Proyecto LIFE+ Operación CO_2: nuevas tecnologías aplicadas a la obtención de créditos de carbono mediante reforestación, restauración y gestión forestal

Luis Fernando Sánchez Sastre[1], Eliecer Herrero Llorente[1], Salvador Hernández Navarro[1], Paula Carrión Prieto[1]
Fermín Garrido Lagunaga[2], José Luis Marcos Robles[3], Zacarías Clérigo Pérez[3],

[1] Departamento de Ingeniería Agrícola y Forestal Universidad de Valladolid, España. lux@iaf.uva.es;
[2] Departamento de Producción Vegetal y Recursos Forestales Universidad de Valladolid, España. fegala@gmail.com;
[3] Departamento de Ciencia de los Materiales Universidad de Valladolid, España. jlmarcos@iaf.uva.es

Resumen. Dentro del marco del proyecto LIFE+ Operation CO_2 se está estudiando la viabilidad de generar créditos de carbono mediante reforestación y una adecuada gestión forestal que permita aumentar la asimilación de CO_2 en un espacio natural del prepirineo leridano. Para conocer el estado actual de las zonas de estudio se ha utilizado teledetección mediante satélite y drones, procesamiento de datos LiDAR y trabajo sobre el terreno. Para evaluar la posible evolución en un futuro cercano del bosque se han realizado simulaciones con modelos matemáticos de crecimiento a través de software específico. Los resultados preliminares muestran una mayor captura de CO_2 en el escenario en el que se aplica la gestión forestal propuesta en comparación con el escenario sin gestión.

Palabras clave: CO_2, gestión forestal, teledetección, vehículos aéreos no tripulados (drones), LiDAR, Sistemas de Información Geográfica (SIG), índices de vegetación, modelos de crecimiento

Project LIFE+ Operation CO_2: new technologies applied to carbon credits obtaining through reforestation, restoration and forest management.

Abstract. In the frame of the European Project LIFE+ Operation CO_2 feasibility to generate carbon credits, hence increasing CO_2 sequestration, via afforestation and improved forest management in the pre-Pyrinees area of Lérida (Spain) is studied. In order to assess the current conditions of the studied zones, remote sensing through satellite images, drones, LiDAR data and fieldwork are used. Besides this, to evaluate the likely evolution of the forest in the near future, projections with a simulation growth software have been conducted. Preliminary results show a larger CO_2 uptake in the managed forest scenario compared with the no management scenario.

Keywords: CO_2, forest management, remote sensing, unmanned aerial vehicles (UAV), LiDAR, Geographic Information Systems (GIS), vegetation index, simulation growth model

1 Introducción

El proyecto LIFE11 ENV/ES/535 - Operation CO_2[1] tiene como objetivo general demostrar la viabilidad económica de proyectos agroforestales de secuestro de carbono en Europa mediante la conservación y manejo de bosques y las prácticas agroforestales integradas. Dicho objetivo se pretende alcanzar mediante nuevos métodos que sean tanto técnica como económicamente viables en 3 diferentes provincias de España (Zamora, Zaragoza y Lérida) y con un equipo multinacional de 9 socios de tres estados miembros (España, Países Bajos, Reino Unido). La finalidad última del proyecto es la obtención de créditos de carbono mediante el estándar VCS[2] (Verified Carbon Standard).

En este contexto, conocer el estado actual de la masa y estimar la biomasa total (aérea y radical) se presentan como acciones fundamentales para establecer un valor de referencia o línea base en el

[1] http://www.operationco2

inicio del proyecto a la hora de calcular el incremento en la captura de CO_2 mediante las acciones del mismo a lo largo de los años.
Los ecosistemas forestales juegan un papel clave en el ciclo global del carbono debido al intercambio natural de carbono entre bosques y atmósfera a través de la fotosíntesis, respiración, descomposición y combustión (IPPC, 2000). La biomasa, al acumular carbono, actúa como sumidero de CO_2 atmosférico secuestrando anualmente entre 0.01 y 1.08 t C ha^{-1} en la región mediterránea (Croitoru & Merlo, 2005). En España, aproximadamente el 19% del total de las emisiones anuales son capturadas por los bosques (Montero, Ruiz-Peinado & Muñoz, 2005).
La mayoría de países no poseen un inventario de datos expresados directamente en términos de biomasa y usan en su lugar factores de conversión y/o expansión aplicados a los datos de crecimiento de existencias para estimar la biomasa (Marklund & Schoane, 2006). Por lo tanto se requieren métodos para proporcionar estimaciones precisas de biomasa forestal y sus cambios para incrementar nuestro conocimiento del papel de los bosques en el ciclo del carbono.
Los métodos convencionales de estimación de biomasa están basados en medidas de campo que a pesar de ser métodos más directos están generalmente limitados en términos espaciales y temporales a la hora de efectuar muestreos. Los sensores remotos proporcionan un método para generar detallada información explícita espacialmente sobre biomasa forestal dado su potencial para suministrar información en un amplio rango de escalas temporales y espaciales, sin embargo, se necesitan desarrollar métodos apropiados para extraer datos relevantes (García, Riaño, Chuvieco & Danson, 2010).
Junto a ellos, el uso de modelos de simulación de crecimiento se presenta como herramienta esencial para evaluar y predecir el comportamiento de los bosques con el paso del tiempo y ante distintas condiciones climáticas.

