

---

# *Introducción*

## *Marco global*

La actividad del ser humano desde que existe como tal ha modificado el medio ambiente, si bien es desde la revolución industrial y más acusadamente a medida que transcurre este siglo cuando dicha transformación ha sido más importante. Transformación asociada a un incremento de la población mundial que actualmente supera los 6.000 millones de personas y que al ritmo actual de crecimiento (88 millones al año) alcanzará la cifra de 10.000 millones de habitantes para el año 2050 (Nebel & Wriqth, 1999). Esta explosión demográfica ha originado la necesidad de obtener una mayor cantidad de alimentos que se ha traducido en la obtención de nuevos campos de cultivos y pastizales, el empleo de fertilizantes químicos, el aumento en la utilización de los recursos hídricos, la implantación de la biotecnología en los cultivos o de los métodos de ingeniería industrial en la explotación ganadera. Por otro lado, el modelo de sociedad industrial se ha consolidado a finales del siglo XX a escala mundial, el proceso de globalización imperante está generando a escala planetaria un aumento en la actividad industrial y comercial.

Todo ello ha derivado en la sobreexplotación de los recursos naturales con la consecuente degradación generalizada del medio ambiente así como en una crisis social acuciada por el aumento de la pobreza

de los países denominados en vías de desarrollo, como recoge el reciente informe GEO-2000<sup>1</sup> (*Global Environment Outlook-2000*) de la UNEP (*United Nations Environment Program*) de las Naciones Unidas.

Podemos concluir que el modelo de sociedad imperante en las puertas del siglo XXI es un modelo insostenible y, a largo plazo, un modelo que genera una sociedad en crisis y que, por tanto, necesita un cambio sustancial en sus planteamientos. Es lo que los científicos denominan *cambios de paradigma* y que definen como cambios excepcionales pero muy significativos que modifican la visión que el ser humano tiene del mundo y de su función en él. Estos cambios suelen estar asociados a conflictos y polémicas pero conducen a una nueva era en el progreso del conocimiento y de la civilización. Cambios que actualmente pasan por dejar de ver a la humanidad como libre para explotar la naturaleza a su antojo sin que por ello pueda verse afectada, y empezar a ver al hombre y a la naturaleza como entes íntimamente relacionados en todos los aspectos, profundizando en la comprensión de la relación del ser humano con los complejos procesos medioambientales.

Como consecuencia de esta preocupación, los líderes mundiales representantes del 98% de la población mundial, han firmado en la Cumbre Mundial de la Tierra, celebrada en Rio de Janeiro en 1992, la denominada Agenda XXI. En la versión abreviada<sup>2</sup> de este documento se pueden leer frases como: “Nunca antes ha encarado la civilización un conjunto de problemas tan graves como hasta ahora. Por amenazador y alarmante que pueda sonar, lo que esta en juego es nada menos que la supervivencia global de la especie humana [...] Por primera vez en la historia la humanidad debe encarar el riesgo de destruir sin querer los cimientos de la vida en la Tierra [...] Evitar tal catástrofe es un desafío impresionante para la comunidad mundial” La Agenda XXI abre una puerta a la esperanza planteando alternativas y quizás sea el preludio del cambio de paradigma que puede producirse en el próximo siglo. La meta de la Agenda XXI consiste en detener y revertir el daño a nuestro planeta y promover el desarrollo sostenible y razonado de todos los países del mundo.

Por otra parte, y frente a los graves problemas que se puedan derivar de la degradación continuada del medio ambiente y de un modelo de sociedad insostenible, la Universidad juega un papel esencial a corto y largo plazo. Desempeña una labor investigadora fundamental para encontrar soluciones a los problemas reales de la sociedad, y tiene una importante misión de formación que dote a las nuevas generaciones de criterios suficientes para analizar los problemas de forma metódica y objetiva. Además la comunidad universitaria debe posicionarse frente a la situación de la sociedad para que, y por encima de los intereses especulativos de una economía liberalizada, se adopten medidas que garanticen una óptima calidad de vida de las generaciones venideras. En este trabajo he querido recoger en el Anexo II las conclusiones que en materia de medio ambiente han adoptado las Universidades, y que como miembro de la comunidad universitaria hago propias, en el III Congreso Internacional de Universidades por el desarrollo sostenible y el medio ambiente celebrado en València en noviembre de 1999.

