

La anisotropía de la BRDF: Una nueva signatura de las cubiertas vegetales

F. Camacho de Coca, F. J. García-Haro, M. A. Gilabert y J. Meliá

Correo electrónico: fernando.camacho@uv.es

Departament de Termodinàmica. Facultat de Física. Universitat de València.

C/Dr. Moliner, 50. 46100 Burjassot (Valencia)

RESUMEN

La BRDF (*Bidirectional Reflectance Distribution Function*) es la magnitud fundamental para describir las propiedades espectrales y direccionales de la reflectividad. Para la caracterización de la BRDF es necesario disponer de un conjunto de medidas de reflectividad adquiridas bajo diferentes configuraciones geométricas. En este trabajo mostramos, mediante datos POLDER, cómo determinar la BRDF de las cubiertas vegetales. La estimación de la BRDF correspondiente a diferentes cultivos permite analizar la anisotropía de la BRDF y mostrar los principales factores que determinan la misma: la estructura de la cubierta, los parámetros ópticos y el ángulo cenital de la iluminación. La anisotropía de la BRDF permite definir la denominada "Signatura Direccional" de las superficies que proporciona información adicional a la que se obtiene desde el nadir, relacionada con las propiedades estructurales de las superficies.

PALABRAS CLAVE: BRDF, anisotropía, cubierta vegetal, POLDER.

ABSTRACT

The Bidirectional Reflectance Distribution Function (BRDF) is the basic quantity to describe the directional properties of the spectral reflectance. In order to characterise the BRDF we need a wide set of reflectance measurements acquired under different geometric conditions. In this paper, we show the manner of characterise the BRDF using airborne POLDER data. The retrieved BRDF over different land crops allow us to analyse the anisotropic behaviour of the BRDF as a function of the structural parameters, optical properties and sun zenith angle position. The influence of the BRDF related with the 3D structure of the surface allows characterise Earth's surfaces through a new signature, the so-called Directional Signature, which contains additional information to those that traditionally has been obtained from nadir view.

KEY WORDS: BRDF, anisotropy, leaf canopy, POLDER.

INTRODUCCIÓN

Tradicionalmente, el estudio de la cubierta vegetal desde teledetección ha estado centrado en la dependencia espectral, espacial y temporal de la reflectividad. Sin embargo, las superficies naturales y, en particular, las cubiertas vegetales no son difusores lambertianos por lo que dispersan la radiación incidente siguiendo un patrón angular que, en principio, será dependiente de la longitud de onda de la radiación incidente. Para caracterizar las propiedades espectro-angulares de la reflectividad, Nicodemus *et al.* (1977) definen una función de proporcionalidad entre el flujo de radiación incidente y la radiancia reflejada denominada *Bidirectional Scattering-Surface Reflectance Distribution Function* (BSSRDF), cuya integral sobre el

área observada es la denominada función de distribución de la reflectividad bidireccional o BRDF (*Bidirectional Reflectance Distribution Function*). Esta función, que determina las características geométricas de la reflectividad espectral, no se puede obtener directamente ya que involucra todo el rango de longitudes de onda y ángulos, y se define para ángulos sólidos infinitesimales y que, por tanto, no contienen una cantidad medible de radiación. En su lugar, caracterizaremos esta función a partir de un conjunto suficientemente amplio de medidas del factor de reflectividad bidireccional o BRF (*Bidirectional Reflectance Factor*) (véase apéndice para una definición radiométrica de estas dos magnitudes).

Diferentes experiencias de laboratorio (Sandmeier *et al.*, 1998; Camacho-de Coca *et al.*, 2001a),

de campo (Kimes, 1983; Deering *et al.*, 1992; Deering *et al.*, 1999; Camacho-de Coca *et al.*, 2001b), con sensores aerotransportados (Irons *et al.*, 1991; Ranson *et al.*, 1994; Leroy and Bréon, 1996; Bréon *et al.*, 1997; Camacho-de Coca *et al.*, 2001c) o mediante satélite (Roujean *et al.*, 1992a; Godsalve, 1995) han puesto de manifiesto el marcado carácter anisótropo con el que las cubiertas vegetales reflejan la radiación incidente. En consecuencia, para una explotación adecuada de los datos de teledetección en el espectro solar, debemos considerar los aspectos direccionales de la reflectividad (Verstraete *et al.*, 1996). En este sentido, hay dos enfoques fundamentales a considerar. Por un lado, la dependencia angular de la reflectividad introduce un factor de variabilidad en la señal. En este sentido, podemos considerar la anisotropía de la BRDF como un 'ruido' que enmascara la información de interés, dicho efecto deberá ser corregido, análogamente a como, por ejemplo, se corrige el efecto en la señal del suelo de fondo o de la atmósfera. Por otro lado, si somos capaces de caracterizar la anisotropía de la BRDF, podremos utilizar esta variabilidad como una fuente potencial de información para los estudios de las superficies mediante teledetección.

La caracterización de la BRDF desde el espacio ha adquirido, palautinamente, un mayor interés en las agencias espaciales. Instrumentos tales como el *POLarization and Directionality of the Earth's Reflectance* (POLDER) (Deschamps *et al.*, 1994) o el *Multi-Angle Imaging Spectro Radiometer* (MISR) (Diner *et al.*, 1998) han sido desarrollados para observar la reflectividad de las superficies desde diferentes ángulos de observación, siendo el concepto óptico del sensor POLDER el más adecuado para caracterizar la dependencia con el ángulo de observación de la reflectividad desde satélite (Hautecoeur and Leroy, 1998; Bicheron and Leroy, 2001). El uso de sensores en órbitas geoestacionarios, como el *Spinning Enhanced Visible and InfraRed Imagery* (SEVIRI) a bordo del *Meteosat Second Generation* (MSG), con una alta frecuencia temporal, nos permitirá además caracterizar la BRDF en función del ángulo cenital de iluminación (Leewen and Roujean, 2002). El uso combinado de ambos sensores permitirá una completa caracterización de la BRDF de la biosfera desde el espacio.

El principal interés en los aspectos direccionales de la reflectividad reside en que la anisotropía de la BRDF está directamente relacionada con la

estructura tridimensional de la escena. La estructura de la cubierta vegetal condiciona la interacción de la radiación incidente con la misma y, por tanto, determina el intercambio de flujos de energía, masa y momento entre la biosfera y la atmósfera (Welles, 1990). En consecuencia, la caracterización de la BRDF de las cubiertas vegetales, puede mejorar la precisión en las estimaciones de parámetros biofísicos, tanto a escala local como regional, con el consecuente beneficio para estudios climáticos y ecológicos (Asner *et al.*, 1998). En este contexto, la anisotropía de la BRDF nos permite definir una nueva signatura física de las superficies, denominada Signatura Direccional, directamente relacionada con la estructura tridimensional de las mismas. La Signatura Direccional corresponde a la variación de la reflectividad con el ángulo de observación cenital en un plano de observación determinado, y será función tanto del intervalo espectral como del ángulo de iluminación. En particular, recientes investigaciones han puesto de manifiesto la utilidad de caracterizar la BRDF para mejorar clasificaciones utilizando la Signatura Direccional o sus índices direccionales asociados (Bicheron *et al.*, 1997; Sandmeier and Deering, 1999), normalizar de efectos anisótropos los índices de vegetación (Leroy and Hautecoeur, 1999), mejorar la precisión en las estimaciones de albedo (Cabot and Dedieu, 1997; Wammer *et al.*, 1997), LAI (*Leaf Area Index*) o FAPAR (*Fraction of Absorbed Photosynthetically Active Radiation*) (Bicheron and Leroy, 1999; Lacaze and Roujean, 2001).

En este trabajo, mostramos los principales mecanismos físicos que gobiernan la anisotropía de la BRDF sobre diferentes tipos de cubiertas vegetales, dando una base teórica que facilite la interpretación de la BRDF respecto a tres factores principales: la arquitectura de la cubierta, sus propiedades ópticas y el ángulo cenital de iluminación. Para ello, en el siguiente apartado describimos los mecanismos físicos que gobiernan la anisotropía de la BRDF. En la sección 3, detallamos el procedimiento experimental seguido para la estimación de la BRDF utilizando datos POLDER adquiridos durante la campaña DAISEX (*Digital Airborne Spectrometer Experiment*). Finalmente, mostramos la BRDF y la Signatura Direccional para diferentes tipos de cubierta, con distinto ángulo de iluminación en diferentes bandas espectrales, y discutimos la dinámica que presenta la anisotropía de la BRDF respecto a los tres factores mencionados anteriormente.

FUNDAMENTOS FÍSICOS

Geometría de adquisición

Previamente a la introducción de los principales mecanismos físicos que gobiernan la BRDF, conviene especificar la configuración geométrica de la medida del factor de reflectividad bidireccional o BRF. La geometría de adquisición está determinada por la posición que la fuente y el observador mantienen respecto a la superficie problema, tal y como se muestra en la Figura 1. La adquisición de medidas de BRF variando su configuración geométrica, será lo que nos permitirá caracterizar la BRDF como veremos en la siguiente sección.

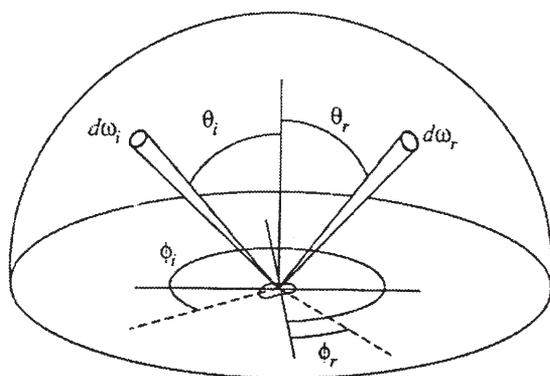


Figura 1. Geometría involucrada en el proceso de adquisición del BRF. Se define la posición de la fuente y del observador mediante los ángulos cenital de incidencia (θ_i , ϕ_i) y de reflexión (θ_r , ϕ_r) respectivamente, así como los elementos de ángulo sólido ($d\omega_i$, $d\omega_r$) que contienen una cantidad medible de flujo de radiación electromagnética.

