2025 | 16·20
GIJÓN | JUNIO
9º CONGRESO FORESTAL ESPAÑOL

9CFE-1701

Actas del Noveno Congreso Forestal Español
Edita: **Sociedad Española de Ciencias Forestales. 2025**.
ISBN: **978-84-941695-7-1**

Organiza

Impacto de la gestión forestal en la productividad de bosques mixtos de *Quercus pyrenaica* y *Pinus sylvestris* en Castilla y León

PORTO RODRÍGUEZ, J.C. (1), VÁZQUEZ VELOSO, A. (2), SÁNCHEZ PELLICER, T. (1), BLÁZQUEZ CASADO, A. (1), BRAVO OVIEDO, F. (2) y RUANO BENITO, I. (2)

(1) Área de Selvicultura y Cambio Climático. Fundación Centro de Servicios y Promoción Forestal y de su Industria de Castilla y León.
(2) SMART Ecosystems Group. Departamento de Producción Vegetal y Recursos Forestales. Instituto Universitario de Investigación en Gestión Forestal Sostenible (iuFOR), ETS Ingenierías Agrarias. Universidad de Valladolid.

Resumen

Las masas mixtas se reconocen como masas más resilientes y resistentes. Sin embargo, la mayoría de itinerarios selvícolas están enfocados en masas puras. El *Quercus pyrenaica* en Castilla y León es una especie ampliamente extendida que crece tanto en masas puras como mixtas, pero su estabilidad futura está en riesgo dado el contexto del cambio climático. De esta forma, resultaría de interés comprobar cómo el método de gestión influye en la producción de masas mixtas de esta especie, ya que es clave su conservación y mejora. El objetivo de este estudio es analizar la productividad de bosques mixtos de *Quercus pyrenaica* con *Pinus sylvestris* bajo diferentes tipos de gestión. Para ello se utilizaron datos del Tercer Inventario Forestal Nacional para bosques regulares con diferentes niveles de mezcla. Utilizando el simulador SIMANFOR se aplicaron diferentes escenarios de gestión enfocados en la producción de madera de calidad: uno para masas mixtas, dos para masas puras y uno de gestión en cubierta continua enfocada en el árbol individual. Los resultados mostraron que la gestión en cubierta continua es la que mayor productividad genera, tanto en biomasa como en productos comerciales.

Palabras clave

Masas mixtas, rebollares, selvicultura, SIMANFOR, productividad.

1. Introducción

Las masas mixtas son ampliamente reconocidas como masas más resilientes y resistentes ante perturbaciones, especialmente ante los efectos del cambio climático, como aumento de temperaturas y sequía (BRAVO-OVIEDO, 2018). Sin embargo, el contexto histórico relativo a la gestión forestal en España ha provocado una disminución de las masas mixtas en favor de las masas puras, debido a su mayor simplicidad en gestión y explotación (ABRIL, 1996). El rebollo (*Quercus pyrenaica Willd.*) es una especie ampliamente extendida en España, y en especial en Castilla y Léon, con más de 700.000 ha (BRAVO, 2022). El método de gestión más extendido para esta especie ha sido el de producción de biomasa para combustible con turnos de corta muy cortos, alrededor de 30 años (BRAVO, 2008). En la actualidad, este uso de la madera está en retroceso y grandes extensiones de esta especie están en estado de abandono, sin ningún tipo de gestión. Esta ausencia de gestión en el contexto de cambio climático pone en riesgo de afección severa y posible desaparición a grandes superficies de esta especie lo que tendría

consecuencias ambientales, sociales y económicas muy relevantes debido a la gran superficie que cubre (BRAVO, 2022).

Esta especie no solo aparecen en masas puras, sino que también tienden a formar masas mixtas con otras especies, entre ellas *Pinus sylvestris L.*, *Pinus pinaster Ait.*, *Quercus ilex L.*, o *Fagus sylvatica L.* entre otras (MITECO, 2025b). En este sentido, fomentar las masas mixtas de rebollo y pino silvestre *(Pinus sylvestris L.)* se ha presentado como una buena alternativa de adaptación al cambio climático para esta especie no solo por la complementariedad entre ellas, sino también por la perspectiva de generación de productos madereros para ambas (BRAVO, 2022). Esto incentivaría la gestión de estas masas desde una perspectiva económica. Sin embargo, existen pocos métodos de gestión publicados para este tipo de masas mixtas. Así, en Castilla y León solo se cuenta con un escenario de masas mixtas de rebollo y pino silvestre que está centrado en la producción de madera de calidad (GONZALEZ-MOLINA, 2006). Con este mismo objetivo aparecen escenarios selvícolas de gestión de masas puras de rebollo (CRESPO-RODRIGO y GARCIA-QUITANA, 2013) y pino silvestre (MONTERO et al, 2008). Por otro lado, la gestión en cubierta continua enfocada en el árbol individual (también conocida como gestión ProSilva) se basa en la selección de pies de porvenir para fomentar la irregularidad y las masas mixtas. Este tipo de selvicultura aparece descrito en SUSSE et al (2011).

En la actualidad la existencia de simuladores forestales permite la comparación de diferentes escenarios selvícolas para facilitar la toma de decisiones. SIMANFOR (BRAVO et al., 2025a, 2025b) es un simulador, en el que se incluye un modelo predictivo de masas mixtas de rebollo y pino silvestre.

2. Objetivos

El objetivo general de este estudio es analizar la productividad de bosques mixtos de *Quercus pyrenaica* con *Pinus sylvestris* bajo diferentes tipos de gestión. Para ello se busca responder a las siguientes preguntas de investigación:

- ¿La producción en términos de crecimiento y biomasa de masas mixtas de *Quercus pyrenaica* y *Pinus sylvestris* es diferente en función del grado de mezcla?
- ¿La producción en términos de crecimiento y biomasa de masas mixtas de *Quercus pyrenaica* y *Pinus sylvestris* es diferente en función la gestión aplicada?
- ¿La gestión aplicada en masas mixtas de *Quercus pyrenaica* y *Pinus sylvestris* influye en el producto final obtenido?
- ¿Es el modelo utilizado adecuado para analizar las masas mixtas de *Quercus pyrenaica* y *Pinus sylvestris* en Castilla y León?

Para responder a estas preguntas se han seleccionado parcelas de masas mixtas de rebollo y pino silvestre del Tercer Inventario Forestal Nacional (MITECO, 2025c), con diferentes proporciones de mezcla y distribuidas por diferentes puntos geográficos de Castilla y León. Para estas parcelas se han simulado los diferentes escenarios de gestión previamente presentados y se ha evaluado tanto la producción de biomasa como la producción de madera de sierra de dimensiones

gruesa y fina.

3. Metodología

a. Área de estudio y datos

El área de estudio es Castilla y León. Para la adquisición de datos se utilizaron las parcelas del Tercer Inventario Forestal Nacional (IFN3) pertenecientes a este territorio, correspondientes a los años 2002-2004 (MITECO, 2025c). Se seleccionaron parcelas de masas mixtas de rebollo (de aquí en adelante identificado como QP) y pino silvestre (de aquí en adelante identificado como PS) con las siguientes proporciones de mezcla: proporción inicial de área basimétrica de QP sobre el total del 30% (QP30), proporción inicial de área basimétrica de QP sobre el total del 50% (QP50) y proporción inicial de área basimétrica de QP sobre el total del 70% (Q70). En los tres casos se permitió una variación en el porcentaje de representación de +/- 7.5%. Además, se estableció que todas las parcelas contasen con valores próximos en cuanto a variables dasométricas (dg, G y N) con un máximo de 3 clases diamétricas por parcela y con un diámetro de árbol máximo de 22,5 cm para garantizar que sean masas jóvenes regulares y poder establecer una comparación más balanceada. En cuanto a la densidad de pies, se seleccionaron grupos de tres parcelas (QP30, QP50 y QP70) con valores próximos entre ellas, para mantener el equilibrio en la muestra. A nivel teórico se consideró la edad de la masa en los tres casos de 20 años. Como resultado se obtuvieron dos parcelas para cada porcentaje de mezcla, que se presentan en la Tabla 1. Aunque esta muestra no resulta representativa de la variabilidad total de las masas mixtas de rebollo y pino silvestre presentes en el área de estudio, sí permitió establecer una comparación equilibrada usando datos reales.

Tabla 1. Características dasométricas de las parcelas utilizadas como datos de entrada para la simulación. Donde dg es diámetro medio cuadrático, Ho es altura dominante, G es área basimétrica y N en número de pies en la parcela.