---

<sup>1</sup> <http://www.unep.org/unep/eia/geo2000/index.htm>

<sup>2</sup> Daniel Sitartz, Agenda XXI (Boulder, CO: Earth Press, 1993), págs. 1-5.

### ***Efectos antrópicos sobre el medio ambiente***

La influencia que la actividad humana tiene sobre el medio ambiente se podría dividir en tres grandes grupos (Vitousek *et al.*, 1997):

- (i) Procesos que llevan a la transformación y degradación de la tierra, donde podemos incluir la deforestación y la desertificación, producidos como consecuencia de la necesidad de obtener nuevos pastos o tierras de cultivo, el sobrepastoreo, la intensificación de cultivos, el abandono de las tierras al dejar éstas de ser productivas, o el aumento de zonas urbanas.
- (ii) Procesos que llevan a la modificación de los ciclos bioquímicos, principalmente los ciclos del agua, del dióxido de carbono y del nitrógeno. El aumento en los niveles de CO<sub>2</sub> es el principal exponente de los efectos que la actividad humana tiene sobre el medio ambiente y es consecuencia del empleo de combustibles fósiles en la industria y el transporte. La agricultura es la principal responsable de la alteración del ciclo del agua y del nitrógeno, por el riego y la utilización de fertilizantes químicos.
- (iii) Procesos que llevan a una pérdida de biodiversidad en la Tierra, bien sea debido a la caza, la pesca, la necesidad del ser humano de instalarse en nuevas zonas o consecuencia de los procesos anteriores, y que origina daños irreparables en los ecosistemas.

En definitiva, la actividad humana está transformando su entorno y, a diferencia de otros periodos, estos cambios están sucediendo más rápidamente de lo que somos capaces de entender y cuyo resultado final es un presumible cambio climático y una alarmante pérdida de biodiversidad. Necesitamos por tanto cuantificar cómo esta cambiando nuestro entorno para poder planear estrategias dirigidas a mitigar los efectos negativos que tales cambios puedan traer. Para ello es necesario comprender los procesos medioambientales y determinar indicadores sensibles a los cambios que se producen o pudieran producirse.

### ***Importancia de la Cubierta Vegetal***

Uno de los indicadores de los cambios que en la biosfera se están produciendo es la cubierta vegetal de la superficie. A través de los cambios en la cobertura vegetal de la superficie terrestre podemos determinar cómo y cuánto y a qué ritmo se está transformando la misma. Así podemos conocer desde el grado de deforestación de un bosque hasta la extensión de los procesos de desertificación, muy acentuados en la Cuenca Mediterránea.

La cubierta vegetal intercambia gran cantidad de CO<sub>2</sub> con la atmósfera, influencia que se puede apreciar en las variaciones estacionales de la composición de la atmósfera (ESA, Rp.1996). Interviene

en otros ciclos biogeoquímicos como el ciclo del nitrógeno, del azufre o del fósforo, esenciales para la vida. Además, la vegetación a través de la productividad primaria, resultado de la fotosíntesis y la producción de biomasa, cambia las características físicas de la superficie de la tierra, como el albedo o la rugosidad y de esta manera modifica tanto los flujos de agua y energía como los ciclos biogeoquímicos.

Por tanto, la distribución geográfica de los diferentes tipos de vegetación, así como el estado fisiológico o estructural de la misma determinan los cambios de energía, agua y CO<sub>2</sub> que se produce entre la superficie y la atmósfera. Los flujos entre las distintas fases del agua afectan directamente al sistema climático a través de mecanismos como la formación de nubes o la precipitación, y que afectan al clima tanto a escala regional como global, el cual a su vez determina la distribución y tipo de vegetación (Bonan, 1995). Por ejemplo, la sustitución de los bosques tropicales por pastos produce un clima más seco en la Amazonia (Henderson-Sellers *et al.*, 1993), lo que sin duda afectará al desarrollo normal de la vegetación natural de la zona. Por ello, podemos decir que la cubierta vegetal, en zonas no perturbadas por la acción del hombre, es un indicador de cambios en los patrones climáticos establecidos (Deschamps *et al.*, 1994).

