



7º CONGRESO FORESTAL ESPAÑOL

**Gestión del monte: servicios
ambientales y bioeconomía**

26 - 30 junio 2017 | Plasencia
Cáceres, Extremadura

7CFE01-589

Edita: Sociedad Española de Ciencias Forestales
Plasencia. Cáceres, Extremadura. 26-30 junio 2017
ISBN 978-84-941695-2-6

© Sociedad Española de Ciencias Forestales

Proyectos de carbono de gestión forestal orientada al pago por servicios ambientales dentro del LIFE FOREST CO2

SÁNCHEZ PELLICER, T.¹, TOMÉ MORÁN, J.L.¹, NAVARRO FERNÁNDEZ, J.A.¹, VILLANUEVA HERNÁNDEZ J.L.², CAMPANERO RHODES, I.², RODRÍGUEZ-NORIEGA, P.¹, FERNÁNDEZ LANDA, A.¹

¹ Agresta S. Coop. C/ Duque de Fernán Núñez, 2, 1º 28012. Madrid.

² CESEFOR. Pol. Ind. Las Casas, calle c, parc. 4 - 42005 - Soria - España

Resumen

Gran parte de los montes españoles se encuentran en una situación de ausencia de gestión debido a la baja rentabilidad de los productos tradicionales y a los limitados presupuestos de que disponen los gestores para su mejora. La captación de inversión privada mediante la compensación de emisiones de carbono en las estrategias de responsabilidad social corporativa del sector empresarial es una opción muy interesante que está comenzando a desarrollarse en nuestro país. Dentro de las actividades forestales de compensación de emisiones consideradas dentro del Protocolo de Kioto, la gestión forestal no se está utilizando aún por la falta de metodologías y experiencias claras que demuestren su potencial en España. El Proyecto LIFE FOREST CO2 está trabajando, en este sentido, con dos especies: *Pinus pinaster* Aiton y *Pinus halepensis* Mill.

La tecnología LiDAR permite trabajar en grandes superficies a bajo coste, por lo que se ha seleccionado para desarrollar metodologías específicas de generación de mapas de alta definición de biomasa y calidad de estación (CE) en masas forestales de estas especies.

En esta comunicación se describe su encaje dentro del mecanismo de gestión forestal de compensación de emisiones y, por consiguiente, su utilidad como fuente de financiación alternativa y/o complementaria de dicha gestión forestal.

Palabras clave

Selvicultura, LIDAR, calidad de estación, cambio climático, mitigación.

1. Introducción

Una gran parte de las masas arboladas españolas se encuentra actualmente ausentes de gestión forestal. Muchas de estas masas proceden de repoblaciones forestales de mayor o menor edad y normalmente presentan una densidad arbolada excesiva. Esta falta de gestión motivada por la baja rentabilidad de los productos forestales produce problemas como el aumento de riesgo de grandes incendios forestales, pérdida de biodiversidad o el desarrollo de plagas y enfermedades.

Recientemente ha ido creciendo la idea de usar el pago por servicios ambientales como medida de financiación de algunos de los trabajos necesarios para la gestión forestal, sobre todo para el caso de las propiedades privadas y actualmente existen múltiples ejemplos de éxito.

En los últimos años se ha empezado a desarrollar en España la captación de inversión privada mediante la compensación de emisiones de carbono en las estrategias de responsabilidad social corporativa del sector empresarial. Las empresas calculan la huella de carbono de su actividad y la compensan mediante la compra de créditos en el mercado voluntario de carbono o mediante iniciativas directas de compensación. Dentro de las acciones de compensación de emisiones de gases de efecto invernadero, tanto en el protocolo de Kioto como en los acuerdos de Marrakech la

gestión forestal se planteó como una posibilidad a desarrollar. Sin embargo, mientras que otras opciones de compensación han sido ampliamente desarrolladas como la forestación/reforestación o los cambios de uso de suelo, la gestión forestal quedó relegada a un segundo plano.

A escala nacional, en España se ha venido incentivando en los últimos años la participación pública y privada en el aumento de los sumideros forestales de carbono y la compensación voluntaria de las emisiones de empresas y personas a través de inversiones en incremento y mantenimiento de masas forestales (artículos 89 y 90 de la ley de Economía Sostenible, 2/2011, de 4 de marzo). Por otro lado, se han desarrollado mecanismos específicos para la reducción y compensación de la huella de carbono de los sectores difusos, como el Real Decreto 163/2014, de 14 de marzo, por el que se crea el registro de huella de carbono, compensación y proyectos de absorción de dióxido de carbono.

Dentro de las actividades forestales de compensación de emisiones consideradas dentro del registro nacional, aún no se incluye la gestión forestal por la falta de metodologías y experiencias claras que demuestren su potencial en España.