Identificador	Tipo de parcela	Especie 1	Especie 2	dg(cm)	Ho(m)	G(m2/ha)	N(Pies/ha)
24_0697	QP70	QP	PS	9.71	8.0	4.00	541.13
42_0435	QP30	PS	QP	9.18	7.5	4.21	636.62
34_0247	QP50	PS	QP	10.52	7.5	5.80	668.45
49_0123	QP70	QP	PS	14.59	12.3	13.83	827.61
42_0625	QP50	QP	PS	9.27	7.5	6.02	891.27
34_1018	QP30	PS	QP	9.48	5.5	6.29	891.27

Además, se buscó que las parcelas elegidas tuvieran una distribución acorde a la representatividad de este tipo de masas en el área de estudio, como se muestra en la Figura 1. Además, en el modelo empleado se incluyó el Índice de Aridez de Martonne (MARTONNE, 1926) de modo que se tiene en cuenta el clima propio de cada zona. Este índice fue obtenido para los años 2000 y 2020 a partir de los datos mensuales históricos extraídos de CRU-TS 4.06 (HARRIS et al., 2020) y rescaldados con WorldClim 2.1 (FICK & HIJMANS, 2017).

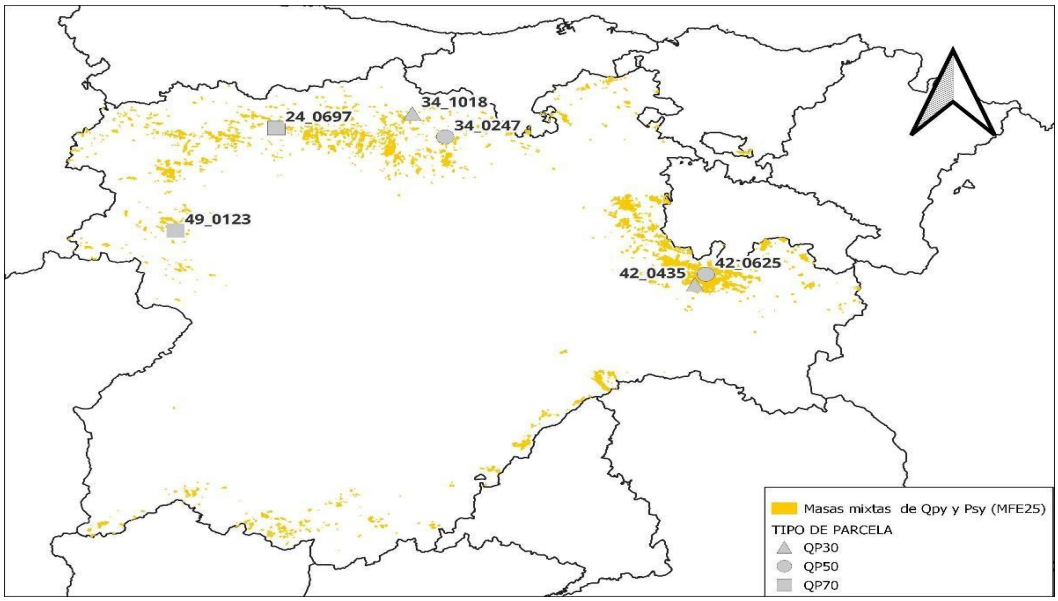

Figura 1. Distribución geográfica de las parcelas utilizadas como datos de entrada para la simulación en la comunidad autónoma de Castilla y León. Datos procesados a partir del Mapa Forestal Español (MITECO, 2025a).

3.

a. **Definición de los escenarios selvícolas**

La presencia en bibliografía de escenarios selvícolas para masas mixtas es escasa, especialmente en la mezcla de especies de este estudio. De este modo, únicamente se localizó un escenario selvícola para masas mixtas de QP y PS en Castilla y León publicado por MOLINA y GONZÁLEZ (2006), centrado en la producción de madera de calidad (Mix_cal de aquí en adelante). Para poder incluir más escenarios en la comparación se optó por utilizar otros que fueran desarrollados para masas puras con el mismo objetivo de producción de madera de calidad, y analizar su desempeño en masas mixtas. Así, el escenario de gestión centrado en producción de madera de calidad en PS (Psy_cal de aquí en adelante) se obtuvo de MONTERO et al (2008) y el de QP (Qpy_cal de aquí en adelante) de CRESPO-RODRIGO y GARCÍA-QUINTANA (2013). Por último, el escenario selvícola de Gestión en Cubierta Continua Centrada en el Árbol Individual se desarrolló y adaptó a partir de la información publicada en SUSSE et al (2011), donde se presentan indicaciones sobre la gestión llevada a cabo por la *Association Futaie Irregulière* en su red de parcelas, cuyo objetivo productor también es la madera de calidad. En este caso, a partir de las indicaciones para masas puras de coníferas y frondosas, se propuso un escenario intermedio propio para masas mixtas (Mix_cc de aquí en adelante). En la Tabla 2 se presentan los itinerarios de los escenarios selvícolas utilizados en este estudio.

Tabla 2. Definición de los itinerarios selvícolas para cada escenario de gestión.

***Pinus sylvestris* – Objetivo calidad (Psy_cal)**			
Edad	**Tipo corta**	**Variable**	**Valor a cortar (%)**
30	Clara selección intermedia de	G(m2/ha)	30

40	árboles de porvenir		30
50			30
65			20
80			20
***Quercus pyrenaica* – Objetivo calidad (Qpy_cal)**			
Edad	**Tipo corta**	**Variable**	**Valor a cortar (%)**
30	Clara selección intermedia de árboles de porvenir	G(m2/ha)	40
45			35
60			40
80			35
100			50
Masas mixtas de QP y PS – Objetivo calidad (Mix_cal)			
Edad	**Tipo corta**	**Variable**	**Valor a cortar (%)**
30	Clara selección intermedia de árboles de porvenir	N(Pies/ha)	40
45			40
60			40
80			40
Masas mixtas de QP y PS – Gestión en Cubierta Continua Centrada en el Árbol Individual (Mix_cc)			
Edad	**Tipo corta**	**Variable**	**Valor a cortar (%)**
30	Clara selección intermedia de árboles de porvenir	V(m3/ha)	20
40			20
50			20
60			20
70			20
80			20
90			20
100			20

3.

a. **Simulaciones selvícolas**

SIMANFOR (BRAVO et al., 2025a, 2025b) es un simulador de gestión forestal, accesible vía web (www.simanfor.es), que facilita la comparación de alternativas selvícolas gracias a los modelos predictivos que tiene incorporados. En este estudio se empleó un modelo de crecimiento de masas mixtas basado en árboles individuales e independientes de la distancia, parametrizado para un total de 29 masas mixtas distribuidas por toda España. Este modelo se compone de tres módulos principales: el incremento del área basal (BAI) (RODRIGUEZ DE PRADO et al., 2022a), la relación altura-diámetro (RODRIGUEZ DE PRADO et al., 2022b) y el Índice de Densidad del Rodal (SDI) junto con el Índice Máximo de Densidad del Rodal (SDImax), ambos sensibles a las variaciones climáticas (RODRIGUEZ DE PRADO et al., 2020). Además, diferentes valores pueden ser estimados en cada etapa de la simulación, como el volumen y la biomasa, entro otras. Sin embargo, debe tenerse en cuenta que este modelo carece de módulos matemáticos que consideren la mortalidad natural y la masa incorporada, lo que limita, en cierta medida, la precisión de las predicciones. SIMANFOR permite la definición de escenarios selvícolas a partir del ajuste de los tipos de corta a aplicar (por lo bajo, por lo alto o sistemáticas), el año de la corta, el criterio (número de pies, área basimétrica o volumen) y la intensidad de la corta. También se puede establecer un

porcentaje de árboles futuros lo que permite simular cortas centradas en árboles de porvenir. Aclarar que el tipo de corta simulado no hace discriminación en función de la especie y que las simulaciones fueron realizadas a 90 años vista, hasta que la masa alcance los 110 años.

4. Resultados

En los siguientes apartados se presentan los resultados obtenidos en las simulaciones. En el primer apartado se analiza el crecimiento analizando la variación de las variables dasométricas (diámetro medio cuadrático, altura media, área basimétrica y densidad), en el segundo se analiza la variación en cuanto a biomasa total (entendida como el sumatorio de biomasa aérea y radical) y en el tercero se analiza la variación en cuanto a volumen de productos de sierra de dimensiones gruesa y fina. Los resultados fueron obtenidos individualmente para cada parcela, pero se obtuvieron los valores promedio para facilitar su interpretación.

4.

a. Análisis del crecimiento en función de la mezcla y la gestión aplicada.

