)$$

$$\rho_\alpha = [1 - \tau_{av}(\alpha, n)] + \frac{\tau_{av}(90, n)\tau_{av}(\alpha, n)t^2[n^2 - \tau_{av}(90, n)]}{n^4 - t^2[n^2 - \tau_{av}(90, n)]^2} \quad (\text{I-8})$$

Con un razonamiento similar, obtendremos el valor de la transmitancia de la lámina:

$$\tau_\alpha = \frac{\tau_{av}(90, n)\tau_{av}(\alpha, n)n^2}{n^4 - t^2[n^2 - \tau_{av}(90, n)]^2} \quad (\text{I-9})$$

Se puede expresar de forma más sencilla la reflectancia y transmitancia para cualquier ángulo en función de la reflectancia y transmitancia para 90° de la siguiente manera:

$$\rho_\alpha = x\rho_{90} + y \quad (\text{I-10})$$

$$\tau_\alpha = x\tau_{90} \quad (\text{I-11})$$

donde

$$x = \frac{\tau_{av}(\alpha, n)}{\tau_{av}(90, n)} \quad (\text{I-12})$$

$$y = x(\tau_{av}(90, n) - 1) + 1 - \tau_{av}(\alpha, n) \quad (\text{I-13})$$

Como ya se ha comentado, el modelo PROSPECT a igual que el desarrollado por Allen, considera que la hoja está formada por N láminas homogéneas separadas por $N - 1$ espacios de aire. Como la luz incide sobre la lámina superior de forma normal, esta lámina vendrá caracterizada por ρ_α y τ_{90} . Sin embargo, en el interior de la hoja considera que la luz se distribuye isotrópicamente. Por lo tanto las láminas inferiores vendrán caracterizadas por ρ_{90} y τ_{90} .

Stokes (1862) resolvió el problema de la reflectancia y la transmitancia de una pila formada por N laminas iguales separadas por $N-1$ espacios de aire:

$$\frac{\rho_{N,90}}{b_{90}^N - b_{90}^{-N}} = \frac{\rho_{N,90}}{a_{90}^1 - a_{90}^{-1}} = \frac{1}{a_{90}b_{90}^N - a_{90}^{-1}b_{90}^{-1}} \quad (\text{I-14})$$

donde:

$$a_{90} = \frac{(1 + \rho_{90}^2 - \tau_{90}^2 + \delta_{90})}{2\rho_{90}} \quad (\text{I-15})$$

$$b_{90} = \frac{(1 - \rho_{90}^2 + \tau_{90}^2 + \delta_{90})}{2\tau_{90}} \quad (\text{I-16})$$

$$\delta_{90} = \sqrt{(\tau_{90}^2 - \rho_{90}^2 - 1)^2 - 4\rho_{90}^2} \quad (\text{I-17})$$

Sin embargo en nuestro caso no es posible aplicar directamente la teoría, ya que debido a las diferencias en la iluminación no se puede considerar todas las láminas como iguales. Para poder resolver este problema, calcularemos la reflectancia y la transmitancia de nuestro sistema no homogéneo en función de la reflectancia y la transmitancia de las $N - 1$ capas inferiores:

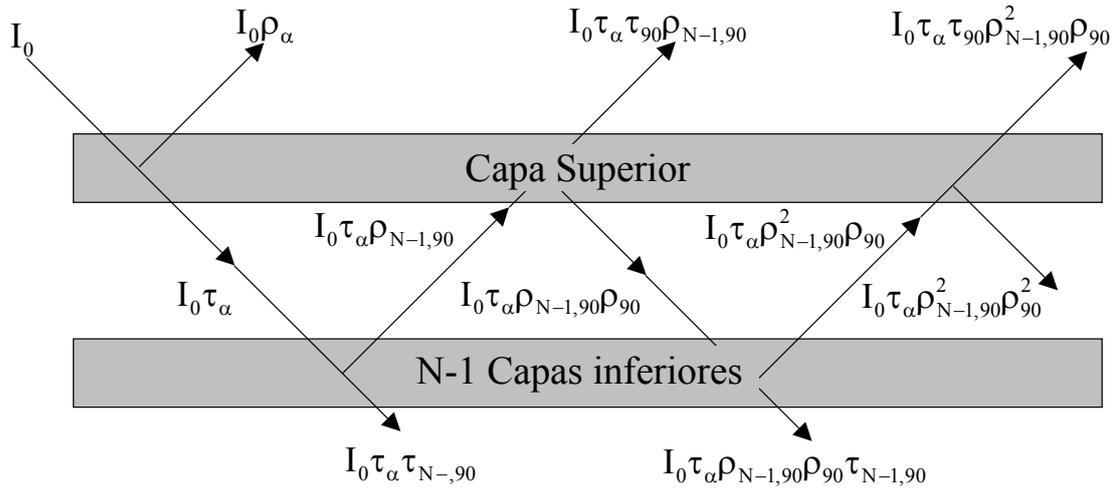


Figura I-4. Esquema de los distintos términos que componen la reflectancia y la transmitancia en un apilamiento de N láminas, considerando que la luz incide de manera perpendicular sobre la primera.

Siguiendo un procedimiento similar al utilizado en la expresión (I-8), sumando los distintos términos del flujo ascendente y descendiente, obtenemos:

$$\rho_{N,\alpha} = \rho_\alpha + \frac{\tau_\alpha \tau_{90} \rho_{N-1,90}}{1 - \rho_{90} \rho_{N-1,90}} \quad (\text{I-18})$$

$$\tau_{N,\alpha} = \frac{\tau_\alpha \tau_{N-1,90}}{1 - \rho_{90} \rho_{N-1,90}} \quad (\text{I-19})$$

Utilizando estas dos últimas ecuaciones junto con las Ecuaciones (I-10) y (I-11) para eliminar ρ_α y τ_α , obtenemos:

$$\rho_{N,\alpha} = x \rho_{N,90} + y \quad (\text{I-20})$$

$$\tau_{N,\alpha} = x \tau_{N,90} \quad (\text{I-21})$$

De esta manera podemos transformar nuestro sistema en otro homogéneo al que sí que podremos aplicar la teoría de Stokes, a partir del cual determinaremos $\rho_{N,\alpha}$ y $\tau_{N,\alpha}$.

Hasta ahora, los procesos de absorción los hemos tenido en cuenta a través del coeficiente de transmisión t . Al igual que en el *plate model* (Allen et al., 1969) se relaciona t con el coeficiente de absorción k para cada longitud de onda:

$$t = (1 - k)e^{-k} - k^2 \int_k^{\infty} \frac{e^{-x}}{x} dx \quad \text{(I-22)}$$

A su vez k puede ser escrito como:

$$k(\lambda) = \sum_i K_i(\lambda)C_i \quad \text{(I-23)}$$

donde K_i son los coeficientes específicos de absorción para cada uno de los elementos que conforman la hoja y C_i los contenidos por unidad de área de hoja de dichos elementos.

Apéndice II. Modelo SAILH

Al igual que ocurre con el modelo PROSPECT, la descripción del modelo SAILH se encuentra de forma muy dispersa, por lo que haremos aquí un desarrollo completo del mismo. La base de los modelos de turbidez es la ecuación de transferencia radiativa (Chandrasekhar, 1960; Sobolev, 1963; Lenoble, 1993; Liou, 1980), a partir de la cual podremos describir la propagación de la luz a través de la vegetación, dando cuenta de los procesos de absorción y scattering que se produzcan. Los métodos utilizados para resolver esta ecuación vienen derivados en primer lugar de la física de partículas, y de forma más próxima de la física atmosférica. No obstante, existe toda una serie de características y un lenguaje propio que será analizado en los siguientes apartados.