En este contexto, el proyecto LIFE FOREST CO₂ “Cuantificación de sumideros de carbono forestal y fomento de los sistemas de compensación como herramientas de mitigación del cambio climático” tiene como principal objetivo el fomento de los sistemas forestales y la gestión forestal sostenible como una herramienta para la mitigación del cambio climático a través de la aplicación de la normativa europea relativa a la contabilidad de emisiones y absorciones en el sector del uso de la tierra, cambios en el uso de la tierra y la silvicultura (LULUCF), mejorando la base del conocimiento a nivel local y realizando una aplicación práctica integrada que abarque a todos los sectores implicados de interés, incluidos aquellos responsables de la compensación de emisiones, en la puesta en valor de los mismos. Una de las líneas de trabajo del proyecto es la modelización del secuestro de carbono como consecuencia de actuaciones de Gestión Forestal Sostenible (podas, claras, clareos, etc.) en masas de *Pinus halepensis* Mill. y *Pinus pinaster* Aiton españolas y francesas en sus diversos depósitos: biomasa (aérea y subterránea) a través de herramientas LIDAR, materia orgánica del suelo y materia orgánica muerta, mediante cálculos reconocidos a nivel internacional (IPCC), pero precisados a escala local. En este artículo se presentan los resultados previos sobre modelización de la CE, la selección de itinerarios selvícolas y el estudio de los balances de carbono para la biomasa aérea en el caso del *P. pinaster* en España; concretamente para el área de trabajo seleccionada de los pinares de serranía con aptitud para la producción de madera de la provincia de Soria. A su vez, se describe el encaje de esta metodología dentro del mecanismo de gestión forestal de compensación de emisiones como una herramienta complementaria de financiación para el aumento de la superficie forestal gestionada activamente.

2. Objetivos

El objetivo principal del trabajo presentado en este artículo es el desarrollo de una metodología específica para la compensación de emisiones a través de la gestión forestal sostenible de *P. pinaster* de serranía en la provincia de Soria. Como objetivos específicos se plantean: la selección de áreas de trabajo potenciales, el estudio de itinerarios selvícolas, desarrollo de modelos de balance de carbono, y cartografía de la CE de *P. pinaster* en el área de estudio.

3. Metodología

Dentro de las actividades de pago por servicios ambientales, la compensación de emisiones de gases de efecto invernadero a partir del balance positivo de CO₂ está sujeta a una serie de condicionantes derivados de los acuerdos del protocolo de Kioto, legislaciones y metodologías desarrolladas desde entonces. Para intentar que el mecanismo de generación de créditos de carbono a partir de la gestión forestal encaje dentro de los principios y la filosofía del protocolo de Kioto, se ha desarrollado una metodología específica que tiene en cuenta las líneas metodológicas utilizadas habitualmente en los estándares más utilizados en los mercados de carbono, tanto voluntarios como obligatorios. En este sentido, se ha tenido de referencia en todo momento la filosofía de los estándares MDL (Mecanismo de Desarrollo Limpio) y VCS (Verified Carbon Standard), para confeccionar el mecanismo de compensación.

Para poder conseguir un valor económico de esa gestión activa derivado en los mercados de carbono, uno de los condicionantes es que la gestión elegida dé como resultado una fijación de carbono mayor que la gestión previa. En este caso, la gestión previa sería la línea base del proyecto de carbono. Debido a que las masas objetivo del proyecto son las masas sin gestionar, la línea base es la no gestión. La gestión de una masa forestal queda definida por un determinado itinerario selvícola que se va a aplicar a esa masa a lo largo del tiempo. En caso de masas regulares, el intervalo de tiempo que comprende el itinerario selvícola será desde la fase de repoblado hasta el momento de la corta. La elección de un determinado itinerario selvícola, así como los balances de carbono para todo el turno de la masa, serán distintos en función de la CE de dicha masa. Por otro lado, la silvicultura también se puede enfocar a un determinado tipo de productos. En el caso del *P. pinaster* la madera y la resina han sido los productos que han determinado el tipo de silvicultura llevada a cabo en sus masas.

Como silvicultura alternativa en carbono se propone una silvicultura orientada a la producción de madera, intentando maximizar el carbono fijado por los productos y la bioenergía, que es donde realmente se encuentra la diferencia en fijación de Carbono. En las CE mejores se obtendrá mayor porcentaje de madera destinada a sierra, mientras que en las calidades de estación peores se obtendrá mayor porcentaje de madera destinada a tablero. De este modo, para poder diseñar un modelo de pago por la captación de carbono derivado de una determinada gestión forestal para una masa forestal concreta debemos conocer qué tratamientos son los que arrojan un mejor balance de carbono para esa masa concreta. Y para ello necesitamos conocer *a priori* la CE de esa masa forestal, de cara a adjudicarle un determinado itinerario selvícola.

De acuerdo con todo esto, la metodología diseñada para este proyecto, se desarrolla en las siguientes fases:

- 1- SELECCIÓN DE ÁREAS POTENCIALES
- 2- ESTUDIO DE ITINERARIOS SELVICOLAS
- 3- MODELOS DE BALANCE DE CARBONO (mediante CO₂FIX)
- 4- CARTOGRAFIA DE CALIDAD DE ESTACIÓN (LIDAR y otros)
- 5- INVENTARIO DE CARBONO (LIDAR)
- 6- CONDICIONES DE APLICACIÓN DEL PROYECTO
- 7- METODOLOGIA DE MONITORIZACIÓN DE SISTEMAS AÉREOS CON LIDAR

En este artículo se presenta la metodología y resultados para las cuatro primeras fases.

3.1 Selección de áreas potenciales

Para poder determinar las zonas de estudio y cómo afecta la selvicultura en la fijación de carbono en *P. pinaster* en Castilla y León, fue necesario hacer primero un estudio de su variabilidad, estudiando CE y distribución por CE en Castilla y León. Para ello se ha utilizado la siguiente información: Tipología de los pinares de *P. pinaster*, Terceros Mapa Forestal Español e Inventario Forestal Nacional (MFE, IFN3, 2008), Mapa de la Estructura Geográfica de Castilla y León elaborado por la Junta de Castilla y León y datos de las parcelas de campo realizadas para el proyecto.