Por otro lado, los principales atributos biofísicos de la cubierta vegetal tienen gran importancia no sólo desde el punto de vista físico sino también ecológico. Puesto que determinar la altura de la cubierta o el tipo de vegetación que tenemos nos da una idea del estado del ecosistema en cuestión, siendo de especial interés para conocer la producción de la biomasa o la dinámica del ecosistema y su respuesta frente a los cambios que se están produciendo en los procesos biosféricos y atmosféricos.

En resumen, podríamos sintetizar todo lo dicho anteriormente apuntando que los cambios que la actividad humana está ejerciendo en su entorno deben de ser estudiados para mejorar la comprensión de los efectos que produzcan sobre los diferentes procesos naturales. En este sentido, el estudio de la cobertura vegetal proporcionará gran información y se considera como un indicador de los cambios que se están produciendo.

### ***El papel de la Teledetección***

La Teledetección nos proporciona un método sistemático y eficaz para obtener la información adecuada que nos ayude a entender estos cambios y, en particular, nos permita estudiar la dinámica de la cubierta vegetal tanto a escala regional como a escala global. Podemos decir que la finalidad de la teledetección es identificar y caracterizar los materiales de la superficie terrestre y los procesos que en ella ocurren a partir de la radiación electromagnética procedente de la misma, entendiendo por tal tanto la emitida por la superficie como la reflejada en la misma procedente del Sol. En general, cuando la radiación solar incide sobre un material, una parte de la misma se refleja en la capa más superficial del mismo y el resto se propaga por su interior. Allí, parte es absorbida y el resto sufre un proceso de dispersión (en todas direcciones) de tal modo que algo de la energía dispersada emerge del material por la misma superficie por la que penetró, sumándose así a la radiación reflejada en la capa

superficial. La suma de estas dos contribuciones constituye la radiación total reflejada por el material y, juntamente con la irradiancia, permite definir la reflectividad espectral del mismo  $R_\lambda$  (González-Piqueras, 1999).

Los tres usos principales de la teledetección en el estudio de las superficies vegetales son (Deschamps *et al.*, 1994):

- (i) Identificar cubiertas vegetales
- (ii) Detectar cambios en la cubierta vegetal, bien por acción humana (deforestación) o por cambios en patrones climáticos (sequía).
- (iii) Determinación de parámetros biofísicos relacionados con la cubierta vegetal, principalmente relacionados con estudios climáticos, pero también con estudios ecológicos

La dependencia de la reflectividad con la longitud de onda, juntamente con el hecho de que la reflectividad espectral de una superficie está íntimamente relacionada con la naturaleza del material (rasgos de absorción en función de los constituyentes químicos de los materiales), es lo que hace posible el reconocimiento de materiales en teledetección. Al ser este tipo de absorción un proceso que está cuantizado, dichos rasgos se encuentran localizados en longitudes de onda concretas, dependiendo de la presencia de determinados componentes en el material. La intensidad de los mismos está relacionada de forma directa con la cantidad de dicho componente (Baret, 1995). Es, por tanto, la distinta forma de interactuar la radiación electromagnética con la materia en función de la longitud de onda la que determina la respuesta espectral de las superficies naturales y posibilita su estudio. Sin embargo, hay que añadir que la reflectividad de una superficie puede ser modificada por la acción de factores externos a la misma entre los que cabe destacar, principalmente, los relacionados con la configuración de observación y la iluminación, así como a la presencia de la propia atmósfera.

La medida de la reflectividad, bien mediante radiometría de campo o teledetección espacial, está íntimamente ligada a la geometría del problema, determinada por las posiciones de la fuente de iluminación y del sensor respecto a la superficie problema. La magnitud que caracteriza para cada una de las geometrías posibles las propiedades reflectantes de las superficies es la BRDF (*Bidirectional Reflectance Distribution Function*). La BRDF, como es bien sabido, se define como el cociente entre la radiancia reflejada, por unidad de ángulo sólido en una determinada dirección, y la irradiancia por unidad de ángulo sólido que desde una determinada dirección incide en la superficie. Sin embargo, la medida de ésta no es posible, pues requiere medidas a ángulos sólidos infinitesimales. La alternativa consiste en calcular el factor de reflectividad bidireccional (en alusión a las dos direcciones involucradas en el problema), BRF (*Bidirectional Reflectance Factor*), que se define como el cociente entre la radiancia reflejada por una superficie y la que refleja una superficie lambertiana totalmente reflectante.