Las direcciones de la fuente y del observador, respecto a la normal a la superficie, vienen determinadas por los ángulos cenitales (q_i , q_r) y acimutales (f_i , f_r), estos últimos obtenidos respecto a una dirección de referencia determinada. Esta dirección de referencia se puede escoger de manera que coincida con alguna dirección privilegiada, como las que determinan, por ejemplo, el Plano Principal y el Plano de Observación. El Plano Principal es aquél que contiene a la fuente y al vector normal a la superficie de estudio. El Plano de Observación es aquél que viene determinado por la posición del observador y, de nuevo, la normal a la superficie. La geometría del problema se puede reducir a los ángulos cenitales de observación e iluminación y al ángulo aci-

mutal relativo (F). Este último determinará el Plano de Observación respecto al Plano Principal. Por tanto, diremos que el Plano de Observación coincide con el Plano Principal, cuando el ángulo acimutal relativo es 0° o $\pm 180^\circ$, y que el Plano de Observación coincide con el Plano Ortogonal cuando el acimut relativo es $\pm 90^\circ$.

Por geometría de adquisición entendemos la geometría del problema que se muestra en la Figura, determinada por las posiciones de la fuente, el observador y la superficie. Por geometría de observación entendemos la que viene dada por el ángulo cenital de observación y el Plano de Observación. Por tanto, la geometría de adquisición quedará determinada por la geometría de observación y el ángulo cenital de iluminación. Veamos a continuación los mecanismos físicos que gobiernan la BRDF de las cubiertas vegetales.

El gap effect y el backshadow effect

La radiación solar dispersada por una cubierta vegetal y medida por un sensor electro-óptico proviene de la interacción de los fotones que inciden e interaccionan con los elementos de la cubierta vegetal. Esta interacción está condicionada por: (i) las propiedades ópticas de los elementos que constituyen la cubierta vegetal (hojas, ramas y suelo), que a su vez dependen de las propiedades químicas (concentración de pigmentos, contenido en agua...), (ii) la arquitectura de la cubierta vegetal, determinada por los parámetros estructurales de ésta, y (iii) el campo de radiación incidente que, excluyendo los efectos atmosféricos (radiación difusa), está caracterizado por el ángulo cenital de iluminación (Ross, 1981; Knyazikhin *et al.*, 1998).

Para simplificar el problema, el ángulo de iluminación y el intervalo espectral van a ser considerados parámetros de la BRDF. Así, el término BRDF hará referencia a la variación de la reflectividad con la geometría de observación. De este modo, la dinámica de la BRDF depende, básicamente, de las características estructurales de la cubierta, de las propiedades ópticas de sus componentes y, finalmente, del ángulo cenital solar que determinará el campo de radiación incidente.

Formalmente, la absorción y dispersión de la radiación incidente por una cubierta vegetal está caracterizada, en la ecuación de transferencia radiativa, por la sección eficaz total de interacción y por la sección eficaz diferencial de dispersión (Knya-

zikhin and Marshak, 1991). La sección eficaz total, viene determinada por la distribución espacial de la densidad foliar, y por la orientación de las hojas, determinada por la función G de Ross (Ross, 1981). La sección eficaz de dispersión, está determinada por la distribución espacial de la densidad foliar, y por la función de fase Γ de dispersión (Ross, 1981), que determina la fracción de energía dispersada, en cada dirección, en función de las propiedades ópticas de las hojas y de su orientación. Por tanto, la densidad foliar, la función G de Ross y la función de fase G de dispersión, son las cantidades que determinan el comportamiento difusor de la cubierta vegetal. Sin embargo, de una manera mucho más intuitiva, podemos explicar la dinámica de la BRDF como se describe en Kimes (1983) y en Sandmeier *et al.* (1998) en función de dos efectos: el *gap effect* y el *backshadow effect*.

El *gap effect*, o efecto hueco, es un efecto relacionado con la perspectiva que tenemos en la observación de la cubierta. Cuando el sensor se sitúa en observación vertical (nadir), la existencia de discontinuidades o huecos en la cubierta, permite observar diferentes estratos de la misma, teniendo acceso a los más profundos y menos irradiados. Al desplazar el sensor de la vertical, los huecos que se apreciaban en el nadir van reduciéndose y, en consecuencia, disminuye la cantidad de elementos sombreados perceptibles por el observador. Por tanto, en observación vertical tenemos una mayor capacidad de penetración, a través de los huecos, hasta las capas más profundas o niveles inferiores de la escena tridimensional. A medida que nos vamos desplazando de la vertical la perspectiva del observador cambia, disminuyendo la capacidad de penetración en la cubierta y aumentando la proporción de los estratos superiores más irradiados.

El *Backshadow effect*, que podríamos denominar el efecto de dispersión direccional, va a tener en cuenta los mecanismos de dispersión de la radiación por los constituyentes de la escena. Por un lado, tendrá en cuenta la irradiancia que reciben los elementos de la cubierta vegetal, y que es función del coseno del ángulo entre la dirección de iluminación y la normal a la superficie. Por otro lado, está relacionado a la existencia de direcciones privilegiadas en la dispersión de radiación. Por ejemplo, en el Plano Principal, hablaremos de dispersión hacia adelante (*forward scattering*) y de retrodispersión (*backscattering*). En general, el *forward scattering* domina en superficies relativamente planas, mientras que el *backscattering* se verá poten-

ciado por la presencia de rugosidad en la superficie, y la existencia de estructuras tridimensionales que favorecen la retrodispersión de la radiación. La existencia de estas direcciones privilegiadas, respecto a la dispersión de la radiación, tiene como contrapartida la existencia de otras direcciones en las que la radiación incidente no es tan dispersada, creando zonas oscuras o sombreadas. La presencia de estas zonas oscuras es lo que se conoce como el *backshadow effect*.

Veamos a continuación cómo se relacionan el *gap effect* y el *backshadow effect* con la arquitectura de la cubierta, las propiedades ópticas y el ángulo cenital de iluminación. En definitiva, lo que estos tres factores determinan es el patrón de sombras de una escena y, en consecuencia, permiten interpretar la anisotropía de la BRDF en función del cambio, con la geometría de observación, del patrón de sombras observado.

Características estructurales de la cubierta

Debemos distinguir entre dos escalas, la escala paisajística (*Landscape structure*) o macroscópica, determinada por las dimensiones y distribución espacial de las unidades vegetales (árboles o plantas) en la superficie, y la escala de cubierta (*Canopy structure*) o microescala, determinada por la propia estructura de estas unidades vegetales, es decir las hojas y ramas y su distribución. Es necesario, además, distinguir entre cubiertas cerradas o densas y abiertas o dispersas, donde además se supondrán ambas lateralmente homogéneas, para interpretar la dependencia espectral de la anisotropía.

En cubiertas cerradas, el *gap effect* produce un aumento de la reflectividad a medida que nos desplazamos del nadir, independientemente del plano de observación, y su influencia dependerá de las discontinuidades que presente la cubierta. Por ejemplo, cubiertas erectófilas, con distribución vertical, permiten observar niveles más profundos, menos iluminados, de la cubierta que las cubiertas planófilas, con distribución horizontal, por lo que el *gap effect* tiene una mayor influencia en las primeras. Así pues, en cubiertas cerradas donde no existe la contribución del suelo, y si sólo actuase este efecto, la BRDF sería como un cuenco con simetría acimutal centrado en el valor del nadir (Sandmeier *et al.*, 1998).

Por otro lado, en cubiertas abiertas con vegetación dispersa, la presencia de claros implica una

mayor contribución de la respuesta espectral del suelo, condicionando así el valor de la reflectividad al intervalo espectral en que nos encontremos (Kimes, 1983), habida cuenta que la reflectividad hemisférica espectral (albedo) de los suelos es mayor en el visible y menor en el IRC (infrarrojo cercano) que la correspondiente a vegetación. Por lo tanto, el *gap effect* se traduce como una mayor reflectividad en el visible que decrece a medida que nos alejamos del nadir, y el efecto opuesto ocurre en el IRC. Esto pone de manifiesto la necesidad de estudiar la variabilidad espectral que presenta la anisotropía de la BRDF.

Con relación al *backshadow effect*, en las cubiertas cerradas, deberemos considerar nuevamente la influencia de la distribución angular foliar (LAD). La orientación de las hojas caracterizada por la normal a la superficie de éstas, determina (junto con la posición de la fuente) el ángulo con el que son irradiadas. Este efecto implica que orientaciones verticales muestren mayor diferencias entre la dispersión hacia adelante (*forward scattering*) y la retrodispersión (*backscattering*) que orientaciones planófilas, donde la superficie observable de las hojas es irradiada de forma similar. Por otra parte, las orientaciones planófilas favorecen una dispersión más isótropa de la radiación, mientras que las orientaciones verticales favorecen la retrodispersión. Si solamente operase este efecto, el mínimo de reflectividad se produciría en los ángulos más extremos en el *forward scattering* (Sandmeier *et al.*, 1998), siendo en las cubiertas erectófilas donde se produciría este efecto con mayor intensidad.

En cubiertas abiertas, la dispersión por el suelo vuelve a ser importante en la anisotropía de la BRDF. Los suelos con cierta rugosidad favorecen la dispersión hacia atrás. Si bien podemos considerar el suelo como una superficie bidimensional frente a las tres dimensiones que exhiben las escenas con vegetación, su transmisividad es prácticamente nula, lo que implica sombras más oscuras, es decir, refuerza el *backshadow effect*.

Según Kimes (1983), el *gap effect* domina sobre el *backshadow effect* a partir de unos 30° cenitales de iluminación. La combinación de ambos efectos produce un mínimo de reflectividad cerca del *forward scattering*, y un máximo en la dirección de retrodifusión. Este máximo en la reflectividad es conocido como el efecto *hot spot*. Dicho efecto está actualmente siendo objeto de investigaciones por su potencialidad para obtener información relativa a la hoja (Bréon *et al.*, 2001). Su medida atiende a reso-

luciones angulares un orden de magnitud menor ($\sim 0.5^\circ$) que la resolución empleada en la caracterización de la BRDF. En este trabajo excluimos esta particularidad de la Signatura Direccional en el Plano Principal, ya que será discutida con profundidad en un trabajo posterior.

La influencia del *gap* y del *backshadow effect* sobre la BRDF dependerá tanto de las propiedades ópticas como de la irradiancia determinada por la posición cenital de la fuente, así como del ángulo acimutal relativo entre el plano de observación y el de iluminación. Las medidas realizadas sobre el rango de valores 0-360° muestran una simetría acimutal respecto al Plano Principal (Kimes, 1983; Leroy and Bréon, 1996; Bicheron *et al.*, 1998), lo que, en caso de ser generalizable, implicaría que para caracterizar los efectos direccionales de la reflectividad sólo necesitaremos recorrer la mitad de los ángulos acimutales.