2 Materiales y métodos

Los objetivos perseguido con este estudio ha sido, por una parte, estimar la cantidad de biomasa total (aérea y radical) existente en aquellas zonas de monte prepirenaico sobre las que va a actuar el proyecto, y por otra, evaluar el estado actual de una de ellas y su posible evolución en los próximos años. Para ello se han combinado tecnologías modernas de teledetección remota, software de procesamiento de datos LiDAR (Light Detection and Ranging), SIGs (Sistemas de Información Geográfica), software estadístico y modelos de crecimiento.

2.1 Área de estudio

De las 3 localizaciones del proyecto, este estudio se centra en un área forestal localizada en el término municipal de Figols i Alinyá (Lérida), sito en la comarca catalana del Alt Urgell, dentro del Espacio Natural Montaña de Alinyà (Fig. 1) perteneciente a la Fundación Catalunya-La Pedrera (FCLP). Las temperaturas medias se sitúan entre los 8 ºC y los 16 ºC, con fenómenos de inversión térmica en el fondo del valle en los meses fríos. Características climáticas estas, que incluyen la zona en la región eurosiberiana y también se encuentran zonas que son típicamente mediterráneas (Moisés, Ibáñez, Rodríguez & Olarieta, 2004). Por la situación geográfica, la pluviometría media oscila entre los 650 mm y los 1100 mm, donde los valores máximos se dan en la primavera y el verano, y los valores mínimos durante el invierno.

Este espacio natural, con una altitud entre 500 y 2.380 m de altura y un relieve accidentado proporciona una gran diversidad de paisajes y ambientes, pudiendo encontrarse bosques, pastos, matorral, altas cumbres y accidentadas zonas de peñascos que permiten una gran riqueza faunística y botánica. Así, Alinyà es un famoso escenario y refugio de especies emblemáticas como el rebeco o el urogallo, y se observan con facilidad las cuatro especies de buitres que viven en Europa: buitre leonado, quebrantahuesos, buitre negro y alimoche.



Fig. 1. *(Localización del municipio de Figols i Alinyà dentro de la comunidad autónoma de Cataluña, España).*

Dentro de dicho espacio natural se han seleccionado un total de 7 ha dedicadas a forestación, reforestación y restauración (acción ARR, Fig. 2 izda) y unas 18 ha a la mejora de la gestión forestal (acción IFM, Fig. 2 drcha).
Las zonas objetivo de actuación de la acción ARR son áreas degradadas donde la vegetación está compuesta mayoritariamente por formaciones de herbáceas, arbustivas y de matorral formadas por enebro (*Juniperus oxycedrus*), boj (*Buxus sempervirens*), espino blanco (*Crataegus sp.*), rosáceas y romero. En cuanto a las escasas formaciones de porte arbóreo hay que destacar el pino pudio (*Pinus nigra*), pino silvestre (*Pinus sylvestris*), rebollo (*Quercus pyrenaica*) y enebro (*Juniperus oxycedrus*).

La zona dedicada a la acción IFM es una masa homogénea de Pinus sylvestris, con presencia de boj y espino, surgida por regeneración tras el abandono de las labores agrícolas durante el siglo XX.

A la hora de realizar la estimación de la biomasa presente en estas zonas, el alto grado de heterogeneidad, la dispersión de la mismas y las fuertes pendientes hacen que se dificulte enormemente el trabajo a pie de campo y la representatividad de los datos muestrales.
Para solventar esta problemática se estableció una metodología apoyada en una combinación de datos LiDAR, imágenes de alta resolución y fotogrametría mediante vehículo aéreo no tripulado (UAV), ortofotografías y datos de campo