El análisis del crecimiento se ha basado en analizar la variación de las diferentes variables dasométricas. El diámetro medio cuadrático (dg) se analiza en la Figura 2, diferenciando entre especie, y en la Figura 3, sin diferenciar entre especie. Así, en la Figura 3 se observan las siguientes diferencias entre los escenarios de gestión. El escenario Mix_cal muestra mayores aumentos en dg que Qpy_cal, que a su vez es superior a Psy_cal y Mix_cc. También se observa, fijándose en la Figura 2, una gran diferencia en cuanto al crecimiento entre especies, con un crecimiento del dg mucho mayor en PS que en QP. Además, hay diferencias entre los tipos de mezcla, con mayores valores cuanto mayor sea la proporción de QP, es decir, el crecimiento en dg en QP70 es mayor que en QP50 que a su vez es mayor que en QP30. Aunque los valores de inicio del escenario QP70 son ligeramente superiores (13cm para PS y 12 cm para QP) a los de QP30 y QP50 (ambos casos están en torno a 9-10 cm).

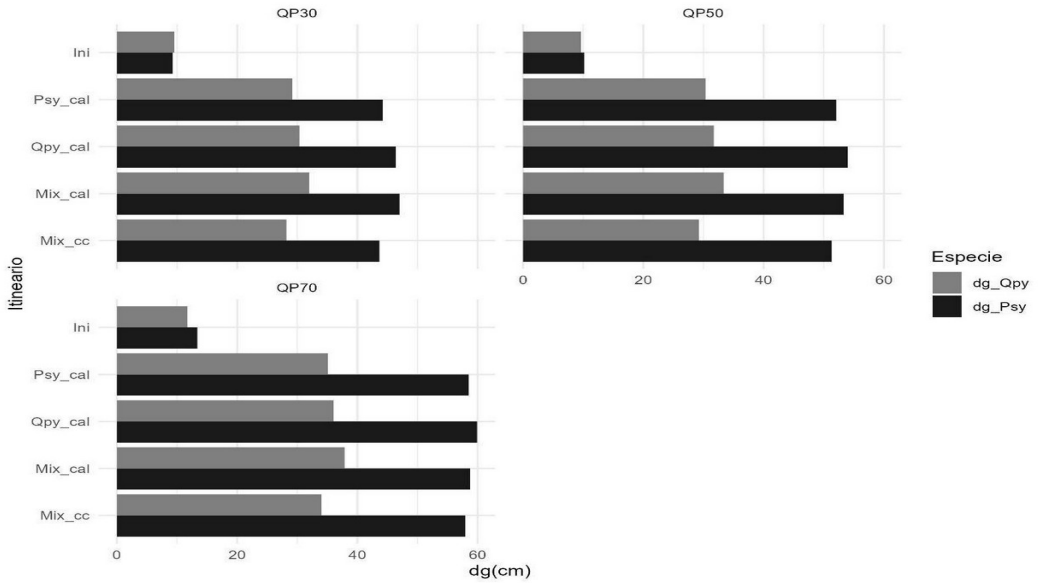

Figura 2. Diámetro medio cuadrático (cm) diferenciando por especie en los diferentes porcentajes de mezcla para los diferentes itinerarios de gestión, comparando el inicio (T=20) con el final de la simulación (T=110).

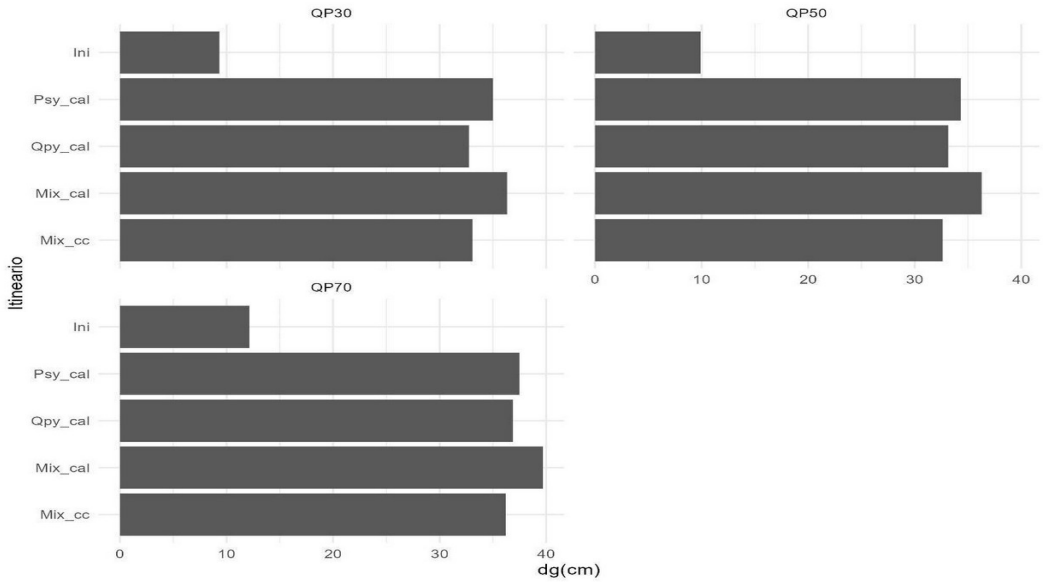

Figura 3. Diámetro medio cuadrático (cm) en los diferentes porcentajes de mezcla para los diferentes itinerarios de gestión, comparando el inicio (T=20) con el final de la simulación (T=110).

La altura media (h_media) se analiza en la Figura 4, diferenciando entre especie, y en la Figura 5, sin diferenciar entre especie. Así, en la Figura 4 se observa como en todos los casos el PS crece más en altura que el QP. Fijándose en el tipo de gestión, en la Figura 5, las diferencias son muy pequeñas, con Psy_cal y Mix_cc dando lugar a aumentos mayores en las parcelas QP50 y QP70, y Qpy_cal y Mix_cal haciendo lo mismo en QP30. Por último, en cuanto a los diferentes tipos de mezclas, se observa que en QP70 se alcanzan alturas medias 2 m mayores que en QP50, que a su vez son 2 m mayores que en QP30. Sin embargo, estas mismas diferencias en h_media ya se observan en el inicio de la simulación con QP70 con una h_media de 8 m, QP50 de 6 m y QP30 de 5 m.

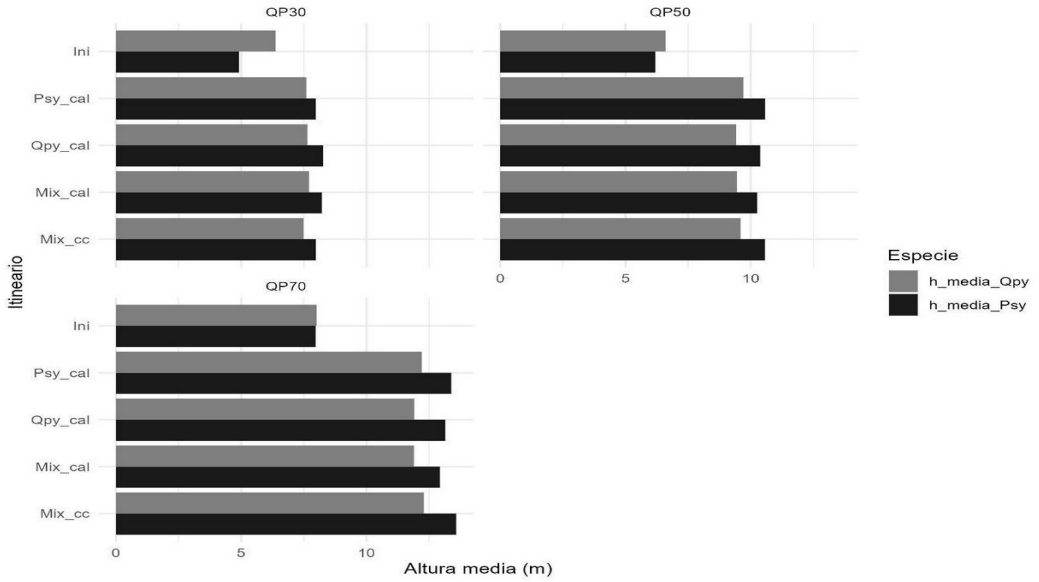

Figura 4. Altura media (m) diferenciando por especie en los diferentes porcentajes de mezcla para los diferentes itinerarios de gestión, comparando el inicio (T=20) con el final de la simulación (T=110).