Propiedades ópticas de la cubierta

En la vegetación, las propiedades ópticas determinan el intervalo espectral donde, por ejemplo, existe poca absortividad, lo que produce alta reflectividad y transmisividad, con la consecuente aparición de la dispersión múltiple. En el caso de baja absortividad, tenemos mayor cantidad de energía disponible para ser dispersada, y los efectos de dispersión múltiple contribuyen a que la reflectividad direccional se muestre más isótropa. En caso contrario, si la absortividad es elevada hay menos radiación disponible y la reflexión de la misma se produce de manera más anisótropa (Sandmeier *et al.*, 1998). Así, la anisotropía de la BRDF de las cubiertas vegetales muestra una dependencia espectral como consecuencia de las propiedades ópticas de las mismas.

Cuando se trata de cubiertas abiertas, las propiedades ópticas del suelo entran en juego y, aunque el efecto para las cubiertas cerradas se sigue verificando, ahora estará pesado por la fracción de cubierta vegetal (FCV). Así, las propiedades ópticas del suelo harán que, dependiendo de la proporción en que éste se encuentre en la escena, en el visible y desde el nadir se produzca un aumento de la respuesta espectral de la escena, y viceversa en el IRC. Así pues, la influencia de las propiedades ópticas, tanto en el *gap effect* como el *backshadow effect*, vendrá determinada principalmente por la fracción de suelo y vegetación. Además, el efecto del apila-

miento de hojas, determinado por el LAI, determinará la absorción de la vegetación y la 'oscuridad' de las sombras que proyecta la vegetación.

Ángulo cenital de iluminación

Los efectos debidos a la elevación solar sobre el horizonte se pueden resumir en uno: el relativo al gradiente de intercepción del flujo de radiación por parte de la cubierta (Kimes, 1983). Dicho gradiente aumenta a medida que aumenta el ángulo cenital solar. Cuando el sol está muy alto sobre el horizonte y se sitúa cerca del cenit (ángulo cenital pequeño) el flujo de radiación consigue penetrar hasta niveles más profundos de la escena tridimensional, con lo que aumenta el nivel de radiación interceptada por la cubierta. Sin embargo, cerca del horizonte (ángulo cenital elevado) el camino óptico de los rayos es más oblicuo y, por tanto, la irradiancia solar llega principalmente a las capas más altas. Por consiguiente, el gradiente de intercepción de la radiación es mayor cuando el sol se sitúa cerca del horizonte, es decir, la diferencia entre la radiación interceptada por los estratos superiores e inferiores de la cubierta vegetal, aumentan a medida que lo hace el ángulo cenital solar. Esto influirá notablemente en el *gap effect* y en el *backshadow effect*.

En resumen, la cubierta cerrada exhibe una función de distribución de reflectividad bidireccional más suave o isotrópica a ángulos cenitales de iluminación moderados, menores de 55° según Kimes (1983). En cubiertas abiertas, el suelo puede interceptar y dispersar radiación en mayor medida cuanto menor sea el ángulo cenital de iluminación. Sin embargo, a grandes ángulos cenitales de iluminación, el flujo solar que recibe el suelo es menor y la BRDF se asemeja a la de una cubierta cerrada.

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

El área de estudio

La zona de estudio corresponde a una ventana de 5x5 km², cuyo extremo superior izquierdo tiene de coordenadas UTM (km): (576 E, 4326 N), que contiene a la finca experimental 'Las Tiesas' localizada en Barrax (Albacete). La zona de estudio (Figura 4) contiene una variedad de superficies extensas cultivadas idóneas para estudios de teledetección desde

avión. La variedad de cultivos incluye, superficies homogéneas como alfalfa, trigo, amapola o leguminosas, superficies con cobertura intermedia como la remolacha, cultivos en sus primeros estadios de desarrollo como el maíz, con tan solo entre 3 y 5 hojas, o cubiertas en un estado fenológico senescente, como la cebada, además de diferentes parcelas en barbecho. Esto nos permite estudiar la variabilidad de la BRDF en función de las características espectrales y estructurales de las superficies. Para este estudio hemos seleccionado 4 superficies: trigo, cebada, remolacha y suelo desnudo. El trigo y la cebada son cubiertas continuas con características estructurales muy similares pero que difieren en sus propiedades ópticas. Se ha seleccionado un suelo por ser necesario para comprender el comportamiento de las cubiertas abiertas, y la remolacha por ser un caso de cobertura intermedia. La siguiente tabla refleja las características estructurales de las parcelas seleccionadas, el NDVI se incluye como indicador del contraste espectral entre el rojo y el infrarrojo cercano.

| Parcela | FVC (%) | LAI* | H* (m) | NDVI |
|---------------|-------------|-------------|-----------|-------------|
| Trigo | 0.97 ± 0.03 | 1.56 ± 0.21 | 0.7-0.85 | 0.86 ± 0.03 |
| Cebada | 0.92 ± 0.06 | 2.95 ± 0.44 | 0.55-0.65 | 0.21 ± 0.02 |
| Remolacha | 0.55 ± 0.07 | 0.62 ± 0.10 | 0.1-0.15 | 0.32 ± 0.04 |
| Suelo desnudo | 0.03 ± 0.02 | 0 | - | 0.08 ± 0.01 |

Tabla 1. Características estructurales de las muestras seleccionadas, FVC (Fracción de Cobertura Vegetal), LAI (*Leaf Area Index*), H (Altura), y caracterización espectral mediante el NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*). (*) Medidas realizadas *in situ* durante la campaña de campo.

Como vemos, el trigo y la cebada presentan una estructura similar con diferencias en el LAI. Sin embargo, mientras que el trigo estaba vigoroso con un verde intenso como refleja el alto valor de NDVI, la cebada ya senescente presentaba un color dorado indicativo de poca actividad fotosintética. La comparación entre ambas superficies evidenciará la influencia de las propiedades ópticas en la anisotropía de la BRDF. Por otra parte, el cultivo de remolacha se disponía en hileras de plantas de muy poca altura, con hojas planas muy anchas. El suelo seleccionado es un suelo compuesto por arcillas rojas con muy poca rugosidad. Los valores de altura y de LAI provienen de medidas *in situ* realizadas durante la campaña, mientras que el NDVI y la FVC se han

utilizando datos HyMAP (*Hyperspectral Mapping*) de alta resolución espectral tomadas durante la misma campaña de campo (Müller *et al.*, 2001).

El sensor POLDER

POLDER es un radiómetro especialmente diseñado para medir los efectos direccionales y la polarización del sistema superficie-atmósfera (Deschamps *et al.*, 1994), si bien en la campaña DAISEX no se utilizaron los filtros de polarización. El sistema óptico POLDER está formado por tres componentes principales: la óptica del sistema, el detector CCD y un disco giratorio con los filtros espectrales y de polarización. La óptica se caracteriza por incorporar una lente que reduce los efectos del ángulo de incidencia sobre la pupila de entrada, reduciendo la distorsión panorámica en la imagen. El detector CCD se compone de 288×384 áreas sensibles independientes. El tamaño del detector, en combinación con la razón focal de la lente, proporciona un FOV (*Field Of View*) máximo de 114° en la dirección diagonal a la dirección de vuelo, lo que permite registrar una gran variabilidad angular en cada imagen. Durante DAISEX la altura típica de vuelo fue de 3000 m, con lo que el GFOV (*Ground Field Of View*) es de 7.4×5.6 km², con una resolución espacial de 20 m. La parte más variable del sistema es el disco giratorio que, en esta campaña, presentaba 10 filtros, uno opaco para corregir la señal de la corriente oscura, y los 9 filtros espectrales

centrados en 443, 500, 550, 590, 670, 700, 720, 800 y 864 nm respectivamente (Leroy *et al.*, 2001).

Plan de vuelo

Durante la campaña DAISEX se realizaron 4 vuelos con POLDER, siguiendo dos configuraciones diferentes. En este trabajo, mostramos resultados de dos vuelos, el realizado el día 3 de Junio al mediodía (primera adquisición a las 11:29 hora solar), donde la trayectoria del avión traza 6 líneas de vuelo sobre el área de estudio (configuración 1), y el realizado el día 4 de Junio por la tarde (primera adquisición a las 13:57 hora solar), donde el avión sigue 4 líneas de vuelo (configuración 2). En ambos vuelos las condiciones atmosféricas fueron óptimas. La Figura 2 muestra las diferentes trayectorias que siguió el avión durante la adquisición de la secuencia de imágenes.

Durante cada vuelo se tomaron alrededor de 100 imágenes que constituyen una secuencia POLDER. El intervalo de adquisición entre dos imágenes es de 10 segundos, tiempo en el que el avión recorre aproximadamente 700 m y, en función de la posición del avión, la imagen adquirida capta un área (GFOV) diferente. Durante el preprocesado de los datos, en concreto durante la corrección geométrica, se selecciona, de cada imagen POLDER, la intersección con el área de estudio (5×5 km²), completando con ceros el resto de la imagen. Por tanto, la secuencia de imágenes proporciona un número de observacio-

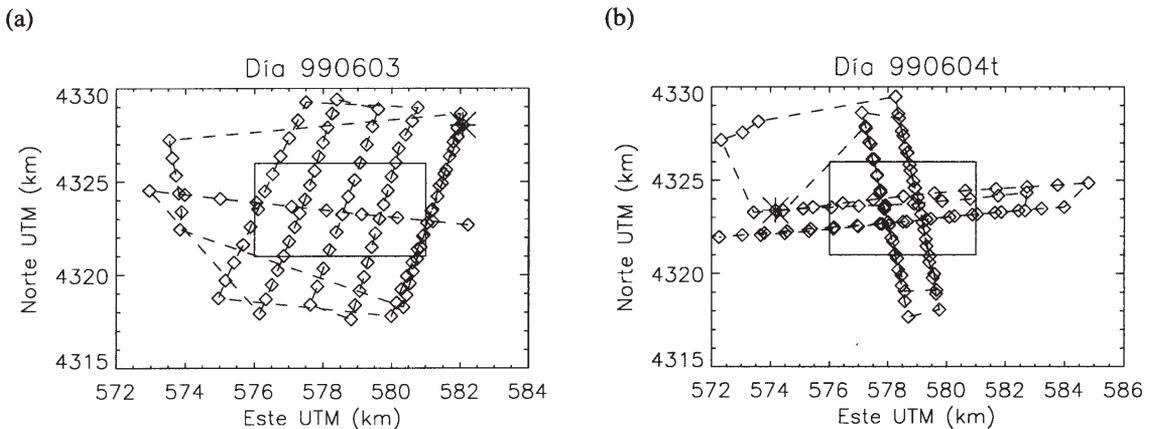


Figura 2. Trayectorias de vuelo sobre el área de estudio que aparece como un rectángulo. La estrella marca el punto inicial de adquisición de datos y los diamantes la posición del avión cada vez que se registra la banda 5. (a) Configuración 1, (b) Configuración 2.

nes diferente para cada píxel, que es función del plan de vuelo y de la posición del píxel en la zona de estudio. La Figura 3 muestra los mapas del número de observaciones en la zona para cada uno de los vuelos seleccionados.