Comenzaremos por ver algunos de los modelos que se pueden considerar como sus antecesores. Como punto de partida se puede considerar la teoría de Paul Kubelka y Franz Munk (1931), desarrollada originalmente a fin de determinar la opacidad de pinturas. Esta teoría estudia como se transmite la luz en un medio homogéneo e isótropo, considerando únicamente la presencia de dos densidades de flujo, uno ascendente (F_+) y otro descendente (F_-) (Figura II-1).

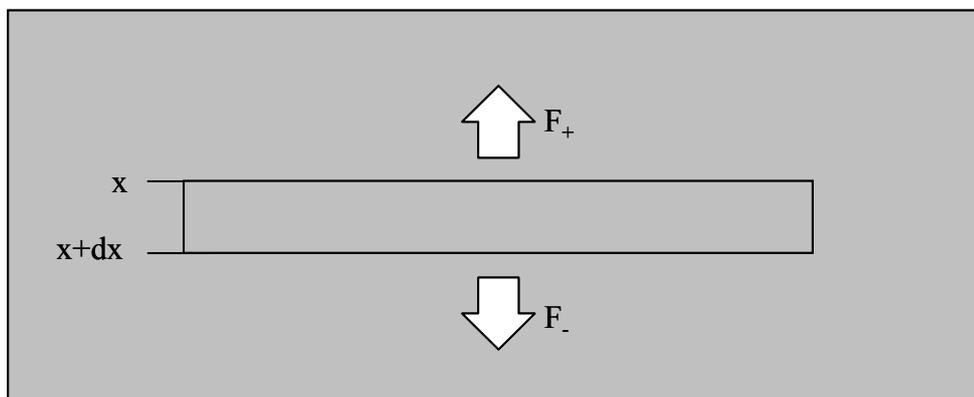


Figura II-1 Densidad de flujo ascendente (F_+) y descendente (F_-), utilizados en el desarrollo de la teoría de Kubelka y Munk.

En la propagación de F_+ a través del medio material, éste se ve reducido a causa de procesos de absorción y scattering. Pero además se verá incrementado por la luz que por procesos de scattering pasan de propagarse en dirección descendente a dirección ascendente. Los mismos procesos son aplicables a F_- . Esto se puede escribir en forma de un sistema de dos ecuaciones diferenciales, que han de resolverse junto con las condiciones de contorno adecuadas a cada problema. En estas ecuaciones F_+' indica la derivada parcial primera de F_+ respecto de x .

$$\begin{cases} F_+' = bF_- - aF_+ \\ F_-' = aF_- - bF_+ \end{cases} \quad (\text{II-1})$$

Este planteamiento, se extendió posteriormente a cubiertas vegetales por W. Allen, T. Gayle y A. Richardson en su modelo AGR (1970), considerando una tercera densidad de flujo, F_S en representación de la irradiancia solar directa (Figura II-2).

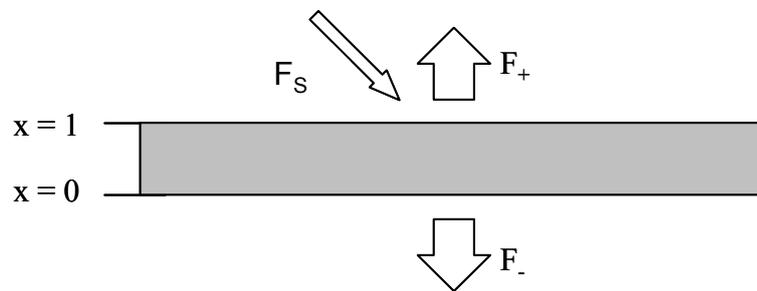


Figura II-2 Densidad de flujo ascendente (F_+), descendente (F_-) y en la dirección de iluminación (F_S) utilizados en el desarrollo de Allen, Gayle y Richardson.

En este caso, el sistema de ecuaciones diferenciales a resolver es el formado por las siguientes:

$$\begin{cases} F_+' = bF_- - aF_+ + c'F_S \\ F_-' = aF_- - bF_+ - cF_S \\ F_S' = kF_S \end{cases} \quad (\text{II-2})$$

A este mismo sistema de ecuaciones se puede llegar partiendo de la ecuación general de transferencia radiativa (1-19), teniendo en cuenta aproximaciones como el método de Eddington o el método de las ordenadas discretas limitado a dos términos (Lenoble, 1993).

El modelo de Suits (1972), directo antecesor del modelo propuesto por Verhoef, parte de considerar el concepto del “campo en la dirección de observación” (Figura II-3), F_o , relacionado con la radiancia en la dirección de observación mediante:

$$F_o = \pi L_o \quad (\text{II-3})$$

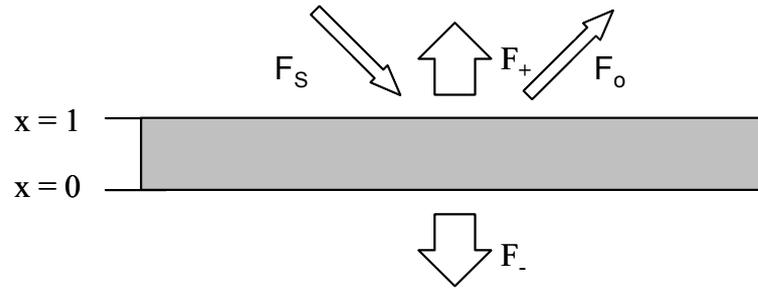


Figura II-3 Densidad de flujo ascendente (F_+), descendente (F_-), en la dirección de iluminación (F_s) y en la dirección de observación (F_o) utilizados en el desarrollo de Suits.

Para calcular esta radiancia se recurre al método del campo autoconsistente. Básicamente el proceso consiste en calcular de forma sencilla en primer lugar el flujo que ilumina las hojas de una capa de espesor diferencial en el interior de la cubierta vegetal. Esto se lleva a cabo mediante el método de los tres flujos. El flujo así calculado puede utilizarse para rehacer el cálculo y considerar que es el que ilumina las hojas. Si tenemos en cuenta aquí la geometría de las hojas, obtendremos un flujo no lambertiano, que podrá ser utilizado en un nuevo cálculo, como el flujo responsable de iluminar las hojas. Este cálculo se puede repetir hasta que el flujo que se considera ilumina las hojas y el flujo que éstas reflejan sean suficientemente similares. El modelo de Suits supone que este proceso es rápidamente convergente y solo se tiene en cuenta el primer orden, por lo que para calcular el campo isótropo en el interior de la cubierta vegetal nos bastará las 3 primeras ecuaciones diferenciales del sistema (II-4). Por su parte, la cuarta ecuación de este sistema nos dará el campo en la dirección de observación. Esta aproximación será tanto más válida cuanto más lambertiana sea la reflectancia total del cultivo.

$$\begin{cases} F_+' = bF_- - aF_+ + c'F_s \\ F_-' = aF_- - bF_+ - cF_s \\ F_s' = kF_s \\ F_o' = wF_s + vF_- + uF_+ - KF_o \end{cases} \quad (\text{II-4})$$

Omitiremos aquí la deducción de los coeficientes de extinción por encontrarse una descripción muy detallada de los mismos en el artículo de Verhoef (1984).