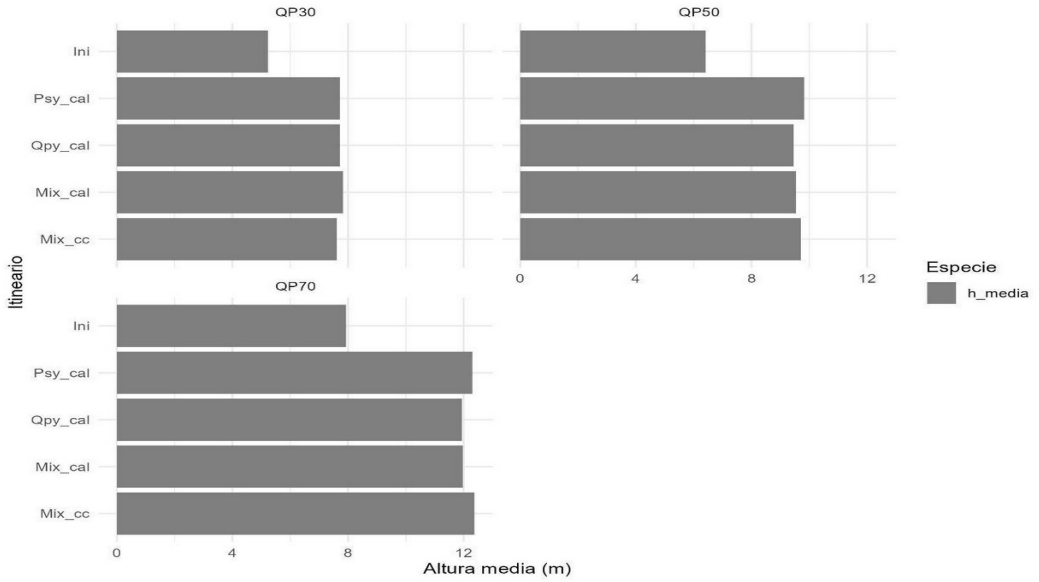

Figura 5. Altura media (m) en los diferentes porcentajes de mezcla para los diferentes itinerarios de gestión, comparando el inicio (T=20) con el final de la simulación (T=110).

El área basimétrica (G) se analiza en la Figura 6, diferenciando entre especie, y en la Figura 7, sin diferenciar entre especie. Así, en la Figura 6 se observa como en todos los escenarios de todos los tipos de mezcla se cumple un patrón común, siempre desciende el valor de G porcentual de PS en la parcela, aunque en cada caso de manera diferente. Mientras que el G de QP aumenta en todos los casos, el G de PS llega a descender en varios casos. Diferenciando entre escenarios, se observa que Psy_cal y Mix_cc muestran mayores aumentos para ambas especies, mientras que Qpy_cal y Mix_cal son los que muestran los valores más bajos. Por último, en

cuanto al tipo de parcela, en la Figura 7 se observa que los valores de inicio están desbalanceados, siendo mayor el G en QP70 que en QP50 y QP30, estando estos dos últimos casos más a la par. Sin embargo, al final de la simulación los valores de G en los tres escenarios son bastante similares, con diferencias más bajas que al inicio de la simulación.

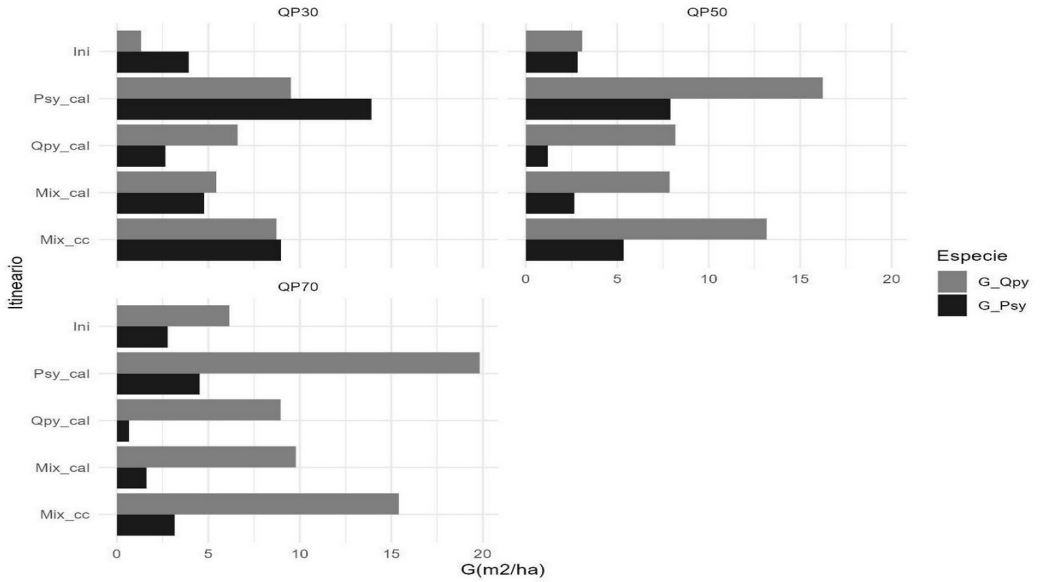

Figura 6. Área basimétrica (m2/ha) diferenciando por especie en los diferentes porcentajes de mezcla para los diferentes itinerarios de gestión, comparando el inicio (T=20) con el final de la simulación (T=110).

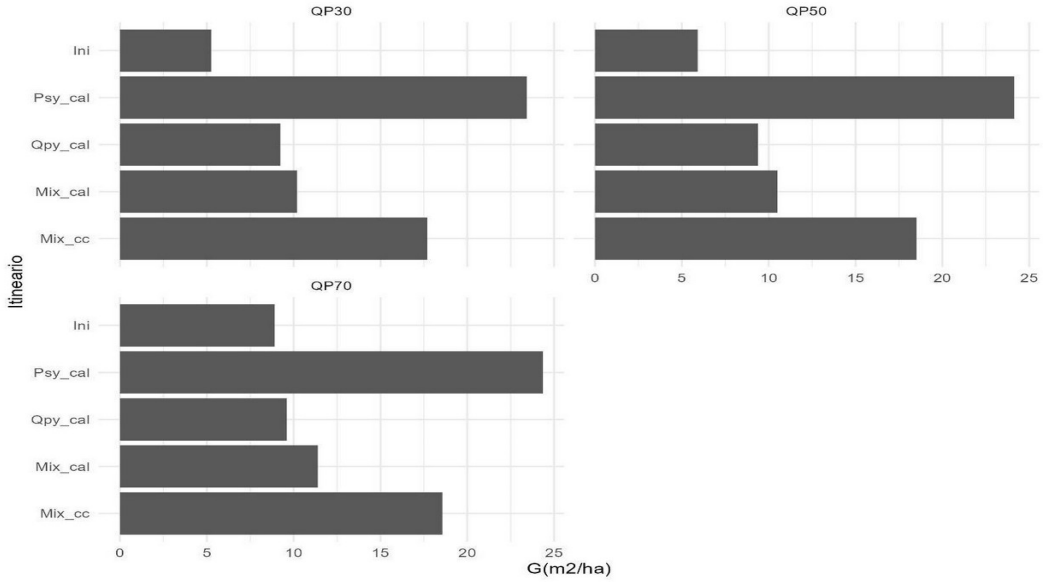

Figura 7. Área basimétrica (m2/ha) en los diferentes porcentajes de mezcla para los diferentes itinerarios de gestión, comparando el inicio (T=20) con el final de la simulación (T=110).

La densidad (N) se analiza en la Figura 8, diferenciando entre especie, y en la Figura 9, sin diferenciar entre especie. Así, en la Figura 8 se observa en todos los

escenarios de todos los tipos de mezcla se cumple un patrón común, desciende drásticamente el número de pies de PS en la parcela. En todos los casos QP pasa a ser la especie con mayor número de pies, incluso en las de QP30. Los escenarios que reducen en mayor cantidad la N son Qpy_cal y Mix_cal, siendo estos mismos también donde más se reduce el N de PS. En la Figura 9 se observa que en lo referido al tipo de parcela no parece que haya granes diferencias entre ellas. QP50 inicia con un N ligeramente superior que QP30, que a su vez es ligeramente superior a QP70, y los resultados al final de la simulación mantienen esta ligera diferencia.

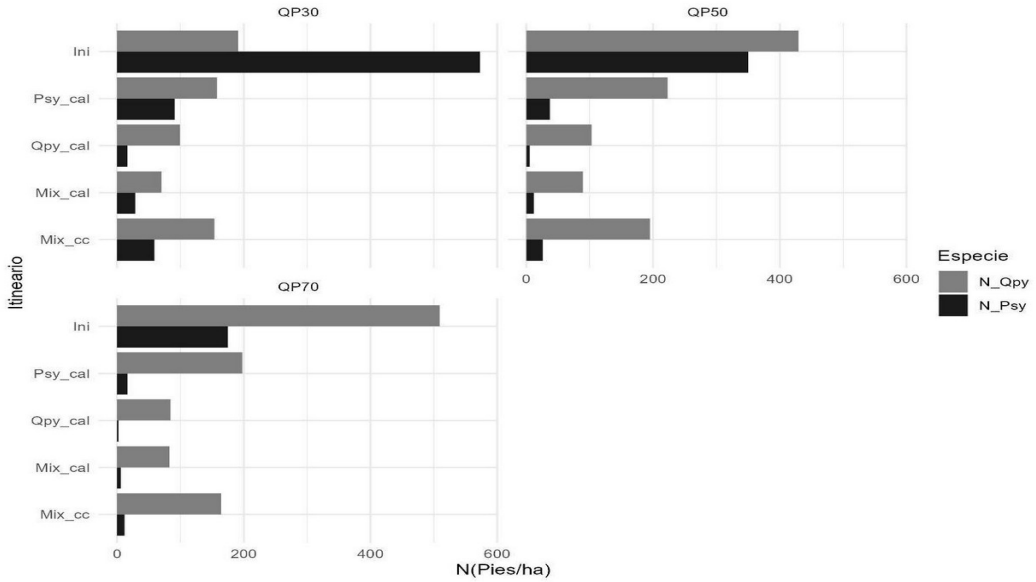

Figura 8. Densidad (pies/ha) diferenciando por especie en los diferentes porcentajes de mezcla para los diferentes itinerarios de gestión, comparando el inicio (T=20) con el final de la simulación (T=110).

