



8º CONGRESO FORESTAL ESPAÑOL

La **Ciencia forestal** y su contribución a
los **Objetivos de Desarrollo Sostenible**



8CFE

Edita: Sociedad Española de Ciencias Forestales

Cataluña | Catalunya - 27 junio | juny - 1 julio | juliol 2022

ISBN 978-84-941695-6-4

© Sociedad Española de Ciencias Forestales

Organiza



Experiencias de gestión forestal adaptativa para reducir la vulnerabilidad del bosque a los impactos del cambio climático

PASCUAL SÁNCHEZ, D.¹, PLA FERRER, E.¹ y RETANA ALUMBREROS, J.^{1,2}

¹ CREAF, E08193 Bellaterra (Cerdanya del Vallès), Catalonia, Spain.

² Universitat Autònoma de Barcelona, E08193 Bellaterra (Cerdanya del Vallès), Catalonia, Spain.

Resumen

El incremento de superficie forestal en Cataluña las últimas décadas, unido a la falta de gestión y la densificación del bosque, hace que sean zonas especialmente vulnerables a la sequía y los incendios forestales. Faltan experiencias prácticas que muestren la efectividad de la gestión forestal ante los impactos del cambio climático. El proyecto LIFE MEDACC realizó tres experimentos de gestión forestal adaptativa en tres cuencas hidrográficas de Cataluña (encinar en Muga, pino silvestre en Ter y pino laricio en Segre), en bosques potencialmente vulnerables al cambio climático. La gestión favoreció un mayor contenido de agua de la vegetación en períodos de alto riesgo de incendio, lo que se traduce en menor inflamabilidad y combustibilidad de la vegetación (Segre y Muga). Además, la gestión redujo claramente el decaimiento de los árboles (Ter). La sequía de 2016 apenas afectó las zonas gestionadas (0-0,55% de superficie con decaimiento) mientras que afectó al 9,1% de la parcela sin gestión (Muga). En Segre, el cambio estructural del bosque gestionado redujo claramente la vulnerabilidad al fuego al reducir la continuidad vertical del combustible. Estos resultados muestran que hay margen para mejorar la resistencia y resiliencia del bosque a los impactos del cambio climático a través de la gestión.

Palabras clave

Adaptación forestal, decaimiento, riesgo de incendio, resiliencia.

1. Introducción

Los bosques, tanto por extensión territorial como por su sensibilidad climática, son uno de los sistemas naturales más vulnerables a los impactos del cambio climático (ALLEN et al. 2010; SEIDL et al. 2014). En las últimas décadas, la superficie de bosque ha aumentado en muchas regiones mediterráneas del suroeste europeo, en detrimento de la superficie agrícola y de matorral (GROVE & RACKHAM 2001, VILÀ-CABRERA et al. 2017). Ésta es una tendencia general en Cataluña, y es especialmente relevante en las cabeceras montañosas de las cuencas hidrográficas. En la cabecera de la Muga este cambio ha sido especialmente significativo, con un incremento de la superficie de bosque de más de un 20% en 30 años (1970-2005, SERRANO et al. 2016). En general, estos nuevos bosques son densos y están poco o nada gestionados por lo que son especialmente vulnerables a la sequía y a grandes incendios forestales (LINARES et al. 2009). El seguimiento de los episodios de decaimiento forestal en Cataluña muestra que durante los últimos veranos cálidos y secos se han registrado afectaciones (decoloración, defoliación y mortalidad) del orden del 3% (2012 y 2016, DEBOSCAT). Los impactos climáticos que ya afectan los bosques se acentuarán en el futuro debido a una mayor frecuencia e intensidad de períodos de sequía proyectados por los modelos climáticos, ello incluye el aumento del riesgo de incendio, cambios en la idoneidad bioclimática de las especies actuales y sustitución de especies en determinados lugares, cambios en el funcionamiento de los bosques y su estructura: disminución de la productividad y la capacidad de almacenamiento de carbono, aumento en la frecuencia e intensidad de los episodios de mortalidad, y aumento de las afectaciones por plagas y enfermedades (THOM & SEIDL 2016, LECINA-DÍAZ et al. 2021).

Existen evidencias de que la gestión forestal puede ayudar a hacer más robustos los bosques ante las eventualidades climáticas (LINDER & CALAMA 2013). Es por ello que, a partir de los principios de gestión adaptativa definidos para distintas tipologías de bosque (ORGEST), se han diseñado y ejecutado una serie de actuaciones silvícolas dirigidas a hacer menos vulnerables las principales tipologías de bosques de tres cuencas hidrográficas en Cataluña. Estas actuaciones se han ubicado en bosques potencialmente vulnerables, ya sea por afectaciones previas de derrumbe o bien porque presentaban un elevado riesgo de incendio.

2. Objetivos

El objetivo de este trabajo es probar diferentes itinerarios de gestión forestal sostenible y cuantificar en qué medida estos itinerarios reducen la vulnerabilidad del bosque a los impactos del cambio climático. Se ha cuantificado el efecto de la gestión en el riesgo de incendio, la resistencia a la sequía y el crecimiento. El trabajo se ha desarrollado en tres tipologías de bosque: un encinar en Requesens (Empordà, Girona), un bosque mixto de pino silvestre en Montesquiu (Osona, Barcelona) y un pinar de pino laricio en Madrona y Llobera (Solsonés, Lleida). En los tres bosques se han aplicado varios itinerarios de gestión forestal adaptativa, consistentes en diferentes grados de claras y desbroce de matorral, y se ha hecho un seguimiento durante 4 años y comparado con una zona control sin actuación.

3. Metodología

3.1 Zona de estudio

Este trabajo se ha llevado a cabo en tres tipologías de bosque diferentes, con el fin de tener una visión amplia y contrastada de los efectos de la gestión forestal adaptativa aplicada. Las zonas se han escogido por ser bosques potencialmente vulnerables, ya sea por episodios previos de derrumbe forestal o porque tienen un elevado riesgo de incendio forestal. Las tres zonas son:

1. Encinar en Requesens (Paraje Natural de Interés Nacional de l'Albera, provincia de Girona) (Figura 1). La encina (*Quercus ilex*) es la especie dominante (80-90% del área basimétrica), con algunas especies acompañantes: alcornoque (*Quercus suber*), roble (*Quercus pubescens*), *Phillyrea angustifolia*, *Erica arborea*, entre otras. Un primer inventario determinó que este bosque es muy denso (más de 2.000 pies/ha), con un área basimétrica de 30 m²/ha y una estructura irregular. Según los propietarios de la finca, el bosque no se ha gestionado en los últimos 80 años (aproximadamente).

2. Bosque mixto de pino silvestre en el Parque del Castillo de Montesquiu (Espacio Natural Protegido, provincia de Barcelona) (Figura 2). El pino silvestre (*Pinus sylvestris*) es la especie dominante en la zona (68% del área basimétrica). También hay una importante presencia de roble (*Quercus pubescens*) en el sotobosque, y de algunas especies acompañantes: arce (*Acer monspessulanum*), *Crataegus monogyna* y *Buxus sempervirens*, entre otras. Un primer inventario mostró un bosque medianamente denso (más de 1.000 pies/ha) y un área basimétrica de 21 m²/ha de pino, con una estructura regular y un 65% de fracción de cabida cubierta. Según los gestores del parque, el bosque no se ha gestionado en los últimos 30 años (aproximadamente).

3. Pinar de pino laricio en Madrona y Llobera (Solsonés, provincia de Lleida) (Figura 3). El pino laricio (*Pinus nigra*) es la especie dominante en la zona, con una importante presencia de roble (*Quercus pubescens*) en el sotobosque. Mediante un inventario inicial, se determinó que se trata de un bosque medianamente denso (entre 1.100 y 1.700 árboles/ha), un área basimétrica entre 29 y 39 m²/ha y una fracción de cabida cubierta de 75%.