II.1 Resolución del sistema de ecuaciones diferenciales

Para resolver las cuatro ecuaciones diferenciales se necesita unas condiciones de contorno, definidas en el límite superior ($x = h$) e inferior ($x = 0$). Aquí consideraremos la altura de la cubierta vegetal normalizada a la unidad.

Para facilitar el cálculo podemos resolver este sistema para una cubierta vegetal sobre un suelo completamente negro, y que por lo tanto no reflejará luz de nuevo sobre el sistema. La influencia del suelo se puede incorporar posteriormente utilizando el método de adición (Lenoble, 1993), de forma similar a lo que se realiza en la expresión (4-6).

$$\rho = \rho^{\uparrow}_{vegetación} + \frac{T^{\downarrow} \rho_{suelo} T^{\uparrow}}{1 - \rho_{suelo} \rho^{\downarrow}_{vegetación}} \quad (II-5)$$

donde $\rho^{\uparrow}_{vegetación}$ y $\rho^{\downarrow}_{vegetación}$ son las reflectancias superior e inferior de la vegetación, sin tener en cuenta el suelo. Por su parte, T^{\downarrow} y T^{\uparrow} son las transmitancias de la vegetación considerando la dirección de iluminación y de observación.

Como ya hemos comentado en la sección 2.4.2, la luz que ilumina la cubierta vegetal puede en general dividirse en la luz que procede directamente del sol $F_s(1)$ y la que, debido a la dispersión en la atmósfera, llega de todas las direcciones $F_d(1)$. Separaremos el problema en dos, de forma que en un caso consideraremos que la iluminación de la vegetación es completamente debida a luz directa, y en el otro, que es completamente debida a luz difusa. Una vez calculada la reflectancia en cada uno de estos casos, la reflectancia final vendrá dada por la expresión:

$$\rho = \frac{\rho_{dir} F_s(1) + \rho_{dif} F_d(1)}{F_s(1) + F_d(1)} = \frac{\rho_{dir} + \rho_{dif} DSKL}{1 + DSKL} \quad (II-6)$$

II.2 Cubierta vegetal iluminada únicamente por la irradiancia difusa.

En este caso, resolveremos el sistema (II-4) considerando que la densidad de flujo $F_s(1) = 0$, y por lo tanto la tercera de las ecuaciones del sistema queda eliminada y el término F_s desaparece de las otras 3 ecuaciones. Por lo tanto el sistema queda como:

$$\begin{cases} F_+' = bF_- - aF_+ \\ F_-' = aF_- - bF_+ \\ F_o' = vF_- + uF_+ - KE_o \end{cases} \quad (II-7)$$

A partir de la primera ecuación, junto a su derivada primera respecto de x , obtendremos tanto F_- como F_-' , en función de F_+ , F_+' y F_+'' :

$$\begin{aligned} F_-' &= \frac{1}{b} F_+'' - \frac{a}{b} F_+' \\ F_- &= \frac{1}{b} F_+' - \frac{a}{b} F_+ \end{aligned} \quad (II-8)$$

con lo que sustituyendo en la segunda ecuación de (II-7), obtendremos:

$$F_+'' = (a^2 - b^2) F_+ \quad (II-9)$$

Obrando de forma similar para F_- , obtenemos las soluciones completas para las dos densidades de flujo:

$$F_+(x) = A e^{\sqrt{a^2 - b^2} x} + B e^{-\sqrt{a^2 - b^2} x} \quad (II-10)$$

$$F_-(x) = Ce^{\sqrt{a^2-b^2}x} + De^{-\sqrt{a^2-b^2}x} \quad (\text{II-11})$$

Sustituyendo en las dos primeras ecuaciones de (II-7), se puede encontrar relaciones entre C y A , y D y B .

$$C = A \frac{a + \sqrt{a^2 - b^2}}{b} \quad (\text{II-12})$$

$$D = B \frac{b}{a + \sqrt{a^2 - b^2}} \quad (\text{II-13})$$

Queda por resolver la tercera ecuación de (II-7). Su solución será la suma de una solución de la parte homogénea más una solución particular. Por lo tanto $F_o(x)$ tendrá la forma:

$$F_o(x) = F_{o0}e^{-Kx} + \alpha e^{\sqrt{a^2-b^2}x} + \beta e^{-\sqrt{a^2-b^2}x} \quad (\text{II-14})$$

Sustituyendo (II-10), (II-11) y (II-14) en la tercera ecuación de (II-7) y agrupando por términos, encontramos la solución para α y β , con lo que (II-14) queda como:

$$F_o = F_{o0}e^{-Kx} + A \frac{v \frac{a + \sqrt{a^2 - b^2}}{b} + u}{K + \sqrt{a^2 - b^2}} e^{\sqrt{a^2 - b^2}x} + B \frac{b}{K - \sqrt{a^2 - b^2}} e^{-\sqrt{a^2 - b^2}x} \quad (\text{II-15})$$

Para considerar también la influencia del suelo, tendremos que utilizar (II-5), que en este caso tomará la forma específica de:

$$\rho_{dif} = R_{dif.O} + \frac{T_{dif.dif} \rho_{suelo} (T_{dif.O} + T_{o.o})}{1 - \rho_{suelo} R_{dif.dif}} \quad (\text{II-16})$$

donde cada uno de los términos lo calcularemos a partir de las expresiones que hemos obtenido de $F_-(x)$ y $F_o(x)$, utilizando unas condiciones de contorno específicas para cada caso a fin de despejar las constantes A , B y F_{o0} .

$$R_{dif.O} = F_o(1) \text{ considerando } F_-(1) = 1; F_+(0) = 0; F_o(0) = 0 \quad (\text{II-17})$$

$$R_{dif.dif} = F_-(0) \text{ considerando } F_-(1) = 0; F_+(0) = 1; F_o(0) = 0 \quad (\text{II-18})$$

$$T_{dif.dif} = F_-(0) \text{ considerando } F_-(1) = 1; F_+(0) = 0; F_o(0) = 0 \quad (\text{II-19})$$

$$T_{dif.O} = F_o(1) \text{ considerando } F_-(1) = 0; F_+(0) = 1; F_o(0) = 0 \quad (\text{II-20})$$

$$T_{O,O} = F_o(1) \text{ considerando } F_-(1) = 0; F_+(0) = 0; F_o(0) = 1 \quad (\text{II-21})$$

II.3 Cubierta vegetal iluminada únicamente por la irradiancia solar directa.

