

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

**ESCOLA TÈCNICA SUPERIOR D'ENGINYERIA
AGRONÒMICA I DEL MEDI NATURAL**

MÀSTER EN INGENIERÍA DE MONTES



Análisis comparativo de la fijación de carbono tras claras selectivas para aprovechamiento bioenergético en fustales de pino carrasco (Pinus halepensis Mill.) con teledetección

Curso académico: 2017/2018

Autora: Rebeca Aleix Amurrio

Tutor: Prof. Dr. José Vicente Oliver Villanueva

Tutor externo: Fernando Pradells Monzó

Directora experimental: Dra. Victoria Lerma Arce

València, julio de 2018



TÍTULO

Análisis comparativo de la fijación de carbono tras claras selectivas para aprovechamiento bioenergético en fustales de pino carrasco (*Pinus halepensis* Mill.) con teledetección.

RESUMEN

El trabajo tiene como objetivo evaluar la influencia de la gestión forestal en la fijación de carbono. Para ello, se seleccionan y analizan parcelas representativas tratadas por claras selectivas y, como parcelas testigo, parcelas no tratadas de *Pinus halepensis* en estrato de fustal en MUP del término municipal de Enguera (València) procedentes de una regeneración artificial efectuada en 1950.

La fijación de carbono por crecimiento del árbol entre dos períodos de tiempo se calcula tanto *in situ* como por medio de la constelación de satélites del programa Copernicus de la ESA y la Comisión Europea. Concretamente, el trabajo establece una correlación entre el cálculo de biomasa en fustal mediante inventario en campo y los valores de reflectividad de la imagen de satélite, calculando el incremento de biomasa antes y después de la intervención. Por último, dicho incremento se compara con el resultado obtenido en las parcelas testigo.

Se evidencia que existe una variación notable en los incrementos en la fijación de carbono tras los tratamientos selvícolas entre las parcelas estudiadas en el periodo evaluado, por lo que la gestión forestal sostenible influye directamente en la dinámica de la fijación de carbono.

El carbono exportado en al aprovechamiento de las claras para uso bioenergético se ha de contabilizar, al igual que el efecto sustitutivo de la biomasa en su valoración energética frente otras fuentes de energía no renovable. Además, cabe decir que dicho aprovechamiento minimiza el riesgo de incendio y, por consiguiente, las emisiones súbitas de carbono a la atmósfera.

Palabras clave

Fijación de carbono; aprovechamiento forestal; bioenergía; prevención de incendios; teledetección.

Alumna: Rebeca Aleix

Tutor: Prof. Dr. José Vicente Oliver

Tutor externo: Fernando Pradells Monzó

Directora experimental: Dra. Victoria Lerma Arce

Valencia, julio de 2018



TITLE

Comparative analysis of carbon fixation after selective thinnings for bioenergy use in mature stands of Aleppo pine (*Pinus halepensis* Mill.) with remote sensing.

ABSTRACT

The objective of the work is to assess the influence of the forest management on carbon fixation. This is the reason why representative selective plots of mature stands of *Pinus halepensis* are analysed in scenarios of selective treated and untreated plots in the public forest Navalón V-074 of the municipality of Enguera (València) from an artificial regeneration by sowing executed in 1950.

The carbon fixation by tree growth in two terms is calculated *both in situ* and through the satellite constellation of the Copernicus program of the ESA and the European Commission. Specifically, the work establishes a correlation between the calculation of biomass in mature stand by field inventory and the reflectance values of the satellite image, calculating the biomass increase before and after the intervention. Finally, this increase is compared with the result obtained in the control plots.

There is a notable variation in the increases in carbon fixation after silvicultural treatments among the plots studied in the evaluated period, so that sustainable forest management has a direct influence on the dynamics of carbon fixation.

The carbon exported in the biomass used as bioenergy should be accounted, as well as the substitution effect of biomass in its energy valorisation against other sources of non-renewable energy. In addition, the selective thinnings minimize the risk of forest fires and, consequently, the sudden emissions of carbon into the atmosphere.

Key words

Carbon fixation; forest use; bioenergy; fire prevention; remote sensing

Student: Rebeca Aleix

Tutor: Prof. Dr. José Vicente Oliver

External tutor: Fernando Pradells Monzó

Experimental tutor: Dra. Victoria Lerma Arce

Valencia, July 2018



TÍTOL

Anàlisi comparativa de la fixació de carboni després de clares selectives per a l'aprofitament bioenergètic en fustals de pi blanc (*Pinus halepensis* Mill.) amb teledetecció.

RESUM

El treball té com a objectiu avaluar la influència de la gestió forestal en la fixació de carboni. Per a això, se seleccionen i analitzen parcel·les representatives tractades per clares selectives i no tractades de *Pinus halepensis* en estrat de fustal en forests públiques del terme municipal d'Énguera (València) procedents d'una regeneració artificial per sembra efectuada en 1950.

La fixació de carboni per creixement de l'arbre entre dos períodes de temps es calcula tant *in situ* com per mitjà de la constel·lació de satèl·lits del programa Copernicus de l'ESA i la Comissió Europea. Concretament, el treball estableix una correlació entre el càlcul de biomassa en fustal mitjançant inventari en camp i els valors de reflectivitat de la imatge de satèl·lit, calculant l'increment de biomassa abans i després de la intervenció. Finalment, aquest increment es compara amb el resultat obtingut en les parcel·les testimoni.

S'evidencia que existeix una variació notable en els increments en la fixació de carboni després dels tractaments silvícoles entre les parcel·les estudiades en el període avaluat, per la qual cosa la gestió forestal sostenible influeix directament en la dinàmica de la fixació de carboni.

El carboni exportat en l'aprofitament de les clares per a usos bioenergètics s'ha de comptabilitzar, igual que l'efecte substitutiu de la biomassa en la seva valoració energètica front altres fonts d'energia no renovables. A més, cal dir que aquest aprofitament minimitza el risc d'incendi i, per tant, les emissions sobtades de carboni a l'atmosfera.

Paraules clau:

Fixació de carboni; aprofitament forestal; bioenergia; prevenció d'incendis; teledetecció.

Alumna: Rebeca Aleix

Tutor: Prof. Dr. José Vicente Oliver

Cotutora experimental: Dra. Victoria Lerma Arce

Cotutor extern: Fernando Pradells Monzó

València, juliol 2018



AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quiero dar las gracias a AMUFOR (Asociación de Municipios Forestales de la Comunitat Valenciana) y en concreto a Fernando y a Javier, por transmitirme su conocimiento, experiencia y profesionalidad en el sector.

Gracias Oli, por brindarme la oportunidad de desarrollar el presente trabajo, por tus sabios consejos y sobre todo por no cerrarnos nunca las puertas al saber.

Gracias Vicky, tu profesionalidad y espíritu te caracterizan, siempre es y será un placer trabajar contigo.

Gracias a David, gran experto en teledetección, por invertir tu tiempo en enseñarme, por tu paciencia y humor.

Gracias a Evaristo, por la profesionalidad en el trabajo realizado que nos ha servido de base en el presente estudio.

A mi familia, mis padres y hermana, gracias a ellos soy quien soy hoy en día, estoy muy orgullosa de vosotros.

A Edu, por seguir siendo el pilar que me sostiene día a día.

«Hace falta más gestión, valorar los servicios ambientales que prestan los bosques y empoderar a la sociedad rural para que pueda gestionar sus recursos» (Pradells, 2018)

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. BIOECONOMÍA, CAMBIO CLIMÁTICO Y BOSQUES	1
1.1.1. Bioeconomía.....	2
1.1.2. Cambio climático	2
1.1.2.1. Importancia de los bosques en la mitigación del cambio climático	2
1.1.2.2. Reducción de emisiones de GEI por efecto sustitutivo y fijación de carbono	3
1.1.3. Gestión forestal sostenible	5
1.1.3.1. Gestión de la biomasa forestal con fines energéticos.....	5
1.1.3.2. Situación actual de los ecosistemas forestales mediterráneos y su gestión	6
1.1.3.3. Ecosistemas forestales valencianos	7
1.2. ESTADO DEL ARTE.....	8
1.2.1. <i>Influencia de la silvicultura sobre la fijación de carbono en biomasa</i>	8
1.2.2. <i>Aplicación de la teledetección para la cuantificación de carbono en biomasa aérea</i> 9	9
1.3. JUSTIFICACIÓN	10
2. OBJETIVOS	11
2.1. OBJETIVO GENERAL.....	11
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	11
3. MATERIAL Y MÉTODOS.....	12
3.1. DESARROLLO DE UN MODELO DE CUANTIFICACIÓN Y EVALUACIÓN DE CARBONO FIJADO EN BIOMASA ARBÓREA EN FUSTALES DE <i>PINUS HALEPENSIS</i> BASADO EN MÉTODOS DE APRENDIZAJE AUTOMÁTICO APLICADOS SOBRE IMÁGENES SATELITALES	12
3.1.1. <i>Selección del área de estudio: localización y caracterización</i>	12
3.1.2. <i>Materiales utilizados</i>	13
3.1.3. <i>Métodos</i>	14
3.1.3.1. Selección de las parcelas	14
3.1.3.2. Inventario en campo y cuantificación de la biomasa a través de ecuaciones alométricas (2011 y 2017).....	14
3.1.3.3. Caracterización de las parcelas	14
3.1.3.3.1. <i>Caracterización de las parcelas en 2011</i>	14
3.1.3.3.2. <i>Caracterización de las parcelas en 2017</i>	14
3.1.3.4. Cuantificación de la biomasa.....	15
4.1.3.4.1. <i>Cuantificación de la biomasa 2011</i>	15
4.1.3.4.2. <i>Cuantificación de la biomasa 2017</i>	15
3.1.3.5. Obtención y análisis de las imágenes satelitales	15
3.1.3.5.1. <i>Procesado de las imágenes: reflectividad y bandas</i>	15
3.1.3.6. Relación de biomasa y reflectividad a través de procesos gaussianos	16
3.2. ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DE TRATAMIENTOS DE CLARAS SELECTIVAS POR LO BAJO EN MASAS ADULTAS DE <i>PINUS HALEPENSIS</i> SOBRE LA DINÁMICA DE CRECIMIENTO Y LA FIJACIÓN DE CARBONO EN BASE A LOS MODELOS DESARROLLADOS	18
3.2.1. <i>Aplicación del modelo de cuantificación de biomasa</i>	18
3.2.2. <i>Zonificación de parcelas</i>	18
3.2.3. <i>Caracterización de las intervenciones realizadas</i>	19
3.2.4. <i>Análisis estadístico de la existencia e incremento en carbono debidas a la gestión forestal</i> 19	19
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	20
4.1. DESARROLLO DE UN MODELO DE CUANTIFICACIÓN Y EVALUACIÓN DE CARBONO FIJADO EN BIOMASA ARBÓREA EN FUSTALES DE <i>PINUS HALEPENSIS</i> BASADO EN MÉTODOS DE APRENDIZAJE AUTOMÁTICO APLICADOS SOBRE IMÁGENES SATELITALES	20

4.1.1. Resultado de la aplicación de métodos de aprendizaje automático aplicados sobre imágenes satelitales.....	20
4.1.1.1. Resultados obtenidos en 2011.....	20
4.1.1.2. Resultados obtenidos en 2017.....	21
4.2. ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DE TRATAMIENTOS DE CLARAS SELECTIVAS POR LO BAJO EN MASAS ADULTAS DE <i>PINUS HALEPENSIS</i> SOBRE LA DINÁMICA DE CRECIMIENTO Y LA FIJACIÓN DE CARBONO EN BASE A LOS MODELOS DESARROLLADOS.....	22
4.2.1. Existencias de carbono.....	22
4.2.1.1. T-test sobre significancia de las existencias de carbono en función de la realización de los tratamientos selvícolas.....	23
4.2.2. Incrementos de carbono fijado.....	24
4.2.2.1. T-test sobre significancia de incrementos de fijación de carbono en función de la realización de los tratamientos selvícolas.....	24
5. CONCLUSIONES.....	27
6. BIBLIOGRAFÍA.....	28
7. ANEJOS.....	37
ANEJO 1.....	1
MODELOS PARA ESTIMAR LA CAPACIDAD DE FIJACIÓN DE CARBONO DE LAS CONÍFERAS ESPAÑOLAS.....	1
ANEJO 2. RESULTADOS OBTENIDOS SEGÚN ESCENARIO.....	2

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. VÍA DE DESCARBONIZACIÓN COHERENTE CON EL ACUERDO DE PARÍS (ROCKSTRÖM ET AL., 2017)	1
FIGURA 2. PRODUCCIÓN PRIMARIA DE ENERGÍA PROCEDENTE DE FUENTES RENOVABLES, EU-28, 1990-2016 (MTEP). FUENTE: EUROSTAT (2018A)	4
FIGURA 3. PROPORCIÓN DE ENERGÍA PROCEDENTE DE FUENTES RENOVABLES 2004 – 2016. FUENTE: EUROSTAT (2018B).....	4
FIGURA 4. ÁREAS DE LA RED NATURA 2000 EN LA CV CON LOS MUNICIPIOS QUE FORMAN PARTE DE LA NORMA DE GESTIÓN “MACIZO DEL CAROIG” EN EL MUP V-074 COMO ÁREA PILOTO DE ESTUDIO (IZQUIERDA) Y REPRESENTACIÓN DE LA INFLUENCIA DEL ZEC Y ZEPa EN EL ÁREA DE ESTUDIO (DERECHA). FUENTE: FORBIOENERGY (2018)	12
FIGURA 5. ÁREA DE ESTUDIO QUE INCLUYE PARCELAS GESTIONADAS (PUNTOS VERDES) Y PARCELAS NO GESTIONADAS (PUNTOS ROJOS) (WGS1984 UTM30) FUENTE ORTOFOTO: ©INSTITUT CARTOGRÀFIC VALENCIÀ.....	18
FIGURA 6. VALORES DE BIOMASA MEDIDAS VS. ESTIMADOS CON LANDSAT 5 EN 2011. M.A.R: AJUSTE DE REGRESIÓN DEL EJE MAYOR; N: NÚMERO DE MUESTRAS; B: SESGO MEDIO; R ² COEFICIENTE DE DETERMINACIÓN; S: DESVIACIÓN ESTÁNDAR DEL SESGO Y RMSE: ERROR CUADRÁTICO MEDIO	20
FIGURA 7. VALORES DE BIOMASA MEDIDOS VS. ESTIMADOS CON LANDSAT 8 EN 2017	21
FIGURA 8. RESULTADO DE LA APLICACIÓN DE LAS ECUACIONES. BIOMASA OBTENIDA EN 2011 (IZQUIERDA) Y BIOMASA EN 2017 (DERECHA) FUENTE ORTOFOTO: ©INSTITUT CARTOGRÀFIC VALENCIÀ	21
FIGURA 9. BOXPLOT O DIAGRAMA DE CAJAS DE PARCELAS DE EXISTENCIAS DE CARBONO EN 2011 (IZQUIERDA) Y EN 2017 (DERECHA).....	23
FIGURA 10. BOXPLOTS O DIAGRAMA DE CAJAS DE INCREMENTOS DE CARBONO EN EL PERÍODO 2011-2017	24

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1. CARACTERIZACIÓN DE LOS DATOS PROCESADOS EN LAS PARCELAS DE 2011.....	14
TABLA 2. CARACTERIZACIÓN DE LOS DATOS PROCESADOS EN LAS PARCELAS DE 2017.....	15
TABLA 3. DESCRIPCIÓN DE LANDSAT 5 (THEMATIC MAPPER (TM)) (USGS 2018)	16
TABLA 4. DESCRIPCIÓN DE LANDSAT 8 (OPERATIONAL LAND IMAGER (OLI)) (USGS 2018)	16
TABLA 5. VALORES ESTADÍSTICOS DE CARBONO (T CO _{2EQ} /HA) PARA UNA MUESTRA DE 60 PARCELAS DE <i>PINUS HALEPENSIS</i> EN ESTRATO FUSTAL.	22
TABLA 6. VALORES ESTADÍSTICOS DEL INCREMENTO DE CARBONO (T CO _{2EQ} /HA) PARA UNA MUESTRA DE 60 PARCELAS DE <i>PINUS HALEPENSIS</i> EN ESTRATO FUSTAL.	24

1. INTRODUCCIÓN

1. INTRODUCCIÓN

1.1. BIOECONOMÍA, CAMBIO CLIMÁTICO Y BOSQUES

En un contexto de urgencia ante los desafíos que presenta el Cambio Climático (CC), la Unión Europea se ha marcado una hoja de ruta con el fin de reducir sus emisiones en línea con el Acuerdo de París COP21 (2016-2020) por el cual pretende establecer “una economía baja en carbono para 2050”, lo que conlleva una reducción de emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) del 40% en 2050 y del 60% en 2040 hasta alcanzar una disminución del 80% en 2050 respecto los niveles de 1990. En este contexto, el sector energético presenta el mayor potencial de emisiones y podría eliminar casi por completo las emisiones de CO₂ de aquí a 2050 a través de fuentes renovables (eólica, solar, hidroeléctrica y biomasa) (CE 2018a). Las bases de un sistema de producción sostenible pueden ser sentadas gracias al aprovechamiento de biomasa y bioprocesos eficientes como obtención de bioenergía y otros productos (FAO 2018).

Los bosques son los sumideros de carbono terrestre más grandes que existen, por lo que son esenciales para la descarbonización rápida que se requiere para alcanzar los objetivos fijados en el COP21. En este sentido y en ausencia de alternativas viables, la eliminación de CO₂ debe acelerarse a nivel mundial por medios técnicos, de cero a, al menos, 0,5 GtCO₂/año para 2030, 2,5 para 2040 y 5 para 2050. Las emisiones de CO₂ del uso de la tierra han de disminuir a 4 GtCO₂/año en 2010, a 2 para 2030, 1 para 2040 y 0 para 2050 (Rockström *et al.* 2017) (Figura 1).