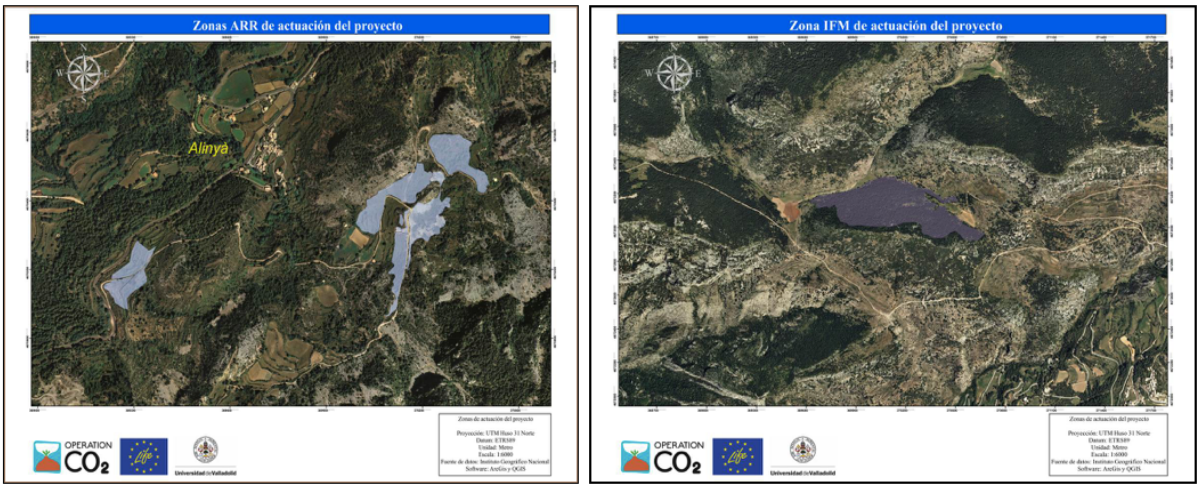


Fig. 2. *(Izda: localización de las 9 zonas dedicadas a la acción ARR. Drcha: zona donde se ejeciuta la acción IFM).*

2.2 Tecnología LiDAR

En este trabajo se han utilizado los datos provenientes de un vuelo LiDAR realizado por el IGN (Instituto Geográfico Nacional) dentro del plan PNOA (Plan Nacional de Ortografía Aérea).
El LiDAR es un sistema activo de detección remota basada en un escáner láser, generalmente aerotransportado, que proporciona información tridimensional de las superficies que escanea mediante la emisión de pulsos láser (Fig. 3 izqda) que permite medir distancias, y generar una nube de puntos de elevación muy precisa y especialmente densa (Fig. 3 drcha). Esto se consigue con la combinación de tres tecnologías: un láser, un sistema de referencia inercial de alta precisión (IMU, Inertial Measurement Unit) y un sistema de posicionamiento global por satélite. La combinación de estos tres sistemas, montados en un único instrumento, permite obtener con gran rapidez y precisión Modelos Digitales del Terreno (Baltsavias, 2008).

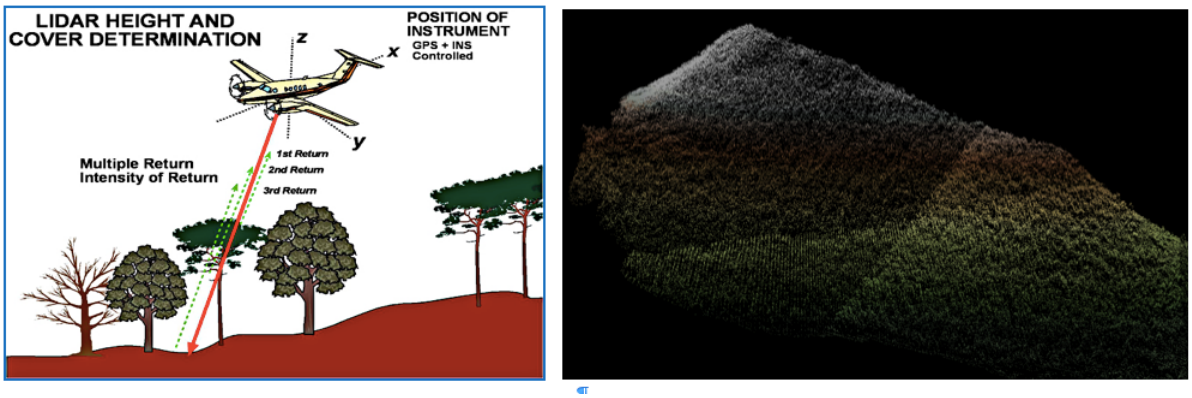


Fig. 3. *(Izda: esquema de un vuelo LiDAR. Drcha: nube de puntos del vuelo LiDAR sobre la zona IFM).*

De esta forma, esta reciente tecnología presenta un gran potencial para muchos tipos de estudios y aplicaciones al proporcionar una alta cantidad de datos, así como la georeferenciación digital de la elevación de los mismos con gran precisión (precisión absoluta de elevación de 15 cm, y precisión absoluta de coordenadas X e Y comprendidas entre 0,001 cm y 1 m).

Otra de las ventajas de esta nueva tecnología es que, al contrario que la imagen adquirida con cámaras fotogramétricas, los instrumentos LIDAR son sistemas de sensores activos y, como consecuencia, ofrece importantes ventajas sobre la fotogrametría, ya que puede penetrar a través de las copas de los árboles, facilitando información de la superficie que se encuentra bajo los mismos y permitiendo construir un modelo digital del terreno bajo la cubierta forestal (Renslow, Geenfield & Guay, 2000). Las aplicaciones LIDAR más frecuentes en estudios forestales han sido para la determinación de atributos estructurales básicos, incluyendo la altura, la cobertura del dosel y los perfiles verticales, y partir de ellos medidas indirectas (Navarro-Cerrillo, Sánchez de la Orden, Gómez Bonilla, García Ferrer, Hernández Clemente & Lanjeri, 2010).