En Castilla y León, la subespecie existente es la denominada *mesogeensis*, distribuyéndose por todas las provincias de la Comunidad Autónoma. Dentro de esta subespecie, podemos encontrar dos tipologías básicas: pinares resineros o de llanura y pinares de serranía con aptitud para la producción de madera (Serrada, R. et al., 2008). Para el estudio, se han considerado como masas puras aquellas en las que el *P. pinaster* representa al menos un 70% de la composición específica de las masas. Para este estudio se consideraron más aptas las masas de la segunda tipología: pinares de serranía con aptitud para la producción de madera ya que son masas que han sido sometidas al mismo tipo de gestión durante los últimos años, frente a los pinares resineros, donde la rentabilidad de la resina ha condicionado la gestión selvícola, lo que permite comparar más fácilmente el efecto de un itinerario selvícola con una masa no gestionada.

Las masas más representativas de esta tipología de pinar, se dan principalmente en Soria, Burgos y Ávila, y debido a la mayor disponibilidad de datos se seleccionaron los pinares situados en la zona de las Sierras Ibéricas Castellanas. Posteriormente, junto con los técnicos de la Junta de Castilla y León de la provincia de Soria, se seleccionaron aquellos Montes de Utilidad Pública (MUP) que se sitúan en estas zonas y en los que se ha realizado una selvicultura orientada a la producción de madera durante los últimos años. Dentro de estos montes (MUP 73, 75, 90, 91, 93, 99 y 114), se analizaron tanto clareos como claras y cortas finales así como el año en el que fueron realizados.

3.2 Estudio de los itinerarios selvícolas, determinación de la línea base del estudio y el itinerario selvícola más adecuado en la fijación de carbono.

Se han estudiado los itinerarios selvícolas teóricos propuestos por el manual de gestión y el compendio de Selvicultura para *P. pinaster*; y por otro lado mediante los IFN y las revisiones de ordenación se ha comprobado la aplicación real de esos itinerarios y sus desviaciones.

3.3 Elaboración de modelos teóricos de fijación de carbono mediante la herramienta CO2 FIX.

Estos modelos se realizan bien para la línea base (no actuación selvícola), o bien para el itinerario selvícola óptimo en fijación de carbono. Como se observa en la figura 1, CO2FIX cuenta con diferentes módulos (biomasa aérea, suelo, productos y bioenergía) que contabilizan como reservorio de carbono. El software se alimentó con datos del IFN, tablas de producción, parcelas de campo (de suelo y de vuelo), ecuaciones de biomasa, densidad de la madera, modelos de evolución de masa sin selvicultura, estadísticas anuales del Instituto Nacional de Meteorología, Software Cubifor, datos de reciclabilidad y vida útil de los productos y poder calorífico y emisiones de cada combustible.

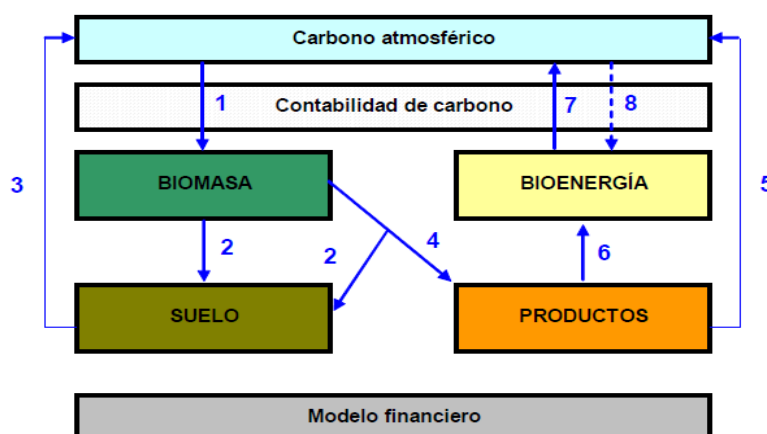


Fig. 1: Esquema de trabajo del Software CO2FIX.

3.4 Modelización y cartografía de la CE de *Pinus pinaster* en el área de estudio

Conocida la edad aproximada de los montes (a partir de los proyectos de ordenación), es conveniente conocer la CE de las zonas seleccionadas. La CE es la capacidad productiva de un lugar frente a una determinada especie forestal y tipo de producto. En Castilla y León, *P. pinaster* presenta cinco CE distintas (del Río et al., 2006).

La cartografía de CE se desarrollará a partir de modelos generados para *P. pinaster* a partir de datos LIDAR complementados con otro tipo de datos relacionados con el índice de sitio como las variables topográficas, de suelo y climáticas. Los datos de LIDAR del PNOA corresponden al vuelo del 2010 con una resolución de 0,5 pulsos/m². Para la estimación de las variables topográficas en el área de estudio, se utilizó un modelo digital del terreno (MDT) con paso de malla de 25 m (CNIG). A partir del MDT de 25 metros de resolución se generó la cartografía de otras variables topográficas necesarias para construir el modelo de CE como son la altitud, la pendiente, y la insolación. La insolación se generó utilizando la herramienta Hillshade disponible en la librería GDAL (QGIS). Para ello, se usó un azimut de 180° (mediodía solar) y un ángulo vertical o altitud correspondiente a la capital de provincia más cercana. Se usaron dos valores de altitud correspondientes a la posición del sol en verano y en invierno, obteniendo de esta forma dos ráster de insolaciones.