El número de observaciones oscila entre 30 y 60, siendo la zona central donde, como cabía esperar, el

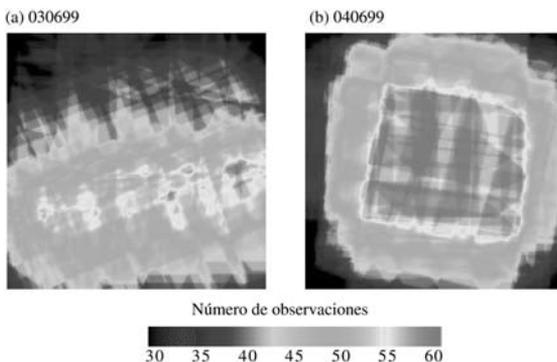


Figura 3. Mapa del número de observaciones POLDER en la zona de estudio. (a) Configuración 1, (b) Configuración 2.

número de observaciones es mayor. Podemos apreciar que la configuración 2, presenta un mayor número de observaciones, lo cual necesariamente no implica una mejor reconstrucción de la BRDF, dado que la calidad de la interpolación dependerá tanto del número de puntos como de su distribución en el espacio direccional (Figura 5).

Estimación de la BRDF

Cada una de las imágenes POLDER adquiridas durante un vuelo tiene un fichero asociado con los datos GPS de la posición del avión, lo que nos permite obtener la geometría de observación de cada imagen. En la Figura 4 se muestran 3 imágenes alternas de la secuencia registrada el día 3 de Junio así como la imagen del ángulo cenital y acimutal de observación calculadas a partir de los datos GPS.

La Figura 4 muestra en la primera fila 3 imágenes POLDER de reflectividad en banda 5 (670 nm), la segunda y la tercera fila muestran las imágenes de los ángulos cenital y acimutal correspondientes. A la vista de las imágenes de ángulos, se entiende fácilmente que el cambio en la imagen de reflectividad atiende a la diferente geometría de observación, dado que el ángulo cenital de iluminación se mantiene constante. En definitiva, disponemos de un conjunto de entre 30 y 60 medidas de BRF para

cada píxel (Figura 3), cada una obtenida con una geometría de observación diferente. Esto nos va a permitir estimar la BRDF de la superficie a cierto ángulo de iluminación, para las 9 bandas espectrales. Para la reconstrucción de la BRDF hemos procedido en dos etapas, en primer lugar realizamos una triangulación de Delaunay sobre el conjunto de valores de reflectividad, irregularmente distribuidos en el espacio direccional (Figura 5) y, posteriormente, realizamos una interpolación sobre una rejilla ahora regularmente distribuida. El resultado obtenido es un conjunto de valores de reflectividad distribuidos en el espacio de direcciones (q_v, j_v) de forma regular, si bien para algunos puntos la ausencia de datos originales impide la interpolación. Para aumentar la representabilidad de la superficie hemos tomado 9 píxeles y representado el valor medio de la reflectividad.

La Figura 5 muestra un ejemplo de la geometría de adquisición del conjunto de medidas de BRF que nos permite caracterizar la BRDF para cierta longitud de onda y ángulo cenital de iluminación.

En la Figura 5 podemos observar la geometría de adquisición correspondiente al píxel central de la parcela de trigo estudiada. Las diferentes configuraciones de vuelo resultan en una diferente distribución en el espacio direccional de las observaciones, representadas por una cruz. Podemos ver que la configuración 1, con mayor número de pasadas, implica una mejor cobertura del espacio direccional, a pesar de que produce un menor número de observaciones en la zona de estudio

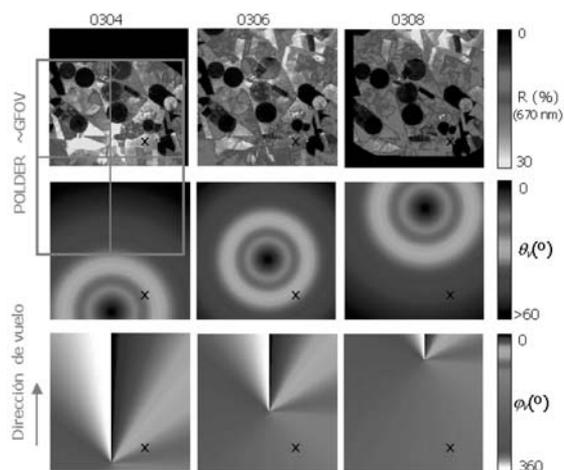


Figura 4. Reflectividad en la banda 5 (670 nm) ángulo cenital de observación y ángulo acimutal de observación, correspondientes a 3 imágenes POLDER del vuelo efectuado el 3 de junio de 1999.

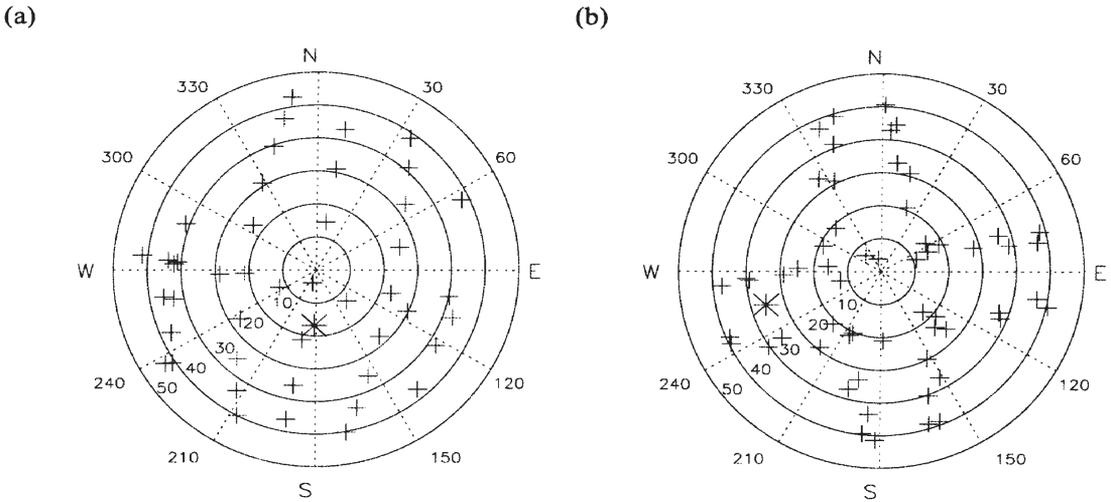


Figura 5. Geometría de adquisición POLDER correspondiente al píxel central de la parcela de trigo estudiada, en banda 5 (670 nm) para las dos secuencias estudiadas: (a) Configuración 1, 'Noon' (mediodía), (b) Configuración 1, 'P.M.' (tarde). El diagrama representa ángulos de observación hasta 45°, donde hemos representado círculos cada 15°.

(Figura 5), y en consecuencia una mejor interpolación. En ambos casos prácticamente no tenemos observaciones con un ángulo cenital superior a 50°. En este tipo de representación, se ha tomado como punto de referencia la posición del sensor, con lo que se produce una diferencia de 180° acimutales respecto la dirección de reflexión medida desde la superficie. Así, el diagrama muestra la posición con respecto al sensor del mismo píxel en cada una de las imágenes de la secuencia. En estos diagramas, el Plano Principal corresponde a la línea que une el centro con la posición solar, y que corresponde aproximadamente a la dirección Norte-Sur en las Figuras 5a y 7a. La línea perpen-

dicular a ésta que pasa por el centro del diagrama corresponde al Plano Ortogonal. Respecto al Plano Ortogonal, los puntos situados en la parte del diagrama donde se localiza la posición solar presentan una reflectividad proveniente de la dispersión hacia delante, que coincide con el semicírculo inferior en las figuras del mediodía (Figuras 5-a y 7-a), localizando el valor de la reflexión especular donde se sitúa el sol, y el *hot spot* desplazado 180° acimutales de la posición solar.

La interpolación de los valores de BRDF a una rejilla de espaciado constante permite visualizar la BRDF como una superficie de reflectividad. Un ejemplo de esta representación se puede observar

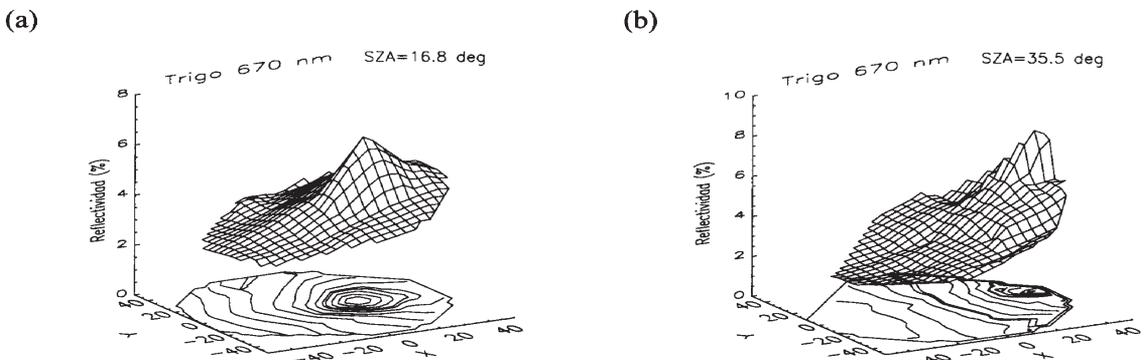


Figura 6. Representación de la BRDF obtenida a partir del conjunto de medidas BRDF (670 nm) cuya geometría de adquisición se representa en la Figura 5 en coordenadas cartesianas: $X=\theta_v \cos \phi$, $Y=\theta_v \sin \phi$, con $\phi=\phi_v-\phi_s$. La proyección de la superficie sobre el plano XY nos permite estudiar la BRDF mediante curvas de nivel que facilitarán la comparación e interpretación de la BRDF.

en la Figura 6, y que equivale a la BRDF a 670 nm reconstruida con el muestreo de BRDF representado en la Figura 5.

