

TELEDETECCIÓN Y SUMIDEROS DE CARBONO

F. González-Alonso¹, A. Calle Montes², S. Merino de Miguel¹, J.M. Cuevas Gozalo¹, S. García Gigorro¹ y A. Roldán Zamarrón¹

¹ Laboratorio de Teledetección. Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria (INIA). Ctra. A Coruña, km 7,5. 28040-MADRID (España)

² Laboratorio de Teledetección. Facultad de Ciencias de la Universidad de Valladolid. 47071-VALLADOLID (España)

Resumen

El Protocolo de Kyoto supone el compromiso para la reducción de las emisiones de CO₂ y otros gases de efecto invernadero hasta rebajar un 5% los niveles de 1990. Como medida alternativa, es posible incrementar los sumideros de carbono mediante distintos mecanismos de aumento de la superficie vegetal. Este compromiso precisa mecanismos de control operativos capaces de realizar un seguimiento exhaustivo de la evolución de las masas forestales y otras formaciones vegetales, es decir, de los almacenes y sumideros de carbono. En este contexto, los actuales y futuros satélites de Observación de la Tierra y las distintas técnicas de Teledetección juegan un papel clave en la inventariación del CO₂ global. Al margen de estas políticas, hay que destacar el efecto sumidero de CO₂ llevado a cabo por los bosques templados durante los últimos años y que ha sido puesto de manifiesto por distintos autores (MYNENI et al., 1997; MYNENI et al., 2001; DONG et al., 2003). En España, diversos estudios han permitido llegar a una conclusión similar: la vegetación de la España peninsular ha incrementado su actividad durante los últimos lustros (GONZÁLEZ-ALONSO et al., 2003a; GONZÁLEZ-ALONSO et al., 2003b; GONZÁLEZ-ALONSO et al., 2003c).

Palabras clave: *Protocolo de Kyoto, CO₂, Sistemas forestales, Inventariación*

INTRODUCCIÓN

La puesta en marcha del Protocolo de Kyoto exigirá la existencia de sistemas operacionales de seguimiento que permitan verificar el cumplimiento del mismo. Según ROSENQVIST et al., (1999) la teledetección es el medio más adecuado para cuantificar la cantidad neta de carbono, por lo que cabe esperar que los satélites de Observación de la Tierra, presentes y futuros, desempeñen un papel estratégico en la implantación definitiva del Protocolo de Kyoto.

La fijación del carbono atmosférico por parte de los ecosistemas vegetales terrestres, y

en especial de los bosques, es una importante pieza del ciclo global del carbono. Y más si tenemos en cuenta que el efecto sumidero de carbono llevado a cabo por dichos ecosistemas puede ser utilizado para compensar las emisiones, tal y como recoge el propio Protocolo.

En el presente artículo, se va a realizar una síntesis de los aspectos clave del Protocolo de Kyoto con especial énfasis en el papel que puede jugar la teledetección en la verificación de su cumplimiento. A continuación se abordarán las tareas en las que la teledetección puede colaborar, así como los sensores más adecuados para ello. Por último, se va a hacer un repaso de

algunos trabajos que hacen referencia al efecto sumidero que están experimentando los bosques boreales y templados y, en particular las masas forestales españolas.

EL PROTOCOLO DE KYOTO

En 1997, ciento sesenta países reunidos en la Tercera Conferencia de las Partes de la Convención Marco de la Naciones Unidas sobre Cambio Climático (UNFCCC) decidieron aprobar el Protocolo de Kyoto como instrumento jurídico para la aplicación del Convenio sobre el Cambio Climático que nació en la Cumbre de Río de Janeiro de 1992 y entró en vigor en 1994. En todo este proceso han sido clave los informes elaborados por el Panel Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático (IPCC), cuyas conclusiones revelan que el sistema climático global está variando debido, principalmente, a las emisiones antropogénicas de gases de efecto invernadero y a los aerosoles. Las previsiones para el siglo XXI recogidas en el tercer informe del IPCC (2001) hablan de incrementos en la temperatura global de entre 1,4 y 5,8 °C, y de elevaciones del nivel medio del mar de entre 0,11 y 0,77 m.