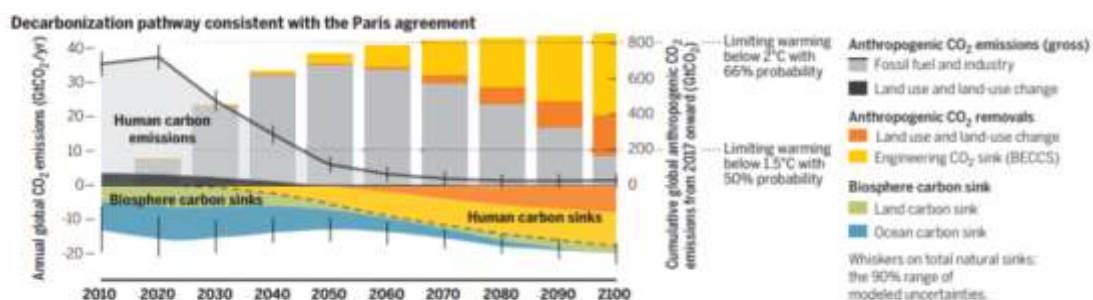


Figura 1. Vía de descarbonización coherente con el Acuerdo de París (Rockström *et al.*, 2017)

La contribución de los bosques a la mitigación de las emisiones de carbono puede ser mejorada mediante la gestión forestal (Montero *et al.* 2005; Nabuurs *et al.* 2007; Bravo *et al.* 2008a; Canadell y Raupach 2008) ampliando y conservando la superficie forestal, aumentando el carbono existente en bosques mediante tratamientos selvícolas que optimicen la fijación de carbono, fomentando y promoviendo el uso de productos forestales como fuente de energía renovable y reduciendo las emisiones debidas a deforestación y degradación de bosques a través de la aplicación de Gestión Forestal Sostenible (GFS). Además, la UE en su Comunicación 112 de 2011 (COM (2011)112 final) (CE 2011) recalca que la mejora de prácticas agrícolas y forestales contribuye a aumentar la capacidad del sector de preservar el carbono y secuestrarlo en los suelos y los bosques. Por tanto, es indispensable mantener los bosques como sumideros y evitar la saturación de carbono en los bosques que están envejeciendo (UE 2017).

1.1.1. Bioeconomía

El aprovechamiento sostenible y la gestión activa de los recursos naturales de uso biológico son elementos clave en la transición hacia la neutralidad en cuanto al carbono, debiéndose abordar cuidadosamente para lograr un crecimiento sostenible (UE 2017).

La bioeconomía circular tiene la capacidad de conciliar el desarrollo económico con el uso de los recursos medioambientales, sustituyendo los materiales fósiles, no biodegradables y no renovables por productos y servicios de base biológica, con una huella de carbono menor y más degradable (Martínez de Arano *et al.* 2018). En consecuencia, la biomasa es una fuente altamente flexible, controlada en el tiempo y de naturaleza térmica que aporta gran eficacia energética si se utiliza prioritariamente para cubrir la demanda térmica, al mismo tiempo que puede suministrar al sistema con electricidad en momentos de debilidad eólica o solar (Rojas 2018).

Sin embargo, una visión prospectiva estratégica se ha de codiseñar para integrar los bosques mediterráneos en marcos territoriales y sociales más amplios (Martínez de Arano *et al.* 2018).

1.1.2. Cambio climático

1.1.2.1. Importancia de los bosques en la mitigación del cambio climático

En los bosques del sur de Europa, los bienes y servicios indirectos son habitualmente más valiosos que los productos directos, como suele ser el aprovechamiento maderero (Scarascia-Mugnozza *et al.* 2000). La conservación del suelo y el ciclo hidrológico, la biodiversidad, el paisaje, así como el uso recreativo son las principales funciones que desempeñan estos bosques, a las que recientemente se ha unido la capacidad de fijación de carbono, conforme a los acuerdos internacionales sobre mitigación del CC como son el Convenio Marco de las Naciones Unidas sobre el CC (CMNUCC), el Protocolo de Kyoto, la Estrategia Forestal Europea (EFE), la Conferencia Ministerial sobre la Protección de Bosques en Europa (Ruíz-Peinado 2013), así como la comunicación 094 de 2012 (COM/2012/094 final) (CE 2012) sobre la contabilidad del uso de la tierra, el cambio de uso de la tierra y la silvicultura (LULUCF).

Los ecosistemas forestales capturan y almacenan carbono atmosférico en la vegetación y suelo. Este almacenamiento es prolongado en los productos forestales al ser sustitutos de otros productos procedentes de combustibles fósiles (CPF 2008). Los bosques liberan carbono tras su muerte y descomposición. Sin embargo, pueden considerarse también emisores cuando son deforestados o sobreexplotados, por lo que su función depende de la gestión que se aplique, de ahí la importancia de los bosques y la Gestión Forestal Sostenible (GFS) en la mitigación del CC (Cabanés *et al.* 2016).

El carbono atmosférico es el Gas de Efecto Invernadero (GEI) que más contribuye al calentamiento global, aunque tan solo represente 0,04%, de la composición de la atmósfera (Yáñez y Vargas-Mena 2004). Su emisión está causada principalmente por la contaminación atmosférica, los cambios de uso del suelo, la desertificación, la deforestación y los incendios forestales (IPCC 2007). En este contexto, los ecosistemas forestales ofrecen un servicio esencial de mitigación del CC gracias a su capacidad de captura y almacenamiento de carbono (PATFOR 2013).

Esta función de almacén, en un contexto de CC antropogénico, tiene una gran importancia al contribuir a la mitigación del 30% de las emisiones anuales de CO₂ debidas al hombre (Canadell y Raupach 2008). De este modo, la GFS ha incluido la fijación de carbono dentro de sus múltiples objetivos y se ha de mantener y aumentar de forma significativa a fin de que contribuya al objetivo mitigador (Ruíz-Peinado 2013).

Se destaca que desde 1990 se han celebrado conferencias ministeriales en Europa (Estrasburgo 1990, Helsinki 1993, Lisboa 1998, Viena 2003, Varsovia 2007, Oslo 2011, Madrid 2015) para analizar cuál es el papel de la gestión forestal en el paradigma de la sostenibilidad y su potencial como sumidero de carbono. Así queda reflejado en la decisión ministerial de Madrid (Forest Europe 2015) donde los representantes de los signatarios de Forest Europe reconocieron que los bosques europeos son vitales para combatir el CC y que la adaptación de los bosques a dicho cambio es esencial para garantizar el efecto mitigador. A nivel nacional, conseguir métodos estandarizados es relevante a fin de calcular los sumideros y fuentes de CO₂ en los bosques para que los países logren los objetivos de Kyoto de reducción de emisiones (Herrero y Bravo 2012).

1.1.2.2. Reducción de emisiones de GEI por efecto sustitutivo y fijación de carbono

El Protocolo de Kyoto (1997) establece unos compromisos cuantificados de reducción de emisiones que permite a países firmantes beneficiarse de los mecanismos flexibles para conseguir la disminución, así como contabilizar el carbono absorbido por los sumideros. El protocolo expresa la posibilidad de aprovechar los recursos de los bosques, conservándolos y mejorando su capacidad de captación de CO₂ a través de la aplicación de actuaciones selvícolas (Montero *et al.* 2009).

No obstante, el reto actual es cuantificar el efecto sumidero de los distintos depósitos forestales (biomasa viva y muerta, suelo y productos derivados del aprovechamiento de madera o biomasa), al igual que las emisiones debidas a deforestación, incendios forestales y otras perturbaciones. Los resultados obtenidos servirán para cumplir con los requisitos de información manifestado en el Convenio Marco de las Naciones Unidas sobre el CC (UNFCCC) y elaborar políticas encaminadas a la mitigación y adaptación al CC a nivel nacional e internacional (MAGRAMA 2018). En concreto, los aspectos que más influencia tienen en el contenido de carbono en los bosques son el régimen de claras, la duración del período de rotación, los sistemas de aprovechamiento y el control de la estructura de la masa (Jandl *et al.* 2007, Bravo *et al.* 2008b).

Por tanto, aunque durante siglos y sobre todo durante la época preindustrial y en zonas predominantemente rurales, la biomasa agroforestal haya sido el combustible más usado (Allué *et al.* 2007), actualmente se requiere de una correcta planificación de la gestión forestal, así como de sus infraestructuras para asegurar el aprovisionamiento continuado de la biomasa y la creación de mercados locales de aprovechamiento de este recurso mediante la fabricación y consumo de biocombustibles sólidos y/o de pequeñas plantas de generación energética (LIFE+ BIOENERGY AND FIRE PREVENTION 2013).

A nivel europeo, la producción primaria de madera y otros biocombustibles sólidos ha incrementado en el período 1990-2016 (Figura 2).

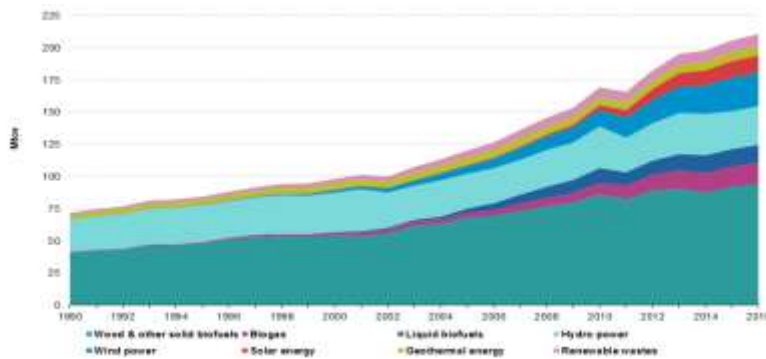


Figura 2. Producción primaria de energía procedente de fuentes renovables, EU-28, 1990-2016 (Mtep). Fuente: Eurostat (2018a)

La valorización energética (térmica y/o eléctrica) de la biomasa residual reduce las emisiones globales de CO₂ siempre que sustituya a otros combustibles fósiles (IPCC 1996). Además, el equilibrio de la concentración de carbono atmosférico no se altera pues las emisiones de CO₂ generadas con su aprovechamiento proceden de un carbono fijado de la atmósfera en el mismo ciclo biológico (Kraxner *et al.* 2003 y Fisher *et al.* 2012). Incluso en los procesos de transformación de biomasa forestal en energía, las emisiones de dióxido de azufre, que junto con las de óxidos de nitrógeno son las causantes de la lluvia ácida, son mínimas (MMAMRM 2010). En consecuencia, se da cumplimiento a los objetivos de la Directiva relativa al fomento del uso de energía procedente de fuentes renovables (Directiva 2009/28/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 23 de abril de 2009) (CE 2009).

Se puede concluir que se requiere de un gran esfuerzo para llegar al objetivo 2020 (20% de reducción de las emisiones de GEI (en relación con los niveles de 1990); 20% de energías renovables en la UE y 20% de mejora de la eficiencia energética (CE 2018b) (Figura 3).

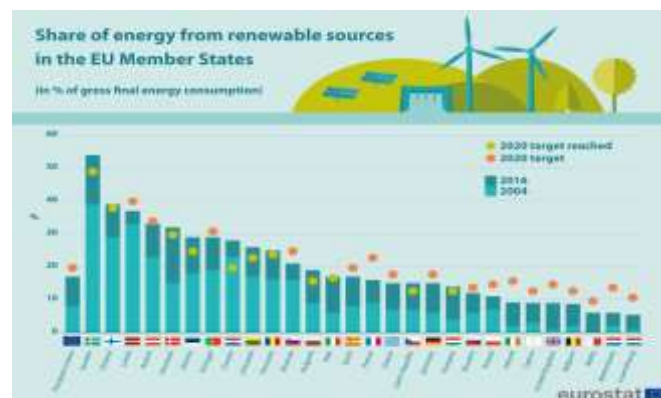


Figura 3. Proporción de energía procedente de fuentes renovables 2004 – 2016. Fuente: Eurostat (2018b)

Sin embargo, en cuanto a la producción de electricidad, los países con grandes industrias forestales están políticamente comprometidos a mantener sus principales esfuerzos en desarrollar la cogeneración de biomasa y a hacer un mejor uso de su potencial forestal (implementando Planes Climáticos) (EurObserv'ER 2017).

1.1.3. Gestión forestal sostenible

1.1.3.1. Gestión de la biomasa forestal con fines energéticos

En Europa, existe un claro potencial de incrementar el aprovechamiento forestal con fines energéticos, ya que tan sólo entre el 60-70% de la posibilidad anual forestal es aprovechada (CE 2013). El desafío consiste en garantizar no solo la disponibilidad de la madera, sino también que ésta proceda de bosques gestionados de manera sostenible (TFD 2008, FAO 2012).

En España, la intensidad de aprovechamientos forestales sobre el crecimiento corriente es sustancialmente menor que en países del centro y norte de Europa (PROFORBIOMED 2012). La realidad es que existe una falta de gestión forestal y como consecuencia, hay una gran cantidad de biomasa acumulada que puede derivar en un alto riesgo de propagación de incendios (Unión por la Biomasa 2013). A esta situación se le añade la superdensificación de las masas abandonadas o regeneradas tras los incendios forestales que requieren de tratamientos selvícolas, principalmente para mejorar las masas y que sean más resistentes al riesgo de los incendios forestales (LIFE+ BIOENERGY AND FIRE PREVENTION 2013). Por lo tanto, el aprovechamiento conjunto de la fracción maderable y la de biocombustible forestal generaría múltiples beneficios ambientales, sociales y económicos (PATFOR 2013) contribuyendo simultáneamente al Plan de Energías Renovables de España 2011-2020 (PER) (IDAE 2011).

Los bosques españoles, incluyendo árboles y arbustos, acumulan más de 4.374 millones de toneladas de CO₂, con una fijación neta anual de más de 120 millones de toneladas de CO₂ (28,9% por las especies arbóreas y 8,1% por arbustivas). Los bosques fijan anualmente el 37 % del total de emisiones anuales de CO₂ producidas en España (COITF 2015). Por tanto, visto el potencial que tienen los sistemas forestales en la mitigación del cambio global, el criterio de la fijación de carbono ya está considerado tanto dentro de la toma de decisiones en la planificación y la aplicación selvícola (Díaz-Balteiro y Romero 2003, Bravo *et al.* 2008b), como de las cuentas económicas del bosque (Campos *et al.* 2008, Caparrós *et al.* 2011).

Específicamente y en cuanto a la captura de carbono, las formaciones jóvenes de coníferas, sobre todo las sometidas a un programa de claras y clareos, y las formaciones de ribera, formadas por árboles de crecimiento rápido, son las que presentan una mayor capacidad de fijación. Asimismo, las masas adultas puras con Fracción de Cobertura (FCC) entre el 70 y el 100% tienen menos capacidad de captura de CO₂ que las mismas masas con menor FCC (PATFOR 2013). Existe una importante capacidad de mejora de la captura de carbono de los ecosistemas, principalmente en las masas jóvenes monoespecíficas.

Finalmente, una gestión forestal enfocada a reducir las excesivas densidades actuales y diversificar las masas, mejoraría sustancialmente el servicio de mitigación del CC (PATFOR 2013). Otros autores (Frühwald *et al.* 1994, Knauf 2015, Mantau y Bilitewski 2010, Rüter 2011, Skog 2008, Umweltbundesamt 2012) demuestran que la reducción de las emisiones de CO₂ a través de la utilización de la madera como material o bioenergía deben tenerse en cuenta en el cálculo de balances totales en el marco del proceso post-Kyoto a nivel global y regional (Cabanés *et al.* 2016).

1.1.3.2. Situación actual de los ecosistemas forestales mediterráneos y su gestión

La bioenergía es una fuente esencial para el desarrollo sostenible de las zonas rurales en el arco mediterráneo, ya que es un instrumento de mercado que puede potenciar la gestión sostenible de los recursos forestales en terrenos públicos y privados, así como contribuir de forma activa a la prevención de grandes incendios forestales (Oliver-Villanueva 2013).

A pesar de ello, en el sector forestal existen elevadas restricciones que impiden el desarrollo de la cadena de valor bioenergética de base forestal (FORBIOENERGY 2017). La situación se agrava cuando se trata de gestionar las áreas forestales protegidas debido a una errónea interpretación de las figuras de protección, específicamente la Red Natura 2000, y a su principio precautorio y muy conservador que conlleva a realizar un elevado número de autorizaciones para poder gestionar las masas forestales. En la Comunitat Valenciana (CV), la Red Natura 2000 representa el 40% del territorio y más del 80% del terreno forestal incluido en los 22 Parques Naturales forman parte esta figura de protección, por lo que existe una superposición de figuras.

Estudios realizados en el área Mediterránea manifiestan una situación similar a la española y avalan la compatibilidad existente entre la gestión y aprovechamiento de los recursos forestales en áreas protegidas (FORBIOENERGY 2017). Además, los bosques de la Red Natura 2000 no se han de gestionar solamente con fines de conservación de la naturaleza, sino también con vistas a lograr múltiples funciones, como puede ser la producción de madera, siempre y cuando los objetivos de conservación específicos del lugar sean respetados y se contribuya de forma activa a su consecución (EU 2015). Por tanto, se requiere de un Plan de Acción para conformar el nuevo marco regulatorio y hoja de ruta destinada a superar las barreras que dificultan la valorización energética de la biomasa forestal, así como para promover el aprovechamiento sostenible de biomasa en el contexto de una gestión forestal multifuncional como herramienta de desarrollo rural en la región Mediterránea en áreas protegidas (FORBIOENERGY 2017) a través de proyectos integrales de bioenergía a nivel local.

El sector forestal necesita nuevas herramientas de gestión que permitan interiorizar los beneficios ambientales en la producción forestal y conservar la biodiversidad, de una forma económica y socialmente aceptable. Todo ello supone un desafío para el sector forestal y una oportunidad para la investigación (PATFOR 2013).

1.1.3.3. Ecosistemas forestales valencianos

Se estima que los ecosistemas forestales valencianos almacenan 69 millones de toneladas de CO₂, lo que supone una media de 58 tCO₂/ha y más de 3 millones tCO₂/año. Este almacén es de 73 tCO₂/ha en zonas arboladas y 17 tCO₂/ha en zonas no arboladas (Cabanés *et al.* 2016, PATFOR 2013).

La superficie forestal en la CV aumenta cada año a un ritmo de unas 3.300 ha/año (IFN2-IFN3). En base a las existencias actuales en los montes de la CV mediante una GFS se podría extraer siete veces más de lo que se obtiene actualmente de madera y más de 142.600 t/año de biomasa forestal es susceptible de ser valorizada para bioenergía (PATFOR 2013).

El uso del biocombustible disponible en los montes valencianos como fuente de energía renovable en sustitución de combustibles fósiles supondría un 1,8% de las emisiones actuales de la Comunitat, dejando de emitir 427.800 tCO₂/año. En paralelo a minimizar las emisiones, una gestión forestal y un aprovechamiento integral y racional de productos derivados de la madera en la CV pueden contribuir a escala regional a la lucha frente al CC como un proceso a escala global (Cabanés *et al.* 2016).