Una descripción más detallada de la localización y características de las tres zonas puede ser consultada en Savé et al (2014) y Savé et al (2015).

3.2 Itinerarios de gestión forestal adaptativa aplicados

Los itinerarios de gestión forestal adaptativos aplicados dependen de cada tipología de bosque, y se cuantifican a continuación y en la tabla 1. Las actuaciones de gestión forestal fueron realizadas entre enero y abril de 2015.

1. Encinar: El objetivo de la gestión en el encinar es reducir el riesgo de incendio mediante la reducción de la densidad de los árboles y la promoción de estructuras maduras con árboles más grandes y la discontinuidad del combustible. En la zona seleccionada, se definieron tres parcelas piloto de aproximadamente 1 hectárea:

- Parcela control, sin intervención.
- Parcela de baja intensidad (T1): Aplicación de una clara baja y desbroce de sotobosque con el objetivo de adaptar el bosque a una estructura regular. Los bosques regulares son, en general, más eficientes en el uso del agua y en la prevención de incendios.
- Parcela de alta intensidad (T2): Tratamiento de selección y desbroce intenso de sotobosque para adaptar el bosque a una estructura irregular y estimular la regeneración forestal. La hipótesis inicial es que los bosques irregulares conservan mejor el suelo, su calidad y sus nutrientes.

2. Bosque mixto de pino silvestre: El objetivo de la gestión en el bosque mixto es mejorar la salud de los árboles conteniendo la mortalidad de los mismos y la afección por plagas, a la vez que estimular el crecimiento, producción de madera y secuestro de carbono. En la zona seleccionada, se definieron tres parcelas piloto de aproximadamente 1 hectárea:

- Parcela control, sin intervención.
- Parcela de baja intensidad (T1): Desbroce del sotobosque con el objetivo de reducir la competencia de recursos.
- Parcela de alta intensidad (T2): Aplicación de una clara baja y desbroce de sotobosque con el objetivo de reducir la competencia de los árboles. Eliminación de las especies acompañantes y de los pinos silvestres dominantes.

3. Pinar de pino laricio: El objetivo de la gestión en el pinar es reducir el riesgo de incendio y potenciar el crecimiento de los árboles mediante la reducción de su competitividad. En cada zona seleccionada, se definieron tres parcelas piloto de aproximadamente 1 hectárea:

Llobera:

- Parcela control, sin intervención.
- Parcela de baja intensidad (T1): Desbroce selectivo de sotobosque y clara baja de poca intensidad. Reducción del 10% del área basimétrica del pino laricio.
- Parcela de alta intensidad (T2): Desbroce selectivo de sotobosque y clara baja de alta intensidad. Reducción del 40% del área basimétrica del pino laricio.

Madrona:

- Parcela control, sin intervención.
- Parcela de baja intensidad (T1): Desbroce selectivo de sotobosque.
- Parcela de alta intensidad (T2): Desbroce selectivo de sotobosque y clara baja de alta intensidad. Reducción del 30% del área basimétrica del pino laricio.

3.3 Seguimiento de los efectos de la gestión forestal adaptativa

La gestión forestal adaptativa se aplicó entre enero y abril de 2015. Una vez llevada a cabo, se instaló una red de seguimiento de un grupo de parámetros para evaluar la efectividad de los tratamientos. Este seguimiento se llevó a cabo entre Abril de 2015 y Noviembre de 2017 (3 años), poniendo especial énfasis en el período estival. La Tabla 2 recoge las variables de seguimiento especificando qué indicadores se han utilizado para cuantificar las variables, la frecuencia del seguimiento y la metodología usada. En resumen, se han seguido las siguientes variables:

- Estructura del bosque: Densidad, distribución por clase diamétrica, altura y número de rebrotes.

- Continuidad del combustible: Biovolumen del sotobosque.
- Humedad del combustible: Contenido relativo de agua de la vegetación.
- Decaimiento forestal: Mortalidad, defoliación y decoloración.
- Humedad del suelo: Contenido de agua del suelo.
- Temperatura y humedad relativa del rodal.
- Condiciones meteorológicas: Temperatura máxima, temperatura mínima, precipitación y radiación.

Además del seguimiento de estas variables en campo, se analizó una imagen aérea creada por un Sistema de Aeronaves Pilotadas Remotamente (RPAS, dron) de las parcelas de encina en Requesens. El verano de 2016 fue especialmente seco en esa zona y la vegetación sufrió notables efectos de la sequía. Estos efectos se observaron al realizar una visita de campo pero no quedaron correctamente registradas en las visitas de seguimiento, ya que afectaron a los árboles que estaban en los márgenes de las parcelas. Por esta razón, se realizó una imagen aérea de la zona en septiembre de 2016 y se digitalizó para cuantificar la superficie forestal afectada por las sequías en cada tratamiento. La imagen área fue inicialmente georeferenciada y posteriormente se realizó una clasificación supervisada de la imagen utilizando ArcGIS, generando dos clases: la vegetación afectada por la sequía (copas decoloradas, en una amplia gama de colores marrón, blanco, amarillo y naranja) y la vegetación sin afección (amplia gama de colores verdes). A continuación se realizó un análisis numérico de la clasificación supervisada, cuantificando la superficie afectada por la sequía en cada parcela y su relación con la superficie total (porcentaje de superficie afectada por decaimiento forestal).

El objetivo de esta red de seguimiento de variables ha sido cuantificar en qué medida estos itinerarios reducen la vulnerabilidad del bosque a los siguientes impactos del cambio climático:

- Riesgo de incendio: Variables como la continuidad y humedad del combustible son indicadores de cómo cambia el riesgo de incendio.
- Resistencia a la sequía: Variables como el decaimiento forestal o la humedad del suelo son indicadores del impacto de la sequía en el bosque.
- El resto de variables ayudan a conocer las características del rodal y a interpretar los resultados.

4. Resultados

Los resultados del período de seguimiento no permitieron detectar todavía cambios significativos en el crecimiento y estructura de los árboles de las zonas piloto, dado el poco tiempo transcurrido después de la intervención. A pesar de ello, se apreciaron cambios relevantes en otras variables de seguimiento.

4.1 Humedad del combustible

El seguimiento de la humedad del combustible se llevó a cabo en las parcelas de encina y de pino laricio, en árboles (encina y pino laricio) y arbustos (brezo y boj, respectivamente). Este seguimiento comienza a mediados de mayo y finaliza a finales de octubre, con una periodicidad mensual en primavera y otoño y quincenal durante el verano, realizándose aproximadamente 9 veces por año.

La Figura 4 muestra los resultados de la humedad de combustible en las parcelas de encina y de pino laricio. En el caso del encinar de Requesens, el riesgo de incendio se redujo de manera significativa en el tratamiento de alta intensidad (tratamiento de selección y desbroce intenso del matorral), ya que se produjo un aumento significativo del contenido de agua de la vegetación de verano tanto en las especies principales del sotobosque (*Erica arborea*) como arbóreas (*Quercus ilex*) en comparación con la zona control y con el tratamiento de baja intensidad. El aumento

potencial de la disponibilidad de agua tras la gestión forestal adaptativa es probablemente la causa del aumento del contenido de agua de la vegetación y de la reducción del riesgo de incendio para el tratamiento de selección. Además, esta mayor disponibilidad de agua también puede promover el crecimiento de la encina. Si analizamos la evolución del contenido de agua de la vegetación durante la etapa más seca, se observa que estas diferencias entre la zona control y las zonas con tratamiento, son mucho más evidente en los periodos secos (Figura 5). A medio plazo, este el seguimiento proporcionará información sobre si los tratamientos cambiaron la estructura del bosque y qué estructura es más eficiente en términos de uso del agua.