En la Figura 6 podemos apreciar cómo la BRDF, a cierta longitud de onda, presenta una fuerte dependencia con el ángulo cenital de iluminación. En el vuelo del mediodía, (Figura 6a) podemos ver como la superficie de reflectividad viene caracterizada por un máximo de reflectividad localizado en la geometría *hot spot*. Cuando el ángulo cenital solar es mayor la variación de la BRDF es continua, con valores superiores de reflectividad para ángulos de observación más próximos al ángulo cenital de iluminación. En la Figura la representación se ha realizado tomando el ángulo cenital relativo para comparar mejor la influencia del ángulo cenital solar sobre las curvas de la BRDF. Sobre la superficie de la BRDF podemos definir curvas de nivel, a intervalos constantes de reflectividad, que proyectaremos sobre el plano cartesiano XY. Así, un pico en la BRDF viene representado por isolíneas concéntricas de radio cada vez menor, mientras que un gradiente constante de reflectividad se representa como un conjunto de isolíneas paralelas. Esta representación proyectada sobre el diagrama polar que representa la geometría de adquisición será la que utilizemos para el análisis de los resultados.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Análisis de la BRDF

La representación de la BRDF mostrada en la Figura 6 no facilita el análisis comparativo entre parcelas, por lo que, en su lugar, representaremos las isolíneas de reflectividad constante sobre los diagramas polares que representan la geometría de adquisición tal y como se muestra en la Figura 5. Para analizar los resultados hemos seleccionado las bandas 5 (670 nm) y 9 (864 nm) de POLDER, ya que son las que presentan un mayor contraste espectral en las cubiertas vegetales y, por consiguiente, son las más adecuadas para poner de manifiesto el efecto de las propiedades ópticas en la anisotropía de la BRDF.

La Figura 7 muestra la BRDF estimada para las 4 parcelas seleccionadas en este estudio. Gracias al concepto multi-imagen y al gran FOV del POLDER, podemos apreciar la variación de la reflectividad con la geometría de observación, lo que para

diferentes regiones espectrales y geometrías de iluminación proporciona una estimación de la BRDF de las superficies. Las figuras están ordenadas en función de su FCV, comenzando por la cubierta cerrada de trigo y terminando por el suelo desnudo (ver descripción de las parcelas en la sección 3). Un primer análisis visual revela que, respecto al Plano Ortogonal, los diagramas muestran una evidente asimetría mientras que respecto al Plano Principal, aparecen simétricos, lo que muestra cualitativamente la gran influencia de la geometría de observación en la anisotropía de la reflectividad. Esto es consecuencia del patrón de sombras observado, mientras que dicho patrón es muy variable si observamos la dispersión hacia delante o hacia atrás, la distribución de las sombras es simétrica respecto al ángulo acimutal relativo. Es decir, mientras que el *gap effect* es independiente del plano de observación, el *backshadow effect* es simétrico respecto al ángulo acimutal relativo, y la combinación de ambos efectos resulta en una simetría respecto al Plano Principal. Este resultado es muy importante puesto que, de satisfacerse para todas las superficies, sugiere la posibilidad de una reducción significativa del número de observaciones necesarias para caracterizar la BRDF de una cubierta vegetal.

Un segundo análisis muestra que, al mediodía (Figura 7a), hay un fuerte gradiente en la dispersión hacia atrás (con excepción de la BRDF de trigo a 864 nm). Éste se manifiesta como una mayor densidad de isolíneas de reflectividad constante. En cada diagrama dos isolíneas consecutivas equivalen al mismo incremento de reflectividad. Un pico en la reflectividad se traduce en curvas concéntricas cada vez de menor radio, tal y como se puede apreciar justo en la dirección de retrodispersión para algunas figuras, especialmente en la BRDF de trigo a 670 nm. Esto es consecuencia del efecto de ocultación de sombras que se produce en la región del *hot spot*, si bien a una resolución angular adecuada el propio efecto *hot spot* quedaría confinado en una curva cuyo radio no sería superior a 3°. Este gradiente en la reflectividad proviene de dos mecanismos de dispersión diferente, la dispersión en superficie y la dispersión en volumen. La dispersión en superficie tiene en cuenta la rugosidad del terreno, así como la estructura tridimensional de la cubierta, mientras que la dispersión en volumen tiene en cuenta los mecanismos de transmisión y dispersión de radiación en el interior de la cubierta vegetal. Una de las diferencias entre estas dos contribuciones es que el mecanismo en volumen origina un mayor gradiente

de la reflectividad en la región *hot spot*, tanto en la dirección acimutal como en la cenital, que la dispersión en superficie.

El diagrama para el suelo corresponde a un caso típico de dispersión en superficie, mientras que los diagramas para vegetación densa reflejan el comportamiento de la BRDF asociado a los mecanismos de dispersión en volumen. Esta diferencia, entre vegetación densa y suelo, se refleja como un aumento paulatino, a medida que disminuye la

FCV, en el radio de los círculos concéntricos en la retrodispersión. De tal modo que si observamos la Figura 7a), vemos cómo hay una mayor similitud entre las cubiertas con cobertura mayor, mostrándose la BRDF de la remolacha como un caso intermedio entre un suelo desnudo y una cubierta densa. En la Figura 7b) el ángulo cenital de iluminación oscila entre 30° y 40° , lo que impide observar adecuadamente la zona circundante al máximo de reflectividad. No obstante, podemos observar diferencias

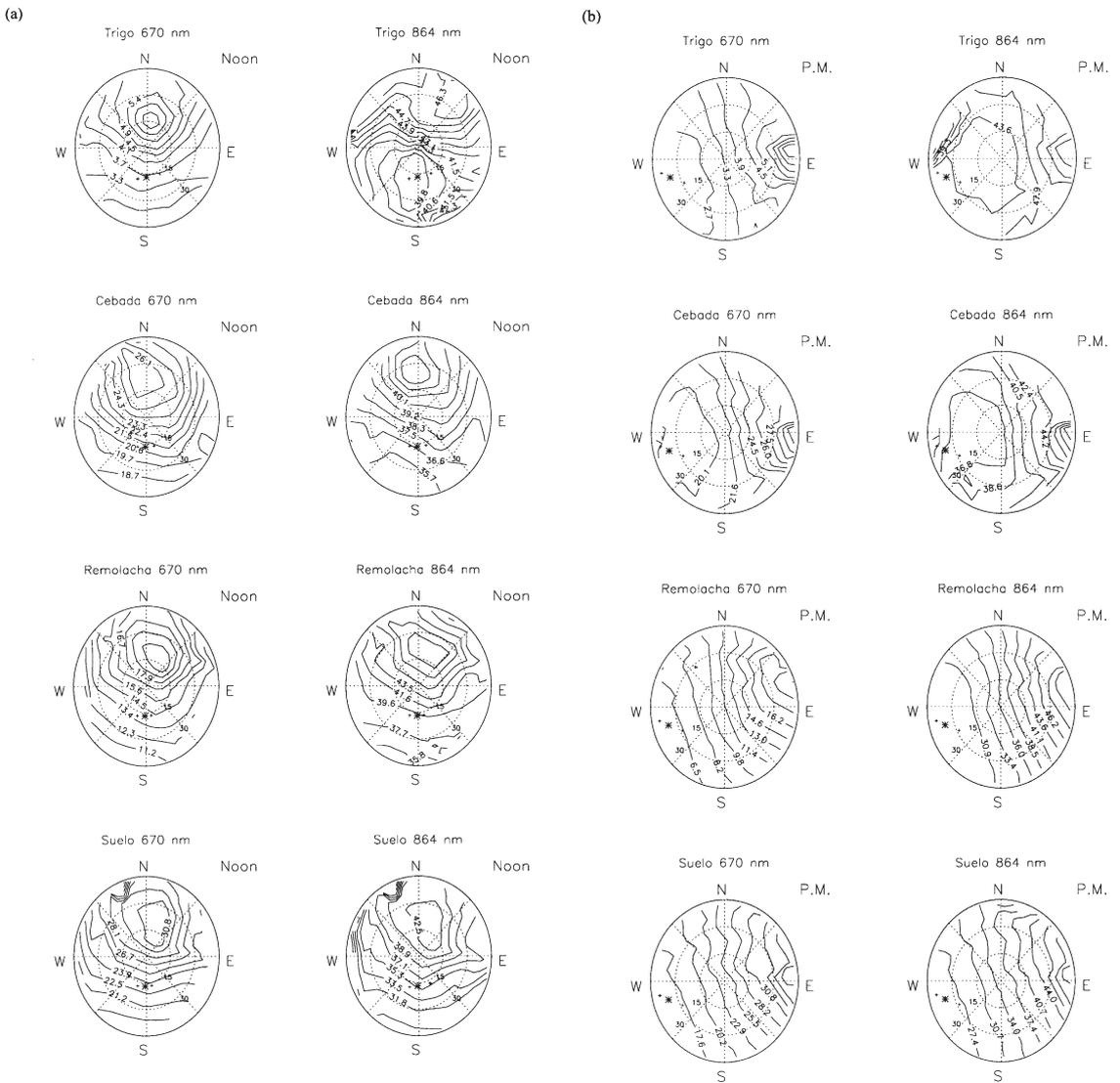


Figura 7. Representación de la BRDF mediante diagramas polares que muestran el valor del BRF en función de la geometría de observación, para dos longitudes de onda (670 nm y 864 nm) y 2 ángulos de iluminación diferentes: (a) 17° . (b) 45° . El diagrama representa ángulos de observación hasta 45° , donde hemos representado círculos cada 15° . La estrella en los diagramas representa la posición media del sol durante la adquisición, las cruces marcan la posición inicial y final del sol.

entre vegetación densa y dispersa, atribuibles a la incidencia del *gap effect* y del *backshadow effect*. Por ejemplo, el *gap effect* implica que, para ángulos de iluminación grandes, cuando aumenta el ángulo cenital de observación aumenta la reflectividad, incluso en la dispersión hacia adelante, como consecuencia del aumento de los estratos superiores, y más irradiados, observados por el sensor. Sin embargo, en los suelos este efecto es despreciable, y su comportamiento en esta región está gobernado por el *backshadow effect*, es decir, la reflectividad disminuye a medida que aumenta el ángulo de observación como consecuencia de la, cada vez, mayor presencia de sombras. Esta diferencia se puede apreciar claramente en la Figura 7b), el *gap effect* da lugar a líneas cerradas en la región de la dispersión hacia adelante, lo que significa que tenemos el mismo valor de reflectividad para un ángulo de observación próximo al nadir, que para un ángulo alejado del nadir, produciendo la forma cóncava típica de la vegetación. Sin embargo, cuando domina el *backshadow effect*, en la dispersión hacia adelante se produce un gradiente continuo de la reflectividad, que se manifiesta como líneas equidistantes, cuyo valor disminuye monótonamente a medida que nos alejamos de la retrodispersión. Estas diferencias demuestran que el patrón angular de la reflectividad es sensible a una característica biofísica tan importante como la fracción de cubierta vegetal y que, por tanto, la adquisición de medidas angulares puede mejorar la estimación de este parámetro.