En virtud del artículo 3.1 del Protocolo de Kyoto, las Partes del Anexo I (países desarrollados y países con economías en transición) acuerdan limitar sus emisiones de gases de efecto invernadero a un nivel un 5% como mínimo por debajo de las emisiones de 1990 entre los años 2008 y 2012. Asimismo, deben demostrar en el 2005 los progresos realizados para alcanzar el nivel de emisiones asignado. La Unión Europea ha suscrito su propio acuerdo interno para reducir un 8% sus emisiones mediante la distribución de distintos porcentajes entre sus Estados miembros. Esta distribución oscila entre una reducción del 28% en el caso de Luxemburgo, y un incremento del 27% en el caso de Portugal. España puede incrementar sus emisiones hasta un 15% respecto al año base (1990). Sin embargo, según datos proporcionados por la Oficina Española de Cambio Climático, ya en 2002 se había producido un incremento en las emisiones de cerca del 40%, lo que supone 25 puntos por encima de las emisiones autorizadas.

Los artículos 3.3, 3.4 y 3.7 del Protocolo de Kyoto establecen mecanismos que permiten modificar el balance de carbono entre la atmósfera y la biosfera terrestre mediante los cambios en el uso del territorio y las actividades selvícolas (actividades de forestación, reforestación y deforestación) para cumplir los compromisos nacionales en materia de reducción de emisiones.

Los países participantes están obligados a implantar sistemas nacionales que les permitan evaluar sus emisiones de gases de efecto invernadero de manera transparente y verificable (Art. 3.3) en el período 2008-2012. Para asegurar el cumplimiento de estos objetivos surge la necesidad de realizar un seguimiento y control de:

- cantidad de carbono almacenado
- secuestro de carbono (desde 1990 hasta 2008-2012)
- pérdidas de carbono (desde 1990 hasta 2008-2012)
- mercado de carbono

Para que el Protocolo de Kyoto entre en vigor deben ratificarlo 55 países que reúnan el 55% de las emisiones. Este objetivo aún no se ha alcanzado puesto que países como Estados Unidos y Rusia, que representan un importante porcentaje de las emisiones de gases de efecto invernadero del total mundial, aún no lo han ratificado. La UE está desempeñando un papel de liderazgo en el debate internacional muy importante como salvaguarda de los valores y principios que inspiran el Protocolo de Kyoto.

PAPEL DE LA TELEDETECCIÓN EN EL PROTOCOLO DE KYOTO

La teledetección es una herramienta fundamental para cubrir las necesidades de información territorial establecidas por el Protocolo de Kyoto, ya que permite realizar el seguimiento y cuantificación de la biomasa vegetal, de los usos del suelo y de sus variaciones. Esta información es necesaria para evaluar las emisiones y capturas de gases de efecto invernadero, directamente relacionadas con la vegetación y usos del suelo.

Se presenta en la tabla 1 un resumen de los sensores disponibles en la actualidad potencialmente útiles para los requerimientos de Kyoto,

en función de sus distintos ámbitos de aplicación y escalas y de su resolución espacial.

A pesar de la capacidad tecnológica de la teledetección para cumplir las funciones señaladas, existen importantes problemas que deben solventarse para lograr un aprovechamiento óptimo de la información. Es necesaria una cooperación permanente entre las distintas administraciones implicadas en el Protocolo, que permita definir estrategias y objetivos comunes, y posibilite el acceso a la información de todos los países que necesiten disponer de ella. El reto es conseguir tecnologías robustas y operativas que aporten transparencia, eficiencia en los costes y precisión, y que permitan una actualización y desarrollo continuos (RICHARDS, 2003).