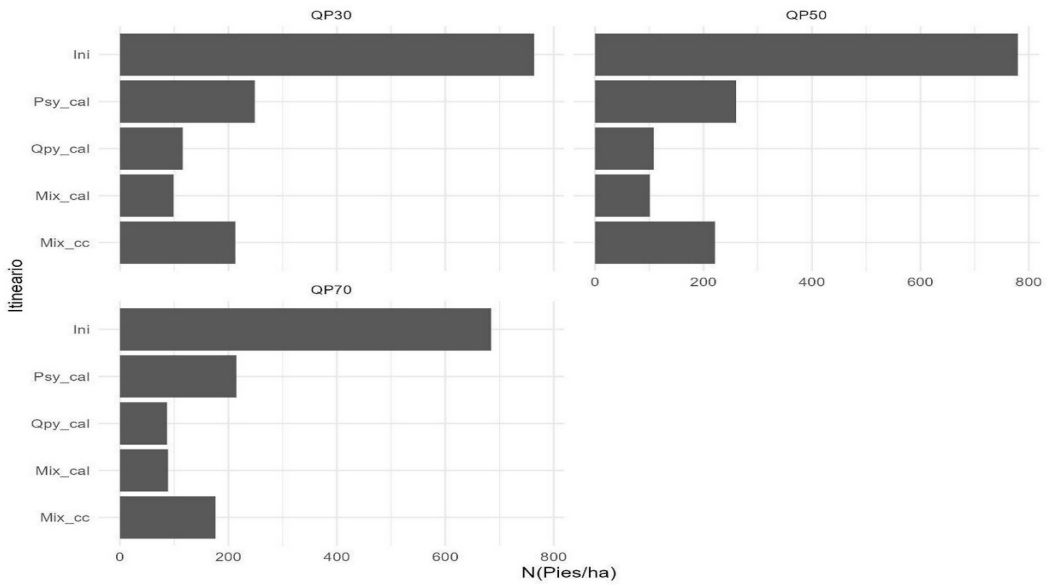

Figura 9. Densidad (Pies/ha) en los diferentes porcentajes de mezcla para los diferentes itinerarios de gestión, comparando el inicio (T=20) con el final de la simulación (T=110).

4.

a. **Comparativa de la productividad en biomasa**

El análisis de la productividad de biomasa total (entendida como sumatorio de biomasa aérea y biomasa radical) se ha basado en la variación este valor en los diferentes escenarios de gestión, tipos de parcela y diferentes sumatorios de las existencias: sumatorio de las existencias en pie o sumatorio de las existencias en pie más las existencias extraídas en las cortas. Así, en la Figura 10 se observa como en cuanto a las existencias en pie finales siempre es mayor el valor en el escenario Psy_cal, seguido de Mix_cc y con los escenarios Qpy_cal y Mix_cal con valores más bajos. Sin embargo, teniendo en cuenta las existencias obtenidas durante las cortas, es el escenario Mix_cc el que aparece como más productivo en términos de biomasa, seguido de Psy_cal, Qpy_cal y Mix_cal, por orden de sus valores. En cuanto a la diferencia entre los tipos de parcela, en la Figura 11 se observa que los valores en QP70 son mayores que en QP50, el cual a su vez tiene valores ligeramente superiores a QP30, aunque el valor de biomasa inicial también es mayor en QP70 que en QP50 y QP30, con valores iniciales muy próximos, aunque ligeramente superiores en QP50.

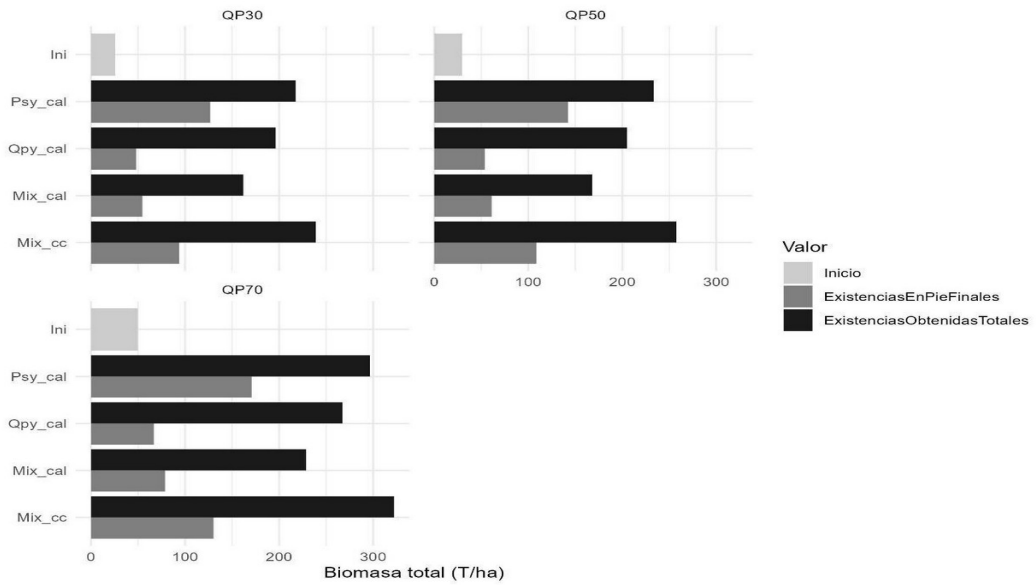

Figura 10. Biomasa total (T/ha) en los diferentes porcentajes de mezcla para los diferentes itinerarios de gestión comparando los valores de biomasa al inicio de la simulación (T=20) y al final de la simulación, donde ExistenciasEnPieFinales se refiere a las existencias en pie en la parcela en T=110 y ExistenciasObtenidasTotales se refiere a las existencias en pie en T=110 más las existencias cortadas a lo largo de la simulación.

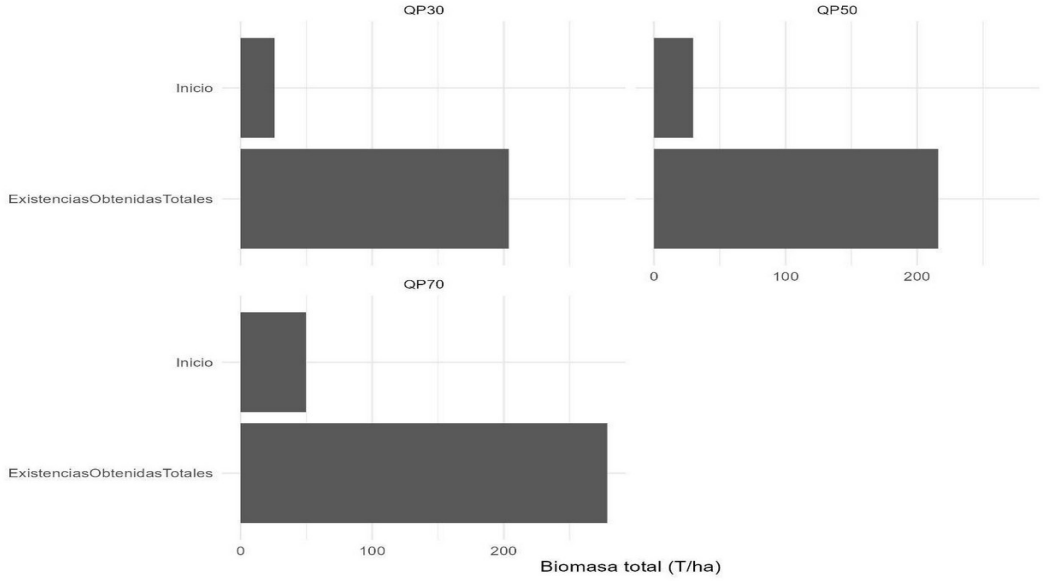

Figura 11. Biomasa total (T/ha) en los diferentes porcentajes de mezcla comparando los valores de biomasa al inicio de la simulación (T=20) y al final de la simulación, donde ExistenciasObtenidasTotales se refiere a las existencias en pie en T=110 más las existencias cortadas a lo largo de la simulación.