Por otro lado, la Figura 7 permite apreciar el papel que las propiedades ópticas van a tener en la anisotropía de la BRDF. Para ello, tan sólo tenemos que comparar los diagramas correspondientes a las dos regiones espectrales seleccionadas para cada muestra. Las diferencias entre ambos diagramas se explican debido a la influencia que las propiedades ópticas tienen en la anisotropía de la BRDF. Así, esperamos que la diferencia entre el diagrama del rojo y del infrarrojo cercano sea mucho mayor para una superficie de vegetación fotosintéticamente activa, donde se produce una fuerte transición al pasar del rojo al infrarrojo próximo, que para un suelo desnudo, donde la variación de las propiedades ópticas con la longitud de onda es muy suave. Efectivamente, este efecto es evidente cuando comparamos los diagramas correspondientes a la cubierta de trigo con el resto. En este caso, las diferencias entre las dos regiones espectrales se manifiestan claramente en los diagramas. En el caso de

la cubierta de cebada podemos deducir, a la vista de la BRDF en el rojo e infrarrojo, que sus propiedades ópticas en estas regiones espectrales no difieren significativamente, de manera análoga a lo que sucede en el caso de un suelo.

La Signatura Direccional

Una vez estimada la BRDF, podemos seleccionar algunos planos de observación y representar la variación del BRDF con el ángulo cenital de observación. Esto es lo que constituye la Signatura Direccional de la superficie en un plano de observación dado, determinada para una longitud de onda y ángulo cenital de iluminación. Para analizar la influencia de los distintos factores sobre esta nueva signatura, consecuencia de la anisotropía de la BRDF, hemos seleccionado los dos planos de observación más relevantes, el Plano Principal y el Plano Ortogonal. El grado de anisotropía lo vamos a determinar mediante el índice de anisotropía, ANIX (*Anisotropy Index*) definido por Sandmeier *et al.*, (1998) como sigue:

$$ANIX(\lambda) = \frac{R_{max}(\lambda)}{R_{min}(\lambda)} \quad [1]$$

El ANIX, por tanto, cuantifica el grado de anisotropía como la razón entre el máximo y el mínimo de reflectividad ($R_{max}(\lambda)$ y $R_{min}(\lambda)$ respectivamente), en un plano de observación dado. Al ser una cantidad espectral nos va a permitir evaluar la dependencia espectral de la anisotropía de la BRDF.

La Figura 8 muestra la Signatura Direccional en estos dos planos, para el conjunto de canales, ángulos de iluminación y parcelas seleccionadas.

Geometría de Observación

Cada una de las gráficas de la Figura 8 muestra la influencia de la geometría de observación sobre la anisotropía de la BRDF. Esto que queda patente a simple vista al comparar la Signatura Direccional en los dos planos de observación considerados, viene cuantificado por el ANIX. Los resultados muestran que, en el Plano Principal, el grado de anisotropía es hasta 3 veces superior al que presenta la misma superficie en el Plano Ortogonal, donde en

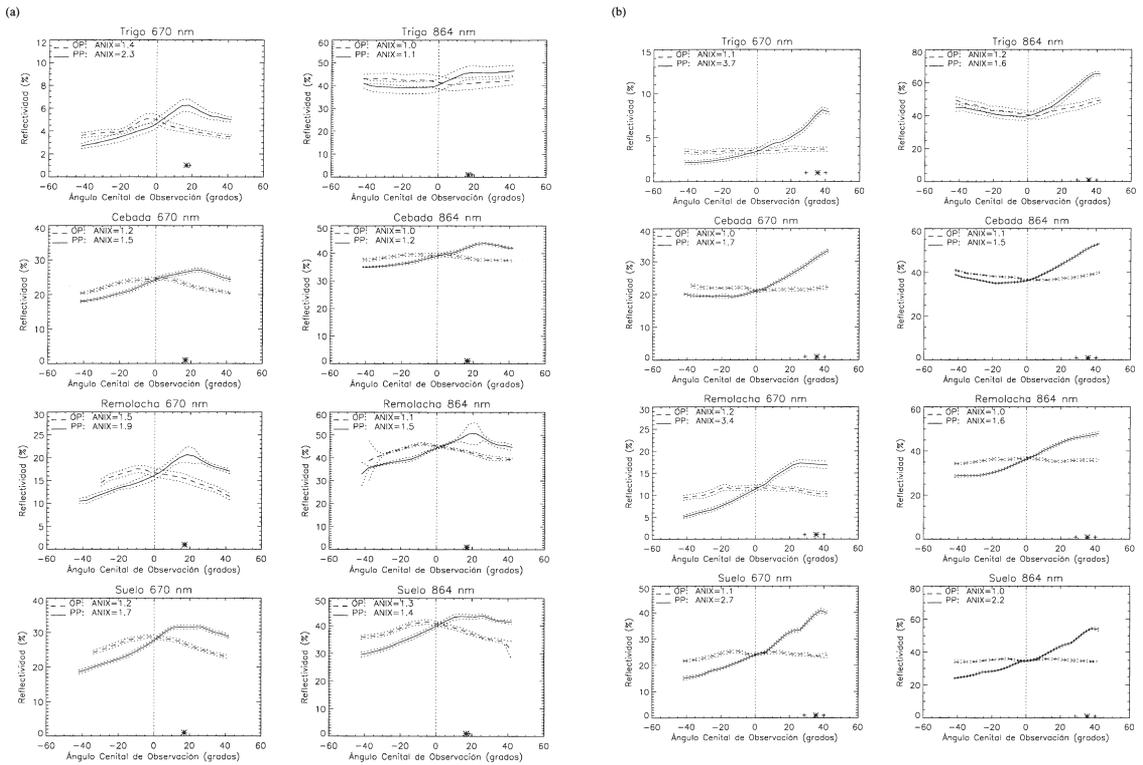


Figura 8. Signatura Direccional en el Plano Principal y en el Plano Ortogonal, para dos longitudes de onda (670 nm y 864 nm) y 2 ángulos de iluminación diferentes (a) 17°, (b) 45°. La estrella en los diagramas representa la posición media del sol durante la adquisición, las cruces marcan la posición inicial y final.

algunos casos la superficie no muestra diferencias significativas al variar el ángulo cenital de observación. Sin embargo, en el Plano Principal la asimetría es muy marcada, con valores del ANIX de hasta un 3.5, factor de proporcionalidad entre el valor máximo y el mínimo. La diferencia entre ambos planos de observación radica en la influencia que el *gap effect* y el *backshadow effect* tienen en cada uno de estos planos. El *gap effect* actúa independientemente del plano de observación y está, principalmente, relacionado con la estructura vertical del sistema, mientras que el *backshadow effect* tiene un efecto muy asimétrico en el Plano Principal (debido a la mayor proporción de sombras que se observan en la dispersión hacia adelante), siendo su efecto simétrico en el Plano Ortogonal. La combinación de ambos efectos determina el grado de anisotropía del sistema. En el Plano Ortogonal observamos que, aunque la BRDF es anisótropa en muchos casos, siempre presenta simetría respecto al nadir. En el Plano Principal, la anisotropía es asimétrica respecto al nadir, como consecuencia del *backshadow effect*. Estos resultados indican que el

Plano Principal es el que presenta un mayor grado de anisotropía y, por tanto, es la configuración idónea para definir una nueva signatura física de las superficies, la Signatura Direccional, que aporte información adicional a la que tradicionalmente se obtiene con la Signatura Espectral. Si bien otros planos de observación también contendrán información relacionada a la estructura tridimensional de la escena, el interés en utilizar el Plano Principal se ve incrementado si consideramos la posibilidad de obtener el efecto *hot spot*, que aporta información relacionada con la dimensión y la reflectividad foliar (Bréon *et al.*, 2001).

Parámetros Estructurales

El principal interés en la adquisición de medidas multiangulares de reflectividad radica en la utilidad que pueda tener para la estimación de parámetros estructurales como la FCV o el LAI. En la Figura 8 podemos observar que cada superficie tiene un ANIX particular asociado a sus características físi-

cas. Sin embargo no hemos observado una tendencia regular del grado de anisotropía con la FCV. Esto es debido a que tanto el suelo como la vegetación tienen una BRDF anisótropa, lo que produce que, a primera vista, las Signaturas Direccionales presenten un aspecto similar, todas con el máximo localizado en la retrodispersión aunque con diferencias en la localización del mínimo. La diferencia se explica por la distinta influencia del *gap effect*, un mecanismo que actúa en cubiertas vegetales con cierta estructura vertical. Por el contrario, el *backshadow effect* actúa incluso con una leve rugosidad y es tanto mayor cuanto más baja sea la transmisividad.

El *gap effect* está directamente relacionado con el gradiente de intercepción de radiación en la cubierta, el cuál viene determinado por la posición cenital de iluminación. Por ello, podemos apreciar mejor las diferencias en la Figura 8b) donde el *gap effect* tiene una mayor incidencia. En este caso podemos apreciar, tanto para la cubierta de trigo como para la de cebada, el aumento de la reflectividad cuando aumenta el ángulo de observación en la dispersión hacia adelante (Plano Principal) como consecuencia del *gap effect*. En el Plano Ortogonal también podemos apreciar este efecto, que es independiente del plano de observación. Por el contrario, la superficie de remolacha (con muy poca verticalidad) y de suelo desnudo no muestran esta tendencia asociada al *gap effect*, y sí la tendencia inversa asociada al *backshadow effect*, que se observa principalmente en el Plano Principal. Como consecuencia de ello, se pone de manifiesto como las diferencias estructurales afectan a la forma de la Signatura Direccional, diferencias que se acentuarían incluso más si tuviésemos otros tipos de cubiertas, como por ejemplo bosque y matorral, con LAI y FCV similares pero con diferente estructura vertical. De hecho, esta nueva Signatura Direccional ha sido utilizada con éxito para mejorar clasificaciones en diferentes ecosistemas (Bicheron *et al.*, 1997; Sandmeier and Deering, 1999) o para estimar el grado de agrupamiento y la densidad foliar en bosques boreales (Lacaze *et al.*, 2002).