Experiencias a escala global

El Departamento de Geografía de la Universidad de Boston (USA) en colaboración con otros centros estadounidenses, finlandeses y rusos, ha llevado a cabo una serie de estudios basados en imágenes de satélite, que han permitido estimar la situación y cuantía de las reservas, fuentes y sumideros de carbono en el contexto de los bosques boreales y templados (MYNENI *et al.*, 1997; MYNENI *et al.*, 2001; DONG *et al.*, 2003). Dichos estudios están basados en la relación hallada entre mediciones por teledetección de NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*), acumulado durante el periodo vegetativo y estimaciones de la cantidad de biomasa forestal obtenidas a partir de datos procedentes

Aplicación	Sensor	Resolución espacial	Escala espacial
Seguimiento de usos del suelo	Landsat TM	Alta	Local - Regional
	Landsat ETM	Alta	Local - Regional
	SPOT HRVIR	Alta	Local
	NOAA AVHRR	Baja	Global
	SPOT VGT	Baja	Global
	SAR	Alta	Local - Regional
	LIDAR	Alta	Local - Regional
Niveles de carbono en 1990	Landsat TM	Alta	Local-regional
	SPOT HRV	Alta	Local
	NOAA AVHRR	Baja	Global
Cuantificación de biomasa vegetal	Envisat MERIS	Media	Regional-Global
	Terra/Aqua MODIS	Media	Regional-Global
	Terra/Aqua ASTER	Alta	Local-Regional
	Landsat	Alta	Local-Regional
	SPOT-HRVIR	Alta	Local
	SAR	Alta	Local-Regional
	LIDAR	Alta	Local-Regional
Cuantificación de cambios de usos del suelo			
Deforestación	Envisat MERIS	Media	Regional-Global
	Terra/Aqua MODIS	Media	Regional-Global
	Terra/Aqua ASTER	Alta	Local-Regional
	Landsat	Alta	Local-Regional
	SPOT-HRVIR	Alta	Local
	SAR	Alta	Local- Regional
	LIDAR	Alta	Local- Regional
Forestación y reforestación	Ikonos	Muy alta	Local
	Quickbird	Muy alta	Local
	SPOT HRG	Muy alta	Local
	SAR	Alta	Local-Regional
	LIDAR	Alta	Local-Regional

Tabla 1. Resumen de sensores actualmente disponibles y potencialmente útiles para los requerimientos de Kyoto. Se indican sus distintos ámbitos de aplicación y escalas y su resolución espacial

de inventarios forestales llevados a cabo en seis países (Canadá, Finlandia, Noruega, Rusia, USA y Suecia).

El citado grupo de trabajo empleó datos procedentes del sensor AVHRR (*Advanced Very High Resolution Radiometer*) a bordo de la serie de satélites NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*) para generar composiciones quincenales de máximo valor de NDVI a resolución de 8 km durante las décadas 1980 y 1990. Paralelamente, datos de campo procedentes de diversos inventarios forestales fueron convertidos en estimaciones de biomasa del vuelo (expresada en tn/ha). Los distintos análisis estadísticos realizados demostraron que podía utilizarse un modelo de regresión para estimar la relación existente entre biomasa forestal y NDVI, independientemente de la escala espacial o temporal utilizada y del ecosistema estudiado.

Los mencionados estudios concluyen que se ha producido un incremento en la cantidad de biomasa almacenada para la mayor parte de los ecosistemas forestales estudiados. Este incremento puede ser debido a la elevación de la temperatura a escala global y a un alargamiento de los periodos vegetativos.

Experiencias en España

Estudios llevados a cabo por los Laboratorios de Teledetección del INIA y de la Facultad de Ciencias de la Universidad de Valladolid (GONZÁLEZ-ALONSO et al., 2003a; GONZÁLEZ-ALONSO et al., 2003b; GONZÁLEZ-ALONSO et al., 2003c) no hacen sino corroborar las tesis enunciadas. Dichos estudios se han basado en un archivo de 15 años de imágenes NOAA-AVHRR, formado por más de 5000 escenas de España a resolución LAC (1 km), y datos de campo procedentes del Segundo Inventario Forestal Nacional.