4.

a. **Comparativa de la productividad de madera de sierra en función de los métodos de gestión analizados.**

El análisis de los productos comerciales de sierra se ha basado en la variación del volumen de dos productos diferentes. Por un lado, en la Figura 12, el volumen de sierra gruesa (troza con dimensiones mínimas de 2.5 m de longitud y 40 cm en punta delgada), y por el otro, en la Figura 13, el volumen de sierra fina (troza con dimensiones mínimas de 2.5 m de longitud y 25 cm en punta delgada). Estos valores se evaluaron en los diferentes escenarios de gestión, tipos de parcela y diferentes sumatorios de las existencias: sumatorio de las existencias en pie o sumatorio de las existencias en pie más las existencias extraídas en las cortas. Así, en la Figura 12 se observa como la parcela QP30 es la que menor producción de sierra gruesa presenta, seguida por la parcela QP50, que está en una posición intermedia, y como parcela más productiva destaca la parcela QP70. Fijándose en la madera en pie al final del turno, el escenario Psy_cal destaca como el más productivo, seguido de Mix_cc, Mix_cal y QPy_cal en último lugar. Esto no aplicaría a la parcela QP30, donde el escenario Mix_cc presenta un valor de 0. Por otro lado, en cuanto a la madera en pie más la madera extraída en las cortas intermedias la situación varía en función de la parcela: en la QP30 Psy_cal es el más productivo, seguido de Qpy_cal y Mix_cal y con valor cero para Mix_cc; en el QP50, Psy_cal y Mix_cc son los escenarios más productivos, con los otros dos por detrás; y en el QP70 es el escenario Mix_cc el que destaca como el más productivo, seguido de Psy_cal, y en posiciones más bajas los dos restantes. En la Figura 13 se observa como la producción aumenta cuanto mayor proporción de QP hay en el tipo de parcela, es decir los valores en QP70 son mayores que en QP50 que a su vez son mayores que en QP30. En cuanto a las existencias en pie al final del turno, en las tres parcelas es el escenario Psy_cal el que presenta mayores valores, seguido de Mix_cc. Sin embargo, cuando se tienen en cuenta las cortas intermedias, es la gestión Mix_cc la que presenta mayores valores de producción en cualquiera de las parcelas, aunque con la gestión Psy_cal relativamente cerca en valores. Los escenarios Qpy_cal y Mix_cal siempre presentan valores más bajos.

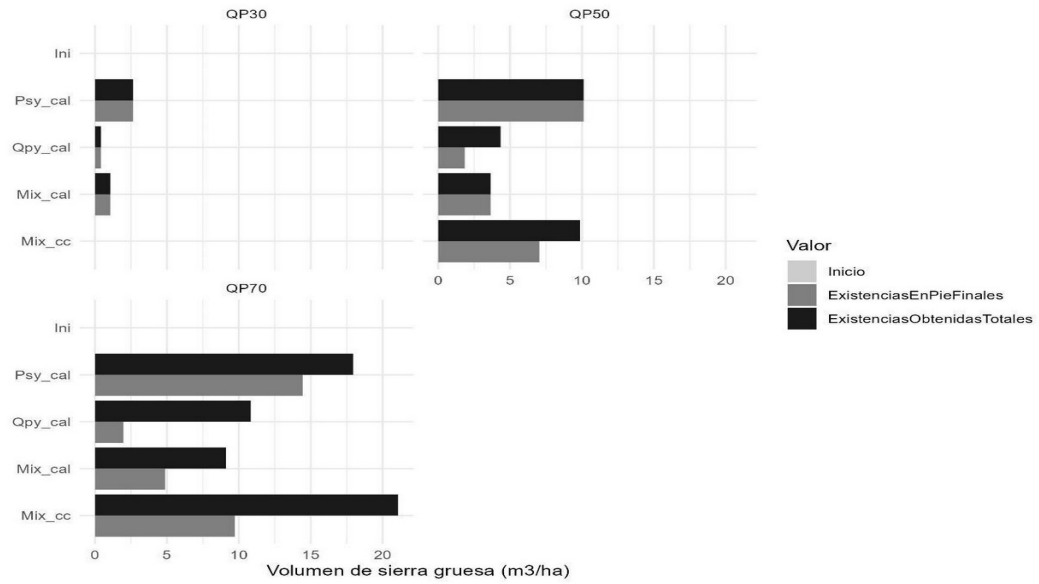

Figura 12. Variación en el volumen de sierra gruesa (m3/ha) en los diferentes porcentajes de mezcla para los diferentes itinerarios de gestión comparando los valores de volumen al inicio de la simulación (T=20) y al final de la simulación, donde

ExistenciasEnPieFinales se refiere a al volumen en pie en la parcela en T=110 y ExistenciasObtenidasTotales se refiere al volumen en pie en T=110 más el volumen cortado a lo largo de la simulación. El producto sierra gruesa se refiere a trozas de una longitud mínima de 2.5 m y diámetro mínimo en punta delgada de 40 cm.

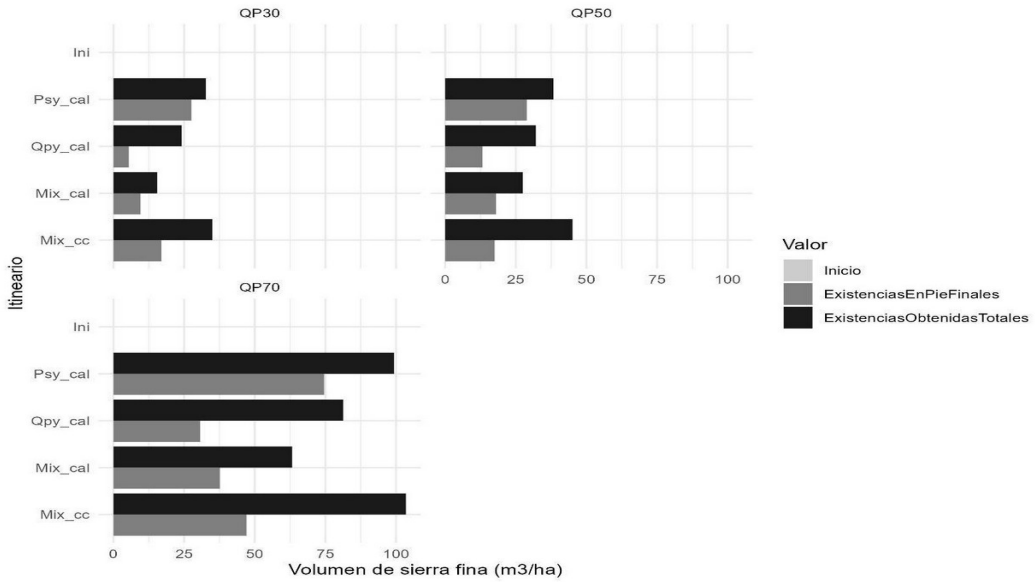

Figura 13. Variación en el volumen de sierra fina (m3/ha) en los diferentes porcentajes de mezcla para los diferentes itinerarios de gestión (descartando el escenario Ctrl), comparando los valores de volumen al inicio de la simulación (T=20) y al final de la simulación, donde ExistenciasEnPieFinales se refiere a al volumen en pie en la parcela en T=110 y ExistenciasObtenidasTotales se refiere al volumen en pie en T=110 más el volumen cortado a lo largo de la simulación. El producto sierra fina se refiere a trozas de una longitud mínima de 2.5 m y diámetro mínimo en punta delgada de 25 cm.

5. Discusión

El interés por las masas mixtas en España en general, y en Castilla y León en particular es cada vez mayor, tal y como muestran publicaciones recientes al respecto (ASKARIEH et al, 2024; RIOFRIO et al, 2017). De esta forma, este trabajo contribuye a este campo mediante la simulación de masas mixtas de *Quercus pyrenaica* y *Pinus sylvestris* bajo diferentes escenarios selvícolas. Comenzando con la discusión de los resultados obtendios, en relación a la producción entre las diferentes proporciones de mezcla, en términos de las 4 variables dasométricas estudiadas, se observa lo siguiente: en el diámetro medio cuadrático el aumento es mayor cuanto mayor es la proporción de rebollo, lo mismo ocurre en la altura media, mientras que en para el área basimétrica y el número de pies no se observan diferencias entre escenarios al final de la simulación. En este sentido, se

debe tener en cuenta el sesgo inicial que hay en las parcelas de proporción 70% de rebollo respecto a las de proporción 50% y 30%, en cuanto a diámetro medio cuadrático, altura media y área basimétrica, ya que estas cuentan con mayores valores para estas variables. En cuanto a la biomasa también parece que la parcela de proporción 70% de rebollo muestra mayores producciones que las de proporción 50% y 30%, sin embargo, este resultado posiblemente también esté sesgado también por el desequilibrio en los valores iniciales. Otros estudios realizados sobre masas mixtas de *Pinus sylvestris* con *Quercus robur* y *Quercus petraea* (PRETZSCH et al, 2020) y de *Pinus sylvestris* con *Quercus pyrenaica* (STERBA et al, 2014) han demostrado que las mezclas con proporciones al 50% son más productivas que las de proporciones intermedias (30%-70%). Esta tendencia no se observa en nuestro estudio. Esto puede deberse a que la situación de partida es ligeramente diferente, por lo tanto, no se podría responder a la primera pregunta de investigación. Para ello se tendría que realizar una selección de parcelas con variables dasométricas de inicio similares.