El índice de posición topográfica (TPI) compara la elevación de cada celda del MDT con la elevación media de una zona especificada alrededor de la celda. Los valores positivos del TPI representan puntos de mayor cota que la media de sus vecinos (crestas). Los valores negativos representan puntos de menor cota que los de su alrededor (valles) y los valores próximos a cero son o áreas planas o áreas de pendiente constante en las que la pendiente del punto es significativamente mayor que cero. La importancia del TPI se halla en que la cota de un punto no define la topografía sino la relación de esta cota con las próximas (Conejo Muñoz et al., 1992).

Las variables de suelo se obtuvieron de la base de datos geográfica de suelos de Eurasia a escala 1:1.000.000 (SGDBE). Se hizo una reclasificación de las unidades de cartografía del terreno (SMU) en un código numérico dentro de la superficie de estudio, de forma que éstas puedan ser tratadas como una variable paramétrica a la hora de generar los modelos de calidad de estación. En este caso se utiliza la clasificación de suelos de la World Reference Base (WRB) para distinguir los

tipos de suelos presentes en el área de trabajo: Water body, Calcaric Cambisol, Eutric Cambisol, Mollic Cambisol, Calcaric Fluvisol, Calcaric Leptosol, Eutric Leptosol, Calcic Luvisol, Eutric Regosol.

Las variables de clima (temperatura mínima, temperatura máxima y precipitación) se obtuvieron a partir del Atlas Climático de la España Peninsular (Gonzalo, 2010) con una resolución de 1km. A partir de esas variables se generaron 19 variables bioclimáticas a través del paquete “dismo” de R (Hijmans et al., 2015)

Procesado LiDAR de toda la superficie de trabajo

La información LiDAR fue procesada con el programa FUSION (McGaughey and Carson, 2003). Para toda la superficie de estudio se generó un modelo digital de elevaciones (MDE) de 2 metros de resolución a partir de los puntos clasificados como suelo, el MDE fue posteriormente utilizado para la asignar alturas sobre el suelo a todos los retornos clasificados como vegetación (normalización de la nube de puntos). A partir de la nube de puntos normalizada se calculó una batería de 70 estadísticos de estructura de masa arbolada por encima de 2 metros en celdas de 25 m de lado, seleccionado finalmente 13 variables LiDAR (Tabla 1).

Tabla 1. Estadísticos calculados a partir de los retornos de vegetación por encima de 2 metros

Media	Desviación estándar	Varianza	Coefficiente de variación	Rango intercuartílico	Kurtosis	Percentil del 1%	Percentil del 5%
Percentil del 25%	Percentil del 50%	Percentil del 75%	Percentil del 95%	Percentil del 99%	Fracción Cobertura	Canopy relief ratio	

En total se obtuvieron 41 variables predictoras para el cálculo de modelos de predicción de la CE de *P. pinaster* en Soria.

Parcelas de campo

Para el ajuste del modelo se han levantado un total de 110 parcelas de campo, diez de las cuales, fueron levantadas en el mismo punto que las parcelas de suelo y se utilizaron para validar los modelos. De las otras 100, se midieron todos los pies en 60 de ellas, mientras que en las 40 restantes solo se midieron edades y alturas dominantes para calcular la CE. La CE de cada parcela se calculó a partir de los modelos para *P. pinaster* en Castilla y León (del Rio et al., 2006).

Para la localización de las parcelas se diseñó una distribución de las mismas de modo que abarcasen el máximo rango posible de calidades de estación y de variabilidad estructural, de cara a optimizar los modelos de CE y de biomasa (Figura 2).

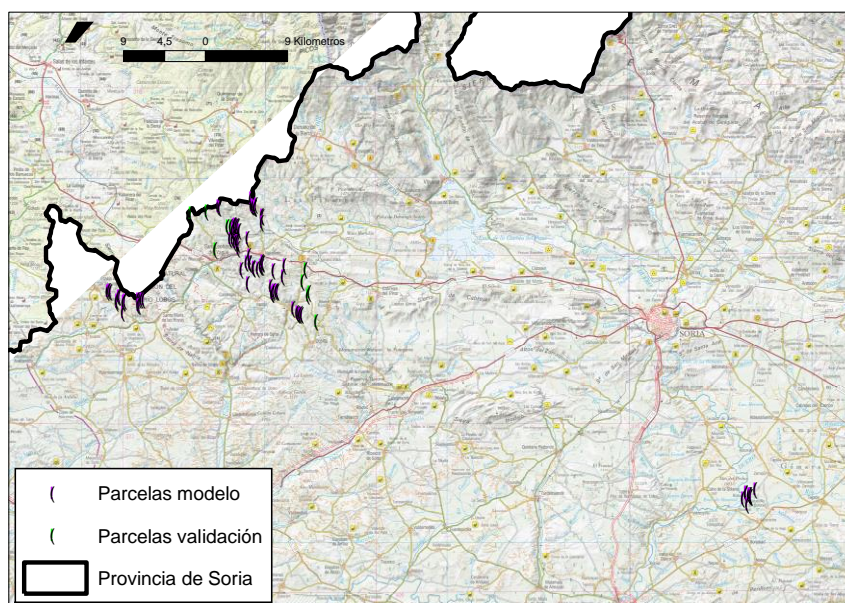


Figura 2. Localización de las parcelas de campo.