El proceso que se ha seguido se puede resumir esquemáticamente en los siguientes pasos:

- Procesamiento de datos LiDAR pertenecientes al vuelo del PNOA realizado por el IGN mediante software específico.
- Cálculo de MDTs (Modelos Digitales del Terreno)
    - MDE (Modelo Digital de Elevaciones)
    - MDS (Modelo Digital de Superficies)
    - MDHV (Modelo Digital de Altura de Vegtación)
- Cálculo de la FCC (Fracción Cabida Cubierta) según tipo de vegetación.
- Discriminación y Determinación de estratos vegetativos.
- Estimación del número de árboles según clase diamétrica.
- Aplicación de ecuaciones de estimación de biomasa según estrato y especie.
- Desarrollo de modelos numéricos para distintos parámetros
- Implementación de un SIG con los resultados obtenidos

2.3 Fotogrametría mediante UAV

Asimismo se realizaron vuelos con un UAV tipo multi-rotor (Fig. 5 izda) equipado con cámara digital RGB (espectro visible) de alta resolución que genera una cobertura fotogramétrica de alta resolución espacial (Fig. 5 drcha) mediante un adecuado solapamiento entre fotogramas y entre pasadas.

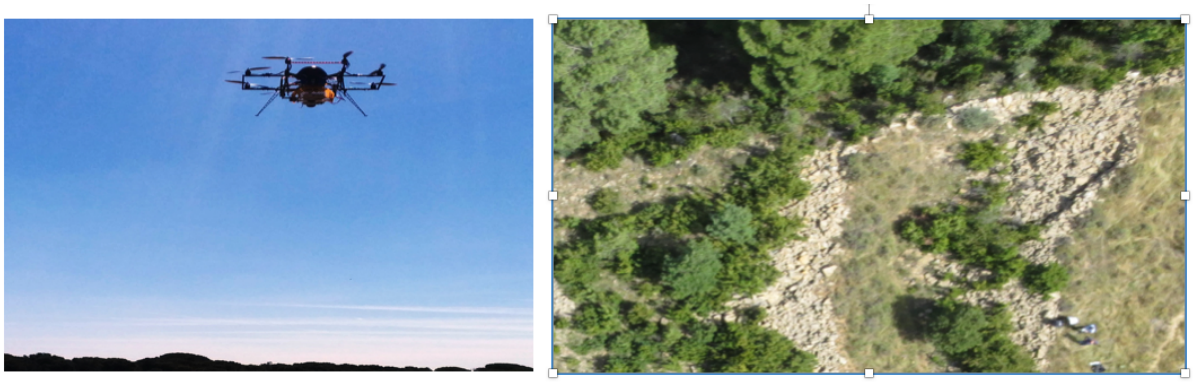


Fig. 4. *(Ejemplo leyenda de una Figura. Muestra una figura que consiste en diferentes tipos de barras.*

Los resultados cartográficos así obtenidos han sido ortofotos de alta resolución, modelos MDS (Modelo Digital de Superficies) y MDE (Modelo de Elevaciones) de precisión, generados a partir de una nube de puntos 3D determinados fotogramétricamente

2.4 Teledetección mediante imágenes satélite

Para el estudio de la evolución de la masa arbórea de la zona IFM en los últimos años, fueron adquiridas 7 imágenes TM (Thematic Mapper), del satélite Landsat 5 correspondientes a la escena con path 198 y row 31. Estas imágenes comprenden parte del territorio de Cataluña incluyendo el Espacio Natural de Alinyà y fueron captadas en las fechas de 28 de julio de 1984, 01 de julio de 2003, 06 de junio de 2006, 28 de junio de 2008, 01 de julio de 2009, 04 de julio de 2007 y 21 de junio de 2006. A partir de dichas imágenes, tras el procesamiento de los datos matriciales se calcularon los índices de vegetación NDVI (Índice de Vegetación por Diferencia Normalizada) propuesto por Rouse, Haas, Schell & Deering (1973) y SAVI (Índice de Vegetación Ajustado al Suelo) propuesto por Huete (1988).