Cuando iluminamos la vegetación únicamente mediante una irradiancia solar directa, no se simplifica el sistema (II-4) como ocurría al iluminar con la irradiancia difusa. En este caso la tercera ecuación diferencial del sistema tendrá la solución:

$$F_S(x) = F_{S1} e^{+kx} \quad (\text{II-22})$$

donde F_{S1} es el valor de F_S para $x = 1$. Siguiendo la misma forma de actuar que nos llevó a obtener la ecuación (II-9), en este caso obtendremos para $F_+(x)$ y $F_-(x)$ las expresiones:

$$F_+'' = (a^2 - b^2)F_+ + (ck - c'b - ac)F_{S0} e^{kx} \quad (\text{II-23})$$

$$F_-'' = (a^2 - b^2)F_- + (-cb + ac' - c'k)F_{S0} e^{kx} \quad (\text{II-24})$$

Soluciones completas de estas ecuaciones son respectivamente:

$$F_+(x) = Ae^{\sqrt{a^2-b^2}x} + Be^{-\sqrt{a^2-b^2}x} + \frac{c(k-a) - cb}{k^2 - (a^2 - b^2)} F_{S0} e^{kx} \quad (\text{II-25})$$

$$F_-(x) = Ce^{\sqrt{a^2-b^2}x} + De^{-\sqrt{a^2-b^2}x} + \frac{-c'(k-a) - cb}{k^2 - (a^2 - b^2)} F_{S0} e^{kx} \quad (\text{II-26})$$

Sustituyendo (II-22), (II-25) y (II-26) en las dos primeras ecuaciones del sistema (II-4), obtenemos las siguientes relaciones entre C y A , y D y B :

$$C = A \frac{a + \sqrt{a^2 - b^2}}{b} \quad (\text{II-27})$$

$$D = B \frac{a - \sqrt{a^2 - b^2}}{b} = B \frac{b}{a + \sqrt{a^2 - b^2}} \quad (\text{II-28})$$

Al igual que se hizo anteriormente, para resolver la cuarta ecuación de (II-4), consideraremos una solución de la parte homogénea y una solución particular, con lo que $F_o(x)$ tendrá la forma:

$$F_o(x) = F_{o0} e^{-Kx} + \alpha e^{\sqrt{a^2-b^2}x} + \beta e^{-\sqrt{a^2-b^2}x} + \gamma e^{kx} \quad (\text{II-29})$$

Sustituyendo (II-22), (II-25), (II-26) y (II-29) en la cuarta ecuación de (II-4), y agrupando por términos, encontramos la solución para α , β y γ :

$$\alpha = A \frac{v \frac{a + \sqrt{a^2 - b^2}}{b} + u}{K + \sqrt{a^2 - b^2}} \quad (\text{II-30})$$

$$\beta = B \frac{v \frac{b}{a + \sqrt{a^2 - b^2}} + u}{K - \sqrt{a^2 - b^2}} \quad (\text{II-31})$$

$$\gamma = \frac{wF_{S1}}{k + K} + \frac{vF_{S1}}{k + K} \frac{c(k - a) - c'b}{k^2 - (a^2 - b^2)} + \frac{uF_{S1}}{k + K} \frac{-c'(k - a) - cb}{k^2 - (a^2 - b^2)} \quad (\text{II-32})$$

En este caso la influencia del suelo se tendrá en cuenta a través de la expresión:

$$\rho_{dir} = R_{S,O} + \frac{(T_{S,dif} + T_{S,S})\rho_{suelo}(T_{dif,O} + T_{O,O})}{1 - \rho_{suelo}R_{dif,dif}} \quad (\text{II-33})$$

donde cada uno de los términos lo calcularemos a partir de las expresiones que hemos obtenido de $F_S(x)$, $F_-(x)$ y $F_o(x)$, utilizando unas condiciones de contorno específicas para cada caso a fin de despejar las constantes A , B y F_{O0} .

$$R_{S,O} = F_o(0) \text{ considerando } F_S(0) = 1; F_-(0) = 0; F_+(1) = 0; F_o(1) = 0 \quad (\text{II-34})$$

$$R_{dif,dif} = F_-(1) \text{ considerando } F_S(0) = 0; F_-(0) = 0; F_+(1) = 1 \quad (\text{II-35})$$

$$T_{S,dif} = F_-(1) \text{ considerando } F_S(0) = 1; F_-(0) = 0; F_+(1) = 0 \quad (\text{II-36})$$

$$T_{S,S} = F_S(1) \text{ considerando } F_S(0) = 1; F_-(0) = 0; F_+(1) = 0 \quad (\text{II-37})$$

$$T_{dif,O} = F_o(0) \text{ considerando } F_S(0) = 0; F_-(0) = 0; F_+(1) = 1; F_o(1) = 0 \quad (\text{II-38})$$

$$T_{O,O} = F_o(0) \text{ considerando } F_S(0) = 0; F_-(0) = 0; F_+(1) = 0; F_o(1) = 1 \quad (\text{II-39})$$

II.4 Efecto Hot Spot.

Hasta aquí, la descripción realizada corresponde al modelo SAIL. Sin embargo en el modelo SAILH (Kuusk, 1985) se considera además la influencia del efecto Hot Spot. Como se comentó en la sección 2.4.2, este efecto se debe a la auto-sombra que los elementos de la vegetación, las hojas, producen unos sobre otros, de tal manera que si se observa desde cualquier dirección diferente a la de iluminación, veremos cierta cantidad de hojas a la sombra, mientras que si se observa desde una dirección igual o cercana a la de iluminación, todas las hojas de la vegetación se verán iluminadas, lo que dará un máximo en el valor de la reflectancia de la vegetación. Esto implica que el resultado de la reflectancia no es independiente de la diferencia entre las direcciones de iluminación y observación. Sin embargo en la ecuación (II-5), al considerar T^\uparrow y T^\downarrow de forma independiente, estamos implícitamente contradiciendo esta afirmación.

Si suponiendo una cubierta homogénea, la probabilidad de que la luz penetre en la vegetación hasta una cierta profundidad x , comprendida ente 0 y 1, en una dirección (θ, φ) se define como (Nilson & Kuusk, 1989):

$$q(\theta, \varphi, x) = e^{-k(\theta)x} \quad (\text{II-40})$$

Dado que hasta ahora hemos considerado independientes los procesos de iluminación y de observación, la probabilidad de observar una hoja directamente iluminada vendrá dada por:

$$Q(\theta_o, \varphi_o, \theta_s, \varphi_s, x) = q(\theta_o, \varphi_o, x)q(\theta_s, \varphi_s, x) \quad (\text{II-41})$$

Sin embargo, en el caso de observar en la misma dirección de iluminación, forzosamente debemos ver todas las hojas que estén directamente iluminadas, y por lo tanto la expresión anterior debiera ser:

$$Q(\theta_s, \varphi_s, \theta_s, \varphi_s, x) = q(\theta_s, \varphi_s, x) \quad (\text{II-42})$$

Para compensar esto, Kuusk (1985) introdujo un factor de corrección sobre esta probabilidad, $C_{HotSpot}$, el cual depende de las direcciones de observación e iluminación, así como de un parámetro HotSpot.

$$Q(\theta_o, \varphi_o, \theta_s, \varphi_s, x) = q(\theta_o, \varphi_o, x)q(\theta_s, \varphi_s, x)C_{HotSpot}(\theta_o, \varphi_o, \theta_s, \varphi_s, x) \quad (\text{II-43})$$

En SAILH, a fin de tener en cuenta este efecto, se considera la reflectancia de la cubierta dividida en la reflectancia procedente únicamente de la vegetación, y la que tiene información del suelo.

$$\rho_{dir} = \rho_{vegetación} + \rho_{suelo} \quad (\text{II-44})$$

La $\rho_{vegetación}$ por su parte se puede dividir en la reflectancia debida a procesos de scattering simple, $\rho_{vegetación}^I$, y aquella debida a múltiple scattering, $\rho_{vegetación}^M$. Este último se puede obtener como solución del sistema (II-45), donde se considera que la densidad de flujo en la dirección de observación sólo se ve incrementada a través de F_- y de F_+ , pero no por la luz que procede directamente de F_s .

$$\begin{cases} F_+' = bF_- - aF_+ + c'F_s \\ F_-' = aF_- - bF_+ - cF_s \\ F_s' = kF_s \\ F_o' = vF_- + uF_+ - KF_o \end{cases} \quad (\text{II-45})$$