4. Resultados

4.1 Selección de áreas potenciales

En la figura 3 se muestran los resultados de la selección de montes para este estudio.

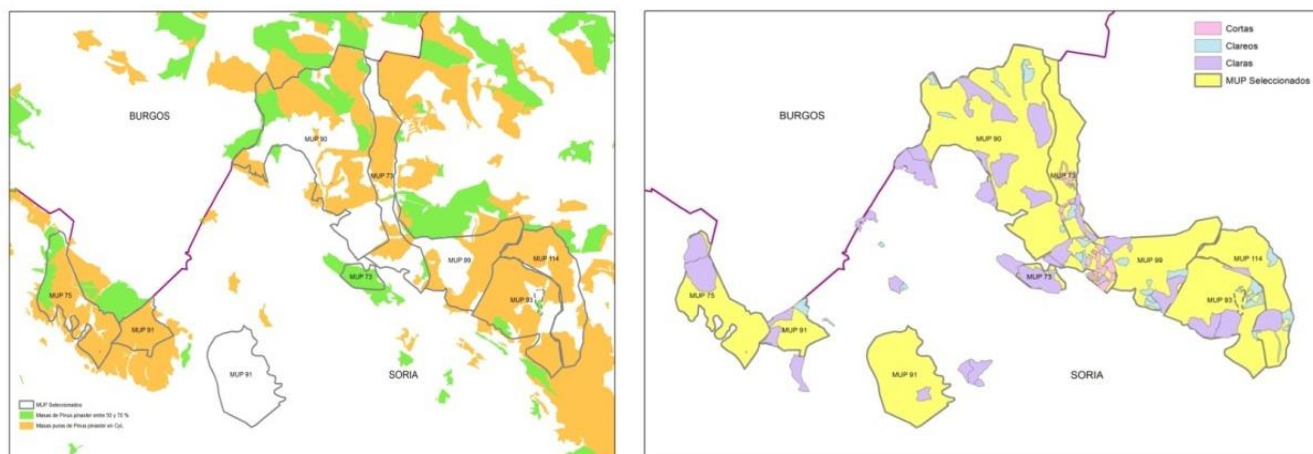


Figura 3. A) Localización de los Montes de Utilidad Pública seleccionados; B) Trabajos selvícolas realizados en los montes seleccionados.

4.2 Selección de itinerarios selvícolas.

En la selección de itinerarios selvícolas, se ha estudiado en primer lugar lo que se considera la línea base del proyecto, que se trata de un supuesto de mínimos donde estimar las fijaciones de carbono. En este estudio se consideran como línea base aquellas zonas y montes donde, por sus características, no se aplica ningún tipo de silvicultura. Esta línea base ha sido elegida debido a que en diferentes montes privados las masas de *P. pinaster* se encuentran sin ningún tipo de actuación y tienen un gran potencial de aumentar su secuestro de carbono.

Al tratarse de pinares de serranía con potencial de producción de madera se realiza un itinerario selvícola con un régimen de claras intensivo, lo cual favorece la obtención de fustes de

grandes dimensiones especialmente en las mejores calidades de estación. Las fases del itinerario selvícola alternativo a la “Línea Base” serían las presentadas en la tabla 2.

Tabla 2. Mejor itinerario selvícola orientado a producción de madera.

Operación	Característica	Estación buena	Estación mala
Densidad Inicial	SIEMBRA	5000-13000 pies/ha	5000-13000 pies/ha
Aclareo	Densidad final 1400-1700 pies/ha	Entre 10-15 años	Entre 10-20 años
1ª Clara+ poda baja	Por lo bajo (30-35)% Área bisimétrica (G)	A los 20-25 años	A los 30-35años
2º Clara	Por lo bajo 30% G	A los 30-35 años.	A los 40-45 años.
3ª Clara	Por lo bajo (25-30)% G	A los 40-45 años	A los 55-65 años
4ª Clara	Por lo bajo (25-30)% G	A los 50-55 años.	No se hace
Corta de Regeneración	Puede ser por fajas, total o arboles padre	TURNO 60- 75	TURNO: 75-90 años

4.3 Resultados modelización CO2FIX

Tabla 3. Comparación de fijación de carbono según la CE. Los datos se dan como promedios de toneladas de carbono fijadas en tres periodos de tiempo (50, 100 Y 150 años)

CE	MEDIA CARBONO FIJADO EN [Tn/ha]		
	50 años	100 años	150 años
calidad 12	41,14	131,77	152,93
calidad 15	50,1	125,62	165,48
calidad 18	66,55	153,76	209,68
calidad 21	94,15	201,01	262,3
calidad 24	203,68	282,56	389,01

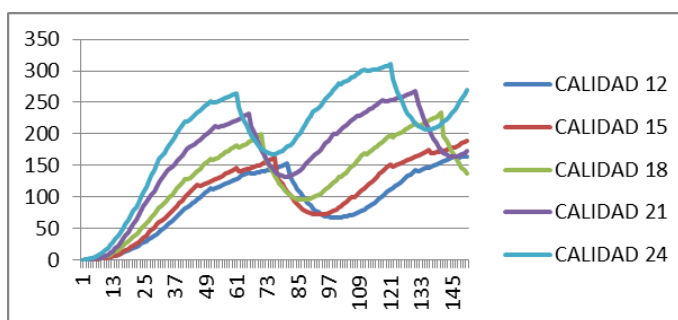
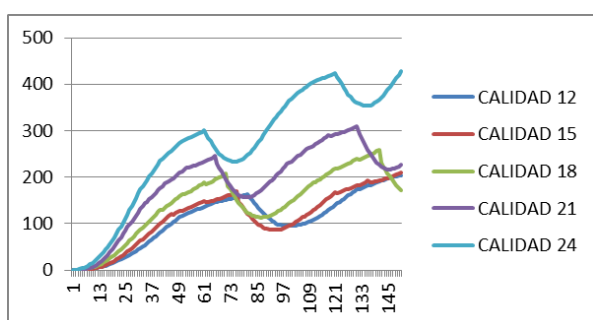