En el caso del pino laricio en Llobera y Madrona (Figura 4, imagen media e inferior), se tomaron muestras de combustible de boj (*Buxus sempervirens*) y roble pubescente (*Quercus pubescens*), ante la imposibilidad de tomar muestras de pino laricio por la elevada altura de la mayoría de los individuos. Tanto en Llobera como en Madrona se observa que, para la vegetación del sotobosque (boj), los dos tratamientos (baja y alta intensidad) presentan un mayor contenido en humedad en comparación con el control, reduciendo de manera significativa el riesgo de incendio. Sin embargo, este efecto no es tan claro para una de las especies arbóreas dominantes, el roble pubescente, ya que sólo el tratamiento de baja intensidad aumentó de manera significativa el contenido de agua en comparación con el control en una zona (Madrona), y el estrato arbóreo estaba incluso más seco en el tratamiento de alta intensidad que en el control en la otra zona (Llobera).

4.2 Decaimiento forestal

El seguimiento del decaimiento forestal se llevó a cabo en las parcelas de pino laricio y pino silvestre. En los dos bosques se obtuvo el mismo resultado: La gestión forestal adaptativa reduce de manera significativa el decaimiento forestal y es incluso capaz de revertir los episodios de decaimiento (Figura 6).

En las parcelas de encina de Requesens se monitorizó el efecto de la sequía del verano de 2016 que provocó decoloración y defoliación en el encinar. Para ello, se realizó una imagen aérea con un dron, que posteriormente fue georeferenciada, clasificada y digitalizada, para obtener el porcentaje de cada parcela afectado por decoloración a causa de la sequía. La Figura 7 muestra un conjunto de imágenes de las parcelas de Requesens, en su situación inicial antes de la aplicación de la gestión forestal adaptativa (2012), después de la gestión (2015), después del verano de 2016 (2016) y después del proceso de clasificación supervisada y digitalización. La Tabla 3 muestra el análisis numérico de la clasificación supervisada, cuantificando el porcentaje de superficie afectada por la sequía. Los resultados muestran que el 9,1% de la superficie de la parcela control presentaba signos de decaimiento forestal, mientras que en las dos parcelas gestionadas, los efectos de la sequía fueron casi inapreciables. En este caso, la gestión forestal adaptativa resultó clave para reducir la vulnerabilidad de los encinares frente a los efectos de la sequía del verano de 2016.

4.3 Humedad del suelo

El seguimiento de la humedad del suelo se llevó a cabo en todas las parcelas: encina, pino silvestre y pino laricio. En todas las tipologías de bosque se obtuvo un resultado similar al que muestra la Figura 8 para el pino silvestre en Montesquiu. La humedad del suelo aumentó en las parcelas donde se aplicó la gestión forestal adaptativa, en comparación con el control, siendo significativas las diferencias en el tratamiento de alta intensidad. Igual que en el caso de la humedad de combustible, la disminución de la competencia entre la vegetación después de la gestión forestal adaptativa es probablemente la causa del aumento del contenido de agua del suelo, siendo clave este aumento en situaciones de estrés por sequía.

4.4 Temperatura y humedad relativa del rodal

El seguimiento de la temperatura y la humedad relativa del rodal se llevó a cabo en todas las parcelas de manera continua: encina, pino silvestre y pino laricio. En todas las tipologías de bosque se obtuvo un resultado similar al que muestra la Figura 9 para el pino laricio en Solsona. Las condiciones microclimáticas de las parcelas cambiaron en las zonas donde se aplicó la gestión forestal adaptativa, siendo significativas las diferencias entre las dos intensidades de actuación y la zona de control. El efecto de reducir la fracción de cabida cubierta y el sotobosque provoca una mayor exposición al sol en las parcelas intervenidas, implicando una mayor temperatura y una menor humedad relativa. Nuestra hipótesis es que, a medida que la vegetación vaya creciendo y se recupere el índice de área foliar se recupere, estas diferencias irán desapareciendo hasta ser las condiciones similares en las zonas gestionadas y en el control.

5. Discusión

Los resultados de este trabajo muestran cómo la gestión forestal adaptativa mejora la resistencia y la resiliencia de los bosques frente a futuras condiciones climáticas, y frente a riesgos como los incendios y las sequías. Pese a su limitación temporal (3 años de seguimiento) estos trabajos pretenden ser el inicio de parcelas de seguimiento que aporten información y criterios a largo plazo a los gestores del medio natural en un contexto de cambio climático.

En este trabajo se han aplicado diferentes intensidades de gestión forestal adaptativa en bosques potencialmente vulnerables a los efectos del cambio climático, ya sea por episodios previos de decaimiento forestal o porque tienen un elevado riesgo de incendio forestal.

Los resultados del seguimiento de tres años de estas parcelas muestran que la gestión forestal adaptativa aumenta el contenido de agua de la vegetación en los períodos de alto riesgo de incendio, lo que se traduce en una menor inflamabilidad y combustibilidad de la vegetación. Este efecto es significativo tanto en las parcelas con una gestión de baja intensidad como en las de alta intensidad.

Además, la gestión forestal adaptativa reduce de manera significativa el decaimiento forestal (defoliación y decoloración) en todas las parcelas, e incluso promueve la reversibilidad de los episodios de decaimiento.

La gestión forestal adaptativa resultó clave para reducir la vulnerabilidad de la encina de Requesens tras la sequía de 2016. Este efecto se ha cuantificado a partir del análisis de una imagen aérea tomada por un dron en septiembre de 2016. Los efectos de la sequía (decoloración y defoliación) afectaron al 9,1% de la superficie de la parcela control, mientras que en las dos parcelas gestionadas, los efectos de la sequía fueron casi inapreciables.

La gestión forestal adaptativa modifica las condiciones microclimática de las zonas tratadas, aumentando transitoriamente la temperatura y disminuyendo la humedad relativa.

La gestión forestal adaptativa favorece un mayor contenido de agua en el suelo en las zonas gestionadas, especialmente significativo en el tratamiento de alta intensidad. Una mayor disponibilidad de agua en el suelo puede resultar clave para la vegetación en un momento de estrés por sequía, reduciendo su vulnerabilidad.

6. Conclusiones

Los resultados del trabajo presentado tienen implicaciones relevantes para el uso de la gestión en la adaptación de los bosques mediterráneos al cambio climático y pueden ser un elemento de ayuda para los gestores forestales en el proceso de toma de decisiones. Los resultados de seguimiento de la gestión, aunque no concluyentes por su limitación temporal, apuntan la idea de que la gestión forestal puede mejorar la capacidad de muchos de nuestros bosques a hacer frente a las condiciones de estrés hídrico y a mejorar su estructura y características físicas para hacerlos más resistentes a los incendios. La estrategia a utilizar y su intensidad están muy vinculadas a las condiciones locales de cada sitio. Para ello, las experiencias presentadas contemplan un abanico interesante de tipologías de bosque, condiciones previas e itinerarios de

gestión. Sin embargo, es necesario un seguimiento experimental a más largo plazo de cara a evaluar la efectividad y los efectos de todos estos tratamientos silvícolas en la salud y funcionamiento de los ecosistemas en un contexto cambiante.

7. Agradecimientos

Este trabajo ha sido realizado en el marco del proyecto LIFE MEDACC (LIFE ENV/ES/000536 Demonstration and validation of innovative methodology for regional climate change adaptation in the Mediterranean area) con financiación del Programa europeo LIFE + (Políticas ambientales y Gobernanza), desarrollado entre 2013 y 2018.

8. Bibliografía

ALLEN, C.D.; MACALADY, A.; CHENCHOUNI, H.; ... COBB, N. 2010. A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests. *Forest Ecology and Management* 259: 660– 84.

DEBOSCAT <https://www.observatoriforestal.cat/decaimento-forestal/>

LECINA-DIAZ, J.; MARTÍNEZ-VILALTA, J.; ALVAREZ, A.; BANQUÉ, M.; BIRKMANN, J.; FELDMAYER, D.; VAYREDA, J.; RETANA, J. 2021. Characterizing forest vulnerability and risk to climate-change hazards. *Frontiers in Ecology and the Environment* 19 (2): 126-133.