Propiedades Ópticas

Las propiedades ópticas desempeñan un papel fundamental en la anisotropía de la BRDF y, consecuentemente, nos llevan a la necesidad de caracterizar espectralmente dicha anisotropía. Si ahora observamos para cada superficie conjuntamente las bandas 670 y 864 nm observamos que, en todos los

casos, la Signatura Direccional es más anisótropa en el rojo que en el infrarrojo cercano. Este efecto ocurre como consecuencia de un *backshadow effect* más marcado cuando aumenta la absorción de radiación (en todos los casos mayor en 670 que en 864 nm). El efecto contrario sucede cuando aumenta la dispersión múltiple de radiación, lo que disminuye el contraste de sombras, evidencia de una disminución de direcciones privilegiadas en la dispersión de radiación. Por tanto, esperamos que la anisotropía de la BRDF presente un mayor contraste espectral donde lo exhiba la Signatura Espectral. Esto se puede comprobar observando el comportamiento de la cubierta de trigo, que presenta un grado de anisotropía en el Plano Principal hasta 3 veces superior en el rojo que en el infrarrojo. Las cubiertas de cebada y de suelo, son las que presentan un menor contraste espectral, y así lo manifiesta su grado de anisotropía. Por lo tanto, es conveniente caracterizar el comportamiento direccional en aquellas regiones espectrales donde las cubiertas vegetales presentan diferentes propiedades ópticas. Esta influencia con las propiedades ópticas de la Signatura Direccional permite definir índices de vegetación de manera análoga a como se definen desde el nadir (Camacho-de Coca *et al.*, 2001d)

Ángulo Cenital de Iluminación

El ángulo cenital de iluminación determina la distribución del flujo de radiación sobre la superficie. De este modo, cuando el sol se sitúa cerca del cenit (ángulo pequeño), el flujo de radiación incide más verticalmente irradiando los niveles más profundos de la cubierta. En el caso contrario, cuando el sol se sitúa cerca del horizonte, el flujo de radiación incide oblicuamente favoreciendo un fuerte gradiente de intercepción de la radiación por la cubierta. El resultado es que los estratos superiores son más irradiados que los inferiores, los cuales quedan ensombrecidos. Por tanto, en general, un incremento en el ángulo de iluminación aumenta la influencia tanto del *gap effect* como del *backshadow effect* y, de este modo, la anisotropía de la BRDF. Esto queda bien reflejado mediante el ANIX que es, en todos los casos, superior en las imágenes correspondientes al vuelo de la tarde (Figura 8b). Por otro lado, en el vuelo del mediodía podemos apreciar que ni la cubierta de trigo ni la de cebada presentan el típico comportamiento asociado con el *gap effect* que esperaríamos en el Plano Ortogonal sino que, por el

contrario, en vez de aumentar la reflectividad a ángulos de observación alejados del nadir, la reflectividad disminuye. Esto se comprende dado que, cuando el sol se sitúa cerca del cenit, todos los estratos de la cubierta vegetal están bien irradiados y el valor de la reflectividad alrededor del nadir aumenta (en relación al valor que tendría si el ángulo solar fuese elevado). Por el contrario, al desplazarnos de la vertical comenzamos a observar estratos superiores que ahora están menos irradiados, disminuyendo así la reflectividad de la cubierta. Este efecto se amplifica en el caso de una cubierta vertical abierta como es la de remolacha, en este caso la contribución del suelo en el visible aumentará la diferencia entre la observación vertical (donde la contribución de suelo aumenta la reflectividad) y la observación oblicua (donde se observa mayor proporción de vegetación, menos brillante que el suelo en el visible). Estos resultados demuestran la influencia del ángulo cenital de iluminación en la anisotropía de la BRDF, y de ahí su utilidad para la estimación de parámetros biofísicos de la cubierta vegetal.

CONCLUSIONES

La BRDF de diferentes superficies ha sido caracterizada utilizando varias secuencias de imágenes POLDER. El comportamiento anisótropo de la BRDF de las cubiertas vegetales viene determinado por tres factores: la estructura tridimensional de la cubierta, las propiedades ópticas de sus constituyentes y el ángulo cenital de iluminación. Estos factores gobiernan la BRDF mediante dos mecanismos físicos: el *gap effect* y el *backshadow effect*.

– El *gap effect* es consecuencia de la mayor capacidad de penetración que tenemos en la observación vertical. Su efecto es cambiar la proporción de elementos macroscópicos vistos por el sensor, por lo que será tanto más evidente cuanto mayor sea el ángulo cenital de observación. Es un efecto geométrico y, por tanto, independiente del plano de observación.

– El *backshadow effect* está relacionado con la existencia de direcciones privilegiadas en la dispersión de radiación, por lo que determina la radiancia reflejada por los elementos observados. Es un efecto

| | Cubiertas densas | Cubiertas abiertas |
|---------------------------------|---|--|
| Parámetros Estructurales | <ul style="list-style-type: none"> • La orientación erectófila (copas, hojas) aumenta el <i>backshadow effect</i> y el <i>gap effect</i>. • A mayor LAI mayor influencia del <i>backshadow effect</i> y el <i>gap effect</i>. • Suave dependencia estructural de la anisotropía de la BRDF. | <ul style="list-style-type: none"> • La presencia de claros amplifica la influencia del <i>Gap effect</i>. Además, la proyección de sombras por la vegetación en el suelo aumenta la influencia del <i>backshadow effect</i>. Por eso: • A mayor altura, mayor es el efecto del <i>gap effect</i>. • A mayor LAI mayor influencia de <i>backshadow effect</i> y del <i>gap effect</i> • A mayor rugosidad del suelo mayor <i>backshadow effect</i> • Fuerte dependencia estructural de la anisotropía de la BRDF. |
| Propiedades Ópticas | <ul style="list-style-type: none"> • Suave dependencia estructural de la anisotropía de la BRDF. • En las regiones espectrales con mayor absorptividad (azul y rojo) el <i>Backshadow effect</i> es muy importante. • El aumento de la dispersión múltiple (IRC) reduce la influencia del <i>Backshadow effect</i>, y domina el <i>Gap effect</i>. • Fuerte dependencia espectral de la anisotropía de la BRDF. | <ul style="list-style-type: none"> • La vegetación se comporta como en el caso de cubiertas continuas. • Los suelos exhiben un marcado <i>Backshadow effect</i> en todo el intervalo espectral por su nula transmisividad, y no presentan <i>Gap effect</i>. • Por tanto, cuanto más dispersa sea la vegetación, mayor influencia del <i>Backshadow effect</i> en todas las longitudes de onda, y menor la influencia del <i>Gap effect</i> en el IRC. • Fuerte dependencia espectral de la anisotropía de la BRDF. |
| Ángulo Cenital Solar | <ul style="list-style-type: none"> • A mayor ángulo solar de iluminación, mayor influencia del <i>Gap effect</i> y del <i>Backshadow effect</i>. • Suave dependencia con el ángulo de iluminación de la anisotropía de la BRDF. | <ul style="list-style-type: none"> • A mayor ángulo solar de iluminación, mayor influencia del <i>Backshadow effect</i>. Sin embargo, menor influencia del <i>Gap effect</i>, ya que disminuye la contribución del suelo a la reflectividad del nadir. • Fuerte dependencia con el ángulo de iluminación de la anisotropía de la BRDF. |

to muy asimétrico respecto al Plano Ortogonal, siendo mayor la reflectividad cuando más cerca de la retrodispersión se realiza la medida. Sin embargo, el *backshadow effect*, es simétrico respecto al Plano Principal lo que produce que la BRDF también lo sea.

Así, podemos explicar cualitativamente la anisotropía de la BRDF atendiendo a la influencia que los parámetros estructurales, propiedades ópticas y del ángulo cenital de iluminación tendrán sobre el *gap effect* y el *backshadow effect*. Se ha visto claramente, que cuanto más acentuados sean dichos efectos, tanto mayor es el grado de anisotropía observado en la BRDF. El siguiente cuadro presenta, a modo de resumen, los rasgos más destacables en las observaciones realizadas, desde un punto de vista cualitativo. Desde un punto de vista cuantitativo, el índice de anisotropía ha mostrado tener un rango de variación adecuado para el conjunto de datos que aquí manejamos.

Finalmente, la anisotropía de la BRDF nos va a permitir definir una nueva signatura de las superficies, a partir de la variación angular del BRF en un plano de observación dado, llamada la Signatura Direccional. Esta nueva signatura contiene información relacionada con la estructura tridimensional de la escena aportando así información adicional a la que, tradicionalmente, obteníamos desde el nadir, por lo que esperamos mejorar las estimaciones de parámetros biofísicos desde teledetección.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido subvencionado, en parte, por el proyecto LSA SAF de EUMETSAT. Los datos POLDER han sido obtenidos gracias al proyecto DAISEX de la ESA.

BIBLIOGRAFÍA

BICHERON, P. and LEROY, M. 2000. Bidirectional reflectance distribution function signatures of major biomes observed from space, *Journal of Geophysical Research*. 105: 26,669- 26,681.
BREON, F. M., VANDERBILT, V., LEROY, M., BICHERON, P., WALTHALL, C. L. and KALSHOVEN, J. E. 1997. Evidence of Hot Spot Directional Signatures from Airborne POLDER Measurements. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 35 (2): 479-484.