Respecto a la ρ_{suelo} , también podemos dividirla en una parte en la que solo se considere scattering simple sobre el suelo, ρ_{suelo}^I , y otra en la que se considere múltiple scattering en vegetación y suelo, ρ_{suelo}^M . En este caso, este último término lo podemos calcular como:

$$\rho^M_{suelo} = \frac{T_{S.S}\rho_{suelo}T_{dif.O}}{1 - \rho_{suelo}R_{dif.dif}} + \frac{T_{S.dif}\rho_{suelo}T_{dif.O}}{1 - \rho_{suelo}R_{dif.dif}} + \frac{T_{S.dif}\rho_{suelo}T_{O.O}}{1 - \rho_{suelo}R_{dif.dif}} + \frac{T_{S.dif}(\rho_{suelo})^2T_{O.O}R_{dif.dif}}{1 - \rho_{suelo}R_{dif.dif}} \quad (\text{II-46})$$

Tanto en $\rho^M_{vegetación}$ como en ρ^M_{suelo} , se están considerando las densidades de flujos isótropos F_- y F_+ , por lo que se calculan de la misma manera que en SAIL. Sin embargo para calcular $\rho^1_{vegetación}$ y ρ^1_{suelo} hay que tener en cuenta el efecto del Hot Spot, y por lo tanto en SAILH son calculados mediante las expresiones (II-47) y (II-48) (Jupp & Strahler, 1991).

$$\rho^1_{vegetación} = \int_0^1 Q(\theta_o, \varphi_o, \theta_s, \varphi_s, x) w dx \quad (\text{II-47})$$

$$\rho^1_{suelo} = Q(\theta_o, \varphi_o, \theta_s, \varphi_s, 1) \rho_{suelo} \quad (\text{II-48})$$

BIBLIOGRAFIA

Allen W.A. & A.J. Richardson (1968). *Interaction of light with a plant canopy*. J. Opt. Soc. Am., **58**, 1023-1028.

Allen W.A., H.W. Gausman, A.J. Richardson & J.R. Thomas (1969). *Interaction of isotropic light with a compact leaf*. J. Opt. Soc. Am., **59**, 1376-1379.

Allen, W.A., T.V. Gayle & A.J. Richardson (1970). *Plant-Canopy Irradiance Specified by the Duntley Equations*. J. Opt. Soc. Am. **60**, 372-376.

Allen, W.A. (1973). *Transmission of isotropic light across a dielectric surface in two and three dimensions*. J. Opt. Soc. Am., **63**, 664-666.

Allen, W.A., H.W. Gausman & A.J. Richardson (1973). *Willstätter-Stoll theory of leaf reflectance evaluated by ray tracing*. Appl. Opt., **12**, 2448-2453.

AMS (2000). *Glossary of Meteorology*. American Meteorological Society. T. S. Glickman, ed. 2nd Edition. Boston.

Anderson, J.R., E. Hardy, J. Roach & R. Witmer (1976). *A land use and land cover classification system for use with remote sensor data*. US Geological Survey Professional Paper 964.

Angström, A. (1929). *On the atmospheric transmission of sun radiation and on dust in the air*. Geogr. Ann., **11**, 156-166.

Angström, A. (1930). *On the atmospheric transmission of sun radiation. II*. Geogr. Ann., **12**, 139- 159.

Aparicio, N., D. Villegas, J. Casadesus, J. Araus & C. Royo (2000). *Spectral vegetation indices as non destructive tools for determining durum wheat yield*. Agron. Journal, **92**, 83-91

Asrar, G., M. Fuchs, E. T. Kanemasu & J. L. Hatfield (1984). *Estimating absorbed photosynthetic radiation and leaf area index from spectral reflectance in wheat*. Agron. Journal, **76**, 300–306.

Asrar, G. (1989). *Theory and Applications of Optical Remote Sensing*. John Wiley & Sons, Inc.

Atzberger C. (2004). *Object-based retrieval of biophysical canopy variables using artificial neural nets and radiative transfer models*. Remote Sens. Environ., **93**, 53–67.

Atzberger, C. (2002). *Hyperspectral retrieval of biophysical variables through inversion of radiative transfer models. Solving the ill-posed inverse problem*. Airborne Imaging Spectroscopy workshop. Bruges (Belgium).

Bacour C., S. Jacquemoud, P. Vogt, B. Hosgood, G. Andreoli & J.P. Frangi (2001). *Optimal sampling configurations for the estimation of canopy properties from BRDF data acquired with the EGO/JRC*. In Proc. 8th Int. Symp. Physical Measurements & Signatures in Remote Sensing, Aussois (France).

Benford, F.A. (1920). *An absolute method for determining coefficients of diffuse reflection*. Gen. Elect. Rev., **23**, 72-76.

Breece H. T. & R. A Holmes (1971). *Bidirectional scattering characteristics of healthy green soybeans and corn leaves in vivo*. Appl. Opt., **10**, 119-127.

Bunnik, N.J.J. (1978). *Spectral reflectance and transmittance of single leaves*. In The multispectral reflectance of shortwave radiation by agricultural crops in relation with their morphological and optical properties (H. Veenman & B.U. Zonen, Eds), Wageningen (Pays Bas).

Cachorro, V. E., P. Duran, A. M. De Frutos, R. Vergaz & S. Hernández (1997). *Modelización de la transferencia radiativa en la atmósfera. Comparación con datos experimentales a nivel de suelo y determinación de la reflectancia de la atmósfera*. En Teledetección Aplicada a la Gestión de Recursos Naturales y Medio Litoral Marino. Ed. Asociación Española de Teledetección.

Cachorro, V.E., R. Vergaz & A.M. De Frutos (2000). *A model for atmospheric correction of DAIS hyperspectral imager sensor based on experimental measurements*. Proc. of the 19th EARSEL Symposium: Remote Sensing in the 21th Century: Economic and Environmental Applications. Edited by BALKEMA, Rotterdam.

Cachorro, V.E. & L.L. Salcedo (1991). *New improvements for Mie Scattering calculations*. J. Electromag. Waves Appl., **5**, 913-926.

Cachorro, V.E., R. Vergaz & A.M. De Frutos (1999). *An operational model for operational correction of hyperspectral image sensors based on experimental measurements*. Proceeding of the 19th EARSEL Symposium. Valladolid.

Campbell, G.S. (1986). *Extinction coefficients for radiation in plant canopies calculated using an ellipsoidal inclination angle distribution*. Agric. For. Meteorol., **36**, 317–321.

Campbell, G.S. & J.M. Norman (1989). *The description and measurement of plant canopy structure*. In G. Russell, B. Marshall and P. Jarvis (Editors), Plant Canopies: Their Growth, Form and Function. SEB Seminar Series 31: 1-19. Cambridge University Press, Cambridge.

Campbell, G.S. (1990). *Derivation of an angle density function for canopies with ellipsoidal leaf angle distributions*. Agr. Forest Meteorol., **49**, 173–176.

Carlson T. N. & D. A. Ripley (1990). *On the relation between NDVI, fractional vegetation cover, and leaf area index*. Remote Sens. Environ., **62**, 241–252.

Casas, J. (1994). *Óptica*. Ed. Universidad de Zaragoza. Distribuidora Librería Pons.

Cayón, G. (2001). *The evolution of photosynthesis, transpiration and chlorophyll during the development of leaves of plantain (Musa AAB Simmonds)*. INFOMUSA, **10**, 12-15.