1.2. ESTADO DEL ARTE

1.2.1. Influencia de la selvicultura sobre la fijación de carbono en biomasa

Existe un gran abanico de estudios realizados de carbono en los diferentes compartimentos de un ecosistema forestal (suelo, biomasa arbórea, madera muerta, arbustos, etc.). No obstante, se requiere identificar el papel que tienen los bosques en la mitigación del cambio global a través de la estimación del carbono en todo el ecosistema forestal.

Respecto a los estudios realizados, se destacan los realizados por Montero *et al.* (2005) y la posterior mejora de los mismos por Ruíz-Peinado (2013) en cuanto a la influencia de la selvicultura en el ciclo del carbono y de los modelos de su cuantificación en las principales especies españolas. Cabe mencionar la cuantificación realizada por Rodríguez-Murillo (1994) del carbono total almacenado en los bosques españoles.

En lo que concierne a los efectos de la selvicultura sobre la fijación de carbono, diversos estudios se han llevado a cabo sobre la influencia de aplicar distintas intensidades de claras con diferentes sistemas de aprovechamiento y en distintas fases del turno propuesto en *Pinus pinaster* Ait. y *Pinus sylvestris* L. Los resultados concluyen que las masas no aclaradas (no gestionadas) tienen una mayor cantidad de carbono acumulada *in situ* que las masas aclaradas (gestionadas), principalmente por la cantidad de biomasa aérea existente. Por tanto, si se considera también la cantidad de carbono extraída en las cortas, los resultados difieren según la especie. En el caso de *Pinus pinaster*, al final del turno, las cantidades de carbono acumuladas son mayores en las masas gestionadas que en las no gestionadas. En cambio, en *Pinus sylvestris*, a mitad del turno, las cantidades de carbono son estadísticamente mayores en las masas no aclaradas que en la masa donde se aplicaron claras fuertes, no encontrándose diferencias significativas con la masa en la que se realizó una clara moderada (Ruíz-Peinado 2013). Como indicadores de sostenibilidad en una gestión forestal, se promulga hacer uso de cantidades de carbono existentes en la biomasa arbórea y cantidades de carbono extraídas en claras de aprovechamiento en términos de carbono acumulado (Ruíz-Peinado 2013).

Por otra parte, Balboa-Murias *et al.* (2006) detectaron que las mayores tasas de absorción de carbono en plantaciones de *Pinus radiata* y *Pinus pinaster* en Galicia eran consecuencia de la aplicación de claras moderadas.

En el estudio realizado por Madrigal *et al.* (2008) se muestra que la respuesta del regenerado post-incendio de *Pinus pinaster* a los tratamientos de clareo mecanizado intenso es positiva.

Heras *et al.* (2013) obtuvieron resultados que confirmaron que la aplicación de un aclareo temprano intensivo era un método útil para gestionar de forma sostenible los rodales de *Pinus halepensis* regenerados de forma natural tras incendios forestales. A corto plazo y a nivel de rodal, el carbono almacenado en la biomasa viva disminuyó. Sin embargo, en un medio plazo, el efecto positivo sobre la productividad permitió restaurar y superar la cantidad inicial de carbono. Para futuras investigaciones se debe tener en cuenta los arbustos, la madera muerta y los desechos para conseguir una perspectiva de biomasa más realista (Jiménez *et al.* 2011), así como tener en cuenta escenarios de CC a largo plazo que sirvan de apoyo a las decisiones sobre el tipo de selvicultura a aplicar.

Además, también existen programas de simulación de la influencia de la gestión forestal en el carbono a fin de maximizar su fijación. Es el caso de CO2fix (Nabuurs y Mohren, 1993), Carbon Budget Model of the Canadian Forest Sector (CBM-CFS3) (Kurz *et al.*, 1993), Carbon

Accounting Model for Forests (CAMFOR Australia) (Richards y Evans, 2000) y GORCAM (Schlamadinger y Marland, 1996).

En la actualidad, es una labor prioritaria compatibilizar la prevención de incendios y los nuevos modelos de GFS, en los que se ha de tener en cuenta la fijación de carbono. De este modo, el ingeniero forestal valorará la conveniencia de la aplicación de estos tratamientos según prioridades y objetivos fijados (Madrigal *et al.* 2006).

1.2.2. Aplicación de la teledetección para la cuantificación de carbono en biomasa aérea

Existen técnicas para estimar la biomasa y carbono existente en las masas forestales mediante teledetección, así como por el empleo de observaciones de satélites, aviones o drones, (Nelson *et al.* 2004, Patenaude *et al.* 2005). Estos son métodos que presentan un gran potencial para estimar el carbono contenido en bosques, esencialmente el contenido en su fracción aérea (Ruíz-Peinado 2013).

Tomé *et al.* (2016) concluyen que la detección a partir de datos LiDAR del PNOA puede ser un sistema muy fiable para el inventario de carbono secuestrado por los bosques españoles.

Por otra parte, varios métodos de estimación de biomasa se han realizado y desarrollado en las últimas décadas para calcular el carbono fijado. Entre los existentes y junto con estimaciones de biomasa en campo, la teledetección proporciona una alta precisión que permite hacer un seguimiento de la evolución de la masa y los costos y esfuerzos de adquisición son reducidos (Galidaki *et al.* 2017).

Vinué *et al.* (2018) demuestran que la teledetección es una herramienta esencial para la gestión y los inventarios forestales en condiciones mediterráneas, necesitando solamente una pequeña base de datos y evitando, por consiguiente, largos y costosos inventarios forestales.

1.3. JUSTIFICACIÓN

El presente trabajo se enmarca dentro de las actividades desarrolladas por el proyecto Interreg MED ForBioEnergy (2016-2019) que tiene, entre sus objetivos, el desarrollo de una metodología de evaluación de riesgos y beneficios a fin de conocer el impacto que puede tener un incremento en el aprovechamiento de biomasa en componentes ambientales y socioeconómicos en diferentes plazos de tiempo. Paralelamente, refuerza la necesidad de realizar una evaluación ambiental de diferentes prácticas selvícolas sobre la biodiversidad, la calidad del suelo y agua, el balance de carbono, el paisaje y la prevención de incendios forestales.

Ruíz-Peinado (2013) destaca que la aplicación de claras supone una perturbación más o menos intensa de la masa forestal respecto al potencial impacto en los almacenes de carbono. La cuantificación de estos posibles impactos es vital para la toma de decisiones de carácter sostenible en la planificación. De este modo, la información obtenida sobre la fijación del carbono forestal se puede considerar como un punto de referencia disponible para los responsables de la toma de decisiones a fin de desarrollar políticas de conservación, gestión y desarrollo sostenible. Además, las nuevas herramientas de información junto a la teledetección contribuyen a que los responsables de la formulación de políticas y las partes interesadas obtengan información comparable y verificable entre diferentes áreas de un modo relativamente simple (Herrero y Bravo 2012).

En este sentido, existen numerosos estudios que analizan la influencia de la silvicultura en el carbono acumulado en el bosque en bosque. Sin embargo, no se evidencian estudios de cómo la evolución de carbono en estratos fustales de *Pinus halepensis* procedentes de las repoblaciones de los años 1950-1960 varía en parcelas gestionadas respecto a parcelas sin gestión en el área Mediterránea de España.

La cuantificación de la fijación de carbono en los ecosistemas forestales es el primer paso en las directrices de gestión forestal hacia la sostenibilidad y la conservación de la biodiversidad. Por tanto, nuevos estudios más específicos sobre biomasa y carbono junto con un monitoreo telemático son necesarios a fin de obtener información de manera sencilla y actualizada. De este modo, se pueden establecer líneas de base y directrices más efectivas y adaptadas a la realidad de los diferentes tipos de bosques, dinámicos por naturaleza.

Finalmente, es crucial determinar la importancia que la GFS puede ejercer en el efecto mitigador de los bosques en el CC a escala regional (PATFOR 2013) en base a estudios locales que ayuden a tomar las mejores decisiones estratégicas y operativas.

2. OBJETIVOS

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GENERAL

El objetivo general del TFM es realizar un análisis comparativo de la fijación de carbono tras claras selectivas para aprovechamiento bioenergético en fustales de pino carrasco (*Pinus halepensis* Mill.) con teledetección.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para alcanzar el objetivo general, el TFM persigue los siguientes objetivos específicos:

1. Desarrollar un modelo de cuantificación y evaluación de carbono fijado en biomasa arbórea en fustales de pino carrasco basado en métodos de aprendizaje automático aplicados sobre imágenes satelitales.
2. Analizar la influencia de tratamientos de claras selectivas por lo bajo en masas adultas de pino carrasco sobre la dinámica de crecimiento y la fijación de carbono en base a los modelos desarrollados.

3. MATERIAL Y MÉTODOS

3. MATERIAL Y MÉTODOS

3.1. DESARROLLO DE UN MODELO DE CUANTIFICACIÓN Y EVALUACIÓN DE CARBONO FIJADO EN BIOMASA ARBÓREA EN FUSTALES DE *PINUS HALEPENSIS* BASADO EN MÉTODOS DE APRENDIZAJE AUTOMÁTICO APLICADOS SOBRE IMÁGENES SATELITALES

3.1.1. Selección del área de estudio: localización y caracterización

El área de estudio se localiza en la CV, Comarca de la Canal de Navarrés y Término Municipal (TM) de Enguera (Valencia). Concretamente, el área de estudio es el Monte de Utilidad Pública (MUP) Navalón V-074 cuyos límites están enmarcados en la norma de gestión del Macizo del Caroig (Figura 4). El área de la Zona de Especial Conservación (ZEC) “Sierra de Enguera (ES5233045)” es de 17.323,77 ha, estando representadas en dicho TM 8.835,56 ha.

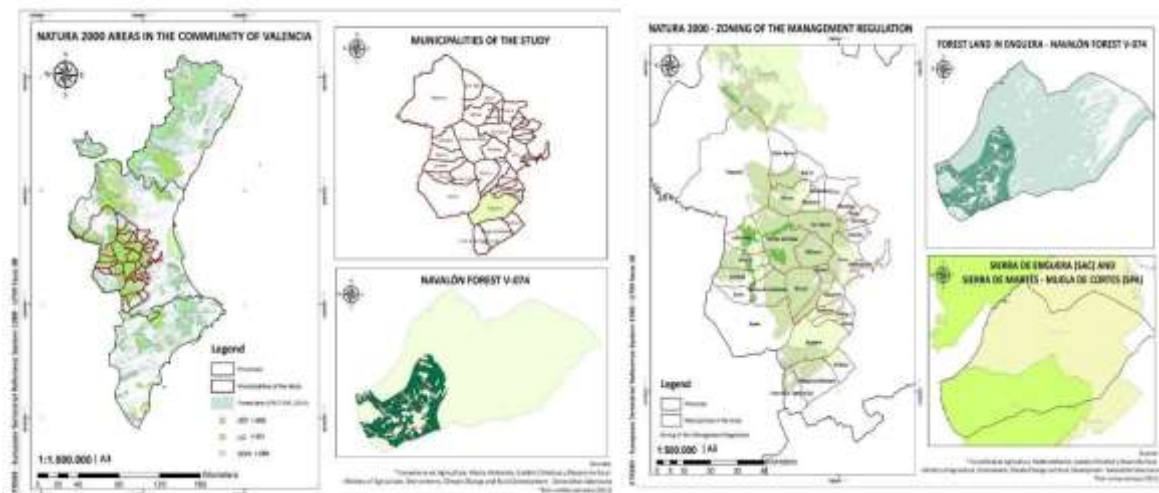


Figura 4. Áreas de la Red Natura 2000 en la CV con los municipios que forman parte de la norma de gestión “Macizo del Caroig” en el MUP V-074 como área piloto de estudio (izquierda) y representación de la influencia del ZEC y ZEPA en el área de estudio (derecha). Fuente: FORBIOENERGY (2018)

El estudio se realiza sobre una masa adulta de *Pinus halepensis* que procede de una regeneración artificial por siembra efectuada en 1950 tras un incendio forestal, por lo que actualmente la masa tiene 68 años de edad. El TM de Enguera tiene una altitud que varía desde 318 m.s.n.m hasta 1.200 m.s.n.m. Concretamente, el ZEC “Sierra de Enguera” tiene una altitud media de 700 m, siendo su máxima de 881 m y su mínima de 520 m. El clima de Enguera se conoce como un clima de estepa local; la temperatura media anual es de 16,3°C y la precipitación media anual de 430 mm, clasificándose como BSk de acuerdo con Köppen y Geiger (1936).

El área de estudio pertenece al estrato 1 y 2 de la provincia de Valencia (IFN3). El MUP V-074 tiene una posibilidad de biomasa (t/ha/año) de 1.091,71 ha (PATFOR, 2013), una cantidad de CO₂ fijado por la vegetación forestal (tCO₂/ha) de 2.868,53 ha (PATFOR, 2013).

3.1.2. Materiales utilizados

Bases de datos:

Se han utilizado tres bases de datos en el proyecto:

1. *Proyecto de Ordenación de los MUP de Enguera*: Inventario en 2011 y principios de 2012. Se realiza la división dasocrática homogéneamente a través de la ortofoto y según el estrato del monte y la FCC. El muestreo realizado incluye una descripción general de la parcela de estudio, del estrato arbóreo y arbustivo, así como una medición de los árboles maderables existentes. En términos generales, las existencias madereras más relevantes por hectárea están presentes en las unidades de fustal 50-75 y 75-100 de FCC. Cada parcela de inventario tiene un radio de 15 m (706,5 m²) (LIFE+ BIOENERGY AND FIRE PREVENTION 2013).
2. *Inventarios propios*: Los inventarios forestales se realizaron a finales de 2017 siguiendo las metodologías descritas en el IFN3 (DGCN 2006) con parcelas de 5, 10 o 15 m de radio conforme a su densidad (Vinué *et al.*, 2018).
3. *Imágenes de satélite*: Para la cuantificación y comparación de la afección de los aprovechamientos sobre la fijación de carbono se tomaron imágenes satelitales en dos fechas (28 de junio 2011 y 12 de junio de 2017), atendiendo a la disponibilidad de fechas sin cobertura de nubes lo más cercanas al solsticio de verano para minimizar la influencia del ángulo solar en la medida de la reflectividad de la superficie, considerando así dos experimentos homogéneos. Debido a la separación entre las fechas de estudio se seleccionaron imágenes de los satélites Landsat 5 (L5) y Landsat 8 (L8) a fin de mantener coherencia espacial de 30m, siendo ambos sensores (TM – *Thematic Mapper*) de L5 y OLI (*Operational Land Imager*) intercomparables.

Material para el inventario en campo:

- Forcípula: medición de diámetros.
- Hipsómetro: medición de altura total y distancias.
- GPS: coordenadas UTM del centro de parcela.
- Visor *oruxmaps*: visualización de mapas cartográficos.

Software *ENvironment for Visualizing Images (ENVI)*: Software especializado en procesos y análisis de imágenes geoespaciales. ENVI está escrito enteramente en IDL (*Interactive Data Language*) (Gumley y Madison 2002). IDL es un poderoso lenguaje de programación basado en matrices, que proporciona capacidades integradas de proceso y de visualización de imágenes, facilitando las rutinas del interfaz gráfico (Reino 2013).

Sistema de Información Geográfica (SIG): creación, edición, análisis y visualización de datos vinculados a una referencia espacial mediante ArcGIS.

MATrix LABORatory - laboratorio de matrices (Matlab): herramienta de software matemático que ofrece un desarrollo integrado con lenguaje de programación propio.

3.1.3. Métodos

3.1.3.1. Selección de las parcelas

Tras el análisis de la base de datos del proyecto de Ordenación de los MUP de Enguera, se seleccionan las parcelas que cumplen las condiciones establecidas (FCC 50-100%, estrato fustal y ecosistema de arbolado de *Pinus halepensis*).

3.1.3.2. Inventario en campo y cuantificación de la biomasa a través de ecuaciones alométricas (2011 y 2017)

El stock de carbono depende de la biomasa total. Por tanto, su evaluación se ha de realizar a través de la estimación de la biomasa (Galidaki *et al.* 2017).

El peso seco de biomasa de cada parcela se calcula de acuerdo a las ecuaciones alométricas de *Pinus halepensis* (Ruíz-Peinado 2013), utilizando los datos de diámetro normal y altura total obtenidos en cada una de ellas. Para la cuantificación de CO₂ acumulado se aplica el porcentaje en peso de carbono contenido en la materia seca de *Pinus halepensis* (Montero *et al.* 2005) (Anexo 1).

Concretamente, la especie *Pinus halepensis* contiene 49,9 % de carbono (Montero *et al.* 2005) y con la proporción entre el peso de la molécula de CO₂ y el peso del átomo de carbono que la compone, se obtiene la relación de carbono a CO₂ ($0,499 * 44/12$): 1,8296.

3.1.3.3. Caracterización de las parcelas

3.1.3.3.1. Caracterización de las parcelas en 2011

En 2011 se analizaron un total de 19 parcelas con una densidad promedio de 317 pies/ha, un DBH medio de 21,32 cm y una altura máxima de 12,57 m.

Tabla 1. Caracterización de los datos procesados en las parcelas de 2011

	N (pies/ha)	G (m ² /ha)	DBH medio (cm)	SEM DBH (cm ²)	Diam. Cuad. (cm ²)	Hart- Becking (%)	Altura media (m)	SEM altura (m)	Hmax (m)
Mín.	113	8,36	10,36	0,36	10,81	32,88	5,99	0,15	8,1
Promedio	317	10,83	21,32	1,87	22,71	49,78	9,26	0,47	12,57
Máx.	1047	15,71	28,38	4,11	30,66	75,20	12,60	0,86	16,7

3.1.3.3.2. Caracterización de las parcelas en 2017

En 2017 se analizaron un total de 20 parcelas con una densidad promedio de 250,91 pies/ha, un DBH medio de 25,36 cm y una altura máxima de 13,33 m.