LINARES, J.C.; CAMARERO, J.J.; CARREIRA, J.A. 2009. Interacting effects of changes in climate and forest cover on mortality and growth of the southernmost European fir forests. *Global Ecology and Biogeography* 18: 485– 497.

LINDNER, M.; CALAMA, R. (2013). Climate Change and the Need for Adaptation in Mediterranean Forests. En: Manuel Esteban Lucas-Borja (ed). *Forest management of Mediterranean forests under the new context of climate change - Building alternatives for the coming future.* 34-55. Nova Science Publishers

ORGEST. Orientacions de gestió forestal sostenible per a Catalunya. Centre de la Propietat Forestal. Departament d'Agricultura, Ramaderia, Pesca, Alimentació i Medi Natural. Generalitat de Catalunya.

http://cpf.gencat.cat/ca/cpf_03_linies_actuacio/cpf_transferencia_coneixement/cpf_orientacions_gestio_forestal_sostenible_catalunya/

SAVÉ, R.; BIEL, C.; FUNES, I.; PLA, E.; SERRANO R.; PASCUAL, D.; 2014. Describing the location and access to demonstrative activities and Implementation of on-site demonstrative activities. Deliverable 5. LIFE MEDACC.

SAVÉ, R.; BIEL, C.; FUNES, I.; PLA, E.; SERRANO R.; PASCUAL, D.; 2015. Description of the demonstrative adaptation measures implemented in the project. Deliverable 12. LIFE MEDACC.

http://medacc-life.eu/sites/medacc-life.eu/files/docuemnts/b2_3_descriptiondemonstrativeactivities_v3.pdf

SEIDL, R.; SCHELHAAS, M.J.; RAMMER, W.; VERKERK, P.J. 2014. Increasing forest disturbances in Europe and their impact on carbon storage. *Nat Clim Change* 4: 806– 10.

VICENTE-SERRANO, S.M.; PASCUAL, D.; PLA. E.; ZABALZA MARTÍNEZ, J.; BORRÀS, G.; CANTOS, G.; SAVÉ, R.; BIEL, C.; FUNES, I. 2016. Historical trends in climate, land use and water demands. Deliverable 12. MEDACC.

VILÀ-CABRERA, A.; COLL MIR, L.; MARTÍNEZ-VILALTA, J.; RETANA, J. 2017 . Forest management for adaptation to climate change in the Mediterranean basin: a synthesis of evidence. *Forest Ecology and Management*, 2018, 407: 16-22.

Tabla 1. Tipología de bosque, objetivos de gestión, tipología de gestión forestal aplicada y variables de seguimiento para cada zona de estudio.

| Bosque | Objetivos de la gestión | Itinerarios de gestión forestal adaptativa | Variables de seguimiento |
|--|---|--|--|
| Encinar (<i>Quercus ilex</i>) | Reducir el estrés hídrico del bosque y el riesgo de incendio | <p>Parcela C: parcela control sin intervención. Situación inicial: más de 2.000 pies/ha, área basimétrica de 30 m²/ha y estructura irregular.</p> <p>Parcela T1: Clara baja y desbroce de sotobosque para adaptar el bosque a una estructura regular. Situación post-actuación: Reducción de 15-25% del área basimétrica afectando principalmente a las clases diámetras 5 y 10. La fracción de cabida cubierta no se ha reducido en este tratamiento para evitar el rebrote. La clara ha afectado a 2-3 rebrotos por tocón.</p> <p>Parcela T2: Tratamiento de selección y desbroce de sotobosque para adaptar el bosque a una estructura irregular y estimular la regeneración forestal. Situación post-actuación: Reducción del 40-50% del área basimétrica, reducción del 40% de la fracción de cabida cubierta, con el fin de estimular la regeneración.</p> | Estructura del bosque Continuidad del combustible Humedad del combustible Humedad del suelo Temperatura y humedad relativa del rodal Condiciones meteorológicas |
| Bosque mixto de pino silvestre (<i>Pinus sylvestris</i>) | Mejorar el estado de salud del bosque Aumentar la producción de madera / el secuestro de carbono | <p>Parcela C: parcela control sin intervención. Situación inicial: más de 1.000 pies/ha, área basimétrica de 21 m²/ha y estructura regular del pino silvestre, área basimétrica de 7 m²/ha de roble (<i>Quercus pubescens</i>) y 3 m²/ha de otras especies acompañantes. Fracción de cabida cubierta 65 %.</p> <p>Parcela T1: Desbroce de sotobosque para reducir la competencia por recursos. Situación post-actuación: Reducción del 50% del área basimétrica del roble y especies acompañantes. Ninguna actuación sobre el pino.</p> <p>Parcela T2: Clara baja y desbroce de sotobosque para reducir la competencia de los árboles. Situación post-actuación: Reducción del 30% del área basimétrica del pino y eliminación de todo el sotobosque, roble y especies acompañantes.</p> | Estructura del bosque Estado de salud del bosque Humedad del suelo Temperatura y humedad relativa del rodal Condiciones meteorológicas |
| Pinar de pino laricio (<i>Pinus nigra</i>) | Reducir el riesgo de incendio Aumentar la producción de madera / el secuestro de | <p>Llobera</p> <p>Parcela C: parcela control sin intervención. Situación inicial: más de 1.700 pies/ha, área basimétrica de 38,6 m²/ha, edad 60-80 años, fracción de cabida cubierta 75 %.</p> <p>Parcela T1: Desbroce selectivo de sotobosque y clara baja de poca intensidad. Situación post-</p> | Estructura del bosque Continuidad del combustible Humedad del combustible |

| | | | |
|--|---------|--|--|
| | carbono | <p>actuación: Reducción del 10% del área basimétrica.</p> <p>Parcela T2: Desbroce selectivo de sotobosque y clara baja de alta intensidad. Situación post-actuación: Reducción del 40% del área basimétrica.</p> <p>Madrona</p> <p>Parcela C: parcela control sin intervención. Situación inicial: más de 1.100 pies/ha, área basimétrica de 29 m²/ha, edad 80-100 años, fracción de cabida cubierta 75 %.</p> <p>Parcela T1: Desbroce selectivo de sotobosque. Situación post-actuación: Sin efecto sobre el área basimétrica.</p> <p>Parcela T2: Desbroce selectivo de sotobosque y clara baja de alta intensidad. Situación post-actuación: Reducción del 30% del área basimétrica.</p> | <p>Humedad del suelo</p> <p>Temperatura y humedad relativa del rodal</p> <p>Condiciones meteorológicas</p> |
|--|---------|--|--|

Tabla 2. Variables de seguimiento, indicadores utilizados, frecuencia del seguimiento y metodología usada.