Chandrasekhar, S. (1960). *Radiative Transfer*. Ed. Dover Publications, New York.

Clevers, J.G (1997). *A simplified approach for yield prediction of sugar beet based on optical remote sensing data*. Remote Sens. Environ. **61**, 221-228.

Cohen, C.J. (2000). *Early History of Remote Sensing*. Proc. of the 29th Applied Imagery Pattern Recognition Workshop. IEEE Computer Society Washington, DC.

Combal, B., F. Baret, M. Weiss, A. Trubuil, D. Mace, A. Pragnere, R. B. Myneni & Y. Knyazikhin (2002). *Retrieval of canopy biophysical variables from bi-directional reflectance using prior information to solve the ill-posed problem*. Remote Sens. Environ., **84**, 1–15.

Dawson T. P., P. J. Curran & S. E. Plummer (1998). *The biochemical decomposition of slash pine needles from reflectance spectra using neural networks*. Int. J. Remote Sens., **19**(7), 1433-1438.

Deering, D.W. (1989). *Field Measurements of Bidirectional Reflectance*. In Theory and Applications of Optical Remote Sensing. John Wiley & Sons, Inc.

Denore, B., C. TRIGUEROS, J. WILLIAMS, J. COLLS (1999). *Estimation of cereal yields combining crop growth models and remotely sensed vegetation indices*. Proceeding of the 19th EARSEL Symposium. Valladolid.

Durán, P. (1997). *Medidas espectralradiométricas para la determinación de componentes atmosféricos (ozono, vapor de agua y aerosoles) y modelización del intercambio radiativo en la atmósfera*. Tesis Doctoral, E.T.S.I.A, Universidad de Valladolid.

ESA (2006). *The changing Earth: New scientific challenges for ESA's Living Planet (ESA SP 1304)*. Ed. European Space Agency.

Fourty, T. & F. Baret (1997). *Vegetation water and dry matter contents estimated from top-of-the-atmosphere reflectance data: a simulation study*. Remote Sens. Environ., **61**, 34–45.

Gallego, F.J., J. Delince & C. Rueda (1993). *Crop area estimates through remote sensing: stability of the regression correction*. Int. J Remote Sensing. **14**, 3433-3445.

Gausman H. W., W. A. Allen, R. Cardenas & A. J. Richardson (1970). *Relation of light reflectance to histological and physical evaluation of cotton leaf maturity*. Appl. Opt., **9**, 545-552.

Green, E. P., P. J Mumby, A. J. Edwards & C.D. Clark (2000). *Remote Sensing Handbook for Tropical Coastal Management*. Vol. 3. Ed. UNESCO (Paris).

Goebel, D.G. (1967). *Generalized integrating sphere theory*. Appl. Opt., **6**,125-128.

Goel, N. S. & D. E. Strebel (1983). *Inversion of vegetation canopy reflectance models for estimating agronomic variables. I. Problem definition and initial results using the Suits model*. Remote Sens. Environ., **13**, 487-507.

Goel, N. (1988). *Models of vegetation canopy reflectance and their use in estimation of biophysical parameters from reflectance data*. Remote Sensing Reviews, **4**, 1-222.

Gonzalez F., S. López & J.M. Cuevas (1991). *Comparing Two Methodologies for Crop Area Estimation in Spain Using Landsat TM Images and Ground-Gathered Data*. Remote Sens. Environ., **35**, 29-35.

Gordon H, R. & M. Wang (1994). *Retrieval of water-leaving radiance and aerosol optical thickness over oceans with SeaWiFS: a preliminary algorithm*. Appl. Opt., **33**, 443-452.

Govaerts Y., S. Jacquemoud, M.M. Verstraete & S.L. Ustin (1996). *Three-dimensional radiation transfer modeling in a dicotyledon leaf*. Appl. Opt., **35**, 6586-6598.

Goward, S.N., C.J. Tucker & D.G. Dye (1985). *North American vegetation patterns observed with the NOAA-7 advanced very high resolution radiometer*. Vegetatio, **64**, 3– 14.

Gower, S.T., C.J. Kucharik & J.M. Norman (1999). *Direct and indirect estimation of leaf area index, fAPAR, and net primary production of terrestrial ecosystems*. Remote Sens. Environ., **70**, 29–51.

Gueymard, C. (2004). *The sun's total and spectral irradiance for solar energy applications and solar radiation models*. Solar Energy, **76**, 423-453.

Gutman, G.G. (1991). *Vegetation indices from AVHRR: An update and future prospects*. Remote Sens. Environ., **35**, 121–136.

Hadamard, J. (1902). *Sur les problèmes aux dérivées partielles et leur signification physique*. Princeton University Bulletin, 49-52.

Hansen, L. M. (1989). *Effects of restricting the detector field of view when using integrating spheres*. Appl. Opt., **28**, 2097-2103.

Harron, J. W. (2000). *Optical properties of phytoelements in conifers*. M. Sc. Thesis, Graduate Program in Earth and Space Science, York University, Toronto.

Holben B.N., T.F. Eck, I. Slutsker, D. Tanré, J.P. Buis, A. Setzer, E. Vermote, J.A. Reagan, Y.J. Kaufman, T. Nakajima, F. Lavenu, I. Jankowiak & A. Smirnov (1998). *AERONET: a federated instrument network and data archive for aerosol characterization*. Remote Sens. Environ., **66**, 1-16.

Huemmrich, K. F. (1995). *An analysis of remote sensing of the fraction of absorbed photosynthetically active radiation in forest canopies*. University of Maryland, Ph. D.

INM (2005). *Calendario meteorológico 2006*. Instituto Nacional de Meteorología. Centro de publicaciones, Secretaria General Técnica, Ministerio de Medio Ambiente.

Iqbal, M. (1983). *An Introduction to solar Radiation*. Academic Press, Canada.

Jacquemoud, S. & F. Baret (1990). *PROSPECT: a model of leaf optical properties spectra*. Remote Sens. Environ., **34**, 75-91.

Jacquemoud S. & F. Baret (1990). *PROSPECT: a model of leaf optical properties spectra*. Remote Sens. Environ., **34**, 75-91.

Jacquemoud S., S. L. Ustin, J. Verdebout, G. Schmuck, G. Andreoli, B. Hosgood (1995a). *PROSPECT redux*, in Summaries of the 5th Annual JPL Airborne

Earth Science Workshop. Volume 1. AVIRIS Workshop (R.O. Green, Ed.), Pasadena (CA), 23-27 January 1995, JPL Publication 95-1, 99-103.

Jacquemoud S., F. Baret, B. Andrieu, F.M. Danson & K. Jaggard (1995b). *Extraction of vegetation biophysical parameters by inversion of the PROSPECT+SAIL models on sugar beet canopy reflectance data. Application to TM and AVIRIS sensors.* Remote Sens. Environ., **52**, 163-172.

Jacquemoud S., S. L. Ustin, J. Verdebout, G. Schmuck, G. Andreoli, B. Hosgood (1996). *Estimating leaf biochemistry using the PROSPECT leaf optical properties model.* Remote Sens. Environ., **56**, 194-202.

Jacquemoud, S., C. Bacour, H. Poilvé & J. P. Frangi (2000). *Comparison of four radiative transfer models to simulate plant canopies reflectance - direct and inverse mode.* Remote Sens. Environ., **74**, 471-481.