Figura 4. Evolución de la fijación de carbono, en itinerarios de producción de madera según la CE: A) incluyendo el carbono fijado en el reservorio de Bioenergía; B) sin incluir el reservorio Bioenergía

Como se observa en la figura 4 y en la tabla 3, la fijación de carbono sigue un aumento exponencial, en función de la CE, como consecuencia del aumento del carbono fijado en los productos y en la Bioenergía como subproducto. En la figura 5 se puede ver el carbono fijado en el escenario base caracterizado por la ausencia de selvicultura.

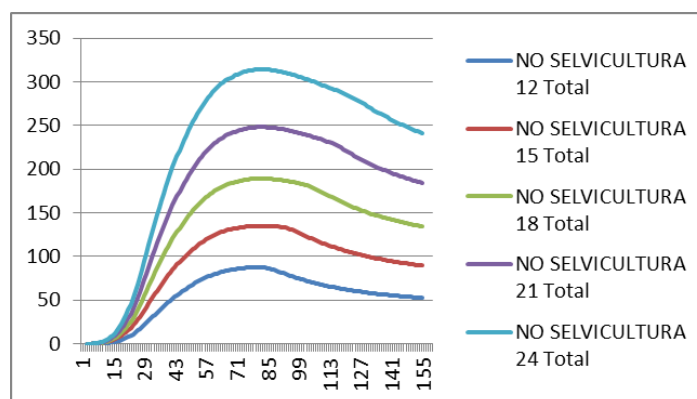


Figura 5. Comparación de fijación carbono total por CE (sin selvicultura) en tn/ha a lo largo de 150 años

En este escenario, los reservorios más importantes de biomasa son la Biomasa Aérea y el suelo. Como se observa en la figura 5 cada una de las masas según su CE tienen un máximo de almacenaje de carbono en torno a los 80 años, produciéndose a partir de ese momento una situación en el que la competencia es tan fuerte y la edad empieza a ser tan avanzada, que la pérdida de mortalidad no es compensada por el crecimiento de los supervivientes. Así mismo dado el carácter altamente heliófilo y la competencia de copas, no se puede considerar como el inicio de un nuevo ciclo de regeneración.

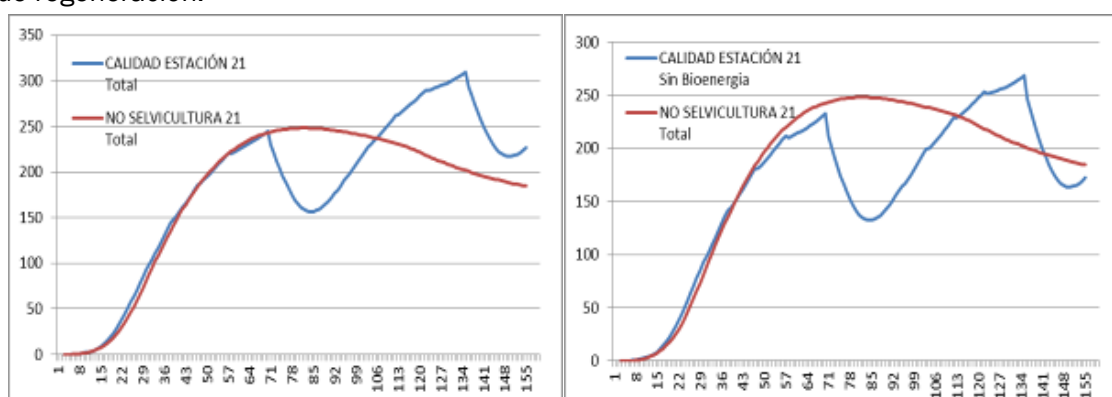


Figura 7. Comparación de fijación carbono CE 21, con y sin selvicultura en Tn/ha a lo largo de 150 años. (A) Contabilizando bioenergía, B) sin contabilizar bioenergía)

A continuación se presentan los resultados comparativos en una serie de 150 años, para dos calidades de estación (una mala y una buena) entre la ausencia de selvicultura y la aplicación de selvicultura orientada a madera, considerando la bioenergía como reservorio cuantificable en fijación (Figura 6ª y 7A) y el itinerario selvícola sin cuantificar la bioenergía (Figura 6B y 7B).