| Variable de seguimiento | Indicadores de seguimiento | Frecuencia | Metodología |
|-----------------------------|--|---|--|
| Estructura del bosque | Densidad (pies/ha) Distribución por clase diamétrica Altura (m) Número de rebrotes/ha | Inicial, después del tratamiento, final | Inventario forestal: En cada parcela de tratamiento y control se instalan tres parcelas de seguimiento permanentes circulares (de 10 m de radio). La ubicación de las parcelas se distribuye uniformemente y se preasigna en un mapa. El punto central de estas parcelas queda marcado para los muestreos periódicas. En cada parcela se cuenta el número de árboles/rebrotes de cada especie y se mide el diámetro a la altura del pecho (DAP) y la altura de cada árbol. |
| Continuidad del combustible | Biovolumen de sotobosque | Inicial, después del tratamiento, final | Transectos de biomasa: En cada parcela se definen dos transectos de biomasa en franja (10 m) para estimar el biovolumen del sotobosque. En cada transecto se miden la altura máxima y la cobertura de las especies de matorral en parcelas cuadradas de 50x50 cm. |
| Decaimiento forestal | Defoliación (%) Decoloración (%) | Inicial, después del tratamiento, anual y final | Clave de identificación del declive forestal: Mediante una clave de campo, se evalúa el estado de decaimiento de la parcela a través de la estimación visual del porcentaje de mortalidad de los árboles, el porcentaje de defoliación (hojas no presentes en relación con las hojas presentes en un árbol sano) y el porcentaje de decoloración del follaje (hojas no verdes en relación con las hojas |

| | | | |
|---|---|--|--|
| | | | verdes en un árbol sano). Este método de identificación en campo se basa en el proyecto DEBOSCAT (Banqué et al, 2013) y en la Red Española de Seguimiento Forestal (Nivel II www.magrama.gob.es). |
| Humedad del combustible | Contenido relativo de agua (RWC) | Estacional y dos veces al mes (verano) | Muestreo de combustible forestal: Se recoge una muestra de ramas de 5 áboles y arbustos al azar mediante una pétiga de poda de fibra de vidrio (Jameson JE). Las muestras se conservan en una caja fría hasta su procesamiento en el laboratorio. En el laboratorio, las muestras se pesan para obtener el peso fresco (W). A continuación, las muestras se secan en el horno a 80 °C durante 24 horas y se pesan para determinar el peso seco (DW). Esto permite determinar el contenido relativo de agua. |
| Humedad del suelo | Contenido de agua del suelo (SWC) | Estacional y dos veces al mes (verano) | El contenido de agua del suelo (SWC) se evalúa cada temporada y dos veces al mes (durante el periodo estival) utilizando un dispositivo de reflectometría (TDR) (Tektronix 1502C, Beaverton, Oregón, EE.UU.) (Gray & Spies, 1995). Se dejan permanentemente tres varillas cilíndricas de acero inoxidable de 15 cm de longitud totalmente clavadas en el suelo en cinco puntos seleccionados y distribuidos uniformemente en cada zona de tratamiento (15 sensores por zona). El TDR se conecta a los extremos de las varillas en cada medición. |
| Temperatura y humedad relativa del rodal | Temperatura y humedad relativa | Continua | Medición con sensores: En cada zona de tratamiento monitorizada, se instalan 5 registradores de datos de temperatura y humedad relativa (HOBO Pro v2 (U23-001) de Onset Computer Corporation). Estos registradores HOBO están situados a 130 cm del suelo. El intervalo de registro se fijó en 60 minutos. |
| Condiciones meteorológicas | Temperatura máxima, temperatura mínima, precipitación y radiación | Continua | Estación meteorológica: Los valores diarios de las variables meteorológicas, incluidas la temperatura máxima, la temperatura mínima, las precipitaciones, la radiación y la velocidad del viento, se calculan a través de los datos horarios registrados por una estación meteorológica automática: estación Vantage Pro2 (Davis Instruments, Hayward, California, EE.UU.). |

Tabla 3. Resultados de la clasificación supervisada de la imagen aérea de Septiembre de 2016.

| Tratamiento | Superficie de la parcela (m ²) | Superficie afectada por decaimiento forestal (m ²) | Porcentaje de superficie afectada por decaimiento (%) |
|-----------------|--|--|---|
| Control | 8.232,6 | 752,1 | 9,1% |
| Baja intensidad | 8.340,2 | 40,8 | 0,5% |
| Alta intensidad | 7.029,8 | 0,9 | 0,0% |

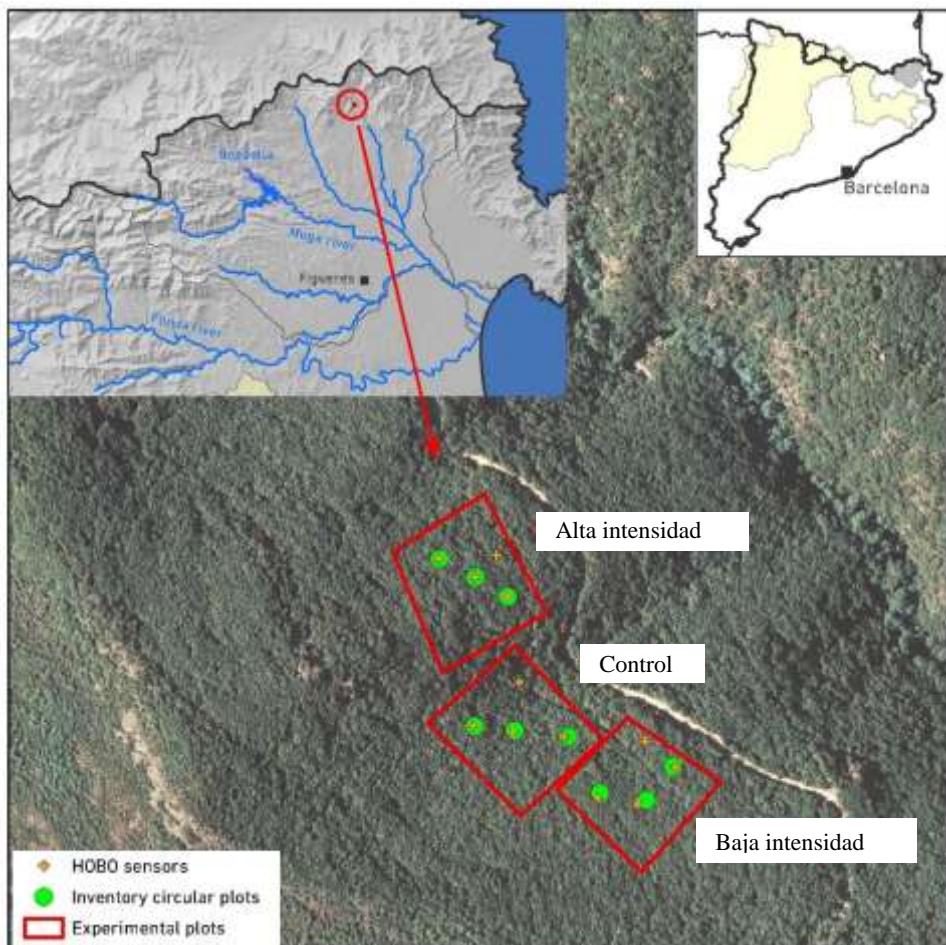


Figura 1. Localización del encinar de Requesens en la cuenca del río Muga. Delimitación de las parcelas de actuación en función de la intensidad y el control (polígonos rojo). Además se incluye la localización de subparcelas de inventario (círculos verdes) y de sensores (cruces naranjas) de seguimiento.