Tabla 2. Caracterización de los datos procesados en las parcelas de 2017

	N (pies/ha)	DBH medio (cm)	SEM DBH (cm ²)	Diam. Cuad. (cm ²)	Hart- Becking (%)	Altura media (m)	SEM altura (m)	Hmax (m)
Mín.	127	19,36	0,36	21,11	22,66	8,65	0,23	10,30
Promedio	251	25,36	1,43	26,19	51,05	10,32	0,44	13,33
max	481	31,14	4,34	34,30	481,00	62,60	13,43	0,77

3.1.3.4. Cuantificación de la biomasa

4.1.3.4.1. Cuantificación de la biomasa 2011

El promedio de biomasa (t/ha) obtenido con una densidad promedio de 317 (pies/ha) es de 45,95 (= 84,12 tCO_{2eq}/ha), el mínimo con 113 pies/ha de 34,18 t/ha (= 62,21 tCO_{2eq}/ha) y el máximo con 1.047 pies/ha de 57,27 (t/ha) (=104,29 tCO_{2eq}/ha).

4.1.3.4.2. Cuantificación de la biomasa 2017

El promedio de biomasa (t/ha) obtenido con una densidad de 251 (pies/ha) es de 12,85 (= 105,26 tCO_{2eq}/ha), el mínimo con 127 pies/ha de 8,03 t/ha (= 75,22 tCO_{2eq}/ha) y el máximo con 481 pies/ha de 19,66 (t/ha) (=178,01 tCO_{2eq}/ha).

3.1.3.5. Obtención y análisis de las imágenes satelitales

3.1.3.5.1. Procesado de las imágenes: reflectividad y bandas

Siguiendo la metodología descrita y adaptada por Vinué (2011), las imágenes Landsat utilizadas se obtienen con un nivel de procesado *Level 2* que incluye la reflectividad de superficie con archivos de metadatos en formato .txt y con unas características que se describen a continuación:

- *Resolución espectral; bandas:* Las imágenes multiespectrales del sensor TM se componen de siete bandas para L5, una de ellas (banda 6) en el infrarrojo térmico (Tabla 3). L8 contiene 11 bandas, siendo la del infrarrojo térmico la 6 y la 7 (Tabla 4). Sin embargo, en este último solo se hace uso del sensor OLI.
- *Resolución espacial:* La resolución espacial es de 30m. Para L5, la banda 6 – 10,4 a 12,5 μm – se toma con una resolución de 120 m, pero es reescalada a 30 m. En el caso de L8, se utilizan las bandas 1-7 y 9 con una resolución espacial de 30 m.
- *Correcciones:* se obtiene de un nivel 2 de reflectividad de superficie (0-1), aplicándose una corrección a fin de mantener la coherencia del metadato.
- *Georreferencia:* la referenciación es en UTM (WGS84) al ser el sistema de referencia utilizado por las imágenes Landsat. Por tanto, se reproyecta la capa *shapelife* y *raster*,

que contiene la información del presente estudio, de ETRS89 UTM 30N a WGS84 UTM 30N a fin de que los datos sean compatibles.

- *Localización del área de estudio:* se utilizan dos imágenes para completar la superficie del MUP V-074 en dos tiempos (2011 y 2017).

De la imagen que proporciona el Servicio Geológico de los Estados Unidos (*United States Geological Survey – USGS*) se incluyen una corrección radiométrica, geométrica, atmosférica y topográfica.

Por último, a través del programa SIG se digitaliza el contorno de la superficie real que acota la zona de la imagen de satélite a estudiar con la finalidad de unir las parcelas de estudio con la capa a procesar en ENVI.

Tabla 3. Descripción de Landsat 5 (*Thematic Mapper (TM)*) (USGS 2018)

Landsat 4-5 Thematic Mapper (TM)	Bands	Wavelength (micrometers)	Resolution (meters)
	Band 1 - Blue	0.45-0.52	30
	Band 2 - Green	0.52-0.60	30
	Band 3 - Red	0.63-0.69	30
	Band 4 - Near Infrared (NIR)	0.76-0.90	30
	Band 5 - Shortwave Infrared (SWIR) 1	1.55-1.75	30
	Band 6 - Thermal	10.40-12.50	120* (30)
	Band 7 - Shortwave Infrared (SWIR) 2	2.08-2.35	30

* TM Band 6 was acquired at 120-meter resolution, but products are resampled to 30-meter pixels.

Tabla 4. Descripción de Landsat 8 (*Operational Land Imager (OLI)*) (USGS 2018)

Landsat 8 Operational Land Imager (OLI) and Thermal Infrared Sensor (TIRS)	Bands	Wavelength (micrometers)	Resolution (meters)
	Band 1 - Ultra Blue (coastal/aerosol)	0.435 - 0.451	30
	Band 2 - Blue	0.452 - 0.512	30
	Band 3 - Green	0.533 - 0.590	30
	Band 4 - Red	0.636 - 0.673	30
	Band 5 - Near Infrared (NIR)	0.851 - 0.879	30
	Band 6 - Shortwave Infrared (SWIR) 1	1.566 - 1.651	30
	Band 7 - Shortwave Infrared (SWIR) 2	2.107 - 2.294	30
	Band 8 - Panchromatic	0.503 - 0.676	15
	Band 9 - Cirrus	1.363 - 1.384	30
	Band 10 - Thermal Infrared (TIRS) 1	10.60 - 11.19	100* (30)
	Band 11 - Thermal Infrared (TIRS) 2	11.50 - 12.51	100* (30)

* TIRS bands are acquired at 100 meter resolution, but are resampled to 30 meter in delivered data product.

3.1.3.6. Relación de biomasa y reflectividad a través de procesos gaussianos

Según la metodología descrita por Vinué *et al.* (2018), la regresión de procesos gaussianos (*Gaussian Process Regression, GPR*) es un método de aprendizaje automático no paramétrico bayesiano adecuado para hacer análisis de teledetección, debido a que no se limitan por la gran cantidad de parámetros requeridos para la implementación de métodos como redes neuronales u otros (Mackay 1998). Además, sus requisitos de cálculo son menores a uno que se base en métodos de inversión píxel por píxel (Verrelst *et al.* 2015).

La función de covarianza, entre las variables de entrada y salida, muestra la similitud entre ellas. Esta función del núcleo y su media (se define a cero para simplificar) definen el GPR (Camps *et al.* 2009). En el presente estudio, se hace uso de una determinación de dependencia automática (*Automatic Relevance Determination, ARD*) para determinar su relevancia (Neal 1996).

GPR se entrena con las bandas espectrales L5 y L8. Específicamente, con las bandas de azul, verde, rojo, infrarrojo cercano y dos bandas en el infrarrojo de onda corta se han utilizado para entrenar GPR contra la biomasa. La banda adicional de NDVI se crea e incluye en el conjunto de datos. Los datos de campo se dividen aleatoriamente en subconjuntos y suelo (no forestal). Además, a fin de realizar un ajuste de biomasa, se incluyen puntos de suelo, cinco puntos en 2011 y cuatro en 2017. Las iteraciones se realizan para crear todas las combinaciones posibles entre los subconjuntos de capacitación y validación a fin de que la validación sea más sólida.

Finalmente, se hace uso de cuatro subconjuntos para el entrenamiento algorítmico de cada uno de ellos y se utilizan para la validación. El rendimiento ha sido evaluado por el cuadrado medio absoluto (RMSE) como un indicador general de precisión.

Como el estudio se lleva a cabo en una sola especie en estrato fustal se obtiene un algoritmo genérico único que se aplica para 2011 y 2017.

3.2. ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DE TRATAMIENTOS DE CLARAS SELECTIVAS POR LO BAJO EN MASAS ADULTAS DE *PINUS HALEPENSIS* SOBRE LA DINÁMICA DE CRECIMIENTO Y LA FIJACIÓN DE CARBONO EN BASE A LOS MODELOS DESARROLLADOS

3.2.1. Aplicación del modelo de cuantificación de biomasa

El modelo obtenido en 2011 y 2017 se aplica sobre la capa de entrada (input) ráster que contiene la delimitación del área de estudio, obteniéndose como capa de salida (output) una capa ráster con información de biomasa en cada píxel de 30 m de lado para 2011 y 2017 disponible para procesar con SIG.

3.2.2. Zonificación de parcelas

Se realiza la zonificación de parcelas gestionadas y no gestionadas en base al conocimiento previo de los tratamientos realizados y con apoyo de las ortofotos 2010 y 2017. La superficie obtenida es de 103,99 ha en las parcelas con tratamiento y de 188,04 ha en las no se ha evidenciado ningún tratamiento. Por tanto, el total analizado es de 292,03 ha.

Posteriormente, con GIS se realiza un “Random Point” a fin de obtener coordenadas de parcelas de forma aleatoria y analizar los píxeles de la imagen obtenida. En total, se han procesado 30 píxeles (= 2,7 ha) (Figura 5).

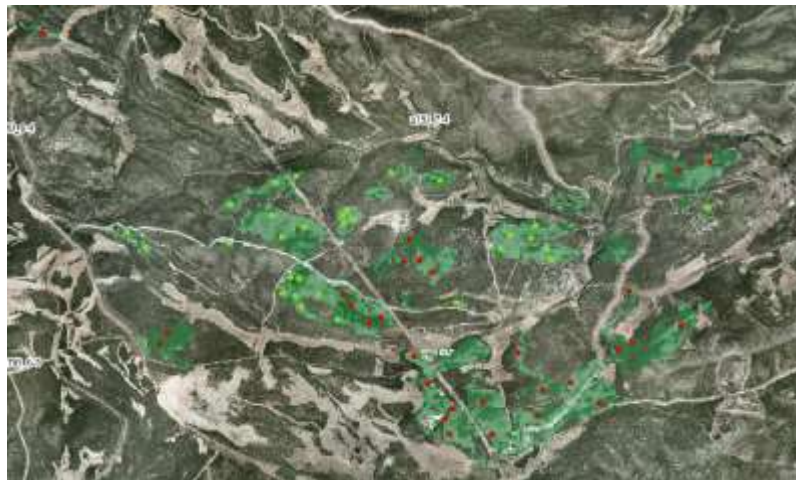


Figura 5. Área de estudio que incluye parcelas gestionadas (puntos verdes) y parcelas no gestionadas (puntos rojos) (WGS1984 UTM30) Fuente ortofoto: ©Institut Cartogràfic Valencià

En lo que respecta al procesado SIG, se hace uso de dos tipos de sistema de coordenadas proyectadas: ETRS 89 UTM 30 y WGS 1984 UTM 30. El WGS 1984 se utiliza para poder procesar las imágenes de satélite.

3.2.3. Caracterización de las intervenciones realizadas

Las parcelas se caracterizan por el crecimiento obtenido en el período 2011-2017. La cantidad aproximada que se ha extraído se tiene en consideración por el efecto directo e indirecto que tiene sobre el monte (reducción de la carga de combustible y del riesgo de incendio, así como la valorización energética de la biomasa). La intensidad de claras se estima en un 35 % en toda la masa forestal según Lerma-Arce *et al.* (2014).

3.2.4. Análisis estadístico de la existencia e incremento en carbono debidas a la gestión forestal

Tras una evaluación del ajuste a la distribución normal, se aplica el T-test para evaluar posibles diferencias significativas entre los dos escenarios tanto en existencias de carbono como en incremento de la fijación de carbono.

Existencia de carbono:

1. Hipótesis nula: no existe diferencia estadísticamente significativa en el promedio de tCO_{2eq}/ha fijadas en parcelas tratadas y no tratadas, con un 95% de nivel de confianza.
2. Hipótesis alterna: sí existe diferencia estadísticamente significativa en el promedio de tCO_{2eq}/ha en parcelas tratadas y no tratadas, con un 95% de nivel de confianza.

Incremento de carbono:

1. Hipótesis nula: no existe diferencia estadísticamente significativa en el incremento de tCO_{2eq}/ha fijadas en parcelas tratadas y no tratadas, con un 95% de nivel de confianza.
2. Hipótesis alterna: sí existe diferencia estadísticamente significativa en el incremento de tCO_{2eq}/ha en parcelas tratadas y no tratadas, con un 95% de nivel de confianza.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. DESARROLLO DE UN MODELO DE CUANTIFICACIÓN Y EVALUACIÓN DE CARBONO FIJADO EN BIOMASA ARBÓREA EN FUSTALES DE *PINUS HALEPENSIS* BASADO EN MÉTODOS DE APRENDIZAJE AUTOMÁTICO APLICADOS SOBRE IMÁGENES SATELITALES

4.1.1. Resultado de la aplicación de métodos de aprendizaje automático aplicados sobre imágenes satelitales.

4.1.1.1. Resultados obtenidos en 2011

Se ha obtenido un coeficiente de determinación $R^2 = 0,81$, por lo que el modelo de cuantificación y evaluación de biomasa explica un alto porcentaje de la variabilidad de los datos (Figura 6).

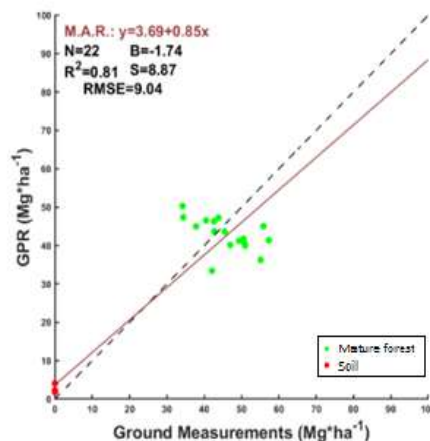


Figura 6. Valores de biomasa medidas vs. estimados con Landsat 5 en 2011. M.A.R: ajuste de regresión del eje mayor; N: número de muestras; B: sesgo medio; R^2 coeficiente de determinación; S: desviación estándar del sesgo y RMSE: error cuadrático medio

La ecuación descrita anteriormente se aplica a toda la superficie de la imagen satelital L5, obteniéndose píxeles de 30 m de radio (900 m^2) con un valor de biomasa cuyo error es de $\pm 9,04 \text{ t/ha}$. Los errores mayores se dan a partir de 60 t/ha . La pendiente obtenida indica que para valores de biomasa inferiores a 30 t/ha , el modelo efectúa una ligera sobreestimación de la biomasa. Sin embargo, los valores obtenidos por encima de 30 t/ha están ligeramente subestimados.

4.1.1.2. Resultados obtenidos en 2017

El resultado de dicha ecuación tiene un coeficiente de determinación de $R^2 = 0,91$ y un error de 6,70 t/ha. La biomasa tiene unos valores promedios aproximados a 60t/ha (Figura 7).

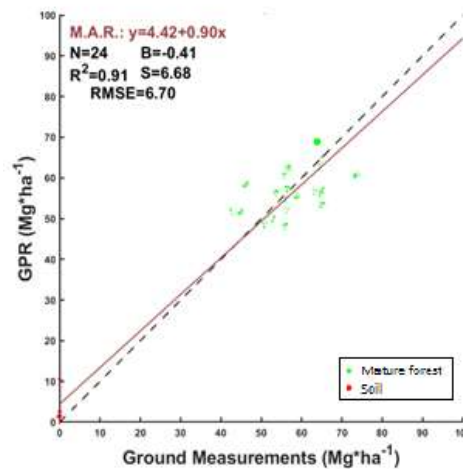


Figura 7. Valores de biomasa medidos vs. estimados con Landsat 8 en 2017

Se destaca que las ecuaciones obtenidas son válidas para las condiciones que establecidas inicialmente y aplicadas sobre la figura 8. Por tanto, son totalmente comparables con $R^2 > 0.80$ en ambos casos. La pendiente indica que por debajo de valores 50t/ha aproximadamente, se está sobreestimando ligeramente la cantidad de biomasa y por encima de 50t/ha se subestima también ligeramente. Los máximos errores se dan a partir de 80t/ha.

Las ecuaciones de biomasa pueden proporcionar estimaciones más precisas que los factores de expansión de la biomasa aérea (*Biomass Expansion Factors*, BEF), por lo que son utilizadas con más frecuencia a fin de estimar la biomasa forestal (IPCC 2003). Estos modelos de estimación de biomasa se construyen a través de muestreos destructivos asociados a un elevado coste. Consisten en relaciones entre el peso seco de la biomasa con alguna característica dendrométrica, el diámetro normal y/o la altura del árbol (Crow y Laidly 1980, Pardé 1980). Con la metodología utilizada en este trabajo, a través de la utilización de imágenes satélite y el modelo de cuantificación se están reduciendo los costes de inventario en gran medida, ya que con unas muestras de 19 y 20 parcelas, se obtienen unos R^2 elevados lo que demuestra una gran bondad de ajuste del modelo obtenido.

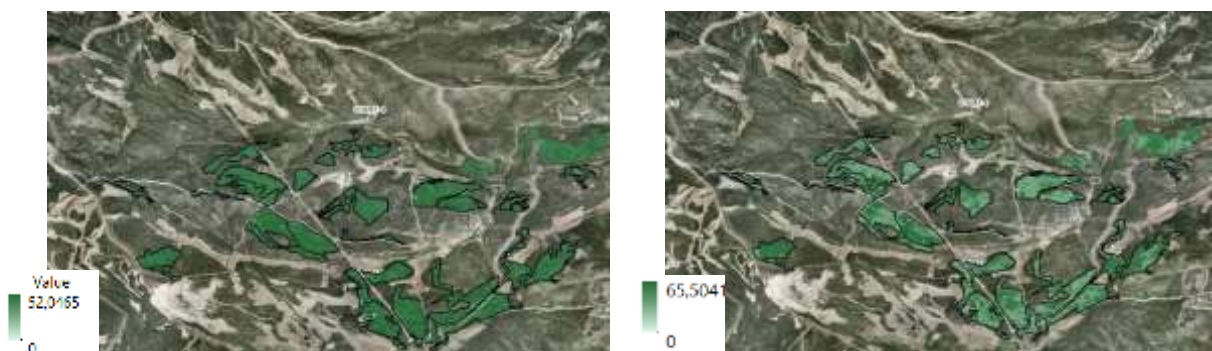


Figura 8. Resultado de la aplicación de las ecuaciones. Biomasa obtenida en 2011 (izquierda) y biomasa en 2017 (derecha) Fuente ortofoto: ©Institut Cartogràfic Valencià

4.2. ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DE TRATAMIENTOS DE CLARAS SELECTIVAS POR LO BAJO EN MASAS ADULTAS DE *PINUS HALEPENSIS* SOBRE LA DINÁMICA DE CRECIMIENTO Y LA FIJACIÓN DE CARBONO EN BASE A LOS MODELOS DESARROLLADOS

Investigaciones previas muestran el papel clave que juega la biomasa arbórea en la estimación de las reservas de carbono en los ecosistemas forestales al representar entre 40% y 70% de la fijación total de los ecosistemas (Nihlgard 1972, Whittaker *et al.* 1974, Zianis y Mencuccini 2003). Entre estos ecosistemas forestales destacan los bosques de coníferas como sumideros de carbono principales (Herrero y Bravo 2012, Gucinski *et al.* 1995).