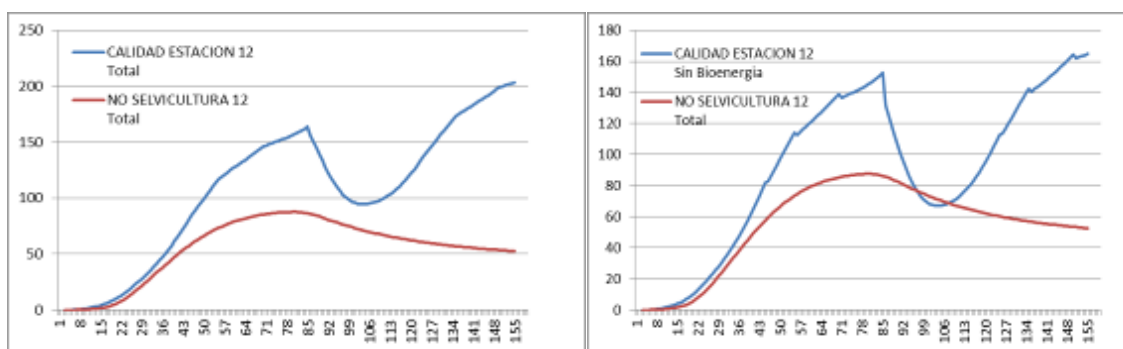


Figura 6. Comparación de fijación carbono CE 12, con (azul) y sin selvicultura (rojo) en tn/ha a lo largo de 150 años. (A) Incluyendo bioenergía, B) sin contabilizar bioenergía

Como se observa en las figuras 6 y 7, la mayor ganancia de carbono relativa se obtiene en calidades de estación malas, ya que en ese caso la selvicultura ayuda notablemente al crecimiento en volumen. Sin embargo, en calidades buenas, al primar el incremento en diámetros, el crecimiento de biomasa por hectárea se puede ver penalizado a partir de un cierto punto (figura 7).

4.4 Modelización y cartografía de la CE de *P. pinaster* en el área de estudio

Se obtuvieron modelos de CE paramétricos y no paramétricos. Posteriormente, todos los modelos se validaron con las 10 parcelas independientes y se seleccionó el que mejor ajuste tuvo en la validación, concretamente un modelo no paramétrico generado con Random Forest (Breiman L., 2001.). El modelo seleccionado se aplicó al stack de raster y se generó un mapa de calidades de estación para las masas de *P. pinaster* en la provincia de Soria con una resolución de 25 metros (Figura 8).

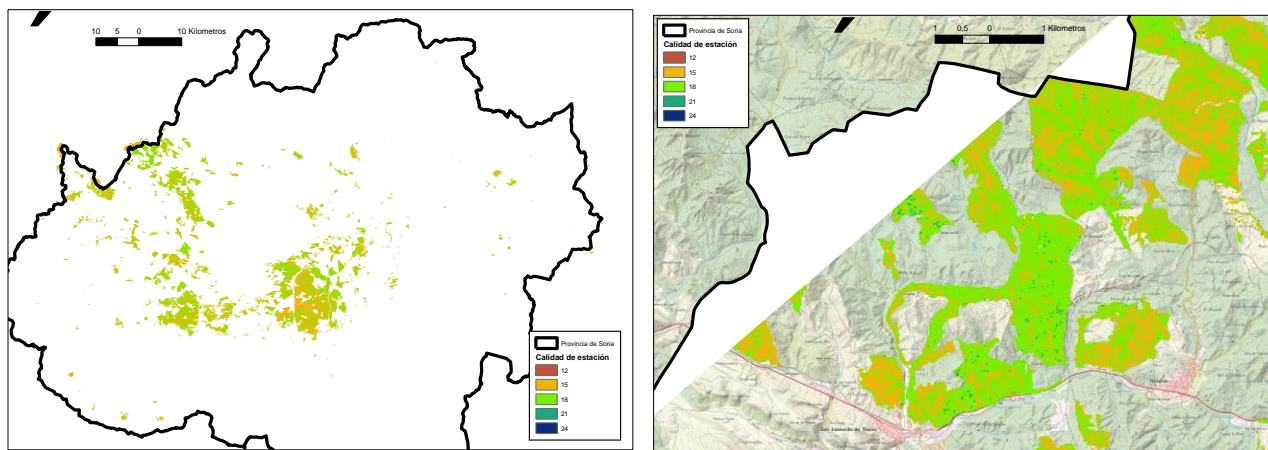


Figura 8. A) Cartografía de CE en las masas de *P. pinaster* en la provincia de Soria. B), detalle de la zona de estudio.

En la Tabla 4 se puede ver la bondad de ajuste del modelo seleccionado como resultado de la validación sobre las 10 parcelas independientes.

Tabla 4, Resultados de la validación del modelo seleccionado con las 10 parcelas independientes.

Sesgo	Error Absoluto Medio	Error Cuadrático Medio
1.14	3.57	4.50
6.53%	20.42%	25.76%

5. Discusión

Con los resultados preliminares obtenidos, se considera que este estudio puede servir como base para plantear proyectos nacionales de compensación de emisiones basados en selvicultura para *P. pinaster*. Parece interesante poder centrar los proyectos de compensación en masas artificiales repobladas o sembradas de CE inferior, donde la selvicultura sin duda supone un incremento de crecimientos y de mejora en el reservorio de productos.

Así mismo, es lógico plantear proyectos de compensación en zonas menos productivas donde es más difícil encontrar rentabilidad económica, por la baja productividad, pudiendo de esta forma justificar el criterio de adicionalidad que es necesario en proyectos de compensación de acciones de mejora en fijación de carbono que no se realizan habitualmente.

Si bien mediante este estudio se han consiguiendo modelizar hipótesis teóricas que pueden servir de base para proyectos de compensación, será necesario, cuando se plantee un proyecto de compensación, ajustar el modelo a la especie de estudio y a las especificidades del lugar, marcando también las condiciones específicas del proyecto de compensación.