Gracias a la correlación positiva existente entre datos de NDVI y datos de biomasa forestal, se han podido elaborar ecuaciones de predicción de la cantidad de carbono. Tales ecuaciones han puesto de manifiesto un incremento generalizado del efecto sumidero de las masas forestales españolas (GONZÁLEZ-ALONSO et al., 2003c). Estos últimos resultados apoyan la tesis del incremento de la actividad vegetativa, tam-

bién generalizado para todas las provincias españolas (GONZÁLEZ-ALONSO et al., 2003a; GONZÁLEZ-ALONSO et al., 2003b). En la figura 1 aparecen los resultados mencionados.

En el contexto de unos resultados tan elocuentes, y fruto de la necesidad y urgencia de idear mecanismos de control y seguimiento del Protocolo de Kyoto, se ha firmado recientemente un convenio de colaboración entre el INIA y la Dirección General de Calidad y Evaluación Ambiental (Ministerio de Medio Ambiente) para la "Evaluación del Potencial de los Bosques Españoles como sumideros de carbono mediante técnicas de teledetección". En este nuevo proyecto se van a utilizar imágenes procedentes del sensor MERIS a bordo del satélite europeo Envisat. Las imágenes MERIS son similares a las AVHRR aunque presentan características mejoradas: mayor resolución espacial y radiométrica, lo que seguro producirá resultados mucho más precisos. En la figura 2 aparece una escena MERIS de 8 de agosto de 2003.

CONCLUSIONES

La teledetección espacial, especialmente desde la puesta en marcha de las iniciativas GMES y GEO, va a desempeñar en un futuro cercano un papel fundamental en la puesta en marcha y verificación del cumplimiento de los acuerdos contemplados en el Protocolo de Kyoto.

Agradecimientos

La realización de este trabajo ha sido posible gracias al convenio de colaboración entre la Dirección General de Calidad y Evaluación Ambiental (Ministerio de Medio Ambiente) y el Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria (Ministerio de Ciencia y Tecnología) en materia de "Evaluación del potencial de los bosques españoles como sumideros de carbono mediante técnicas de teledetección", y a la colaboración del Laboratorio de Teledetección de la Universidad de Valladolid.

BIBLIOGRAFÍA

- DONG, J.; KAUFMANN, R.K.; MYNENI, R.B.; TUCKER, C.J.; KAUPPI, P.E.; LISKI, J.; BUERMANN, W.; ALEXEYEV, V. & HUGHES, M.K.; 2003. Remote Sensing estimates of boreal and temperate forest woody biomass: carbon pools, sources and sinks. *Rem. Sens. Env.* 84: 393-410.
- GONZÁLEZ-ALONSO, F.; CUEVAS, J.M.; CALLE, A.; CASANOVA, J.L. & ROMO, A.; 2003a. Spanish vegetation monitoring during the period 1987-2001 using NOAA-AVHRR images. *Int. J. Rem. Sens.* 25(1): 1-4.
- GONZÁLEZ-ALONSO, F.; CALLE, A.; CASANOVA, J.L. Y CUEVAS, J.M.; 2003b. La actividad de la vegetación en la España Peninsular se incrementó un diecisiete por ciento durante el periodo 1987-2001. *En: Teledetección y Desarrollo Regional*: 179-181. Cáceres.
- GONZÁLEZ-ALONSO, F.; CALLE, A.; MERINO DE MIGUEL, S. Y CUEVAS, J.M.; 2003c. Using Remote Sensing Techniques to assess Terrestrial Carbon Sinks in Spain. *In: 30th International Symposium on Remote Sensing of Environment*. Honolulu. Hawaii.
- IPCC; 2001. *Tercer Informe de Evaluación, Cambio Climático* 2001. <http://unfccc.int> (8/Marzo/2003).
- MYNENI, R.B.; KEELING, C.D.; TUCKER, C.J.; ASRAR, R.G. & NEMANI, R.R.; 1997. Increased plant growth in the northern high latitudes from 1981-1991. *Nature* 386: 698-702.
- MYNENI, R.B.; DONG, J.; TUCKER, C.J.; KAUFMANN, R.K.; KAUPPI, P.E.; LISKI, J.; ZHOU, L.; ALEXEYEV, V. & HUGHES, M.K.; 2001. A large carbon sink in the woody biomass of Northern Forests. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 98(26): 14784-14789.
- RICHARDS, G.; 2003. The Expanding Role of Remote Sensing in Greenhouse Gas Accounting. *In: 30th International Symposium on Remote Sensing of Environment*. Honolulu. Hawaii.
- ROSENQVIST, A.; IMHOFF, M.; MILNE, A. & DOBSON, C.; 1999. *Remote Sensing and the Kyoto Protocol: A Review of Available and Future Technology for Monitoring Treaty Compliance*. Ann Arbor. Michigan.
- UNFCCC; 1997. *El Protocolo de Kyoto*. Bonn, Alemania. <http://unfccc.int/es> (8/Marzo/2003)