Por tanto el BRF o la reflectividad presentan una dependencia angular. Diferentes autores han demostrado el carácter anisótropo con el que las cubiertas vegetales reflejan la radiación incidente (Kriebel, 1976; Kimes, 1983). El principal exponente de esta anisotropía es lo que se denomina en las

cubiertas vegetales el efecto *hot spot*, también denominado *opposition effect*, debido a que fue descubierto primeramente por Seeliger, cuando observaba los anillos de Saturno, y posteriormente por Gehrels (Gehrels, 1956) observando la luna y distintos asteroides, cerca de la oposición astronómica, justo cuando el ángulo de fase (ángulo relativo entre las direcciones de iluminación y de observación) tiende a cero. En las cubiertas vegetales, se manifiesta como un pico en la radiancia reflejada desde la superficie en la dirección de retroiluminación, es decir, cuando el ángulo de fase es cero y el ángulo cenital de iluminación y de observación coinciden. El origen del *hot spot* reside en la ausencia de sombras, las cuales quedan ocultas por los elementos iluminados en la configuración comentada anteriormente. Si bien, en la intensidad del fenómeno, influyen factores como la geometría de la cubierta o las propiedades ópticas de la misma (Sandmeier *et al.*, 1999-b). Algunos modelos demuestran cómo el *hot spot* depende de la razón entre las escalas horizontales y verticales de la cubierta o del tamaño relativo de las hojas, así como de su orientación. Por lo que se piensa que obtener la reflectividad en el *hot spot* puede ser útil para estimar parámetros estructurales de la cubierta vegetal.

Fruto del creciente interés por comprender la BRDF de las superficies naturales, las agencias espaciales han desarrollado sensores como el POLDER (CENS), el AATSR (ESA), o el MISR (NASA). Estos sensores han sido diseñados para ser capaces de obtener medidas de reflectividad bidireccional de la superficie. Incorporando la información angular de la reflectividad se espera introducir mejoras en algunas de las líneas de investigación desarrolladas en Teledetección, como la clasificación de superficies naturales, la definición de nuevos índices de vegetación que normalicen los efectos de la anisotropía existente en la reflectividad de las cubiertas vegetales o la mejora en la estimación de parámetros biofísicos de la cubierta.

### **Objetivos**

La aparición de los nuevos sensores con capacidad para obtener información angular de la reflectividad implica la necesidad de desarrollar algoritmos que sean capaces de, a partir de los datos proporcionados por el satélite, obtener información útil relativa, en nuestro caso, a la cubierta vegetal. En este aspecto la radiometría juega un papel fundamental en el desarrollo de modelos físicos o en el diseño de nuevos sensores.

Nuestra intención como grupo de investigación es desarrollar aplicaciones así como mejorar en la obtención de lo que podríamos denominar ‘observables’ radiométricos, y cuya relación con los atributos biofísicos de la superficie nos permite estimar estos. Para ello, necesitamos adquirir medidas experimentales de reflectividad bajo diferentes configuraciones geométricas que permitan simular bajo situaciones controladas los datos que proporcionarían los nuevos sensores, así podremos desarrollar estrategias que permitan obtener aplicaciones relacionadas con el estudio de superficies naturales.

Por tanto, nuestro principal objetivo ha sido desarrollar una metodología adecuada que nos permita obtener medidas bidireccionales de reflectividad tanto en un entorno controlado, laboratorio, como en un entorno natural, campo. De esta manera esperamos:

- (i) Caracterizar y estudiar la anisotropía de la reflectividad de cubiertas vegetales, que nos permitan obtener aquellas configuraciones geométrica y regiones espectrales donde podamos conseguir una mayor información.
- (ii) Obtener valores de reflectividad próximos al *hot spot* e investigar la utilidad de dicho parámetro para estimar propiedades estructurales de la superficies, así como la utilidad de obtener la variación de la reflectividad con el ángulo de observación en en el plano principal de iluminación para la investigación de las superficies naturales desde teledetección.

### ***Organización de la memoria***

Tras esta introducción vamos a encontrar 3 capítulos que forman el grueso de la memoria, las conclusiones que se derivan del mismo y varios apéndices que le dan al trabajo mayor autoconsistencia.