Otra de las observaciones a tener en cuenta es la importancia de poder incluir la Bioenergía como sustitutivo de los combustibles fósiles en futuros proyectos de compensación con selvicultura. Siempre que se demuestre la no duplicidad en la contabilidad, se podría tener en cuenta en un proyecto de compensación, lo cual supondría un aumento de las toneladas almacenadas por hectárea disminuyendo el precio de la tonelada de carbono compensada.

En el marco internacional del cambio climático y los bosques, en concreto en lo referente a la mitigación del cambio climático mediante actividades del sector UTCUTS (Uso de la tierra, Cambio de uso de la tierra y selvicultura) se ha dado prioridad en los últimos años a la fo/reforestación y a la deforestación. En el Protocolo de Kioto, tanto en los requerimientos de los inventarios nacionales como en los mecanismos de flexibilidad, la gestión forestal quedó relegada a un segundo plano. En los acuerdos de Marrakech la gestión forestal fue considerada como actividad a ser recogida de forma voluntaria por los países y en el MDL) sólo se consideraron actividades de forestación/reforestación. No obstante, con el surgimiento de los mercados voluntarios se empezaron a tener en cuenta otras actividades que contribuyen a mitigar el cambio climático. Las primeras iniciativas que surgieron fueron relacionadas con la deforestación evitada a los que posteriormente se incluyeron otras actividades (proyectos conocidos como REDD o REDD+), pero también los estándares incluyeron actividades como la que se plantea en el presente trabajo. Entre los distintos estándares que surgieron como consecuencia de la preocupación internacional por el cambio climático, el precursor en materia de bosques ha sido el VCS que cuenta con 4 metodologías específicas para gestión forestal mejorada (IFM, por sus siglas en inglés) pero hasta la fecha únicamente alrededor del 10% de los proyectos registrados por este estándar son de esta actividad.

Hasta el momento, los proyectos de gestión forestal no han tenido un gran impacto en el mercado internacional de carbono. No obstante, y pese a que, como se concluye en el trabajo, su potencial secuestro de carbono por unidad de superficie no es muy alto, se trata de una alternativa a poner en valor por dos cuestiones fundamentales: costo-efectividad y superficie disponible. En cuanto al primer aspecto, pese a que no se analiza con detalle en el presente estudio, los costos de implementación de un proyecto REDD o de reforestación son significativamente más altos por hectárea que una mejora en la gestión forestal. Por otro lado, a nivel nacional las superficies

potenciales de gestión forestal “mejorada” son significativamente mayores que las de re/forestación y deforestación. A nivel internacional podrían aplicar estos dos factores con la excepción en el caso de REDD+ las superficies disponibles son también altas. Es importante resaltar que a este nivel internacional los proyectos de gestión forestal tienen potencial tanto como proyectos independientes pero aún mayor en el marco de proyectos REDD+.

6. Conclusiones

- CO2 fix es una herramienta válida para modelizar stocks de carbono.
- Las masas de *Pinus pinaster* de Serranía con mayor aumento en el stock de CO2 como consecuencia de la silvicultura activa corresponden a las situadas en zonas de peor calidad de estación.
- El LiDAR, incluido el MDT generado a partir del mismo y sus variables topográficas derivadas, junto con las variables climáticas, son buenos predictores de la calidad de estación de las masas forestales.
- A escala nacional, los proyectos de carbono de gestión forestal ofrecen una oportunidad para financiar una parte de la silvicultura en gran cantidad de superficie de masas de *Pinus pinaster* que actualmente no se gestiona.
- A pesar de que el potencial de secuestro de carbono por unidad de superficie no es muy alto, los proyectos de gestión forestal son una alternativa a tener en cuenta en los mercados internacionales debido al ratio costo-efectividad y a la gran superficie disponible.

7. Agradecimientos

Los redactores de la presente comunicación quieren agradecer a los técnicos de la Junta de Castilla León en Soria, a Elena Moreno Amat y a Celia Martínez Alonso por su asesoramiento en los montes públicos de Soria, las variables climáticas y la metodología respectivamente.

8. Bibliografía

Breiman, L.; 2001. Random forests. *Mach. learn.*, 5-32.

Conejo Muñoz, R.; Morales Bueno, R.; Pérez de la Cruz, J.L. y Urbano Montero, J.A.; 1992. “Conjuntos difusos y reconocimiento de rasgos del terreno”. II Congreso Español sobre Tecnologías y Lógica Fuzzy, Madrid.

del Rio, M., López, E.; Montero, G.; 2006. Manual de gestión para masas procedentes de repoblación de *Pinus pinaster* Ait., *Pinus sylvestris* L. y *Pinus nigra* Arn. Castilla y León. Consejería de Medio Ambiente. Junta de Castilla y León.

Gonzalo, J.; 2010. Diagnóstico Fitoclimática de la España Peninsular. Hacia un modelo de clasificación funcional de la vegetación y de los ecosistemas peninsulares españoles. Serie técnica Naturaleza y Parques Nacionales. Organismo Autónomo de Parques Nacionales, Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino de España.

Hijmans, R.J.; Phillips, S.; Leathwick, J.; Elith, J.; 2015. Dismo: Species Distribution Modeling. R package version 1.0-12. <http://CRAN.R-project.org/package=dismo>

Serrada, R.; Montero, G.; Reque, J.A.; 2008. Compendio de silvicultura aplicada en España. Fundación Conde del Valle de Salazar. Madrid.