2.5 Modelo de simulación

A la hora de predecir el comportamiento futuro de la masa de *Pinus sylvestris* de la zona IFM se ha recurrido al modelo de simulación CO2FIX v3.1 (Schelhaas, van Esch, Groen, de Jong, Kanninen, Liski, et al., 2004) desarrollado dentro del proyecto europeo CASFOR (Secuestro de Carbono en Forestación y Gestión Forestal Sostenible). Para completar los datos que reclama como entrada el modelo se realizó un estudio climático de la zona, se recurrió a tablas de producción y se recabaron datos a pie de campo por parte de la FCLP, alumnos de la Universidad Autónoma de Barcelona y el equipo de la Universidad de Valladolid.
Se realizaron diversas simulaciones tanto para un modelo de gestión sin ninguna actuación (dejando al bosque en su evolución actual), como para el modelo de gestión propuesto por el CREAF (Centro de Investigación Ecológica y Aplicaciones Forestales) denominado Ps05 (Piqué, Beltrán, Vericat, Cervera, Farriol & Baiges, 2011) desarrollado en el marco del proyecto LIFE12 ENV/ES/000730 Demorgest y enfocado a una mayor captura de CO_2.

2.6 Resumen de software empleado

Los datos en bruto sobre los que se ha trabajado han sido ficheros con formato ".las" solicitados al IGN que contienen la información generada por el vuelo LiDAR efectuado dentro del marco del PNOA. Para el visionado de la nube de puntos LiDAR se ha utilizado el software gratuito FugroViever™, perteneciente a la compañía holandesa Fugro.
Para el análisis, filtrado, cálculo de variables y visionado de puntos se ha recurrido al software de libre distribución FUSION/LDV desarrollado por el Forest Service – USDA (Servicio Forestal del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos). Complementariamente para la gestión y el filtrado se utilizó el software Lastools (Isenburg, 2008).
En cuanto a software SIG se ha trabajado, por una parte, con el programa de código libre y gratuito QuantumGIS desarrollado por la fundación OSGeo (Open Source Geospatial Foundation), y por otra, para el cálculo de índices y la generación de los mapas de resultados se ha utilizado el programa ArcMap™ 10 (ArcGIS®) bajo licencia de Esri.
Para el tratamiento estadístico de los datos y el desarrollo de modelos numéricos se ha recurrido al programa de libre licencia R, nacido en la Universidad de Auckland y desarrollado actualmente por R Development Core Team.
Todo ello se ha visto apoyado con reconocimientos a pie de campo, contraste de datos con el IFN3 (Inventario Forestal Nacional) y el uso de ortofotos y fotogramas de alta resolución actuales obtenidos mediante UAV.

3 Resultados

El tratamiento de los ficheros de datos LIDAR ha permitido obtener la altura sobre el terreno de las diferentes cubiertas vegetales y su fracción de cabida cubierta, variables necesarias para la estimación de la biomasa a través de ecuaciones que ofrece la literatura científica. Además, a través del estudio de los índices de vegetación y las simulaciones con el modelo de crecimiento se consigue evaluar la situación actual de la zona IFM y su posible evolución en los siguientes años.

3.1 Modelos digitales

A partir del procesamiento de los datos LiDAR se obtienen distintos MDTs, en este caso: MDE y MDS (Fig. 5 izda). El vuelo realizado mediante UAV ha hecho posible visualizar y analizar en tres dimensiones (Fig. 5 drcha), y con gran detalle, las diferentes cubiertas vegetales para su identificación. Además, a partir de los modelos MDS y MDE se ha podido calcular, a su vez, un modelo MDHV que ha servido de apoyo a los datos LiDAR.