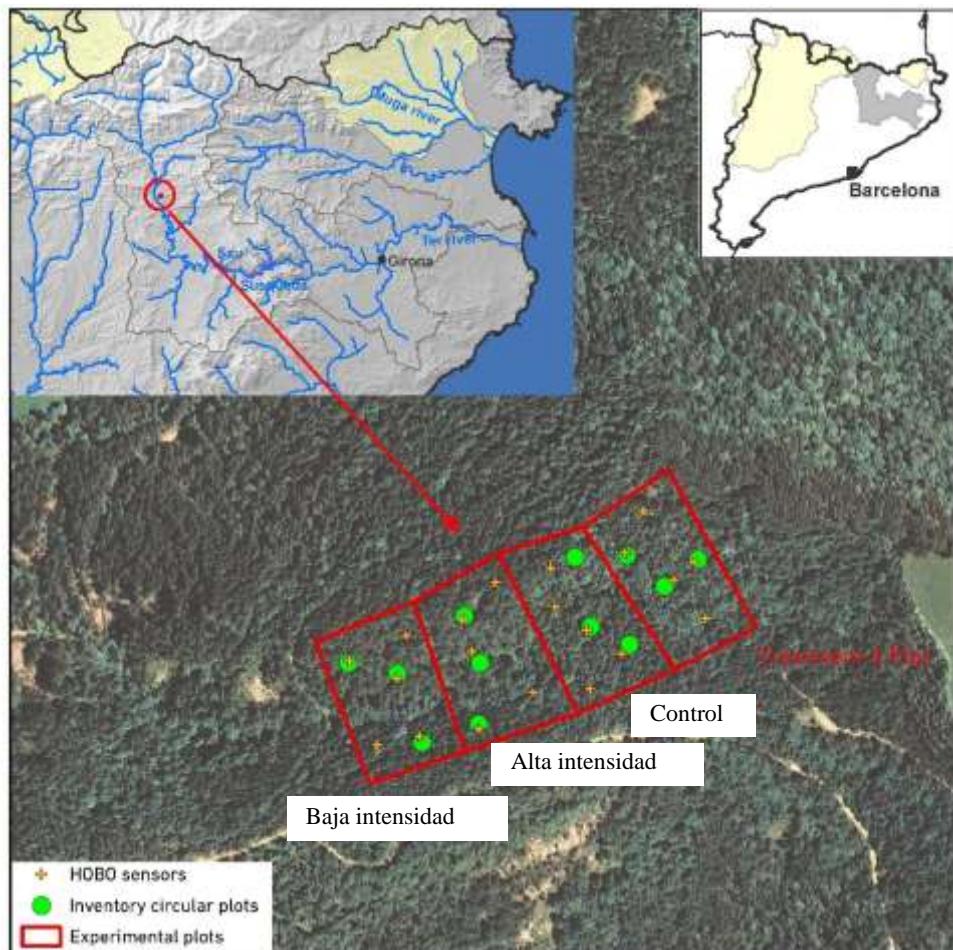


Figura 2. Localización del bosque mixto de pino silvestre de Montesquiu en la cuenca del río Ter. Delimitación de las parcelas de actuación en función de la intensidad y el control (polígonos rojo). Además se incluye la localización de subparcelas de inventario (círculos verdes) y de sensores (cruces naranjas) de seguimiento.

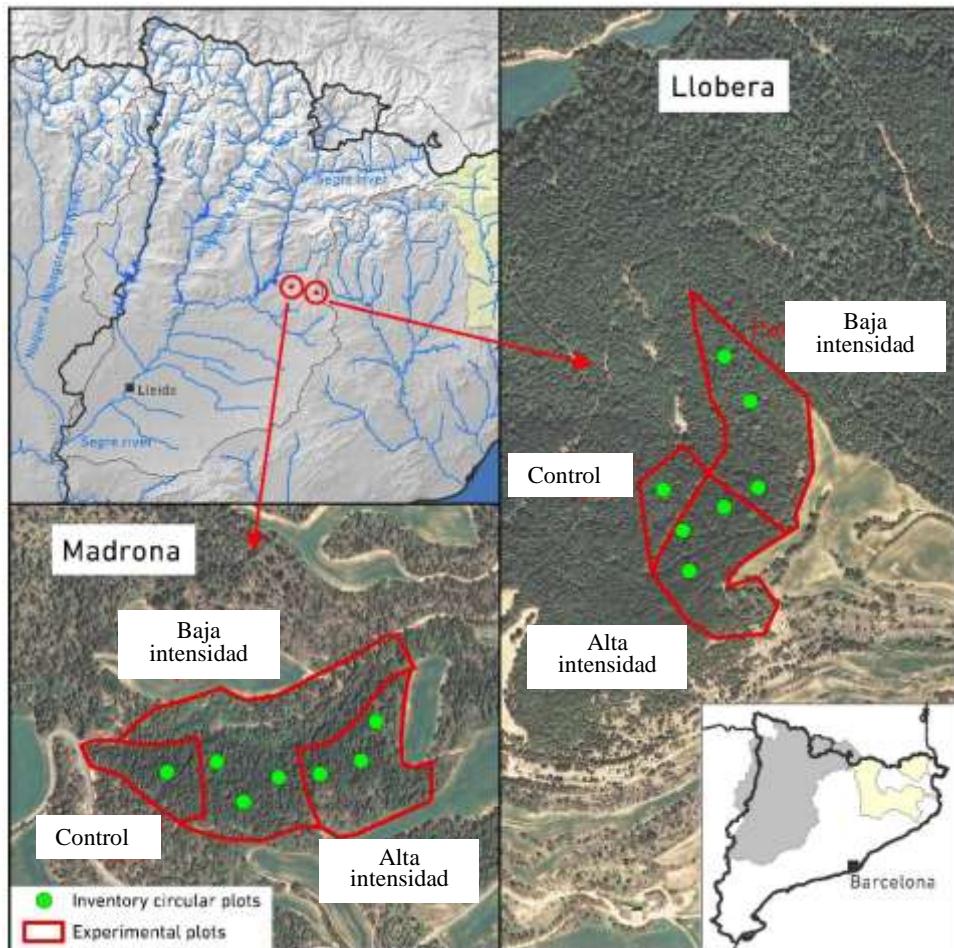


Figura 3. Localización del pinar de pino laricio de Madrona (izquierda) y Llobera (derecha) en la cuenca del río Segre. Delimitación de las parcelas de actuación en función de la intensidad y el control (polígonos rojo). Además se incluye la localización de subparcelas de inventario (círculos verdes) de seguimiento.