En cuanto al análisis de los diferentes tipos de gestión, se ha observado claramente como la gestión aplicada en las parcelas tiene una influencia directa en la productividad de las mismas. Así, se ha visto como la gestión para pino silvestre puro y la gestión en cubierta continua generan mayores valores de área basimétrica, mientras que la gestión de rebollo puro y rebollo con pino silvestre muestra aumentos más bajos. La altura media no varió demasiado, pero las pequeñas diferencias que hay también muestran mejores efectos a través de la gestión para pino silvestre puro y la gestión en cubierta continua. En cuento a la biomasa, es la gestión en cubierta continua la que proporciona masas más productivas, seguido de cerca de la gestión para pino silvestre puro, siempre que se tenga en cuenta la biomasa extraída durante las cortas. Es decir, la gestión en cubierta continua no busca alcanzar grandes valores de área basimétrica en pie en la parcela, sino que las cortas intermedias sean rentables y que la masa restante en la parcela garantice aumentos en el área basimétrica, especialmente de los pies de porvenir, aunque no únicamente, de modo que se asegure la rentabilidad en las próximas cortas intermedias (SUSSE et al, 2011). Sin embargo, la gestión de pino silvestre puro busca reducir la competencia de los pies de porvenir y maximizar su crecimiento hasta la corta final (MONTERO et al. 2008). Discutiendo por qué estas dos gestiones son más productivas que la de rebollo puro y la de rebollo con pino silvestre, la razón podría ser que estas dos últimas tienen intensidades de corta muy elevadas, quedando en la parcela menos árboles en los primeros años de simulación, que en su conjunto producen menos aumento de área basimétrica. La gestión en cubierta continua y de pino silvestre puro al hacer cortas más suaves, extraen poca biomasa, y permiten que la que se mantenga en la parcela siga aumentando de dimensiones. De esta forma quedaría resuelta la segunda pregunta de investigación. De todas formas, estas simulaciones deben entenderse como simplificaciones de la realidad. Por un lado, por una cuestión temporal, ya que una simulación de un período tan largo está sujeta a la influencia de muchos factores no considerados, y por el otro, por la ausencia de parámetros de mortalidad y de masa incorporada proveniente de regenerado. Esta última podría modificar los outputs obtenidos, especialmente en la gestión en cubierta continua donde el regenerado juega un papel fundamental (SUSSE et al., 2011). En cuanto a la mortalidad, las cortas más suaves características de la cubierta continua y de la gestión de pino silvestre puro podrían generar mortalidad por competencia

excesiva que no estaría siendo estimada. Adicionalmente, también se debe tener en cuenta que el tipo de corta propuesto para los cuatro escenarios de gestión (clara de selección intermedia de árboles de porvenir) podría no ajustarse fielmente a una situación real.

Poniendo el foco en los productos obtenidos, hay dos situaciones diferentes en función del producto. Por un lado, en cuanto a la madera de sierra gruesa, que incluye a madera de grandes dimensiones con diámetro mínimo en punta delgada de 40 cm, se debe tener en cuenta que para el final de simulación con un turno de 110 años, ninguno de los pies de rebollo alcanzó estas dimensiones, por lo que los productos obtenidos en todos los casos provienen de pino silvestre. En función del tipo de parcela, la situación varía levemente, pero en general los modelos de gestión que responden mejor son la de pino silvestre puro (especialmente en las parcelas proporción de rebollo al 30% y 50%) y la gestión en cubierta continua (especialmente en las parcelas proporción de rebollo al 50% y 70%). Es decir, los itinerarios descritos para estos tipos de gestión maximizan el número de ejemplares de pino silvestre con grandes dimensiones. Aunque esta diferencia entre los tipos de parcelas quizás se deba a los diferentes valores iniciales de las variables dasométricas de las parcelas, y no a la mezcla como tal. Esto coincide con lo presentado previamente en el apartado de biomasa, ambos escenarios selvícolas enfocan su selvicultura en aumentar el número de pies de grandes dimensiones (MONTERO et al., 2008; SUSSE et al. 2011). Por otro lado, en cuanto a la madera de sierra fina, que incluye tanto a madera de dimensiones intermedias como grandes, es decir con diámetro mínimo en punta delgada de 25 cm, los productos provienen de ambas especies. En este caso, la situación en los tres tipos de es similar, siempre que se tengan en cuenta el volumen final y las cortas intermedias. Así, el escenario de gestión en cubierta continua es el que proporciona más volumen de madera de sierra fina, seguido muy de cerca por la gestión de pino silvestre puro. Por los tiempos e intensidades de los itinerarios de estas gestiones, el crecimiento se ve maximizado (MONTERO et al., 2008; SUSSE et al. 2011). De todas formas, debe tenerse en cuenta que los productos de provenientes de gestión en cubierta continua proporcionarían productos con una calidad mayor ya que en este tipo de selvicultura se realizan las cortas atendiendo a mantener la sombra en los fustes de rebollo, de modo que no aparezcan rebrotes y que por lo tanto la madera pueda ser utilizado para usos de más valor añadido. En resumen, respondiendo a la tarcera pregunta de investigación, para los productos de grandes dimensiones (sierra gruesa), los métodos de gestión en cubierta continua y de pino silvestre puro son los más apropiados, especialmente el de gestión en cubierta continua en el caso de la proporción inicial de rebollo al 70%. Mientras que para los productos de dimensiones intermedias (sierra fina), el método de gestión en cubierta continua sería el más productivo. Sin embargo, ampliar más el tiempo de simulación podría mostrarnos situaciones diferentes ya que los pies podrían aumentar más en diámetro. Además, similar a lo discutido en el apartado previo, poder tener en cuenta la mortalidad y la masa incorporada en forma de regenerado aportaría nuevas dinámicas que serían de interés.

Por último, centrándose en la validez del modelo de masas mixtas en este estudio se han encontrado distintas limitaciones al respecto. Mientras que este modelo ha sido ajustado con datos de toda España (RODRIGUEZ DE PRADO, 2022) y permite cubrir amplias zonas de estudio, su funcionamiento podría verse limitado en zonas de estudio de carácter regional. Este modelo incluye información

climática a través del Índice de Martonne, lo que garantiza cierta sensibilidad a las características climáticas de la zona de estudio, aunque su calibración con datos locales podría mejorar las predicciones. Por otro lado, la falta de módulos para el cálculo de la mortalidad natural y masa incorporada limitan la precisión de las predicciones. Si bien la masa incorporada puede jugar un papel de menor importancia a la hora de cuantificar madera comercial, la ausencia de mortalidad natural puede repercutir en los valores mostrados en este estudio, incrementando los valores aquí mostrados. Sin embargo, pese a los errores que pueden mostrar las predicciones, la comparativa entre escenarios selvícolas y los efectos inter e intraespecíficos discutidos con anterioridad son resultados menos sensibles a estos efectos que el valor numérico final. Además, los datos climáticos utilizados en este estudio se han mantenido continuos durante toda la simulación, tomando como referencia el promedio climático del periodo 2000-2020. Sin embargo, las predicciones climáticas futuras nos muestran distintos escenarios climáticos, previsiblemente con condiciones más extremas que las actuales para las especies estudiadas (BRAVO, 2022). Esta simplificación en las simulaciones resulta en valores de crecimiento y, por tanto, de producción maderable, ligeramente superiores a los esperados, como ha sido reportado por estudios previos (RODRÍGUEZ DE PRADO et al, 2023). De esta forma se responde a la cuarta pregunta de investigación. Por último, cabe mencionar el efecto de las simulaciones en las masas mixtas. Como se ha mostrado tanto en el análisis del número de pies diferenciando por especie, como del área basimétrica, las parcelas tienden a ser más puras en todos los métodos de gestión aplicados, lo que se enfrenta al objetivo de fomentar las masas mixtas que justifica este estudio. Por lo tanto, sería conveniente ajustar los itinerarios selvícolas de forma que se mantenga un porcentaje adecuado de mezcla, quizás a través de cortas de selección que sí diferencien entre especies.