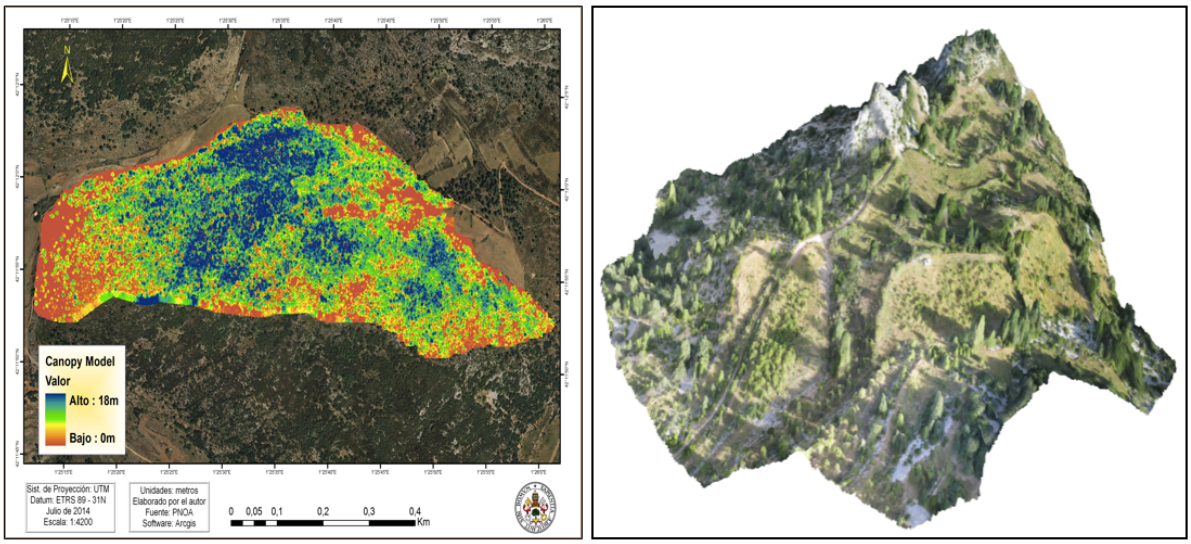


Fig. 5. *(Izda: MDS de la zona IFM a partir de datos LiDAR. Drcha: modelo 3D de una de las zonas ARR a partir de fotogrametría mediante UAV)*

3.2 Estratificación

El proceso de estratificación de la vegetación, a partir de los cálculos estadísticos realizados sobre los datos LiDAR y el apoyo de las ortofotos generadas mediante vuelo con UAV, es fundamental para poder aplicar los modelos o ecuaciones de biomasa. Los resultados de dichos cálculos estadísticos se vuelcan en un SIG para cuantificar la superficie que ocupa cada estrato definido, en este caso: suelo, herbáceo, matorral y arbolado.
A continuación se muestran los resultados (Tabla 1) para la estratificación exigida por el estándar VCS de las zonas ARR.

Tabla 1. FCC para cada uno de los estratos obtenida mediante procesamiento de datos LiDAR y software SIG

Zona ARR	Superficie total	Suelo		FCC Herbáceo		FCC Matorral		FCC Arbolado	
	m^2	m^2	%	m^2	%	m^2	%	m^2	%
1	5960	1644.95	27.60	1822.40	30.58	2391.67	40.13	100.99	1.69
2	15948	7112.12	44.60	5859.54	36.74	2854.95	17.90	121.39	0.76
3	3382	729.44	21.57	1199.95	35.48	1283.45	37.95	169.16	5.00
4	350	57.90	16.54	259.41	74.12	32.69	9.34	0.00	0.00
5	13373	5877.46	43.95	4592.45	34.34	2819.74	21.09	83.35	0.62
6	1058	301.68	28.51	465.89	44.04	290.43	27.45	0.00	0.00
7	3899	1009.87	25.90	1088.86	27.93	1691.20	43.38	109.07	2.80
8	7564	3252.48	43.00	2744.80	36.29	1547.30	20.46	19.43	0.26
9	14467	5640.58	38.99	3554.00	24.57	4717.44	32.61	554.98	3.84
	Total:	25626.49	38.83	21587.29	32.71	17628.86	26.71	1158.36	1.76

3.3 Modelos numéricos

El proceso de procesamiento de datos LiDAR tiene como fase final la obtención de ecuaciones de regresión lineal donde se modela la relación entre una variable dependiente (biomasa, área basimétrica y número de pies) y las variables independientes (estadísticos LiDAR). Se han examinado las relaciones de correlación entre las variables y se ha ido afinando los distintos modelos hasta conseguir altos coeficientes de determinación y bajos errores estándar (Tabla 2). Cabe reseñar que al aplicar modelos en las celdas o al representar en un mapa alguna variable aparezcan celdas en blanco o "huecos" producto de pequeños errores que arroja el comando *Gridmetrics* del programa Fusion que se traducen en celdas con información corrupta que han de ser desechadas

Tabla 2. Modelo numérico para biomasa obtenido por regresión a partir de los estadísticos LiDAR

Modelo de Biomasa	
Correlaciones	*Ecuación*
Error estándar residual = 0,5712	Biomasa de la parcela = Elevación media + Elevación percentil 05 + Elevación percentil 50 + Elevación percentil 75 + Elevación Percentil 90 + Elevación Percentil 95 + Fracción Cabida Cubierta + Elevación Percentil 25 + Elevación CV + Elevación Percentil 99
Múltiple R – cuadrado = 0,9198	
Ajustado R-cuadrado = 0.853	

3.4 Índices de vegetación

El análisis del índice NDVI, desde el año 1984 hasta el año 2011, calculado sobre imágenes multiespectrales del satélite Landsat 5, muestra claramente cómo el vigor de la masa ha disminuido, lo cual respalda el hecho de que la masa se halla en un estado actual de estancamiento en su crecimiento debido a una alta densidad de arbolado.