Jacquemoud S., W. Verhoef, F. Baret, P. J. Zarco-Tejada, G. P. Asner, C. François & S. L. Ustin (2006). *PROSPECT+SAIL: 15 years of use for land surface characterization*, in Proc. IEEE International Geoscience & Remote Sensing Symposium, Denver.

Jasco (1995). *Model v-530 uv/vis spectrophotometer.* Hardware/function manual. Jasco Co. Tokyo, Japan.

Jonckheere, I., S. Fleck, K. Nackaerts, B. Muys, P. Coppin, M. Weiss & F. Baret (2004). *Methods for leaf area index determination. Part I. Theories, techniques and instruments.* Agric. For. Meteorol., **121**, 19-35.

JRC (1996). *Remote Sensing Applications.* Institute Annual Report 95. JRC. European Commission. Report 16384 EN. ECSC-EC-EAEC Brussels. Luxemburg.

Junge, C.E. (1963). *Air Chemistry and Radioactivity.* Academic Press. New York.

Jupp, D.L.B. & A.H. Strahler (1991). *A Hotspot Model for Leaf Canopies.* Remote Sens. Environ., **38**, 193-210.

Kaufman, Y.J. & D. Tanré (1998). *Algorithm for Remote Sensing of Tropospheric Aerosol from MODIS. Products: MOD04, MOD08*. ATBD Reference Number: ATBD-MOD-02.

Krause, K.K. (2003). *Radiance Conversion of QuickBird Data*. Technical Note. DigitalGlobe 1900 Pike Road Longmont, Colorado, USA, 80501.

Kubelka, P. & F. Munk (1931): *Ein Beitrag zur Optik der Farbanstriche*, Zeit. Für Tekn. Physik, **12**, 593-601.

Kumar, R. & L. Silva (1973). *Light ray tracing through a leaf cross section*. Appl. Opt., **12**, 2950-2954.

Kumar, M. & J. L Monteith (1982). *Remote sensing of crop growth*, en *Plants and daylight spectrum*. H. Smith (Ed.), London Academic Press., 133– 144.

Kuusik, A. (1985). *The hot spot effect of a uniform vegetative cover*. Sov. J. Remote Sens. Environ., **3**, 645– 658.

Kuusik A. (1991). *Determination of vegetation canopy parameters from optical measurements*. Remote Sens. Environ., **37**, 207-218.

Kuusik, A. (1994). *A multispectral canopy reflectance model*. Remote Sens. Environ., **50**, 75-82.

Kuusik, A. (1995). *A Markov chain model of canopy reflectance*. Agric. For. Meteorol., **76**, 221-236.

Lauvernet, C., F. Baret, L. Hascoët & F.X. Ledimet (2005). *Improved estimates of vegetation biophysical variables from MERIS TOA images by using spatial and temporal constraints*. 9th ISPMSRS symposium, Beijing.

Lenoble, J. & C. Brogniez (1984). *A comparative review of radiation aerosol models*. Beitr. Phys. Atmos., **57**, 1-20.

Lenoble, J. (1993). *Atmospheric radiative transfer*. A. Deepak Publishing.

Li-Cor (1991). *Radiation measurement instruments*. Ed. Li-Cor Co.

Liedtke, J. (2002). *QuickBird-2 System Description and product overview*. JACIE Workshop. Washintong D.C.

Liou, K. N. (1980). *An introduction to solar radiation*. Academic Press, INC. San Diego, California.

Lobo, A. (1995). *Image segmentation and discriminant analysis for the identification of land cover units in ecology*. IEEE Translational on Geossience and Remote Sensing, **35**, 1136-1144.

Lu, L., X. Li, M. Ma, G. Che, T. Huang, C. L. Bogaert, J. Veroustraete, F. Dong & Q. H. Ceulemans (2004). *Investigating Relationship Between Landsat ETM+ Data and LAI in a Semi-arid Grassland of Northwest China*. International Geoscience and Remote Sensing Symposium, **6**, 3622-3625

MAPA (2005). *Avances superficies y producciones agrícolas*. Ed. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, Centro de Publicaciones, Paseo de la Infanta Isabel, 1 – 28014 Madrid.

Marshall, T.J. & J.W. Holmes (1988). *Soil physics*. Cambridge University Press.

Mie, G. (1908). *Beiträge zur Optik trüber Medien, speziell kolloidaler Metallösungen*. Leipzig, Annalen der Physik, **330**, 377-445.

Miller, J.B. (1967). *A formula for average foliage density*. Aust. J. Bot., **15**, 141-144.

Monteih, J.L. (1994). *Validity of the correlation between intercepted radiation and biomass*. Agric. Forest Meteorol. **68**, 213-220.

Morisette J. T., F. Baret & J. L. Privette (2006). *Validation of global moderate-resolution LAI products: a framework proposed within the CEOS land product validation subgroup*. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, **44**, No. 7, July.

Myneni, R.B., J. Ross & G. Asrar (1989). *A review on the theory of photon transport in leaf canopies*. Agr. Forest Meteorol., **45**, 1–153.

Nelder, J. A. & R. Mead (1965). *A simplex method for function minimization*. Comput. J., **7**, 308-313.

Nicodemus, F. E., J. C. Richmond, J. J. Hsia, I. W. Ginsberg & T. Limperis (1977). *Geometric considerations and nomenclature for reflectance*. Monograph 160. National Bureau of Standard (US).

Nilson, T. & A. Kuusk (1989). *A reflectance model for the homogeneous plant canopy and its inversion*. Remote Sens. Environ., **27**, 157-167.

Oppelt, N. (2002). *Monitoring of Plant Chlorophyll and Nitrogen Status Using the Airborne Imaging Spectrometer AVIS*. Ludwig-Maximilians-Universität München.

Paruelo, J. M., H. E. Epstein, W. K. Lauenroth & I. C. Burke (1997). *ANPP estimates from NDVI for the central grassland region of the United States*. Ecology, **78**, 953–958.

Penman, H.L. (1948). *Natural evaporation from open water, bare soil and grass*. Proc. R. Soc. London, Ser. A., **193**, 120-145.

Peñuelas, J. & I. Filella (1998). *Visible and near-infrared reflectance techniques for diagnosing plant physiological status*. Trend in Plant Sciences **3**, 151-156.

Press, W.H., B. P. Flannery, S. A. Teukolsky & W. T. Vetterling (1986). *Numerical Recipes, The art of Scientific computing*. Cambridge University Press, Cambridge.

Ramos, R. (2000). *Aplicación de sustancias húmicas comerciales como productos de acción bioestimulante: efectos frente al estrés salino*. Tesis Doctoral. Universidad de Alicante.

Richards, J.M. (1971). *A simple expression for the saturation vapour pressure of water in the range of -50°C to 140°C* . Brit. J. Appl. Phys., **4**, 15-18.

Richardson A. J., C. L. Wiegand, D. F. Wanjura, D. Dusek & J. L. Steiner (1992). *Multisite analyses of spectral-biophysical data for Sorghum*. Remote Sens. Environ., **41**, 71-82.

Rock, B. N., T. Hoshizaki & J. R. Miller (1988). *Comparison of insitu and airborne spectral measurements of the blue shift associated with forest decline*. Remote Sens. Environ., **37**, 117-130.

Rondeaux, G. (1990). *Polarisation de la lumiere reflechie par un couvert vegetal*. Tesis Doctoral. Universidad de Paris VII.