6. Conclusión

A través del presente estudio se ha comprobado como la gestión en cubierta continua es, de entre las gestiones evaluadas, la que da lugar a una mayor productividad en cuanto a biomasa. De la misma forma, este tipo de gestión también asegura los mayores valores de productividad para productos comerciales de sierra fina y de sierra gruesa, aunque para este último también es adecuada la gestión de pino silvestre puro. En cuanto a las limitaciones encontradas, no se ha podido comprobar que tipo de mezcla resulta más productivo. En este sentido, varias mejoras futuras se han detectado. Por un lado, una selección de parcelas con valores dasométricos iniciales similares facilitaría la comparación de los diferentes porcentajes de mezcla. En cuento al modelo de masas mixtas utilizados, se considera que la ausencia de módulos para el cálculo de la mortalidad natural y masa incorporada limitan la precisión, por lo que mayores esfuerzos podrían ser llevados a cabo para incluir estas dinámicas en el modelo mixto de estas especies. Por último, las simulaciones realizadas han generado una reducción del porcentaje de mezcla para todos los casos, por lo que se propone la realización de este experimento asegurando la estabilidad de la masa mixta, probablemente estableciendo que las cortas intermedias sí diferencien entre especies.

7. Agradecimientos

Este trabajo está realizado en el marco del proyecto LIFE20 CCM/ES/001778: LIFE + REB - Quercus pyrenaica forest management to obtain cascading use of timber products as a tool for mitigation in Castilla-Leon con la contribución del instrumento financiero LIFE de la Unión Europea.

Este trabajo ha sido financiado por ORDEN EDU/842/2022.

8. Bibliografía

ABRIL, A. D. G.; CAÑETE, J. G.; IRASTORZA, P.; 1996. Las masas irregulares y mixtas: ¿Un objetivo fundamental de la gestión forestal futura? *Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales*, (3), 139-145.

ALDEA, J.; DEL RIO, M.; CATTANEO, N.; RIOFRIO, J.; ORDOÑEZ, C.; UZQUIANO, S.; Bravo, F; 2023. Short-term effect of thinning on inter-and intra-annual radial increment in Mediterranean Scots pine-oak mixed forests. *Forest Ecology and Management*, 549, 121462.

ASKARIEH, A.; DEL RIO, M.; ALDEA, J.; RIOFRIO, J.; Bravo, F.; 2024. Radial increment dynamics of Maritime pine (Pinus pinaster Ait.) in pure and mixed stands with Scots pine (Pinus sylvestris L.) under changing environmental conditions. *European Journal of Forest Research*, 143(2), 671-686.

BRAVO, J. A.; ROIG, S.; SERRADA, R.; 2008. Selvicultura en montes bajos y medios de Quercus ilex L., Q. pyrenaica Willd. y Q. faginea Lam. Compendio de Selvicultura Aplicada en España; SERRADA, R.; MONTERO, G.; REQUE, J. A.; Eds, 657-744.

BRAVO, F.; 2022. Adaptación al cambio climático: directrices para la adaptación de la gestión del patrimonio natural y la política forestal al cambio climático en Castilla y León. Instituto Universitario de Investigación en Gestión Forestal Sostenible.

BRAVO, F.; ORDÓÑEZ, C.; VÁZQUEZ-VELOSO, A.; MICHALAKOPOULOS, S.; 2025a. SIMANFOR cloud Decision Support System: Structure, content, and applications. *Ecological Modelling*, 499, 110912. https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2024.110912

BRAVO, F.; ORDÓÑEZ, C.; VÁZQUEZ-VELOSO, A.; MICHALAKOPOULOS, S.; 2025b. SIMANFOR: herramienta renovada para la toma de decisiones forestales en el siglo XXI [oral communication]. 9º Congreso Forestal Español. Gijón, España.

BRAVO-OVIEDO, A.; 2018. The Role of Mixed Forests in a Changing Social-Ecological World. In: BRAVO-OVIEDO, A., PRETZSCH, H., DEL RÍO, M. (eds) *Dynamics, Silviculture and Management of Mixed Forests. Managing Forest Ecosystems*, vol 31. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-91953-9_1

CRESPO-RODRIGO, A.; GARCIA-QUINTANA, I.; 2013. Manual de tipificación, inventario y gestión de rebollares. Junta de Castilla y León. Soria, España.

FICK, S. E.; HIJMANS, R. J.; 2017. WorldClim 2: new 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*, 37, 4302–4315. https://doi.org/10.1002/JOC.5086

GONZALEZ MOLINA, J. M.; GONZALEZ ROMERO, A.; 2006. Manual de gestión de los hábitats de pino silvestre en Castilla y León. JUNTA DE CASTILLA Y LEÓN CONSEJERÍA DE MEDIO AMBIENTE.

HARRIS, I.; OSBORN, T. J.; JONES, P.; LISTER, D.; 2020. Version 4 of the CRU TS monthly high-resolution gridded multivariate climate dataset. Scientific Data 2020 7:1, 7(1), 1–18. https://doi.org/10.1038/s41597-020-0453-3

MARTONNE, E.; 1926. L'indice d'aridité. Bulletin de l'Association de Géographes Français, 3(9), 3–5. https://doi.org/10.3406/bagf.1926.6321

MITECO; 2025a. Mapa Forestal de España a escala 1:25.000 (MFE25). Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. Recuperado de:

https://www.miteco.gob.es/es/biodiversidad/temas/inventarios-nacionales/mapa-forestal-espana/mfe_25.html

MITECO; 2025b. Los melojares. Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. Recuperado de: https://www.miteco.gob.es/content/dam/miteco/es/biodiversidad/temas/inventarios-nacionales/qpyrenaica_tcm30-153896.pdf

MITECO; 2025c. Tercer Inventario Forestal Nacional (IFN3). Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. Recuperado de:

https://www.miteco.gob.es/es/biodiversidad/servicios/banco-datos-naturaleza/informacion-disponible/ifn3.html

MONTERO, G.; DEL RIO, M.; ROIG, S.; ROJO, A., 2008. Selvicultura de Pinus sylvestris L. En: Compendio de Selvicultura Aplicada en España, Fundación Conde del Valle de Salazar. Madrid, Spain. pp, 503-534.

PRETZSCH, H.; STECKEL, M.; HEYM, M.; BIBER, P.; AMMER, C.; EHBRECHT, M.; ... DEL RIO, M.; 2020. Stand growth and structure of mixed-species and monospecific stands of Scots pine (Pinus sylvestris L.) and oak (Q. robur L., Quercus petraea (M att.) L iebl.) analysed along a productivity gradient through Europe. *European Journal of Forest Research*, 139, 349-367.

RIOFRÍO, J.; DEL RIO, M.; ALDEA, J.; Bravo, F.; 2017. Relaciones de complementariedad en masa mixtas de pinos mediterráneos: un análisis de los patrones de incremento radial intra-annual. In 7th Spanish Forestry Congress. Plasencia-Spain.

RODRÍGUEZ DE PRADO, D.; SAN MARTÍN, R.; BRAVO, F.; DE AZA, C. H.; 2020. Potential climatic influence on maximum stand carrying capacity for 15 Mediterranean coniferous and broadleaf species. *Forest Ecology and Management*, 460, 117824. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.117824

RODRÍGUEZ DE PRADO, D.; RIOFRÍO, J.; ALDEA, J.; BRAVO, F.; HERRERO DE AZA, C.; 2022a. Competition and climate influence in the basal area increment models for Mediterranean mixed forests. In *Forest Ecology and Management* (Vol. 506). https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.119955

RODRÍGUEZ DE PRADO, D.; 2022. New insights in the modeling and simulation of tree and stand level variables in Mediterranean mixed forests in the present context of climate change [Universidad de Valladolid]. https://uvadoc.uva.es/bitstream/handle/10324/55195/TESIS-2015-220907pdf.pdf?sequence=1

RODRÍGUEZ DE PRADO, D.; RIOFRÍO, J.; ALDEA, J.; MCDERMOTT, J.; BRAVO, F.; HERRERO DE AZA, C.; 2022b. Species Mixing Proportion and Aridity Influence in the Height–Diameter Relationship for Different Species Mixtures in Mediterranean Forests. In *Forests* (Vol. 13, Issue 1). https://doi.org/10.3390/f13010119

RODRÍGUEZ DE PRADO, D.; VÁZQUEZ VELOSO, A.; QUIAN, Y. F.; RUANO, I.; BRAVO, F.; HERRERO DE AZA, C.; 2023. Can mixed forests sequester more CO2 than pure forests in future climate scenarios? A case study of Pinus sylvestris combinations in Spain. In *European Journal of Forest Research* (Vol. 142, Issue 1, pp. 91–105). https://doi.org/10.1007/s10342-022-01507-y

STERBA, H.; DEL RIO, M.; BRUNNER, A.; & CONDES, S.; 2014. Effect of species proportion definition on the evaluation of growth in pure vs. mixed stands. Instituto de Ciencias Forestales (ICIFOR).

SUSSE, R.; ALLEGRINI, C.; MORGAN, P.; 2011. Management of irregular forests: Developing the full potential of the forest. Besancon, France: Association Futaie Irreguliere.