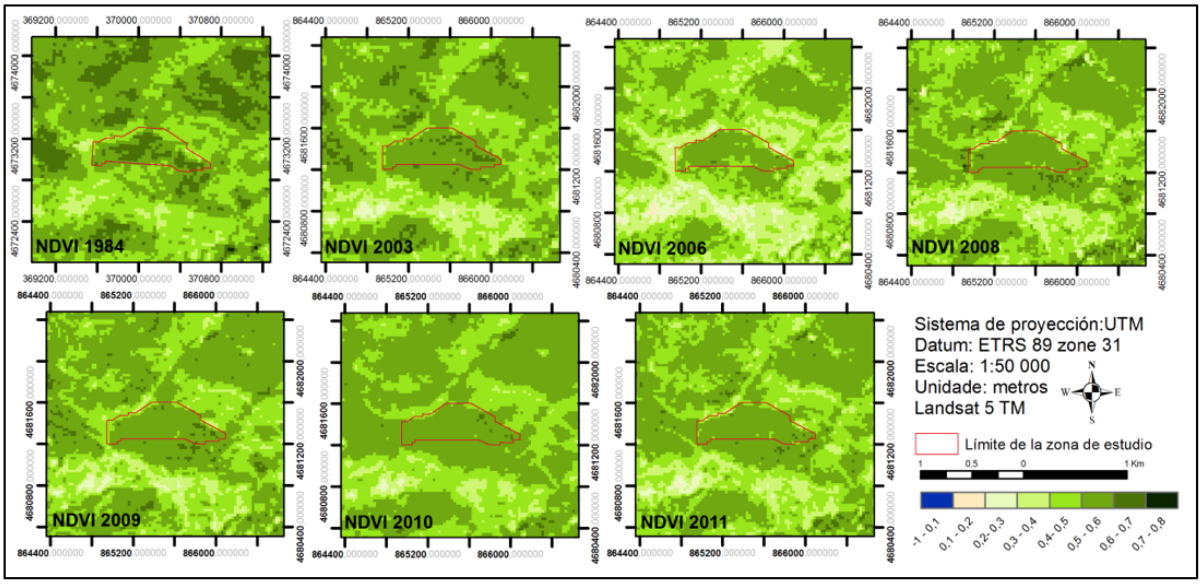


Fig. 6. *(Evolución del índice NDVI desde 1984 hasta 2011 calculado a partir de imágenes del Landsat 5).*

3.5 Simulación evolución futura

Las simulaciones realizadas con el software CO2FIX nos permiten concluir que con el modelo de gestión forestal Ps05, siempre que se incluyan los productos de las cortas como sumidero de carbono, la captura de CO_2 es mayor que optando por no actuar sobre el bosque pues éste se halla prácticamente estancado en su crecimiento compitiendo por los recursos, además de presentarse mucho más susceptible a sufrir incendios, plagas y enfermedades.

En la Fig. 7 izda se representa la evolución del carbono retenido en la biomasa aérea y radical de la masa forestal estudiada en el escenario en el que el bosque es sometido a los tratamientos silvícolas definidos por el modelo de gestión Ps05 con aclareos cada 10 años (se excluye en la representación el carbono retenido en los productos de la madera). Por otra parte, en la Fig. 7 drcha se muestran tres de la simulaciones que se han realizado para representar la evolución del bosque en un escenario de no actuación, en el que se deja a la masa evolucionar de manera natural. Incluso bajo enfoques muy conservadores se infiere que la evolución natural, teniendo en cuenta las condiciones actuales del rodal, tiende a estancarse o incluso a disminuir la cantidad de carbono asimilado. Las distintas curvas responden a distintos grados de mortalidad, competencia y máximo de biomasa área en el rodal.

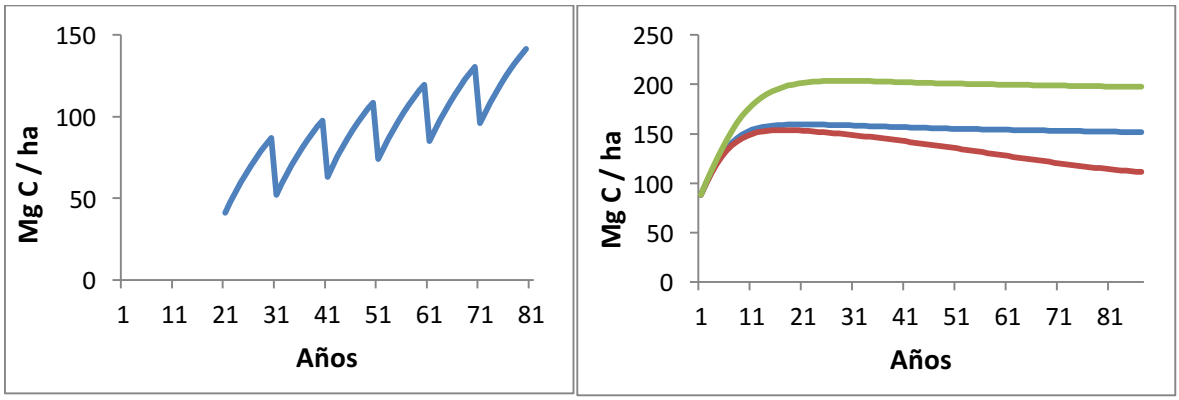


Fig. 7. *(Izda: simulación de la evolución del carbono en la biomasa de la zona IFM bajo gestión forestal sin incluir los productos de la madera. Drcha: simulaciones de la posible evolución de la biomasa de la zona IFM sin gestión forestal)*