En el capítulo I, '*Fundamentos Teóricos*', se proporcionan los argumentos teóricos necesarios para la comprensión de la importancia que la geometría de observación y de iluminación tiene sobre la respuesta espectral de las cubiertas vegetales. Comenzamos con un repaso de las propiedades espectrales de los elementos que forman la cubierta vegetal así como de las técnicas que tradicionalmente han sido utilizadas para extraer información a partir de la medida de la reflectividad desde el nadir. Se explica la geometría del problema y la influencia que los parámetros ópticos, estructurales o el ángulo de iluminación tienen sobre la BRDF. Los mecanismos físicos que explican el comportamiento anisótropo de una superficie son necesarios para la discusión que posteriormente hagamos de los resultados. Al analizar la BRDF de una cubierta vegetal encontramos un máximo en la dirección de retrodispersión conocido como el *hot spot*. El capítulo sigue con una explicación detallada de este fenómeno, así como la influencia que la resolución espacial o angular tengan sobre él. Concluimos el capítulo con una perspectiva general de los avances tecnológicos que se está llevando a cabo en las agencias espaciales, haciendo un mayor énfasis en los nuevos sensores con capacidad de observación angular y en los beneficios que para el estudio de los procesos terrestres y de la cubierta vegetal puedan aportar.

El capítulo II, '*Diseño Experimental*', es un capítulo más técnico en el que se aborda el problema de la medida de la reflectividad mediante radiometría y, en particular cómo resolvemos el problema de adquirir medidas bajo diferentes ángulos de observación. Por ello, se describen con detalle los elementos involucrados en el proceso de medida, la técnica radiométrica empleada para medir el BRDF, las fuentes de error más importantes, y las experiencias previas llevadas a cabo hasta obtener la

configuración experimental adecuada tanto para realizar medidas de laboratorio como de radiometría de campo. Especial interés por su importancia en los resultados finales tiene la calibración del panel de referencia, sin cuya adecuada normalización no podríamos obtener medidas comparables desde los distintos ángulos. El capítulo termina con un esquema donde se muestra la configuración de medida empleada tanto en el laboratorio como en el campo, las experiencias propuestas y la descripción de las superficies vegetales escogidas y de algunos de sus parámetros estructurales como la altura o el parámetro de forma de sus hojas.

En el capítulo III, '*Discusion de los Resultados*', se proponen unas experiencias para estudiar el comportamiento anisótropo de las cubiertas vegetales. En la primera estudiaremos el comportamiento de dos cubiertas con alta densidad de plantas y, por tanto, poca influencia del suelo de fondo. El análisis de la anisotropía es realizado no solo en función de la geometría de observación, sino también en función de las propiedades estructurales de las muestras y de las propiedades ópticas diferentes en cada región espectral. En la configuración más próxima al plano principal de iluminación obtenemos un evidente pico cuando coinciden los ángulos cenitales de observación y de iluminación. Este es el plano en el que el BRF muestra un comportamiento más anisótropo y donde las diferencias entre ambas cubiertas son más significativas. Por esto es la configuración idónea para obtener una signatura angular propia de las superficies y de las condiciones de iluminación del sistema. Por ello, diseñamos una segunda experiencia donde determinamos esta signatura angular para ambas muestras y en la que variamos la densidad de plantas. Esto nos permite analizar la influencia que la abundancia de vegetación tiene sobre la variación del BRF con el ángulo de observación cenital. A continuación mostramos los resultados de las medidas angulares que adquirimos en el campo, confirmando las conclusiones derivadas del análisis en un entorno artificial. Para terminar incluimos un breve análisis de qué podemos esperar cuando dispongamos de datos de satélite. Dado el carácter más bien teórico de esta discusión, si bien se aplican filtros del POLDER y del MISR a los datos experimentales, hemos considerado más oportuno incluirlo como un apéndice del trabajo.

Finalmente, presentamos las conclusiones que se derivan del trabajo realizado, así como las perspectivas futuras. Posteriormente encontramos una lista de acrónimos, los apéndices y los anexos de esta memoria. Especial interés tiene el anexo I donde se recoge el índice de todas las gráficas que se pueden encontrar en el disco de 3.5'' que se adjunta con la memoria y que representan la colección completa de datos recopilados en el transcurso de las experiencias de laboratorio.