Saltelli, A., S. Tarantola & K. P. S. Chan (1999). *A quantitative model-independent method for global sensitivity analysis of model output*. (American Statistical Association and the American Society for Quality) Technometrics, **41**, 39–56.

Saltelli, A. (2002). *Sensitivity analysis for importance assessment*. Risk Analysis, **22**, 579-590.

Sellers, P. J. (1987). *Canopy reflectance, photosynthesis and transpiration: II. The role of biophysics in the linearity of their interdependence*. Remote Sens. Environ., **21**, 143– 183.

SIGPAC (2006). <http://www.sigpac.jcyl.es/visor>. Junta de Castilla y León.

Snail, K. A. & L. M. Hanssen (1989). *Integrating sphere designs with isotropic throughput*. Appl. Opt., **28**, 1793-1799.

Snell J. F. (1978). *Radiometry and Photometry*, en Handbook of Optics. W.G. Driscoll & W. Vaughan (Ed.), New York, McGraw-Hill, 201–227.

Sobolev, V. V. (1963). *A Treatise on Radiative Transfer*. Princeton, NJ: Van Nostrand.

Steven, M.D., & J.A. CLARK (1990). *Applications of Remote Sensing in Agriculture*. Oxford: Butterworth.

Steven, M.D., R Werker & M. Milnes (1997). *Assimilation of satellite data in crop monitoring and yield prediction*. In Physical Measurements and Signatures in Remote Sensing, Guyot & Phulpin (eds). Balkema, Rotterdam.

Steven, M. D., T. J. Malthus, F. Baret, H. Xu & M. J. Chopping (2003). *Intercalibration of vegetation indices from different sensor systems*. Remote Sens. Environ., **88**, 412-422.

Stokes, G. G. (1862). *On the intensity of the light reflected from or transmitted through a pile of plates*. Proc. Roy. Soc. Lond., **11**, 545-556.

Suits, G. H. (1972). *The calculation of the directional reflectance of a vegetative canopy*. Remote Sens. Environ., **2**, 117-125.

Tanré, D., C. Deroo, P. Duhaut, M. Herman, J.J. Morcrette, J. Perbos & P.Y. Deschamps (1986). *Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum (5S)*. Laboratoire d'Optique Atmosphérique, Université des Sciences et Techniques de Lille.

Torres O., P.K. Bhartia, J.R. Herman & Z. Ahmad (1998). *Derivation of aerosol properties from satellite measurements of backscattered ultraviolet radiation. Theoretical Basis*. J. Geophys. Res., **103**, 17099-17110.

Tucker, C. J., I. Y Fung, C. D. Keeling & R. H. Gammon (1986). *Relationship between atmospheric CO₂ variation and a satellite-derived vegetation index*. Nature, **319**, 195– 199

Turner, D.P., W. B. Cohen, R. E. Kennedy, K. S. Fassnacht & J. M. Briggs (1999). *Relationships between leaf area index and Landsat TM Spectral Vegetation Indices across three temperate zone sites*. Remote Sens. Environ., **70**, 52-68.

Ulbricht, R. (1900). *Photometer for mean spherical candle-power*. Electrotech. Zeit., **21**, 595-597.

Vega, J.R., G.L. Frontini, L.M. Gugliotta & G.E. Elicabe (2005). *A method solving an inverse problem with unknown parameters from two sets of relative measurements*. Lat. Am. Appl. Res., **35**, 49-154.

Vergaz, R. (2001). *Propiedades ópticas de los aerosoles atmosféricos. Caracterización del área del Golfo de Cádiz*. Tesis Doctoral. Departamento de Óptica y Física Aplicada. Universidad de Valladolid.

Verhoef, W. (1984). *Light scattering by leaf layers with application to canopy reflectance modeling: the SAIL model*. Remote Sens. Environ., **16**, 25-141.

Verhoef, W. & H. Bach (2003). *Simulation of hyperspectral and directional radiance images using coupled biophysical and atmospheric radiative transfer models*. Remote Sens. Environ., **87**, 23–41.

Verhoef W, L. Jia & Z. Su (2006). *Optical-thermal canopy radiance directionality modelling by unified 4SAIL model*. In Second recent advances in quantitative remote sensing. Ed. Sobrino. Valencia

Vermote, E. F., D. Tanré, J. L. Deuzé, M. Herman & J. J. Mockette (1997). *Second simulation of the satellite signal in the solar spectrum, 6S: an overview*. IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens., **35**, 675–686.

Vile, D., E. Garnier, B. Shipley, G. Laurent, M.L. Navas, C. Roumet, S. Lavorel, S. Diaz, J. Hodgson, F. Lloret, G.F. Midgley, H. Poorter, M.C. Rutherford, P.J. Wilson & I. Wright (2005). *Specific leaf area and dry matter content estimate thickness in laminar leaves*. Annals of Botany, **96**, 1129–1136.

Wang Y.P. & P.G. Jarvis (1988). *Mean leaf angles for the ellipsoidal inclination angle distribution*. Agric. For. Meteorol., **43**, 319-321.

Wang, Q., S. Adiku, J. Tenhunen & A. Granier (2005). *On the relationship of NDVI with leaf area index in a deciduous forest site*. Remote Sens. Environ., **94**, 244–255

Wellburn, A. R. (1994). *The spectral determination of chlorophylls a and b, as well as total carotenoids using various solvents with spectrophotometers of different resolutions*. J. Plant Physiol., **144**, 307–313.

Willstätter R. & A. Stoll (1918). *Untersuchungen über die Assimilation der Kohlensäure*. Springer-Verlag, Berlin.

Wit, C.T. De (1965). *Photosynthesis of leaf canopies*. Versl. landbouwk. Onderz.Ned. 663.

Woolley, J.T. (1971). *Reflectance and transmittance of light by leaves*. Plant Physiol., **47**, 656-662

Yamada, N. & S. Fujimura (1988). *A mathematical model of reflectance and transmittance of plant leaves as a function of chlorophyll pigment content*. In Proc. 8th Int. Geosci. and Remote Sens. Symp. (IGARSS'88), Edinburgh (Scotland), 833-834.

Zarco, P.J. (2000). *Hyperspectral remote sensing of closed forest canopies: estimation of chlorophyll fluorescence and pigment content*. Tesis Doctoral. York University (Canada).

Zarco, P.J., J.R. Miller, A. Morales, A. Berjón, & J. Agüera (2004). *Hyperspectral Indices and Model Simulation for Chlorophyll Estimation in Open-Canopy Tree Crops*. Remote Sens. Environ., **90**, 463-476.

Zarco, P.J., A. Berjón, R. Lopez, J.R. Miller, P. Martin, V.E. Cachorro, M.R. Gonzalez & A.M. De Frutos (2005). *Assessing Vineyard Condition with Hyperspectral Indices: Leaf and Canopy Reflectance Simulation in a Row Structured Discontinuous Canopy*. Remote Sens. Environ., **99**, 271-287.

Zhang, O., X. Xiao, B. Braswell, E. Linder, S. Ollinger, M. L. Smith, J. P. Jenkins, F. Baret, A. D. Richardson & B. Moore (2006). *Characterization of seasonal variation of forest canopy in a temperate deciduous broadleaf forest, using daily MODIS data*. Remote Sens. Environ., **105**, 189–203

Zhangshi, Y., & T.H.L. Williams (1997). *Obtaining spatial and temporal vegetation data from Landsat MSS and AVHRR/NOAA satellite images for a hydrological model*. Photogr. Eng. Remote Sens., **63**, 69–77.