Hay que tener en cuenta que factores como las características del suelo (Davis *et al.* 2003, Sierra *et al.* 2007), la productividad del lugar (Arnold *et al.* 2005), el paisaje y la composición de las especies, la etapa de desarrollo del rodal (Davis *et al.* 2003) o la edad (Lecoite *et al.* 2006) son importantes impulsores de la variación espacial en la acumulación y los cambios de biomasa (Sierra *et al.* 2007). Por tanto, estas variables deben haber condicionado los resultados del estudio. Según Montero *et al.* (2009), la cantidad de biomasa depende de las existencias de cada especie, teniendo el factor “número de pies” un gran peso en los resultados finales.

Según Herrero y Bravo (2012), la silvicultura es uno de los factores más relevantes que producen cambios en la fijación de carbono. La aplicación de claras en las masas forestales mediante la corta de parte de los pies de la masa principal conlleva a una disminución de la competencia para procurar la estabilidad biológica de la masa y el mantenimiento de su composición específica, obteniendo importantes crecimientos a edades tempranas, mejorando las dimensiones, así como el valor de los productos finales (Río 1999, Serrada 2011).

En el estudio se analizan tres escenarios considerando el valor obtenido directamente de la imagen procesada para el análisis, teniendo en cuenta el error generado por el modelo (en el escenario dos se suman los errores de cada modelo y en el escenario tres se restan) (Anexo 2). Sin embargo, se toma como base para el análisis solamente el escenario uno al ser el más ajustado y representativo para la masa estudiada.

4.2.1. Existencias de carbono

Los resultados obtenidos en cuanto a existencias de carbono (tCO_{2eq}/ha) en los escenarios de gestión y no gestión forestal en 2017 a través de la aplicación del modelo obtenido muestran sobre una selección aleatoria de 60 parcelas que de media se obtiene una fijación de 95 y 102 tCO_{2eq}/ha respectivamente, siendo la desviación típica en ambos escenarios de aproximadamente 8 tCO_{2eq}/ha .

Tabla 5. Valores estadísticos de carbono (tCO_{2eq}/ha) para una muestra de 60 parcelas de *Pinus halepensis* en estrato fustal.

	Año	Mínimo	1er cuartil	Mediana	Media	3er cuartil	Máximo	Desviación estándar
Gestión	2011	79,33	82,80	84,80	85,02	88,61	90,20	3,15
	2017	85,29	88,52	93,16	95,40	99,91	111,98	8,08
No gestión	2011	79,36	83,32	86,28	85,78	88,09	94,78	3,53
	2017	86,06	93,10	104,58	101,67	108,48	113,69	8,07

Las parcelas analizadas presentan una distribución prácticamente simétrica (Figura 9). Si se analiza el año 2017, en el escenario de gestión la diferencia entre la mediana y el tercer cuartil (6,75 tCO_{2eq}/ha) es ligeramente mayor que la diferencia entre la mediana y el primer cuartil (4,64 tCO_{2eq}/ha). Con ello, la masa forestal representada tiene una distribución normal. Por otro lado, en el escenario no gestionado, la diferencia entre la mediana y el tercer cuartil (3,9 tCO_{2eq}/ha) es menor que la diferencia entre la mediana y el primer cuartil (11,48 tCO_{2eq}/ha). Sin embargo, esta ligera diferencia puede ser asumida, considerándose la masa representada ajustable a una distribución normal (Figura 9).

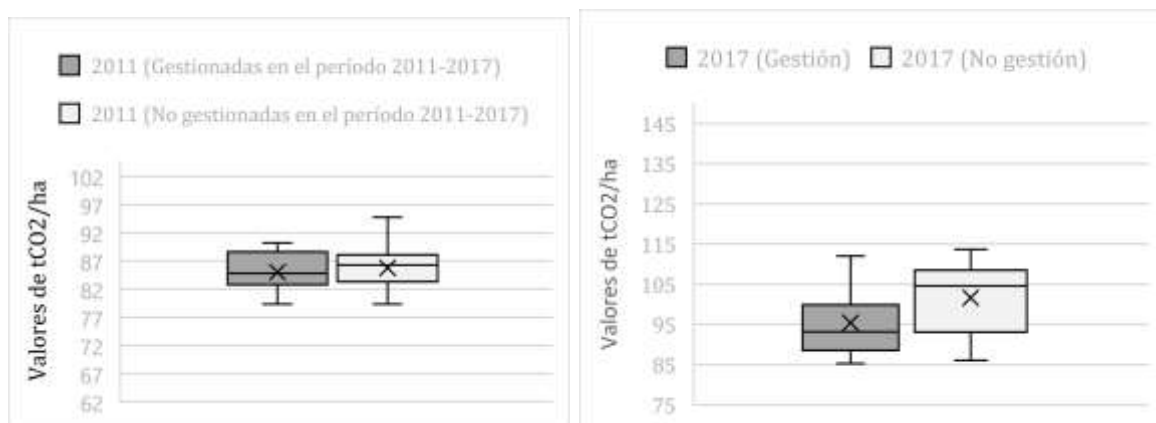


Figura 9. Boxplot o diagrama de cajas de parcelas de existencias de carbono en 2011 (izquierda) y en 2017 (derecha)

4.2.1.1. T-test sobre significancia de las existencias de carbono en función de la realización de los tratamientos selvícolas

Los resultados del t-test entre parcelas de 2011 gestionadas y no gestionadas muestran que no existen diferencias significativas (P value = 0,38 con un 95% de confianza; Pvalue >nivel significancia); mediana y la media coinciden prácticamente tanto en el escenario de gestión (84,80 y 85,02 tCO_{2eq}/ha, respectivamente) como el de no gestión (86,28 y 85,78 tCO_{2eq}/ha). Este resultado verifica la homogeneidad de la masa en el escenario previo a los aprovechamientos.

En cambio, en los escenarios de 2017 de gestión y no gestión los resultados muestran que sí existen diferencias significativas entre parcelas (P value = 0,0039 con un 95% de confianza; Pvalue ≤ 0,05). Por tanto, los resultados muestran una ligera mayor cantidad de carbono promedio fijado en 2017 en el escenario de no gestión (101,67 tCO_{2eq}/ha) frente al de gestión (95,40 tCO_{2eq}/ha). Hay que recalcar que las diferencias observadas, aunque significativas, son muy pequeñas.

Hay que tener en cuenta que en el presente estudio se analiza el carbono fijado en la biomasa sólo de los pies mayores, no llegando a conocer cómo ha afectado la gestión a la totalidad de la cantidad de carbono fijado por todo el ecosistema forestal.

4.2.2. Incrementos de carbono fijado

Los resultados obtenidos en cuanto al incremento de carbono (tCO_{2eq}/ha) en el periodo 2011-2017 en los escenarios de gestión y no gestión forestal a través de la aplicación del modelo obtenido muestran sobre una selección aleatoria de 60 parcelas una media 13,13 tCO_{2eq}/ha , concretamente, de 10,37 y 15,89 tCO_{2eq}/ha en escenarios de gestión y no gestión, respectivamente.

Tabla 6. Valores estadísticos del incremento de carbono ($t CO_{2eq}/ha$) para una muestra de 60 parcelas de *Pinus halepensis* en estrato fustal.

	Mínimo	1 ^{er} cartel	Mediana	Media	3 ^{er} cuartil	Máximo	Desviación estándar
Gestión (2011-2017)	-3,25	4,67	7,49	10,37	16,61	26,74	8,26
No gestion (2011-2017)	-2,17	8,59	17,85	15,89	22,72	25,74	8,08

Analizando el incremento 2017-2011 en el escenario de gestión, se obtiene que la diferencia entre la mediana y el tercer cuartil es ligeramente mayor que la diferencia entre la mediana y el primer cuartil. Aun así, los resultados se ajustan a una distribución normal. En el escenario de no gestión ocurre lo contrario, siendo la diferencia entre la mediana y el tercer cuartil ligeramente menor que la diferencia entre la mediana y el primer cuartil. También aquí podemos considerar una aproximación a la distribución normal (Figura 10). Esto permite el t-test como análisis estadístico inductivo con el fin de evaluar posibles diferencias.

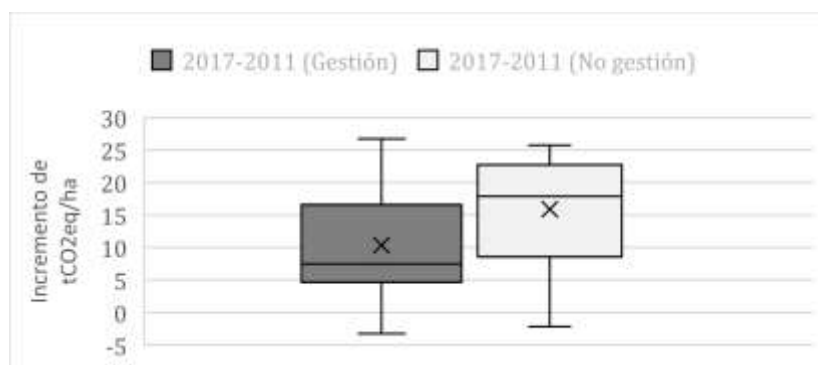


Figura 10. Boxplots o diagrama de cajas de incrementos de carbono en el período 2011-2017

4.2.2.1. T-test sobre significancia de incrementos de fijación de carbono en función de la realización de los tratamientos selvícolas

Los resultados del t-test entre incrementos en el periodo 2011-2017 de carbono fijado en parcelas gestionadas y no gestionadas muestra que existen diferencias significativas (P value = 0,011 con un 95% de confianza; P value \leq nivel significancia). Aunque la mediana y la media no coinciden ni en el escenario de gestión (10,37 y 7,37 tCO_{2eq}/ha) ni el de no gestión (86,28 y 85,78 tCO_{2eq}/ha) respectivamente, en el conjunto total de las 60 muestras, la mediana de las 60 parcelas analizadas (2014-2011) tiene un valor de 13,43 tCO_{2eq}/ha prácticamente igual al promedio 13,13 tCO_{2eq}/ha .

Los resultados muestran una ligera mayor cantidad de carbono promedio fijado en 2017 en el escenario de no gestión (15,89 tCO_{2eq}/ha) frente al de gestión (10,37 tCO_{2eq}/ha),

En general, en el estudio realizado, si se considera un crecimiento homogéneo en los seis años (2011-2017), se obtienen valores muy similares de 13 tCO_{2eq}/ha y año y de 14 tCO_{2eq}/ha y año en escenarios de gestión y no gestión, respectivamente (Anexo 2). Según FEMP (2011), las masas de *Pinus halepensis* fijan una media de entre 4 y 9 tCO_{2eq}/ha y año y el intervalo de valores medios de fijación para un decenio en la especie sería entre 40 y 90 tCO₂/ha. Por tanto, el crecimiento en ambos casos está claramente por encima de la media obtenida por esta fuente.

Los resultados obtenidos se muestran en detalle en el Anexo 2. En general, en las parcelas no gestionadas los incrementos son más acusados y homogéneos.

Sin embargo, hay que tener en cuenta que el uso de las cantidades de carbono existentes en la biomasa aérea, así como las cantidades extraídas como indicadores de la sostenibilidad (Ruíz-Peinado, 2011). El stock total de carbono, incluyendo extracciones, es mayor en las masas aclaradas que en las masas sin aclarar (Ruíz-Peinado *et al.* 2013). En el escenario de no gestión se fija menor cantidad de carbono, aunque si se tiene en consideración la cadena de valor bioenergética de base forestal, la fijación del carbono realizada en el escenario de gestión es mayor.

Díaz-Balteiro y Romero (2007) observan también que la gestión sobre masas monoespecíficas lleva a un incremento en la acumulación total de carbono. Para conocer el efecto de la gestión forestal en el carbono almacenado en bosque, se ha de entender que los potenciales efectos que las actividades selvícolas pueden tener respecto al carbono almacenado serán diferentes dependiendo de la intervención que se realice. Así, las claras fuertes suelen dejar un balance de carbono algo menor que con las claras moderadas (Ruíz-Peinado 2013). Sin embargo, a fin de efectuar una estimación completa del carbono en los ecosistemas forestales, se tendría que incluir la cuantificación de la biomasa de las especies arbustivas, herbáceas, biomasa muerta y carbono contenido en el suelo (Montero *et al.* 2005). Respecto al carbono fijado por el matorral, si se contabilizase puede llegar a incrementar en un porcentaje importante al almacenado en el estrato arbóreo (Alfaro-Sánchez *et al.* 2013). Por otro lado, el carbono en suelo no se ve afectado significativamente por la realización de claras (Ruíz-Peinado 2013). Investigaciones futuras en masa de *Pinus halepensis* deberían tener estos aspectos en cuenta.

Parte de la biomasa que almacenan los bosques podrían transformarse en energía renovable, rebajando así el peligro de incendios y contribuyendo a disminuir el empleo de combustibles fósiles más contaminantes (Oliver-Villanueva 2013). El uso de biocombustibles tiene una implicación directa en el balance de CO₂. Por tanto, aunque el promedio de toneladas de CO₂ equivalentes sea menor en las parcelas no gestionadas respecto a las que sí se han gestionado, cabe destacar que habría que estimar la cantidad de CO₂ que dejaría de emitirse a la atmósfera por el uso de biocombustibles, como fuente de energía renovable, respecto al uso de fuentes de energía fósiles y calcular, el efecto/la tasa de ahorro de emisiones (Cabanés *et al.* 2016). Para ello, se tendría que tomar como referencia los factores de emisiones de CO₂ y poder calorífico inferior (PCI) de diferentes combustibles empleados en el inventario nacional de GE para el período actual disponible (Fernández-Puratich 2013). Concretamente, el poder calorífico es el parámetro de calidad energética más importante, ya que indica la cantidad de energía contenida en los pellets (Lerma 2015). Así pues, si en lugar de usar gas natural o gasóleo se emplea biocombustible forestal, el ahorro sería de 3 toneladas de CO₂ por cada tonelada de combustible sustituido (Cabanés *et al.* 2016). Las emisiones de carbono aún serían mucho más

significativas si las masas forestales fueran arrasadas por incendios forestales si no se aplicaran medidas de prevención y reducción de combustibles en el medio natural y del efecto sustitutivo que la bioenergía realiza frente a otras fuentes de energía no renovables (PROFORBIOMED 2012).

Una silvicultura adecuada planificada en el proyecto de ordenación forestal garantiza el mantenimiento del recurso carbono capturado en un monte, por lo que la propia ordenación podría suponer un incentivo para la revalorización de los montes en los que se practica en cuanto a este servicio ambiental en particular (Tomé *et al.* 2016). Sin embargo, existe una alta heterogeneidad espacial y variabilidad temporal de las reservas y flujos de carbono que generan grandes incertidumbres a largo plazo en el área mediterránea. Por tanto, se han de considerar las incertidumbres sobre las respuestas de los bosques al CC (Sabaté *et al.* 2002) y evaluarse en el futuro a fin de incrementar la absorción de carbono o disminuir las pérdidas de carbono a través de la gestión (LeMay y Kurz 2008). Finalmente, los resultados obtenidos en este estudio nos indican que es necesario cuantificar las reservas de carbono forestal, incluida la biomasa radical, en los bosques tras aplicar una gestión forestal a fin de conocer cómo influye la silvicultura a la evolución de la biomasa en los pinares de *Pinus halepensis* en el Mediterráneo para integrar el carbono en los programas de GFS.

5. CONCLUSIONES

5. CONCLUSIONES

Las principales conclusiones que se extraen de los resultados obtenidos en el TFM son las siguientes:

- El modelo desarrollado de cuantificación y evaluación de carbono fijado en biomasa arbórea en fustales de *Pinus halepensis* basado en métodos de aprendizaje automático aplicados sobre imágenes satelitales está validado por un muy alto coeficiente de determinación y por tanto es posible utilizar este modelo para estimar la cantidad de biomasa de una manera sencilla y eficiente. Además, la resolución espacial del análisis puede considerarse como suficiente.
- La gestión forestal sostenible influye directamente en la dinámica de la fijación de carbono. Aunque las claras selectivas se han realizado a una edad avanzada, las masas estudiadas han sido capaces de seguir fijando carbono.
- Las existencias de carbono en escenarios de gestión y no gestión apenas varían, por lo que, si tenemos en cuenta el carbono exportado en el aprovechamiento de las claras para uso bioenergético, el total de fijación de carbono es claramente positivo en el escenario de gestión, más teniendo en cuenta el efecto sustitutivo de la biomasa en su valorización energética frente a fuentes de energías fósiles.
- A ello hay que añadir que la extracción de biomasa por claras selectivas de árboles dominados reduce considerablemente la carga de combustible, minimizando el riesgo de incendios forestales y, por consiguiente, de emisiones súbitas de carbono a la atmósfera. Además, se favorece la persistencia del ecosistema por la mejora del vigor de la masa remanente y su capacidad de fructificación para la regeneración natural de la siguiente generación en un escenario de cambio climático.
- Se evidencia que existe una variación notable en los incrementos en la fijación de carbono tras los tratamientos selvícolas entre las parcelas estudiadas en el periodo evaluado. Los resultados obtenidos muestran la necesidad futura en la investigación de segmentar el análisis por tipo de tratamiento y periodos de crecimiento de la masa remanente, que se podría conseguir con una mayor y más apropiada resolución temporal de las imágenes satelitales.
- Los resultados de la investigación deben servir de base para investigaciones futuras que ahonden en el análisis integral de la dinámica de fijación de carbono en la totalidad del ecosistema, teniendo en cuenta no solo la biomasa arbórea, sino también la biomasa en otros estratos arbustivos y herbáceos, la madera muerta y la biomasa subterránea. Finalmente, se debería profundizar en la cuantificación de la huella de carbono de la biomasa extraída en los tratamientos selvícolas con fines bioenergéticos en toda su cadena de valor.