4 Conclusiones

Las tecnologías de teledetección empleadas en este proyecto permiten obtener información de la totalidad de las zonas de estudio con lo que se reducen los errores por extrapolación de datos muestrales o por poca representatividad de los mismos, habida cuenta de la heterogeneidad de las parcelas sobre las que se ha trabajado. Se ha demostrado, asimismo, que estas tecnologías son aptas para la determinación de biomasa existente y, por lo tanto, de la cantidad de carbono retenido en la misma, permitiendo distinguir distintos estratos de vegetación. Estos resultados sirven para cuantificar la línea base del proyecto.

Además, a través del procesamiento de estadísticos LiDAR se pueden generar distintos modelos digitales del terreno así como modelos numéricos de diversos parámetros. Esta metodología puede ser complementada mediante teledetección y fotogrametría de baja altura con UAV.

Por otra parte, el estudio de los índices de vegetación, calculados sobre series históricas de imágenes multiespectrales de satélite, junto con las simulaciones ejecutadas en el modelo CO2FIX nos permiten determinar la bondad de la gestión forestal en el bosque de estudio, permitiendo identificar una adicionalidad en la asimilación de CO_2 en comparación con un escenario de no intervención en dicho bosque.

Referencias

Baltsavias E., 2008. *Introduction to airborne LIDAR and physical principles of LIDAR technology.* Institute of Geodesy and Photogrammetry, ETH Zurich, Switzerland. 361 pp.

Croitoru, L., & Merlo, M. (2005). Mediterranean forest values. In *Valuing Mediterranean forests. Toward total economic value* (pp. 378). L. Croitoru & M. Merlo (Eds.), CABI Publishing.

García M., Riaño D., Chuvieco E. & Danson F.M. (2010). Estimating biomass carbon stocks for a Mediterranean forest in central Spain using LiDAR height and intensity data. *Remote Sensing of Environment*, 114, 816-830.

Huete A. R. 1988. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing of Environment*, 25: 295-309.

IPCC (2000). *IPCC Special report. Land use, land use change and forestry. Summary for policy makers*

Isenburg, M. (2008). *LasTools-Efficient Tools for LiDAR Processing, Version 111216,* <<http://lastools.org>> [Consulta: marzo 2015].

Marklund, L. G., & Schoene, D. (2006). Global assessment of growing stock, biomass and carbon stock. *Global Forest Resources Assessment 2005.* Rome: Forestry Department. Food and Agricultural Organization of the United Nations.

Moisés, J., Ibáñez, M., Rodríguez, R., Olarieta J.R. (2004). Estudi climatològic de la Vall d'Alinyà. In: *Els sistemes naturals de la vall d'Alinyà.* Barcelona: Institució Catalana d'Història Natural, p. 17-45.

Montero, G., Ruiz-Peinado, R., & Muñoz, M. (2005). Producción de biomasa y fijación de CO_2 por los bosques españoles. *Monografías INIA, Serie forestal nº 13, 270 p, Madrid.*

Navarro-Cerrillo, R.M., Sánchez de la Orden M., Gómez Bonilla J., García Ferrer, A., Hernández Clemente, R., Lanjeri, S. (2010). Aplicación de imágenes LIDAR para la estimación del índice de superficie foliar (LAI) en encinas [*Quercus ilex* L. subsp. *ballota* (Desf.) Samp.]. *Forests systems 19(1), 61-69.*

Piqué, M.; Beltrán, M.; Vericat, P.; Cervera, T.; Farriol, R.; Baiges, T. 2011. *Models de gestió per als boscos de pi roig (*Pinus sylvestris *L.): producció de fusta i prevenció d'incendis forestals*. Sèrie: Orientacions de gestió forestal sostenible per a Catalunya (ORGEST). Centre de la Propietat Forestal. Departament d'Agricultura, Ramaderia, Pesca, Alimentació i Medi Natural. Generalitat de Catalunya.

Renslow M., Geenfield P. & Guay T. (2000). *Evaluation of Multi-Return LIDAR for forestry applications*. US Department of Agriculture Forest Service Engineering, Remote Sensing Applications. <<http://www.ndep.gov/USDAFS_LIDAR.pdf >> [Consulta: febrero 2016].

Rouse, J. W.; Haas, R. H.; Schell, J. A.; Deering, D. W. 1979. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. *Third ERTS Symposium*, NASA SP-351 I, 309-317.

Schelhaas, M.J, van Esch, P.W., Groen, T.A., de Jong, B.H.J., Kanninen, M., Liski, J. et al. (2004). *CO2FIX V 3.1 - A modelling framework for quantifying carbon sequestration in forest ecosystems.* Wageningen, Alterra, Alterra-rapport 1068.