CAMACHO-DE COCA, F., GILABERT, M. A. and MELIÁ, J. 2001a. Reflectance Anisotropy Analysis of Homogeneous Canopies Using Laboratory and Hymap Airborne Data. *Remote Sensing for Agriculture, Ecosystems, and Hydrology II. Barcelona 2000. SPIE*. 4171: 280-291. (ISBN: 0-8194-3827-8)
CAMACHO-DE COCA, F., GILABERT, M.A. and MELIÁ, J. 2001b. Bidirectional Reflectance Factor Analysis from airborne HyMap data and field measurements. *Proceedings of the Final Results Workshop on DAISEX (Digital Airborne Imaging Spectrometer Experiment), ESA SP-499, July 2001*, pg. 163- 176. *ESA Pub.*, ESTEC, Noordwijk, The Netherlands, Ed. M. Wooding / R.A. Harris, 288 pages. (ISBN 92-9092-809-3)
CAMACHO-DE COCA, F., GILABERT, M. A. and MELIÁ, J. 2001c. Implicaciones de la anisotropía del BRF en la medida con sensores ópticos aerotransportados. *En Teledetección: Medio Ambiente y Cambio Global*. pg. 576- 581. Ed. Universitat de Lleida i Editorial Milenio (ISBN 84-9743-001-8)
DEERING, D. W., MIDDLETON, E. M., IRONS, J. R., BLAD, B. L., WALTER-SHEA, E. A., HAYS, C. J., WALTHALL, C., ECK, T.F., AHMAD, S. P. and BANERJEE, B. P. 1992. Prairie Grassland Bidirectional Reflectances Measured by Different Instruments at the FIFE Site. *Journal of Geophysical Research*, 97 (D17): 18,887-18,903.
DEERING, D. W., ECK, T. F. and BANERJEE, B. 1999. Characterization of the reflectance anisotropy of the three boreal forest canopies in Spring-Summer. *Remote Sensing of Environment*. 67: 205-229.
DESCHAMPS, P. Y, BREÓN, F.M., LEROY, M., PODAIRE, A., BRICAUD, A., BURIEZ, J.C. and SÈZE, G. 1994. The POLDER Mission: Instrument Characteristics and Scientific Objectives. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 32 (3): 598-614.
DINEER, D.J., BECKERT, REILLY, BRUEGGE, CONEL, KAHN, MARTONCHIK, ACKERMAN, DAVIES, GERSTL, GORDON, MULLER, MYNENI, SELLERS, PINTY and VERSTRATE. 1998 Multi-angle Imaging SpectroRadiometer (MISR) Instrument Description and Experiment Overview. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 36 (4): 1072-1087.
GODSALVE C. C. 1995. Bidirectional Reflectance sampling by ATSR2: a combined orbit and scan

model. *International Journal of Remote Sensing*. 16: 269-300.

HAUTECOEUR, O. and LEROY, M. 1998. Surface Bidirectional Reflectance Distribution Function observed at global scale by POLDER/ADEOS. *Geophysical Research Letters*. 25 (22): 4197-4200.

IRONS, J.R., RANSON, K.J., WILLIAMS, D.L., IRISH, R.R. and HUEGEL, F. G. 1991. An Off-Nadir-Pointing Imaging Spectroradiometer for Terrestrial Ecosystem Studies. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 29 (1): 66-74.

KIMES, D. S. 1983. Dynamics of directional reflectance factor distributions for vegetation canopies. *Applied Optics*. 22: 1364-1372.

LEROY, M and BREON, F. M. 1996. Angular Signatures of Surface Reflectances from Airborne POLDER data. *Remote Sensing of Environment*. 57: 97-107.

NICODEMUS, F. E., RICHMOND, J. C. HSIA, J. J., GINSBERG, I. W. and LIMPERIS, F. (1977). Geometrical Considerations and Nomenclature for Reflectance. *National Bureau of Standards. NBS. Monograph 160*.

RANSON, K. J., IRONS, J. R. and WILLIAMS, D. L. 1994. Multispectral Bidirectional Reflectance of Northern Forest Canopies with the Advanced Solid-State Array Spectroradiometer (ASAS). *Remote Sensing of Environment*. 47: 276-289.

ROUJEAN, J. L. LEROY, M., PODAIRE, A. and DESCHAMPS, P. Y. 1992. Evidence of Surface Reflectance Bidirectional Effects from a NOAA/AVHRR multi-temporal data set. *International Journal of Remote Sensing*. 13 (4): 685-698.

SANDMEIER, S., MÜLLER, C., HOSGOOD, B., and ANDREOLI, G. 1998. Physical mechanisms in Hyperspectral BRDF Data of Grass and Watercress. *Remote Sensing of Environment*. 66: 222-223.

VERSTRAETE, M. M., PINTY, B., and MYNENI, R. B. 1996. Potential and Limitations of Information Extraction on the Terrestrial Biosphere from Satellite Remote Sensing. *Remote Sensing of Environment*. 58: 201-214.

APÉNDICE

Tradicionalmente, la práctica común de los científicos que trabajaban en radiometría había sido

expresar las propiedades reflectantes de los cuerpos como la suma de una componente especular y una componente difusa. Nicodemus *et al.* (1977) nos presentan una forma alternativa de describir y especificar las propiedades geométricas de la reflectividad en términos de la denominada Función de Distribución de Reflectividad Bidireccional, BRDF (*Bidirectional Reflectance Distribution Function*). La BRDF es la magnitud básica para describir las propiedades geométricas reflectantes de las superficies. Veamos cuál es su conexión con la radiancia, magnitud fundamental en radiometría.

Sea un flujo de radiación incidente, dF_i , desde una dirección (q_i, f_i) , dentro de un ángulo sólido dw_i que llega a un elemento de área dA_i centrado en el punto (x_i, y_i) . La radiancia reflejada en la dirección (q_r, f_r) por el punto (x_r, y_r) , dL_r , será proporcional al flujo incidente y, por tanto, la podemos escribir como:

$$dL_r = S \cdot d\Phi_i \quad [A.1]$$

donde, en general, S será función de todas las direcciones y puntos involucrados en el proceso:

$$S = S(\theta_i, \phi_i, x_i, y_i, \theta_r, \phi_r, x_r, y_r) \quad [A.2]$$

sus dimensiones se deducen de [A.1], y son, $m^2 sr^{-1}$, en el SI. Esta función básica de proporcionalidad se denomina BSSRDF, acrónimo de *Bidirectional Scattering-Surface Reflectance Distribution Function*. La función S contiene toda la información acerca de cómo la superficie problema dispersa la radiación que incide sobre ella. Es una propiedad intrínseca de la superficie y, por lo tanto, nos va a permitir obtener información de la misma.

Escojamos como plano de referencia una superficie plana que represente las propiedades reflectantes de la muestra. Podemos calcular la contribución a la radiancia reflejada en el punto (x_r, y_r) , dado el flujo incidente en la dirección (q_i, f_i) , integrando dL_r , [A.1], sobre el área irradiada se obtiene:

$$dL_r(\theta_i, \phi_i; \theta_r, \phi_r, x_r, y_r) = \int_{A_i} dL_r(\theta_i, \phi_i, x_i, y_i; \theta_r, \phi_r, x_r, y_r) = \int_{A_i} S d\Phi_i \quad [A.3]$$

y teniendo en cuenta como se relaciona el flujo incidente con la irradiancia, [A.2], podemos escribir la ecuación anterior como:

$$dL_r(\theta_i, \phi_i; \theta_r, \phi_r, x_r, y_r) = dE_i \cdot \int_{A_i} S(\theta_i, \phi_i, x_i, y_i; \theta_r, \phi_r, x_r, y_r) dA_i \quad [A.4]$$

Si asumimos que las propiedades de dispersión de la muestra son uniformes a lo largo del plano de referencia, entonces la función S no depende de la localización del punto de observación, pero sí de d , siendo d la distancia relativa entre los puntos (x_r, y_r) y (x_i, y_i) , que determinará la irradiancia relativa en el punto (x_r, y_r) . Entonces podemos escribir [A.4] como:

$$dL_r = dE_i \cdot f_d(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r) \quad [A.5]$$

donde:

$$f_d(\vartheta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r) = \int_{A_i} S(\vartheta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r, d) dA_i \quad [A.6]$$

La ecuación [A.6] es la definición matemática de la BRDF, que a partir de [A.5] se puede expresar en función de la radiancia y de la irradiancia como:

$$f_d(\vartheta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r) = dL_r(\vartheta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r; E_i) / dE_i(\vartheta_i, \phi_i) \quad [A.7]$$

La BRDF se puede entonces definir como el cociente entre la radiancia reflejada por unidad de ángulo sólido en una determinada dirección y la irradiancia incidente desde una dirección en particular, para el conjunto de posibles geometría. La BRDF es una función continua que se expresa en $[\text{sr}^{-1}]$.

La expresión [A.7] indica cómo podemos caracterizar las propiedades reflectantes de las superficies midiendo la radiancia reflejada y conocida o calculada la irradiancia incidente. La perturbación del flujo incidente producida por la superficie problema es lo que nos permite inferir propiedades del cuerpo difusor. Sin embargo, la BRDF no se puede medir directamente puesto que los elementos de ángulo sólido infinitesimales no incluyen cantidades medibles de radiación. Necesitamos, por tanto, una expresión alternativa de la reflectividad que de cabida a las diferentes geometrías de observación e iluminación, y que al mismo tiempo sea un observable en teledetección.

Este observable que buscamos es el Factor de Reflectividad Bidireccional o BRF (*Bidirectional*

Reflectance Factor), que se define como la razón entre el flujo reflejado por una muestra y el que sería reflejado, en las mismas condiciones geométricas, por una superficie ideal, perfectamente reflectante y lambertiana, irradiada bajo idénticas condiciones. El factor de reflectividad bidireccional (BRF) constituye una cantidad fundamental en radiometría y teledetección, dado que esta será la magnitud observable que determinaremos a partir de la radiancia que integra el campo de visión del detector. Hay que notar expresamente que el BRF es en realidad un factor bicónico de reflectividad (dado que involucra ángulos sólidos extensos), si bien en la literatura aparece definido como factor bidireccional, haciendo referencia a las dos direcciones involucradas en el proceso.

$$BRF = \frac{d\Phi_r}{d\Phi_{r,id}} = \frac{\int_{\omega_i} \int_{\omega_r} f_d(\vartheta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r) \cdot L_i(\vartheta_i, \phi_i) d\Omega_i d\Omega_r}{(1/\pi) \cdot \int_{\omega_r} \int_{\omega_i} L_i(\vartheta_i, \phi_i) d\Omega_i d\Omega_r} \quad [A.8]$$

Donde hemos utilizado que $f_{r,id}(\vartheta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r) = 1/\pi$

La expresión anterior se puede reescribir en función de la radiancia reflejada utilizando la ecuación [A.7], entonces:

$$BRF = \frac{\int_{\omega_r} L_r(\vartheta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r; E_i) d\Omega_r}{\int_{\omega_r} L_{r,id}(\vartheta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r; E_i) d\Omega_r} = \frac{dL_r(\vartheta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r; E_i)}{dL_{r,id}(\vartheta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r; E_i)} \quad [A.9]$$

Es decir ahora podemos obtener un factor adimensional de reflectividad espectral bidireccional (estrictamente hablando debe ser denominado bicónico) integrando sobre los ángulo sólido extensos, centrados en las direcciones de iluminación y de reflexión, y que dependerá de estas direcciones. A efectos prácticos, la medida bajo un número suficientemente amplio de configuraciones geométricas diferentes, nos permite caracterizar el patrón direccional de la dispersión de la radiación o BRDF.