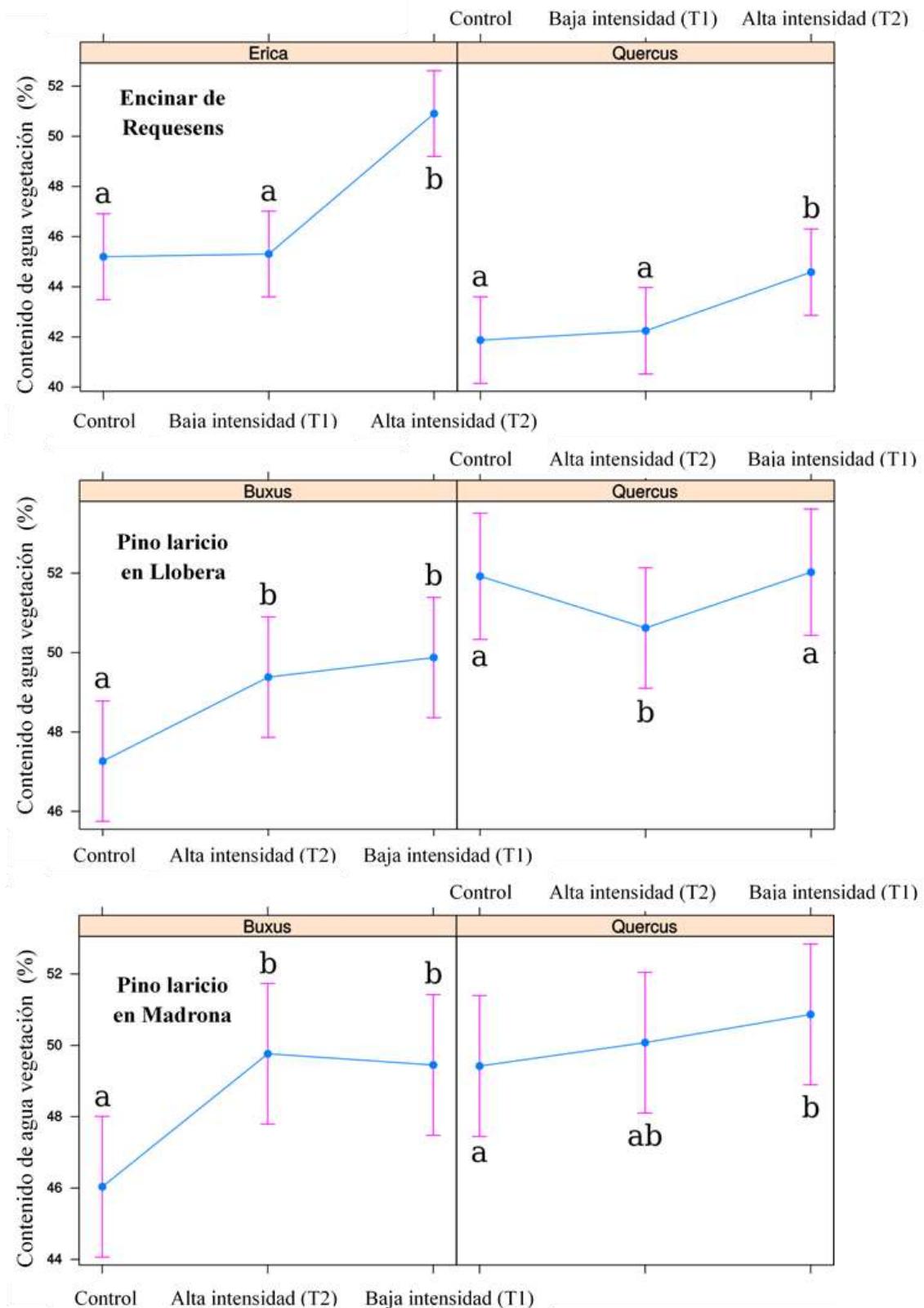


Figura 4. Efecto de la gestión forestal adaptativa en la humedad del combustible. Arriba: Encinar en Requesens, muestras de brezo (*Erica*) y encina (*Quercus*). Medio: Pinar de pino laricio en Llobera, muestras de boj (*Buxus*) y pino laricio (*Pinus nigra*). Abajo: Pinar de pino laricio en Madrona, muestras de boj (*Buxus*) y pino laricio (*Pinus nigra*). Parcelas control, baja intensidad (T1) y alta intensidad (T2).

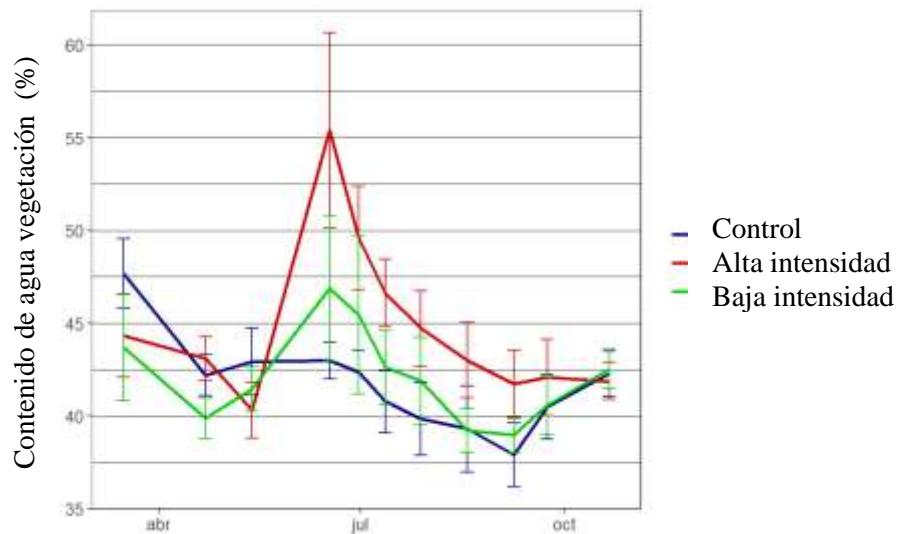


Figura 5. Evolución del contenido de agua de la encina en el año 2016 en Requesens. La línea azul muestra el contenido de agua en las parcelas control, la línea roja en el tratamiento de alta intensidad y la línea verde en el tratamiento de baja intensidad.

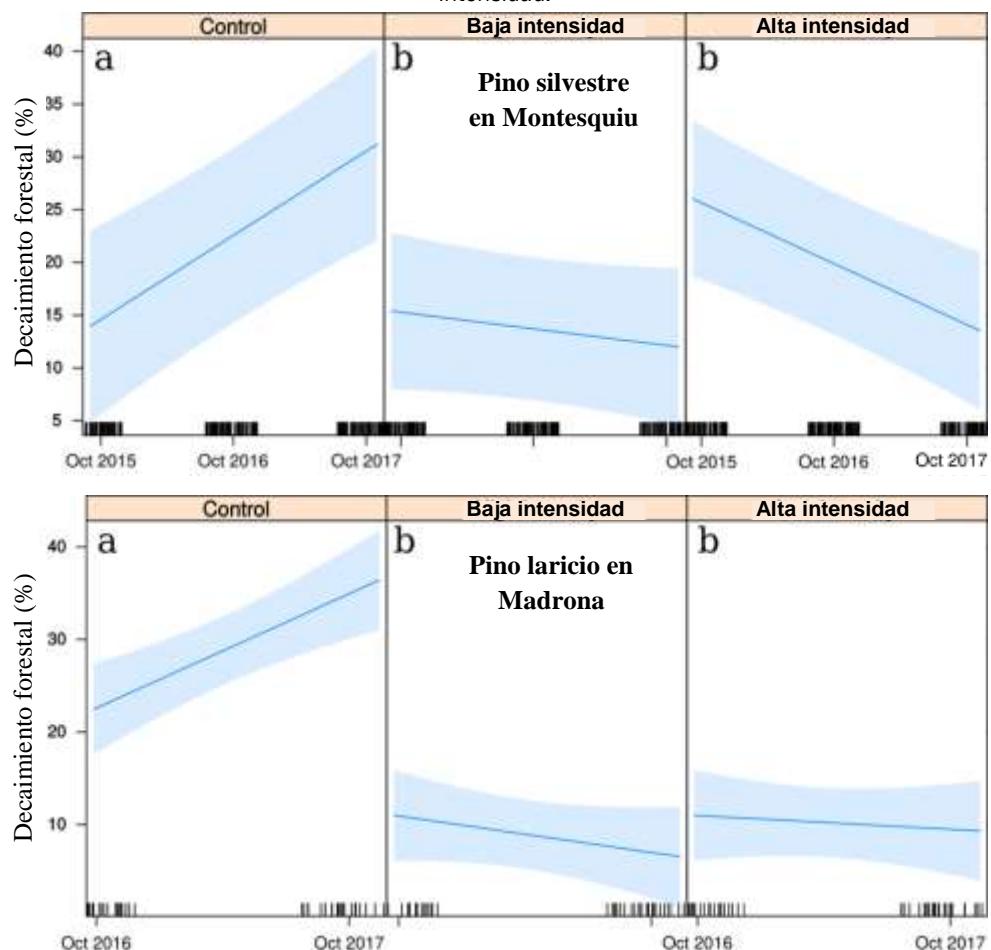


Figura 6. Efecto de la gestión forestal adaptativa en el decaimiento forestal. Arriba: Bosque mixto de pino silvestre en Montesquiu. Abajo: Pinar de pino laricio en Madrona. Parcela control (izquierda), tratamiento de alta intensidad (T2, centro) y tratamiento de baja intensidad (T1, derecha).