6. BIBLIOGRAFÍA

6. BIBLIOGRAFÍA

- ALFARO-SÁNCHEZ, R., LÓPEZ-SERRANO, F.R., RUBIO, E., DE LAS HERAS, J. Y MOYA, D. (2013). La importancia del sotobosque en la cuantificación de los depósitos de carbono en masas jóvenes de *Pinus halepensis* Mill. En el SE español. Sexto Congreso Forestal Español. Vitoria-Gasteiz. *Sociedad Española de Ciencias Forestales*.
- ALLUÉ, E., NADAL, J., ESTRADA, A. Y GARCÍA-ARGUELLES, P. (2007). Los datos antropológicos de la Balma del Gai: Una aportación al conocimiento de la vegetación y la explotación de los recursos forestales durante el tardiglaciario en el NE peninsular. *Trabajos de Prehistoria* 64 (1), 87-89.
- ARNOLD, K., HÄNNEL, B., STENDAHL, J. AND KLEMEDTSSON, L. (2005). Greenhouse gas fluxes from drained organic forestland in Sweden. *Scandinavian Journal Forest Research*, 20, 400–411.
- BALBOA-MURIAS, M.A., RODRIGUEZ-SOALLEIRO, R., MERINO, A. AND ALVAREZ-GONZALEZ, J.G. (2006). Temporal variations and distribution of carbon stocks in aboveground biomass of radiata pine and maritime pine pure stands under different silvicultural alternatives. *Forest Ecology and Management* 237, 29-38.
- BRAVO, F., BRAVO-OVIEDO, A. AND DÍAZ BALTEIRO, L., (2008b). Carbon sequestration in Spanish Mediterranean forest under two management alternatives: a modeling approach. *European Journal of Forest Research* 127,225-234.
- BRAVO, F., RÍO, M., BRAVO-OVIEDO, A., PESO, C. AND MONTERO, G. (2008a). Forest management strategies and carbon sequestration. In: BRAVO. F., JANDL. R., LEMAY. V., GADOW. K. (Eds.) *Managing forest ecosystems: the challenge of climate change*. Springer Netherlands, 179-194.
- CABANES, M., ESCRIG DEL VALLE, A. Y OLIVER-VILLANUEVA, J.V. (2016). El carbono en los ecosistemas forestales valencianos. Conferencia del II Congreso Forestal de la Comunitat Valenciana. Segorbe. Actas: 217 – 230. Plataforma Forestal Valenciana y Universitat de València. ISBN: 978-84-9133-019-6
- CAMPOS, P., CAPARRÓS, A., OVIEDO, J.L. Y OVANDO, P. (2008). La renta ambiental de los bosques. *Arbor* 184, 57-69.
- CAMPS-VALES, G., GÓMEZ-CHOVA, L., MUÑOZ-MARI, J., VILA-FRANCES, J., AMOROS, J., DEL VALLE-TASCON, S. AND CALPE-MARAVILLA, J. (2009). Biophysical parameter estimation with adaptive Gaussian Processes. Conference: Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2009 *IEEE International, IGARSS 2009*, Volume: 4.
- CANADELL, J.G. AND RAUPACH, M.R. (2008). Managing forests for climate change mitigation. *Science* 320, 1456-1457.
- CAPARRÓS, A., OVANDO, P., OVIEDO, J.L. AND CAMPOS, P. (2011). Accounting for carbon in avoided degradation and reforestation programs in Mediterranean forests. *Environment and Development Economics* 16, 405-428

- CE (2009). Comisión Europea. Directiva 2009/28/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 23 de abril de 2009 relativa al fomento del uso de energía procedente de fuentes renovables y por la que se modifican y derogan las Directivas 2001/77/CE y 2003/30/CE. Recuperada de: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?uri=celex%3A32009L0028>
- CE (2011). Comunicación 112 de 2011 (COM (2011)112 final <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?uri=CELEX%3A52011DC0112>)
- CE (2012). COMMUNICATION FROM THE COMMISSION TO THE EUROPEAN PARLIAMENT, THE COUNCIL, THE EUROPEAN ECONOMIC AND SOCIAL COMMITTEE AND THE COMMITTEE OF THE REGIONS Accounting for land use, land use change and forestry (LULUCF) in the Union's climate change commitments/* COM/2012/094 final */
- CE (2013). Comisión Europea. EU Energy in Figures. Statistical Pocketbook 2013. Luxembourg: Publications Office of the European Union 2013. *Environment and Energy*. 252 pp.
- CE (2018a). Comisión Europea. Una economía baja en carbono para 2050. Recuperado de: https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2050_es#tab-0-0
- CE (2018b). Comisión europea. Paquete de medidas sobre el clima y energía hasta 2020. Recuperado de: https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2020_es
- COITF (2015). Colegio Oficial de Ingenieros de Montes. NP Los bosques españoles fijan el 37% de las emisiones anuales españolas de CO₂. Recuperado de: <http://www.forestales.net/Canales/Ficha.aspx?IdMenu=9e4e08fd-fcc9-48f9-bb0d-17d6cf0e5fbe&Cod=11f1e56e-2021-4f9e-a238-3d7fb1cf0c5a&Idioma=es-ES>
- COLLABORATIVE PARTNER ON FOREST (CPF) (2008). The CPF strategic framework for forests and climate change. A proposal by the Collaborative Partnership on Forests for a coordinated forest-sector response to climate change. Poznan-UNFCCC COP 14-5.
- CROW, T.R. AND LAIDL, P.R. (1980). Alternative models for estimating woody plant biomass. *Canadian Journal of Forest Research* 10, 367-370.
- DAVIS, M.R., ALLEN, R.B. AND CLINTON, P.W. (2003). Carbon storage along a stand development sequence in a New Zealand Nothofagus forest. *Forest Ecol. Manag.* 177,313–321.
- DEL RÍO, M., BARBEITO, I., BRAVO-OVIEDO, A., CALAMA, R., CAÑELLAS I., HERRERO, C. AND BRAVO, F. (2008) Carbon Sequestration in Mediterranean Pine Forests. In: Bravo F., Jandl R., LeMay V., von Gadow K. (eds) *Managing Forest Ecosystems: The Challenge of Climate Change. Managing Forest Ecosystems*, vol 17. Springer, Dordrecht
- D.G.C.N. (2006). III Inventario Forestal Nacional Español 1996-2006. Dirección General de Conservación de la Naturaleza, Ministerio de Medio Ambiente, Madrid.
- DÍAZ-BALTEIRO, L. AND ROMERO, C. (2003) Forest management optimization models when carbon captured is considered: a goal programming approach. *Forest ecology and Management* 174, 447-457.

- DÍAZ-BALTEIRO, L. Y ROMERO, C. (2007). Análisis económico de la fijación de CO₂ en los sistemas forestales. El papel de los bosques españoles en la mitigación del cambio climático/coord. por Felipe Bravo Oviedo, 2007, ISBN 978-84-611-6599-5, 223-262
- DREXHAGE, M. AND COLIN, F. (2001). Estimating root system biomass from breast-height diameters. *Forestry* 74,491-497.
- EU (2015). European Union. Natura 2000 and Forests. Part I-II. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities, 2015. *Environment*. Technical Report - 2015 – 088.
- Euroserv'er (2017). Solid Biomass Barometer. Comisión Europea. December 2017. Recuperado de: <https://www.euroserv-er.org/pdf/solid-biomass-barometer-2017-en/>
- EUROSTAT (2018a). Estadísticas de energía renovable. Unión Europea. Recuperada de : http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=File:Figure_3-Primary_production_of_energy_from_renewable_sources_EU-28_1990-2016.png
- EUROSTAT (2018b). Estadísticas de energía renovable. Unión Europea. Recuperada de: http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=File:Figure_3-Primary_production_of_energy_from_renewable_sources_EU-28_1990-2016.png
- USGS (2018). What are the band designations for the Landsat satellites? Recuperado de: <https://landsat.usgs.gov/what-are-band-designations-landsat-satellites>
- FAO (2012). Comité forestal, 21º período de sesiones. Resultado de Río+20 en medidas prácticas dendroenergía para un futuro sostenible. Food and Agriculture Organization of the United Nations. COFO/2012/5. Roma.
- FAO (2018). Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Energía. Directrices para una bioeconomía sostenible. Recuperado de: <http://www.fao.org/energy/bioeconomy/es/>
- FEMP (2011). Los sumideros de carbono a nivel local. Federación Española de Municipios Forestales. 162. Soria
- Fernández Puratich, H.W. (2013). Valorización integral de la biomasa leñosa agroforestal a lo largo del gradiente altitudinal en condiciones Mediterráneas. Universitat Politècnica de València. doi:10.4995/Thesis/10251/19133
- FISHER, J., JACKSON, S. AND BIEWALD, B. (2012). The Carbon Footprint of Electricity from Biomass A Review of the Current State of Science and Policy. *Synapse Energy Economics, Inc.* Massachusetts, USA 65.
- FORBIOENERGY (2017). Forest Bioenergy in the Protected Mediterranean Areas (2016-2019). Interreg MED program. Baseline review of the study areas (D.3.2.1)
- FORBIOENERGY (2018). Forest Bioenergy in the Protected Mediterranean Areas (2016-2019). Interreg MED program. Impact assessment of increase biomass use in the short, medium and long term in the protected areas (D.3.5.1)
- FOREST EUROPE (2015). Work Programme. Pan-European Follow-Up of the 7th FOREST EUROPE Ministerial Conference and the Extraordinary Ministerial Conference, Madrid.

- FRÜHWALD, A., WEGENER, G., KRÜGER, S. AND BEUDERT, M. (1994): Forst- und Holzwirtschaft unter dem Aspekt der CO₂-Problematik. Forstabsatzfonds Bonn: Forschungsbericht.
- GALIDAKI, G., ZIANIS, D., GITAS, I., RADOGLU, K., KARATHANASSI, V., TSAKIRI-STRATI, M., WOODHOUSE, I. AND MALLINIS, G. (2017). Vegetation biomass estimation with remote sensing: focus on forest and other wooded land over the Mediterranean ecosystem. *International Journal of Remote Sensing*, 38:7, 1940-1966. doi:10.1080/01431161.2016.1266113.
- GENERALITAT VALENCIANA (2013) Plan de Acció Territorial Forestal de la Comunitat Valenciana (PATFOR). Recuperado de: <http://www.agroambient.gva.es/documents/20551003/164635011/PATFOR+Memoria+Versi%C3%B3n+final/e359be7b-bdfc-44d9-b6d7-68a92aabdbd6;jsessionid=EC356E5DDE661022D5347A583B0C0425>
- GUCINSKI, H., VANCE, E. AND REINERS, W.A. (1995). Potential effects of global climate change. In: Smith, W.K., Hickley, T.M. (Eds.), *Ecophysiology of Coniferous Forests*. Academic Press, New York, 309–331.
- HERAS, J., MOYA, D., LÓPEZ-SERRANO, F.R. AND RUBIO, E. (2013). Carbon sequestration of naturally regenerated Aleppo pine stands in response to early thinning. *New Forests* 44, 457-470.
- HERRERO, C., AND BRAVO, F. (2012). Can we get an operational indicator of forest carbon sequestration? A case study from two forest regions in Spain. *Ecological Indicators* 17, 120-126.
- IFN2 (1996). Segundo Inventario Forestal Nacional Español. Ministerio de Agricultura Gobierno de España. Recuperado de: <https://www.mapama.gob.es/es/biodiversidad/servicios/banco-datos-naturaleza/informacion-disponible/ifn2.aspx>
- IFN3 (2008). Tercer Inventario Forestal Nacional Español. Ministerio de Agricultura. Gobierno de España. Recuperado de: <https://www.mapama.gob.es/es/biodiversidad/servicios/banco-datos-naturaleza/informacion-disponible/ifn3.aspx>
- IPCC (1996). Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (Intergovernmental Panel on Climate Change): Tecnologías, políticas y medidas para mitigar el cambio climático. ISBN: 92-9169-412-6. Recuperado de: <http://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/spm/srpt-sp.pdf>
- IPCC (2003). Good practice guidance for land use, land-use change and forestry. PENMAN, J., GYTARSKY, M., HIRASHI, T., KRUGER, D., PIPATTI, R., BUENDIA, L., MIWA, K., NGARA, T., TANABE, K., WAGNER, F. (Eds). Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), IPP/IGES, Hayama, Japan.
- IPCC (2007). Climate Change. Fourth Assessment Report of the IPCC – The Physical Science Basis (contribution of Working Group I); Impacts, Adaptation and Vulnerability (contribution of Working Group II); Mitigation of Climate Change (contribution of Working Group III). En: The Synthesis Report. *Cambridge University Press*.

- JANDL, R., LINDNER, M., VESTERDAL, L., BAUWENS, B., BARITZ, R., HAGEDORN, F., JOHNSON, D.W., MINKKINEN, K. AND BYRNE, K.A. (2007). How strongly can forest management influence soil carbon sequestration? *Geoderma* 137, 253-268.
- JIMÉNEZ, E., VEGA, J.A., FERNÁNDEZ, C. AND FONTURBEL, T. (2011). Is pre-commercial thinning compatible with carbon sequestration? A case study in a maritime pine stand in northwestern Spain. *Forestry* 84, 149-157.
- KNAUF, M. (2015). A multi-tiered approach for assessing the forestry and wood products industries' impact on the carbon balance. *Carbon Balance and Management* 2015; 10, 1-11.
- KÖPPEN, W.P. AND GEIGER, R. (1936). Das geographische System der Klimate. Recuperado de: http://koeppen-geiger.vu-wien.ac.at/pdf/Koppen_1936.pdf
- KRAXNER, F., NILSSON, S. AND OBERSTEINER, M. (2003). Negative emissions from BioEnergy use, carbon capture and sequestration (BECS) – the case of biomass production by sustainable forest management from semi-natural temperate forests. *Biomass and Bioenergy* 24 (4), 285-296.
- KURZ, W.A., WEBB T.M., MCNAMEE, P.J. AND APPS, M.J. (1993). The carbon Budget of the Canadian forest sector: Phase I. *Simulation* 61, 139-144.
- LECOINTE, S., NYS, C., WALTER, C., FORGEARD, F., HUET, S., RECENA, P. AND FOLLAIN, S. (2006). Estimation of carbon stocks in a beech forest (Fougères Forest W, France): extrapolation from the plots to the whole forest. *Ann. Forest Sci.* 63, 139–148.
- LE GOFF, N. AND OTTORINI, J.M. (2001). Root biomass and biomass increment in a beech (*Fagus sylvatica* L.) stand in North-East France. *Annals of Forest Science* 58, 1-13.
- LEMAY, V.M. AND KURZ, A.W. (2008). Estimating carbon stocks and stock changes in forests: linking models and data across scales. In: Bravo, F., LeMay, V., Jandl, R., Gadow, K.v. (Eds.), *Managing Forest Ecosystems: The Challenge of Climate Change. Managing Forest Ecosystems*. Springer, New York, USA, 63–81.
- LERMA-ARCE, V., OLIVER-VILLANUEVA, J.V., SEGURA, G. (2014). Comparison of two harvesting methods for bioenergy thinning in Mediterranean pine forests. FEC - FORMEC - 2014 Conference Contributions. ID 161. Fifth Forest Engineering Conference and 47th international Symposium on Forestry Mechanisation. 23-26.09. 2014. Gerardmer (Francia)
- LERMA ARCE, V. (2015). Planificación, logística y valorización de biomasa forestal residual en la provincia de Valencia. Universitat Politècnica de València. doi:10.4995/Thesis/10251/52391.
- LIFE+ BIOENERGY AND FIRE PREVENTION (2013). Contribution of forest biomass generated in the prevention of forest fires in the EU energy strategy. LIFE09 ENV/ES/000450. 2011-2013. http://ec.europa.eu/environment/life/project/Projects/index.cfm?fuseaction=search.dspPage&n_proj_id=3653

- GUMLEY L.E. Y MADISON. UNIVERSITY OF WISCONSIN-MADISON (2002) PRACTICAL IDL PROGRAMMING.
- MACKAY, D.J.C. (1998). Introduction to Gaussian Processes, Neural Networks and Machine Learning. In Bishop, C. M., editor; Springer-Verlag.
- MADRIGAL, J., HERNANDO, C., GUIJARRO, M., DÍEZ, C. Y JIMÉNEZ, E. (2008). Distribución de biomasa y fijación de carbono tras claros mecanizados intensos en regenerado post-incendio de *Pinus pinaster* Ait. (Monte "Fraguas", Guadalajara, España). *Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales* 15: 231-242.
- MAGRAMA (2018). Ministerio de Agricultura y Alimentación. Bosques y cambio climático. Recuperada de: <https://www.mapama.gob.es/es/desarrollo-rural/temas/politica-forestal/planificacion-forestal/bosques-y-cambio-climatico/index.aspx>
- MANTAU, U. AND BILITEWSKI, B. (2010): Stoffstrom-Modell-Holz. Bestimmung des Aufkommens, der Verwendung und des Verbleibs von Holzprodukten. Forschungsbericht für den Verband Deutscher Papierfabriken e.V. (VDP). Celle (Alemania)
- MONTERO, G., MUÑOZ, M. AND AGUDO, R. (2009). Cuantificación del CO₂ fijado por las principales especies forestales arbóreas en Andalucía. IV congreso forestal español. Zaragoza.
- MARTÍNEZ DE ARANO, I., PALAHÍ, M., FARCY, C., ROJAS, E. Y HETEMÄKI, L. (2018). Perspectivas de una bioeconomía forestal en el Mediterráneo. *Mediterráneo Económico* 31. ISSN: SSN: 1698-3726 | ISBN-13: 978-84-95531-89-6
- MMAMRM. 2010. Estrategia Española para el desarrollo del uso energético de la biomasa forestal residual. Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino. Madrid. Recuperado de: https://www.mapama.gob.es/es/biodiversidad/publicaciones/Estrategia%20Biomasa%20Forestal%20Residual%20Marzo%202010_tcm30-155830.pdf
- MONTERO, G., RUIZ-PEINADO, R. Y MUÑOZ, M. (2005) Producción de biomasa y fijación de CO₂ por los bosques españoles. Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria, Ministerio de Educación y Ciencia, Madrid, 270.
- NABUURS, G. AND MOHREN, G. (1993). Carbon fixation through forestation activities: a study of the carbon sequestering potential of selected forest types. IBN Research Report 93/4. Institute for Forestry and Nature Research, 205 pp. Wageningen (Holanda)
- NABUURS, G.J., MASERA, O., ANDRASKO, K., BENÍTEZ-PONCE. P., BOER, R., DUTSCHKE, M., ELSIDDIG, E., FORD-ROBERTSON, J., FRUMHOFF. P., KARJALAINEN, T., KRANKINA, O.N., KURZ, W.A., MATSUMOTO, M., OYHANTCABAL, W., RAVINDRANATH, NH., SÁNZ SÁNCHEZ, M.J. AND ZHANG, X. (2007) Forestry In: METZ B, DAVIDSON OR, BOSCH PR, DAVE R, MEYER LA (Eds.) Climate Change 2007: mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. *Cambridge University Press*, p. 541-584. Cambridge (Gran Bretaña).
- NEAL, R.M. (1996). Bayesian learning for neural-networks. New York: Springer. *Lecture Notes in Statistics* 118.