TELEDETECCIÓN Y SUMIDEROS DE CARBONO

F. González-Alonso, A. Calle Montes, S. Merino de Miguel, J.M. Cuevas Camacho, S. García Gígorro y A. Roldán Zamarrón

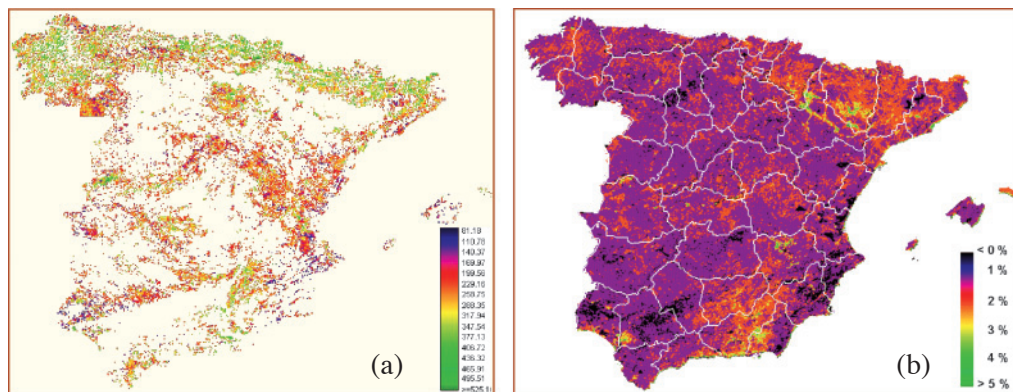


Figura 1. (a) Incremento en la cantidad de carbono almacenado expresado en t/ha para las áreas forestales durante el periodo 1996-2001, (b) Tasa de incremento relativo medio anual del NDVI durante el periodo 1987-2001

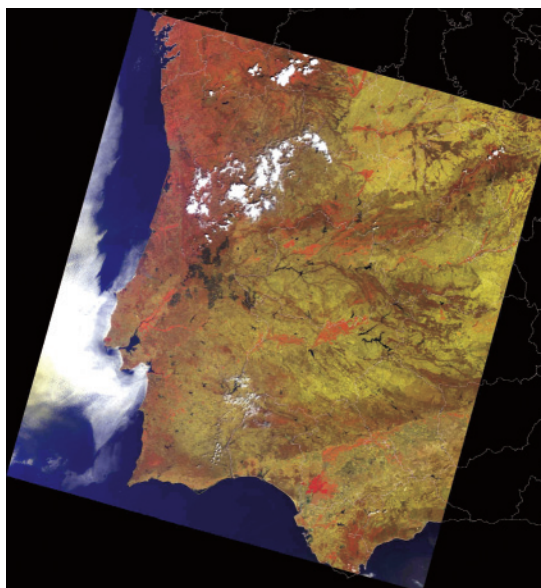


Figura 2. Escena MERIS del 8 de agosto de 2003. Composición RGB:12,9,1