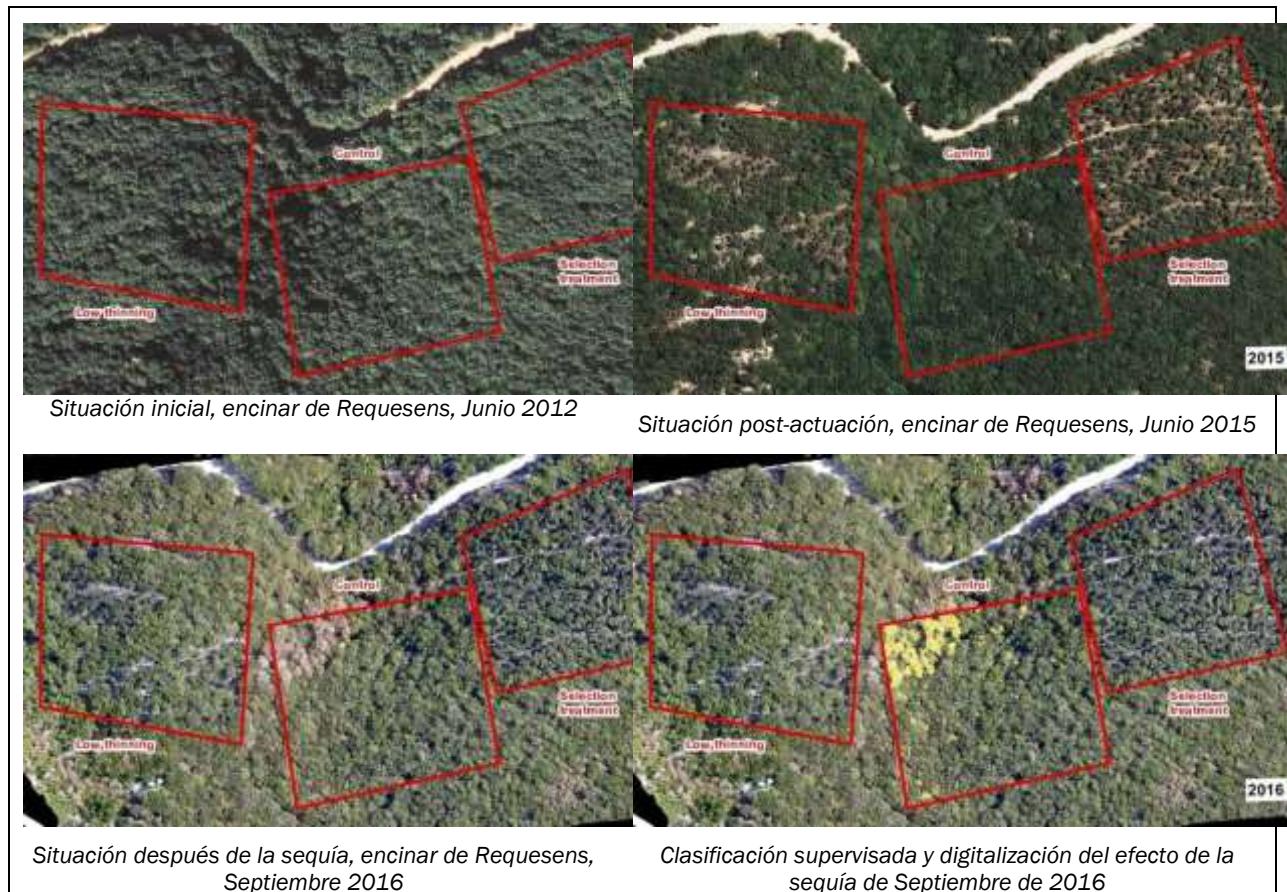


Figura 7. Evolución de la zona de estudio de Requesens. Arriba izquierda: Situación inicial del encinar en Junio de 2012. Arriba derecha: Situación del encinar después de la aplicación de la gestión forestal adaptativa en Junio de 2015. Abajo izquierda: Situación del encinar después de la sequía del verano de 2016. Abajo derecha: Georreferenciación y clasificación supervisada de la imagen aérea de 2016. Los polígonos rojos indican las parcelas de actuación, a la izquierda el tratamiento de baja intensidad (low thinning), en medio el control y a la derecha el tratamiento de alta intensidad (Selection treatment).

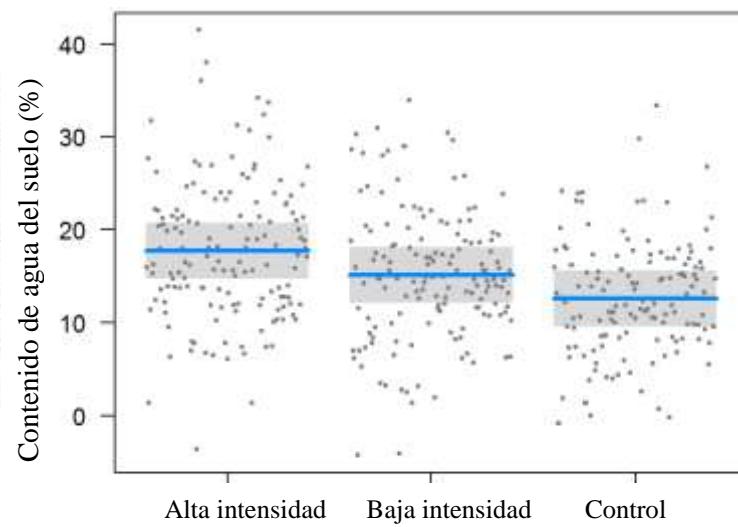


Figura 8. Efecto de la gestión forestal adaptativa en el contenido de agua del suelo del pinar de pino silvestre en Montesquiu. Tratamiento de alta intensidad (izquierda) de baja intensidad (centro) y control (derecha).

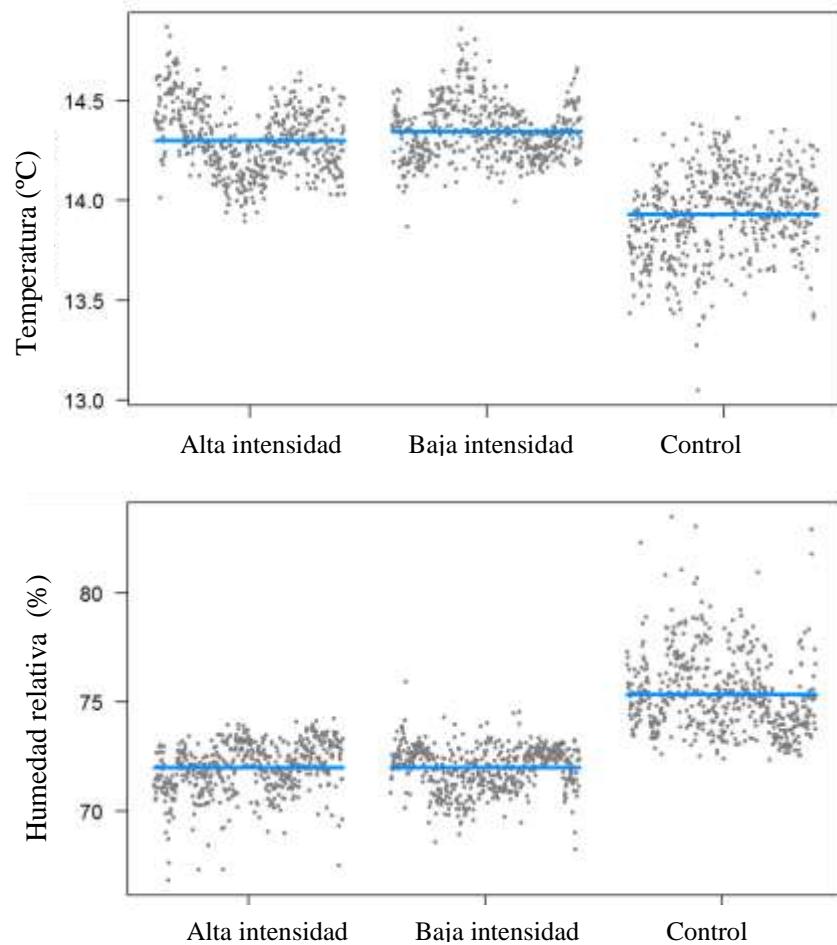


Figura 9. Efecto de la gestión forestal adaptativa en la temperatura y la humedad relativa del rodal del pinar de pino laricio en Madrona. Tratamiento de alta intensidad (izquierda) de baja intensidad (centro) y control (derecha).