- NELSON, R., SHORT, A. AND VALENTI, M. (2004) Measuring biomass and carbon in Delaware using an airborne profiling LIDAR. *Scandinavian Journal of Forest Research* 19, 500-511.
- NIHLGARD, B. (1972). Plant biomass, primary production and distribution of chemical elements in a beech and planted spruce forest in South Sweden. *Oikos* 23, 203–212.
- OLIVER-VILLANUEVA, J.V. (2013). Bioenergía desaprovechada. Boletín Informativo Bosc Valencia nº2 Noviembre 2013. Plataforma Forestal Valenciana.
- ONU (1998). Protocolo de Kyoto 1997 de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático.
- PARDÉ, J. (1980). Forest biomass. *Forestry Abstracts* 41, 343-363.
- PER (2011). PLAN DE ENERGÍAS RENOVABLES (PER) (2011-2020). IDAE - Instituto para la Diversificación y ahorro de la energía.
- PATENAUDE, G., MILNE, R. AND DAWSON, T.P. (2005). Synthesis of remote sensing approaches for forest carbon estimation: reporting to the Kyoto Protocol. *Environmental Science & Policy* 8, 161-178.
- PROFORBIOMED (2010-2013). Proyecto Interreg MED “Promotion of residual forestry biomass in the Mediterranean basin” financiado por el programa de Cooperación Territorial Transnacional. Número de proyecto: 1S-MED10-009
- REINO, S. (2013). Detección de zonas urbanas en imágenes de satélite radar (SAR). Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Telecomunicación. Universidad Politécnica de Cartagena. Recuperado de: <http://repositorio.upct.es/handle/10317/3472>
- RICHARDS, G.P. AND EVANS, D.W. (2000). CAMFor User Manual v 3.35. National Carbon Accounting System Technical Report no. 26. Australian Greenhouse Office, Canberra, 47 p.
- RÍO, M. (1999). Régimen de claras y modelos de producción de *Pinus sylvestris* L. en los sistemas Central e Ibérico. Tesis doctoral, INIA, 257.
- RÍO, M., BARBEITO, I., BRAVO-OVIEDO, A., CALAMA, R., CAÑELLAS, I. AND BRAVO, F. (2008). Carbon sequestration in Mediterranean pine forest. In: BRAVO F, LEMAY V, JANDL R, GADOW KV (Eds.). *Managing forest ecosystems: the challenge of climate change*. Springer, Netherlands, 221-245.
- ROCKSTRÖM, J., GAFFNEY, O., MEINSHAURSEN, M., NAKICENOVIC, N. AND SCHELLNHUBER, H.J. (2017). A roadmap for rapid decarbonization. *Science* 355 (6331), 1269-1271. [doi: 10.1126/science.aah3443]
- RODRÍGUEZ-MURILLO, J.C. (1994). The carbon Budget of the Spanish forests. *Biogeochemistry* 25, 197-217
- ROJAS, E. (2018). Bioeconomía, clave en la lucha contra el cambio climático, la despoblación y los incendios. *NATURAL*. ABC.
- RUIZ-PEINADO, R. (2013). Modelos para la estimación del carbono en la biomasa de los sistemas forestales. Influencia de la silvicultura en los stocks de carbono. Tesis Doctoral.

Universidad de Valladolid. Instituto Universitario de Investigación y Gestión Forestal Sostenible.

- RUIZ-PEINADO Y MONTERO, (2009). Selvicultura del carbono. Centro de Investigación Forestal – CIFOR-INIA y Instituto Universitario de Gestión Forestal Sostenible Uva-INIA. Bosques, sumidero de carbono y cambio climático. Zaragoza.
- RÜTER, S. (2011): Welchen Beitrag leisten Holzprodukte zur CO₂-Bilanz? AFZ, der Wald. 2011(15), 15-8.
- SABATÉ, S., GRACIA, C.A. AND SÁNCHEZ, A. (2002). Likely effects of climate change on growth of *Quercus ilex*, *Pinus halepensis*, *Pinus pinaster*, *Pinus sylvestris* and *Fagus sylvatica* forests in the Mediterranean region. *Forest Ecol. Manag.* 162, 23–37.
- SCARASCIA-MUGNOZZA, G., OSWALD, H., PIUSSI, P. AND RADOGLU, K. (2000). Forests of the Mediterranean region: gaps in knowledge and research needs. *Forest Ecology and Management* 132, 97-109.
- Scarascia-Mugnozza, G. AND Pisanelli, A. (2008). Multifunctional forestry, global change and the impact on mobilizing wood resources. Cost Action E44 Final Conference in Milan on A European wood processing strategy: future resources matching products and innovations (May 30th and June 2nd-3rd 2008).
- SCHLAMADINGER, B. AND MARLAND, G. (1996). The role of forest and bioenergy strategies in the global carbon cycle. *Biomass and Bioenergy* 10, 275-300.
- SERRADA, R. (2011). Apuntes de Selvicultura. Fundación Conde del Valle de Salazar. Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Forestal, Madrid, 502.
- SIERRA, C.A., HARMON, M.E., MORENO, F.H., ORREGO, S.A. AND DEL VALLE, J.I. (2007). Spatial and temporal variability of net ecosystem production in a tropical forest: resting the hypothesis of a significant carbon sink. *Global Change Biol.* 13, 838–853
- SKOG, K.E. (2008): Sequestration of carbon in harvested wood products for the United States. *Forest Products Journal* 2008 (56), 56-72.
- TFD (2008) Más allá de las iniciativas de REDD. The Forests Dialogue. La función de los bosques en el cambio climático. Disponible en www.theforestsdialogue.org
- TOMÉ, J.L, CANTÓN, J. Y SÁNCHEZ, T. (2016). Aplicación de la tecnología LiDAR a la valorización de los balances de carbono capturado en montes ordenados en la Comunitat Valenciana, el caso del monte Ametler (Castellón). II Congreso Forestal de la Comunitat Valenciana. Segorbe. 160-172.
- UE (2017). DOUE. Diario Oficial de la Unión Europea. Dictamen del Comité Económico y Social Europeo sobre la «Propuesta de Reglamento del Parlamento Europeo y del Consejo sobre la inclusión de las emisiones y absorciones de gases de efecto invernadero resultantes del uso de la tierra, el cambio de uso de la tierra y la silvicultura en el marco de actuación en materia de clima y energía hasta 2030, y por el que se modifica el Reglamento (UE) n.º 525/2013 del Parlamento Europeo y el Consejo, relativo a un mecanismo para el seguimiento y la notificación de las emisiones de gases de efecto invernadero y de otra información relevante para el cambio climático» [COM(2016) 479

final — 2016/0230(COD)]. Recuperado de: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/PDF/?uri=CELEX:52016AE4477&from=ES>

- UMWELTBUNDESAMT (2012): Berichterstattung unter der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen und dem Kyoto-Protokoll 2012. Nationaler Inventarbericht zum Deutschen Treibhausgasinventar 1990-2010. Dessau-Roßlau
- UNIÓN POR LA BIOMASA (2013). Creación de empleo para la reducción de incendios forestales. Boletín Informativo Bosc Valencia nº2 Noviembre 2013. Plataforma Forestal Valenciana
- VERRELST, J., CAMPS-VALLS, G., MUÑOZ-MARÍ, J., RIVERA, J.P., VEROUSTRAETE, F., CLEVERS, J.G.P.W., J. AND MORENO, J. (2015). OPTICAL REMOTE SENSING AND THE RETRIEVAL OF TERRESTRIAL VEGETATION BIO-GEOPHYSICAL PROPERTIES – A REVIEW. *ISPRS JOURNAL OF PHOTOGRAMMETRY AND REMOTE SENSING*, 108: 273-290.
- VINUÉ (2011). Estimación de la biomasa en masas homogéneas de pinar mediante imágenes Landsat y ecuaciones de biomasa en la Provincia de Palencia. Trabajo Final de Máster. Universitat de València. Facultat de Física.
- VINUÉ-VISÚS, D., CAMACHO DE COCA, F., OLIVER-, J.V., FUSTER, B. AND COLL-ALIAGA, E. (2018). Machine learning methods for total biomass assessment of *Pinus halepensis* Mill. Combining forest inventories and Sentinel imagery. EOLAB Spain SL y Universitat Politècnica de Valencia, ITACA Instituto de Investigación (en revisión).
- WHITTAKER, R.H., BORMANN, F.H., LIKENS, G.E. AND SICCANNA, T.G. (1974). The Hubbard Brook ecosystems study: forest biomass and production. *Ecol. Monogr.* 44, 233–254
- YÁÑEZ Y VARGAS-MENA, A. (2004) La captura de carbono en bosques, ¿una herramienta para la gestión ambiental? *Gaceta ecológica*. Instituto Nacional de Ecología. México. P6 [en línea]. Disponible en: dialnet.unirioja.es/servlet/fichero_articulo?codigo=2882569.
- ZIANIS, D., MENCUCUNI, M. (2003). Aboveground biomass relationship for beech (*Fagus moesiaca* Cz.) trees in Vermio Mountain, Northern Greece, and generalised equations for *Fagus* sp. *Ann. Forest Sci.* 60, 439–448

7. ANEJOS

**ANEJO 1. MODELOS PARA ESTIMAR LA
CAPACIDAD DE FIJACIÓN DE CARBONO Y
CÁLCULO DEL CO₂ ACUMULADO**

ANEJO 1.

MODELOS PARA ESTIMAR LA CAPACIDAD DE FIJACIÓN DE CARBONO DE LAS CONÍFERAS ESPAÑOLAS

“Metodología de mínimos cuadrados generalizados conjuntos para el cumplimiento de la aditividad entre componentes. Como variables independientes se utilizaron el diámetro normal y la altura total del árbol. El diámetro aparece en todas las ecuaciones como variable significativa, mientras que la altura aparece también en todos los modelos para la biomasa de fuste y en algunos modelos para las ramas. Los modelos ajustados fueron comparados con otras ecuaciones publicadas para comprobar con precisión, presentando mejores estadísticos en todos los casos” (Ruíz-Peinado 2013)

Tabla 1. Modelos ajustados por mínimos cuadrados generalizados conjuntos (SUR) y estadísticos para las especies de coníferas (Ruíz-Peinado 2013)

Especies / fracciones	Modelo	MRES	RMSE	EF
<i>Pinus halepensis</i> Mill.				
Fuste	$B_f = 0,0139 \cdot d^2 \cdot h$	-4,13	21,43	0,93
Ramas gruesas	Si $d \leq 27,5$ cm $\rightarrow Z=0$; Si $d > 27,5$ cm $\rightarrow Z=1$; $B_{r7} = [3,926 \cdot (d-27,5)] \cdot Z$	1,54	14,75	0,61
Ramas medias	$B_{r2-7} = 4,257 + 0,00506 \cdot d^2 \cdot h - 0,0722 \cdot d \cdot h$	-0,19	7,54	0,91
Ramillas + acículas	$B_{r2+a} = 6,197 + 0,00932 \cdot d^2 \cdot h - 0,0686 \cdot d \cdot h$	-1,14	13,79	0,93
Raíces	$B_r = 0,0785 \cdot d^2$	0,40	23,46	0,87

B_f : peso de la biomasa de fuste (kg); B_{r7} : peso de la biomasa de las ramas gruesas (diámetro mayor de 7 cm) (kg); B_{r2-7} : peso de la biomasa de las ramas medias (diámetro entre 2 y 7 cm) (kg); B_{r2+a} : peso de la biomasa de las ramillas (diámetro menor de 2 cm) con acículas (kg); B_r : peso de la biomasa radical (kg); d : diámetro normal (cm); h : altura del árbol (m); *MRES*: residuo medio; *RMSE*: raíz del error cuadrático medio; *EF*: eficiencia del modelo.

CÁLCULO DEL CO₂ ACUMULADO

“Mediante la proporción entre el peso de la molécula de CO₂ y el peso del átomo de C que la compone se halla la relación que se utilizará para obtener los kg de CO₂ equivalente a partir de la cantidad de carbono presente en la biomasa (44/12 = 3,67). Así, multiplicando los valores modulares de biomasa por el contenido en carbono y por la relación molécula de CO₂-peso átomo C se obtiene los valores modulares de CO₂ acumulado, por clases diamétricas y fracciones de biomasa para cada especie.” (Montero *et al.*, 2005)

Tabla 2. Porcentaje en peso de carbono contenido en la materia seca aplicado a cada especie (Montero *et al.*, 2005)

TABLA 3
Porcentaje en peso de carbono contenido en la materia seca aplicado a cada especie

Especie	% carbono	Especie	% carbono
<i>Abies alba</i> Mill.	50,6	<i>Pinus halepensis</i> Mill.	49,9
<i>Abies pinsapo</i> Boiss.	50,0	<i>Pinus nigra</i> Arn.	50,9
<i>Alnus glutinosa</i> L.	50,0	<i>Pinus pinaster</i> Ait.	51,1
<i>Betula</i> spp.	48,5	<i>Pinus pinea</i> L.	50,8
<i>Castanea sativa</i> Mill.	48,4	<i>Pinus radiata</i> D. Don	49,7
<i>Ceratonia siliqua</i> L.	50,0	<i>Pinus sylvestris</i> L.	50,9
<i>Erica arborea</i> L.	50,0	<i>Pinus uncinata</i> Mill.	50,9
<i>Eucalyptus</i> spp.	47,5	<i>Populus x euramericana</i> (Dode) Guinier	48,3
<i>Fagus sylvatica</i> L.	48,6	<i>Quercus canariensis</i> Willd.	48,6
<i>Fraxinus</i> spp.	47,8	<i>Quercus faginea</i> Lamk.	48,0
<i>Ilex canariensis</i> Poit.	50,0	<i>Quercus ilex</i> L.	47,5
<i>Juniperus oxycedrus</i> L./ <i>J. communis</i> L.	50,0	<i>Quercus pyrenaica</i> Willd.	47,5
<i>Juniperus phoenicea</i> L./ <i>J. sabina</i> L.	50,0	<i>Quercus robur</i> L./ <i>Q. petraea</i> Liebl.	48,4
<i>Juniperus thurifera</i> L.	47,5	<i>Quercus suber</i> L.	47,2
<i>Laurus azorica</i> (Seub.) Franco	50,0	Otras coníferas	50,0
<i>Myrica faya</i> Ait.	50,0	Otras frondosas	50,0
<i>Olax europaea</i> var. <i>sylvestris</i> Brot.	47,3	Otras lauráceas	50,0
<i>Pinus canariensis</i> Sweet ex Spreng.	50,0		

ANEJO 2. RESULTADOS OBTENIDOS SEGÚN ESCENARIO

	ESCENARIO 1: PARCELAS GESTIONADAS		W (t/ha)			Carbono fijado			tCO _{2eq} /ha		
	Coordenada X	Coordenada Y	2017	2011	2017-2011	2017	2011	2017-2011	2017	2011	2017-2011
1	679873	4309862	49,20	45,02	4,18	24,55	22,46	2,09	90,01	82,37	7,64
2	679831	4309816	48,40	44,39	4,01	24,15	22,15	2,00	88,56	81,22	7,35
3	679926	4309779	48,32	46,09	2,24	24,11	23,00	1,12	88,41	84,32	4,09
4	679843	4309736	49,42	46,56	2,87	24,66	23,23	1,43	90,43	85,18	5,25
5	678860	4309916	49,29	46,44	2,84	24,60	23,17	1,42	90,18	84,98	5,20
6	679257	4310138	52,82	44,14	8,68	26,36	22,03	4,33	96,64	80,76	15,88
7	679429	4310203	60,52	45,91	14,62	30,20	22,91	7,30	110,74	83,99	26,74
8	677956	4309648	49,11	48,16	0,95	24,51	24,03	0,47	89,86	88,12	1,75
9	678121	4309500	46,61	46,25	0,36	23,26	23,08	0,18	85,29	84,62	0,67
10	678845	4309543	53,05	43,36	9,69	26,47	21,64	4,84	97,05	79,33	17,72
11	679379	4309206	61,20	48,42	12,78	30,54	24,16	6,38	111,98	88,60	23,38
12	679454	4309192	58,19	48,52	9,66	29,04	24,21	4,82	106,46	88,78	17,68
13	679308	4309046	47,27	48,99	-1,72	23,59	24,45	-0,86	86,49	89,64	-3,15
14	679424	4309022	58,42	44,33	14,09	29,15	22,12	7,03	106,89	81,11	25,77
15	679625	4309036	50,28	49,30	0,99	25,09	24,60	0,49	92,00	90,20	1,80
16	679474	4308923	49,52	46,50	3,02	24,71	23,20	1,51	90,60	85,08	5,52
17	679788	4308788	51,55	48,90	2,66	25,72	24,40	1,33	94,32	89,46	4,86
18	680823	4308959	54,16	45,40	8,75	27,03	22,65	4,37	99,09	83,08	16,02
19	681208	4309480	59,68	48,65	11,04	29,78	24,28	5,51	109,20	89,01	20,19
20	681293	4309624	47,19	45,80	1,39	23,55	22,85	0,69	86,35	83,81	2,54
21	681476	4309592	52,23	45,33	6,90	26,06	22,62	3,44	95,56	82,95	12,62
22	681519	4309715	54,03	46,66	7,37	26,96	23,28	3,68	98,85	85,38	13,48
23	681610	4309483	48,26	44,60	3,66	24,08	22,26	1,83	88,30	81,60	6,70
24	681656	4309380	46,66	48,44	-1,78	23,28	24,17	-0,89	85,38	88,63	-3,25
25	680254	4310241	54,23	45,34	8,88	27,06	22,62	4,43	99,22	82,96	16,25
26	680687	4310161	55,75	48,44	7,31	27,82	24,17	3,65	102,01	88,63	13,37
27	683010	4309891	53,32	45,58	7,75	26,61	22,74	3,87	97,56	83,39	14,17
28	679494	4309701	47,78	44,07	3,71	23,84	21,99	1,85	87,42	80,63	6,79
29	679218	4309812	49,87	47,13	2,74	24,89	23,52	1,37	91,25	86,23	5,02
30	679303	4309601	57,79	47,33	10,46	28,84	23,62	5,22	105,74	86,60	19,14

	ESCENARIO 1: PARCELAS NO GESTIONADAS		W (t/ha)			Carbono fijado			tCO _{2eq} /ha		
	Coordenada X	Coordenada Y	2017	2011	2017-2011	2017	2011	2017-2011	2017	2011	2017-2011
1	678310	4308661	59,29	47,50	11,79	29,59	23,70	5,88	108,48	86,91	21,57
2	678246	4308549*	57,78	47,10	10,68	28,83	23,50	5,33	105,73	86,18	19,54
3	679846	4309044	54,80	47,97	6,83	27,35	23,94	3,41	100,27	87,77	12,50
4	677227	4311603	59,30	48,21	11,09	29,59	24,06	5,53	108,49	88,21	20,28
5	679907	4308931	50,60	48,20	2,40	25,25	24,05	1,20	92,58	88,19	4,40
6	680059	4308763	55,94	44,94	11,00	27,91	22,43	5,49	102,35	82,22	20,13
7	680168	4308810	61,62	47,61	14,01	30,75	23,76	6,99	112,74	87,11	25,63
8	680370	4309358	59,62	45,85	13,77	29,75	22,88	6,87	109,08	83,88	25,20
9	680412	4309579	59,16	45,56	13,60	29,52	22,73	6,79	108,24	83,36	24,89
10	680502	4309378	57,06	45,48	11,58	28,47	22,69	5,78	104,40	83,22	21,18
11	680614	4309254	57,98	45,83	12,14	28,93	22,87	6,06	106,08	83,86	22,22
12	680458	4308431	52,06	43,37	8,69	25,98	21,64	4,34	95,26	79,36	15,90
13	680575	4308157	62,14	48,13	14,01	31,01	24,02	6,99	113,69	88,06	25,63
14	680789	4307916	50,12	47,83	2,30	25,01	23,87	1,15	91,71	87,51	4,20
15	680731	4307816	55,08	45,79	9,29	27,48	22,85	4,64	100,78	83,78	16,99
16	680757	4307666	48,07	44,36	3,71	23,99	22,14	1,85	87,95	81,16	6,79
17	681049	4307980	58,37	51,80	6,57	29,13	25,85	3,28	106,80	94,78	12,02
18	681136	4307667	50,70	44,48	6,23	25,30	22,20	3,11	92,77	81,38	11,39
19	682070	4307973	59,43	46,19	13,24	29,66	23,05	6,61	108,74	84,52	24,22
20	681581	4308093	57,52	47,21	10,30	28,70	23,56	5,14	105,23	86,38	18,85
21	681366	4308468	48,70	43,68	5,02	24,30	21,80	2,50	89,11	79,91	9,19
22	681818	4308174*	47,03	48,22	-1,18	23,47	24,06	-0,59	86,06	88,22	-2,17
23	681537	4307844	59,20	49,58	9,63	29,54	24,74	4,81	108,32	90,71	17,62
24	682357	4308563	57,26	50,57	6,69	28,57	25,23	3,34	104,77	92,53	12,24
25	682243	4308494	59,43	45,36	14,07	29,66	22,63	7,02	108,73	82,99	25,74
26	682329	4309071	50,11	47,18	2,93	25,00	23,54	1,46	91,68	86,33	5,35
27	682784	4308724	51,10	48,23	2,87	25,50	24,07	1,43	93,49	88,24	5,26
28	682586	4310199*	50,94	47,62	3,32	25,42	23,76	1,66	93,21	87,13	6,08
29	682767	4310259*	59,62	45,57	14,05	29,75	22,74	7,01	109,09	83,39	25,71
30	683034	4310345	57,02	47,13	9,89	28,45	23,52	4,94	104,33	86,24	18,09

	ESCENARIO 2: PARCELAS GESTIONADAS		W (t/ha)			Carbono fijado			tCO _{2eq} /ha		
	Coordenada X	Coordenada Y	2017	2011	2017-2011	2017	2011	2017-2011	2017	2011	2017-2011
1	679873	4309862	55,90	54,06	1,84	27,89	26,98	0,92	96,71	91,41	5,30
2	679831	4309816	55,10	53,43	1,67	27,50	26,66	0,84	95,26	90,26	5,01
3	679926	4309779	55,02	55,13	-0,10	27,46	27,51	-0,05	95,11	93,36	1,75
4	679843	4309736	56,12	55,60	0,53	28,01	27,74	0,26	97,13	94,22	2,91
5	678860	4309916	55,99	55,48	0,50	27,94	27,69	0,25	96,88	94,02	2,86
6	679257	4310138	59,52	53,18	6,34	29,70	26,54	3,16	103,34	89,80	13,54
7	679429	4310203	67,22	54,95	12,28	33,54	27,42	6,13	117,44	93,03	24,40
8	677956	4309648	55,81	57,20	-1,39	27,85	28,54	-0,69	96,56	97,16	-0,59
9	678121	4309500	53,31	55,29	-1,98	26,60	27,59	-0,99	91,99	93,66	-1,67
10	678845	4309543	59,75	52,40	7,35	29,81	26,15	3,67	103,75	88,37	15,38
11	679379	4309206	67,90	57,46	10,44	33,88	28,67	5,21	118,68	97,64	21,04
12	679454	4309192	64,89	57,56	7,32	32,38	28,72	3,65	113,16	97,82	15,34
13	679308	4309046	53,97	58,03	-4,06	26,93	28,96	-2,03	93,19	98,68	-5,49
14	679424	4309022	65,12	53,37	11,75	32,49	26,63	5,86	113,59	90,15	23,43
15	679625	4309036	56,98	58,34	-1,35	28,44	29,11	-0,68	98,70	99,24	-0,54
16	679474	4308923	56,22	55,54	0,68	28,05	27,72	0,34	97,30	94,12	3,18
17	679788	4308788	58,25	57,94	0,32	29,07	28,91	0,16	101,02	98,50	2,52
18	680823	4308959	60,86	54,44	6,41	30,37	27,17	3,20	105,79	92,12	13,68
19	681208	4309480	66,38	57,69	8,70	33,13	28,79	4,34	115,90	98,05	17,85
20	681293	4309624	53,89	54,84	-0,95	26,89	27,37	-0,47	93,05	92,85	0,20
21	681476	4309592	58,93	54,37	4,56	29,41	27,13	2,27	102,26	91,99	10,28
22	681519	4309715	60,73	55,70	5,03	30,30	27,80	2,51	105,55	94,42	11,14
23	681610	4309483	54,96	53,64	1,32	27,42	26,76	0,66	95,00	90,64	4,36
24	681656	4309380	53,36	57,48	-4,12	26,63	28,68	-2,05	92,08	97,67	-5,59
25	680254	4310241	60,93	54,38	6,54	30,40	27,14	3,26	105,92	92,00	13,91
26	680687	4310161	62,45	57,48	4,97	31,16	28,68	2,48	108,71	97,67	11,03
27	683010	4309891	60,02	54,62	5,41	29,95	27,25	2,70	104,26	92,43	11,83
28	679494	4309701	54,48	53,11	1,37	27,19	26,50	0,69	94,12	89,67	4,45
29	679218	4309812	56,57	56,17	0,40	28,23	28,03	0,20	97,95	95,27	2,68
30	679303	4309601	64,49	56,37	8,12	32,18	28,13	4,05	112,44	95,64	16,80

	ESCENARIO 2: PARCELAS NO GESTIONADAS		W (t/ha)			Carbono fijado			tCO _{2eq} /ha		
	Coordenada X	Coordenada Y	2017	2011	2017-2011	2017	2011	2017-2011	2017	2011	2017-2011
1	678310	4308661	65,99	56,54	9,45	32,93	28,21	4,71	115,18	95,95	19,23
2	678246	4308549	64,48	56,14	8,34	32,18	28,02	4,16	112,43	95,22	17,20
3	679846	4309044	61,50	57,01	4,49	30,69	28,45	2,24	106,97	96,81	10,16
4	677227	4311603	66,00	57,25	8,75	32,93	28,57	4,36	115,19	97,25	17,94
5	679907	4308931	57,30	57,24	0,06	28,59	28,56	0,03	99,28	97,23	2,06
6	680059	4308763	62,64	53,98	8,66	31,26	26,94	4,32	109,05	91,26	17,79
7	680168	4308810	68,32	56,65	11,67	34,09	28,27	5,82	119,44	96,15	23,29
8	680370	4309358	66,32	54,89	11,43	33,09	27,39	5,71	115,78	92,92	22,86
9	680412	4309579	65,86	54,60	11,26	32,86	27,24	5,62	114,94	92,40	22,55
10	680502	4309378	63,76	54,52	9,24	31,82	27,21	4,61	111,10	92,26	18,84
11	680614	4309254	64,68	54,87	9,80	32,27	27,38	4,89	112,78	92,90	19,88
12	680458	4308431	58,76	52,41	6,35	29,32	26,15	3,17	101,96	88,40	13,56
13	680575	4308157	68,84	57,17	11,67	34,35	28,53	5,82	120,39	97,10	23,29
14	680789	4307916	56,82	56,87	-0,04	28,36	28,38	-0,02	98,41	96,55	1,86
15	680731	4307816	61,78	54,83	6,95	30,83	27,36	3,47	107,48	92,82	14,65
16	680757	4307666	54,77	53,40	1,37	27,33	26,64	0,68	94,65	90,20	4,45
17	681049	4307980	65,07	60,84	4,23	32,47	30,36	2,11	113,50	103,82	9,68
18	681136	4307667	57,40	53,52	3,89	28,64	26,70	1,94	99,47	90,42	9,05
19	682070	4307973	66,13	55,23	10,90	33,00	27,56	5,44	115,44	93,56	21,88
20	681581	4308093	64,22	56,25	7,96	32,04	28,07	3,97	111,93	95,42	16,51
21	681366	4308468	55,40	52,72	2,68	27,65	26,31	1,34	95,81	88,95	6,85
22	681818	4308174	53,73	57,26	-3,52	26,81	28,57	-1,76	92,76	97,26	-4,51
23	681537	4307844	65,90	58,62	7,29	32,89	29,25	3,64	115,02	99,75	15,28
24	682357	4308563	63,96	59,61	4,35	31,92	29,75	2,17	111,47	101,57	9,90
25	682243	4308494	66,13	54,40	11,73	33,00	27,14	5,85	115,43	92,03	23,40
26	682329	4309071	56,81	56,22	0,59	28,35	28,06	0,29	98,38	95,37	3,01
27	682784	4308724	57,80	57,27	0,53	28,84	28,58	0,27	100,19	97,28	2,92
28	682586	4310199	57,64	56,66	0,98	28,76	28,27	0,49	99,91	96,17	3,74
29	682767	4310259	66,32	54,61	11,71	33,10	27,25	5,84	115,79	92,43	23,37
30	683034	4310345	63,72	56,17	7,55	31,80	28,03	3,77	111,03	95,28	15,75

	ESCENARIO 3: PARCELAS GESTIONADAS		W (t/ha)			Carbono fijado (t/ha)			tCO _{2eq} /ha		
	Coordenada X	Coordenada Y	2017	2011	2017-2011	2017	2011	2017-2011	2017	2011	2017-2011
1	679873	4309862	42,50	35,98	6,52	21,21	17,95	3,25	83,31	73,33	9,98
2	679831	4309816	41,70	35,35	6,35	20,81	17,64	3,17	81,86	72,18	9,69
3	679926	4309779	41,62	37,05	4,58	20,77	18,49	2,28	81,71	75,28	6,43
4	679843	4309736	42,72	37,52	5,21	21,32	18,72	2,60	83,73	76,14	7,59
5	678860	4309916	42,59	37,40	5,18	21,25	18,66	2,59	83,48	75,94	7,54
6	679257	4310138	46,12	35,10	11,02	23,01	17,51	5,50	89,94	71,72	18,22
7	679429	4310203	53,82	36,87	16,96	26,86	18,40	8,46	104,04	74,95	29,08
8	677956	4309648	42,41	39,12	3,29	21,17	19,52	1,64	83,16	79,08	4,09
9	678121	4309500	39,91	37,21	2,70	19,92	18,57	1,35	78,59	75,58	3,01
10	678845	4309543	46,35	34,32	12,03	23,13	17,13	6,00	90,35	70,29	20,06
11	679379	4309206	54,50	39,38	15,12	27,20	19,65	7,54	105,28	79,56	25,72
12	679454	4309192	51,49	39,48	12,00	25,69	19,70	5,99	99,76	79,74	20,02
13	679308	4309046	40,57	39,95	0,62	20,25	19,94	0,31	79,79	80,60	-0,81
14	679424	4309022	51,72	35,29	16,43	25,81	17,61	8,20	100,19	72,07	28,11
15	679625	4309036	43,58	40,26	3,33	21,75	20,09	1,66	85,30	81,16	4,14
16	679474	4308923	42,82	37,46	5,36	21,37	18,69	2,67	83,90	76,04	7,86
17	679788	4308788	44,85	39,86	5,00	22,38	19,89	2,49	87,62	80,42	7,20
18	680823	4308959	47,46	36,36	11,09	23,68	18,15	5,54	92,39	74,04	18,36
19	681208	4309480	52,98	39,61	13,38	26,44	19,76	6,67	102,50	79,97	22,53
20	681293	4309624	40,49	36,76	3,73	20,21	18,35	1,86	79,65	74,77	4,88
21	681476	4309592	45,53	36,29	9,24	22,72	18,11	4,61	88,86	73,91	14,96
22	681519	4309715	47,33	37,62	9,71	23,62	18,77	4,84	92,15	76,34	15,82
23	681610	4309483	41,56	35,56	6,00	20,74	17,74	3,00	81,60	72,56	9,04
24	681656	4309380	39,96	39,40	0,56	19,94	19,66	0,28	78,68	79,59	-0,91
25	680254	4310241	47,53	36,30	11,22	23,72	18,12	5,60	92,52	73,92	18,59
26	680687	4310161	49,05	39,40	9,65	24,48	19,66	4,82	95,31	79,59	15,71
27	683010	4309891	46,62	36,54	10,09	23,26	18,23	5,03	90,86	74,35	16,51
28	679494	4309701	41,08	35,03	6,05	20,50	17,48	3,02	80,72	71,59	9,13
29	679218	4309812	43,17	38,09	5,08	21,54	19,01	2,54	84,55	77,19	7,36
30	679303	4309601	51,09	38,29	12,80	25,49	19,11	6,39	99,04	77,56	21,48

	ESCENARIO 3: PARCELAS NO GESTIONADAS		W (t/ha)			Carbono fijado (t/ha)			tCO _{2eq} /ha capturado		
	Coordenada X	CoordenadaY	2017	2011	2017-2011	2017	2011	2017-2011	2017	2011	2017-2011
1	678310	4308661	52,59	38,46	14,13	26,24	19,19	7,05	101,78	77,87	23,91
2	678246	4308549	51,08	38,06	13,02	25,49	18,99	6,50	99,03	77,14	21,88
3	679846	4309044	48,10	38,93	9,17	24,00	19,43	4,58	93,57	78,73	14,84
4	677227	4311603	52,60	39,17	13,43	26,25	19,55	6,70	101,79	79,17	22,62
5	679907	4308931	43,90	39,16	4,74	21,91	19,54	2,37	85,88	79,15	6,74
6	680059	4308763	49,24	35,90	13,34	24,57	17,91	6,66	95,65	73,18	22,47
7	680168	4308810	54,92	38,57	16,35	27,41	19,25	8,16	106,04	78,07	27,97
8	680370	4309358	52,92	36,81	16,11	26,41	18,37	8,04	102,38	74,84	27,54
9	680412	4309579	52,46	36,52	15,94	26,18	18,22	7,96	101,54	74,32	27,23
10	680502	4309378	50,36	36,44	13,92	25,13	18,19	6,94	97,70	74,18	23,52
11	680614	4309254	51,28	36,79	14,48	25,59	18,36	7,23	99,38	74,82	24,56
12	680458	4308431	45,36	34,33	11,03	22,64	17,13	5,50	88,56	70,32	18,24
13	680575	4308157	55,44	39,09	16,35	27,66	19,50	8,16	106,99	79,02	27,97
14	680789	4307916	43,42	38,79	4,64	21,67	19,35	2,31	85,01	78,47	6,54
15	680731	4307816	48,38	36,75	11,63	24,14	18,34	5,80	94,08	74,74	19,33
16	680757	4307666	41,37	35,32	6,05	20,64	17,62	3,02	81,25	72,12	9,13
17	681049	4307980	51,67	42,76	8,91	25,78	21,34	4,45	100,10	85,74	14,36
18	681136	4307667	44,00	35,44	8,57	21,96	17,68	4,27	86,07	72,34	13,73
19	682070	4307973	52,73	37,15	15,58	26,31	18,54	7,77	102,04	75,48	26,56
20	681581	4308093	50,82	38,17	12,64	25,36	19,05	6,31	98,53	77,34	21,19
21	681366	4308468	42,00	34,64	7,36	20,96	17,28	3,67	82,41	70,87	11,53
22	681818	4308174	40,33	39,18	1,16	20,13	19,55	0,58	79,36	79,18	0,17
23	681537	4307844	52,50	40,54	11,97	26,20	20,23	5,97	101,62	81,67	19,96
24	682357	4308563	50,56	41,53	9,03	25,23	20,72	4,51	98,07	83,49	14,58
25	682243	4308494	52,73	36,32	16,41	26,31	18,12	8,19	102,03	73,95	28,08
26	682329	4309071	43,41	38,14	5,27	21,66	19,03	2,63	84,98	77,29	7,69
27	682784	4308724	44,40	39,19	5,21	22,15	19,55	2,60	86,79	79,20	7,60
28	682586	4310199	44,24	38,58	5,66	22,08	19,25	2,83	86,51	78,09	8,42
29	682767	4310259	52,92	36,53	16,39	26,41	18,23	8,18	102,39	74,35	28,05
30	683034	4310345	50,32	38,09	12,23	25,11	19,01	6,10	97,63	77,20	20,43