



Universidad Pública de Navarra  
Nafarroako Unibertsitate Publikoa

**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA AGRONÓMICA Y  
BIOCIENCIAS**

***NEKAZARITZA INGENIARITZAKO ETA BIOZIENTZIETAKO GOI  
MAILAKO ESKOLA TEKNIKOA***

**Estimación del crecimiento de los bosques del  
Pirineo navarro bajo el cambio climático**

*PRESENTADO POR AITOR AYAPE RODRÍGUEZ*

*DIRIGIDO POR JUAN ANTONIO BLANCO VACA*

**GRADO EN CIENCIAS  
GRADUA ZIENTZIETAN**

Mayo, 2023



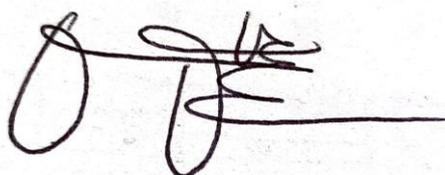
# upna

Universidad Pública de Navarra  
Nafarroako Unibertsitate Publikoa

EL SIGUIENTE TRABAJO DE FIN DE GRADO PARA OPTAR AL  
TÍTULO DE GRADUADO EN CIENCIAS ESTÁ PRESENTADO POR  
AITOR AYAPE RODRÍGUEZ Y HA SIDO DIRIGIDO POR JUAN  
ANTONIO BLANCO VACA.

Juan Antonio Blanco Vaca

Aitor Ayape Rodríguez

A handwritten signature in black ink, appearing to be 'Aitor Ayape Rodríguez', written in a cursive style.

*Una selección de los resultados generados en este trabajo de fin de grado ha sido aceptada para su presentación en la European Conference on Ecological Modelling (ECEM 2023).*

**La referencia de este trabajo es: Ayape A., Blanco J.A. (2023) Expected enhanced growth in Pyrenean forests under climate change. Poster presented at: European Conference on Ecological Modelling (ECEM 2023), September 4-8, Leipzig (Germany).**

# Resumen

En las próximas décadas el cambio climático podría tener un impacto en los ecosistemas forestales de montaña, especialmente en aquellos que están en zonas de transición entre clima mediterráneo y continental como los que encontramos en el Pirineo navarro. Para estudiar el efecto del cambio climático en estos bosques se utilizaron parcelas de estudio en las localidades de Aspurz (clima mediterráneo fresco, 650msnm) y Garde (clima continental fresco, 1350msnm) para tomar los datos de calibración del modelo FORECAST Climate, que se usó para simular el efecto de dos niveles de cambio climático y en un escenario control sin cambio climático.

Para crear los escenarios de simulación RCP 4.5 y RCP 8.5 se tomaron las previsiones del Observatorio Pirenaico del Cambio Climático (OPCC). Cabe destacar que este observatorio no prevé disminución en las precipitaciones. Para la concentración de CO<sub>2</sub> se tomaron las previsiones del quinto informe del IPCC. En cuanto al tipo de bosque, en cada caso se simularon pinares y hayedos puros y bosques mixtos al 50%:50% (comparando el *stock* máximo de ambas especies).

Nuestros resultados indican que a excepción de los pinos en el sitio de Aspurz, se espera que todos los bosques tengan una mayor producción de biomasa de tronco a mayor cambio climático. El principal motivo sería que un aumento de las temperaturas en ausencia de aumento de la sequía alargaría el periodo de crecimiento. En particular, en el sitio continental (Garde), el aumento de las temperaturas eliminaría el frío como factor limitante del crecimiento, especialmente en otoño. Además, el aumento en la concentración de CO<sub>2</sub> tendría un efecto fertilizante y optimizaría el uso del agua al reducir la apertura estomática. En el caso del sitio continental (Garde) se observa que el bosque mixto es más productivo que los puros, cosa que no ocurre en el mediterráneo (Aspurz). Por otro lado, vemos que en todos los casos el cambio climático provoca una menor acumulación de humus en el suelo, lo que se debería a que el aumento de la tasa de descomposición asociado al aumento de temperaturas supera el aumento en la producción de humus ligado al mayor crecimiento de los árboles. Esta mayor descomposición tendría también efectos fertilizantes en el bosque.

Como conclusión, un aumento de las temperaturas y la concentración de CO<sub>2</sub> sin aumento de la sequía (como está previsto para el Pirineo) podría aumentar la productividad de algunos bosques, sobre todo en sitios fríos (normalmente más altos).

## *Abstract*

*In the coming decades climate change could particularly impact mountain forest ecosystems, especially those in the transition between Mediterranean and continental climates, such as those found in the Southwestern Pyrenees. To study the effect of climate change in these forests, long-term study plots in a cool Mediterranean forest (near Aspurz town, 650 masl) and cool continental climate (near Garde town, 1350 masl) were taken as data sources to calibrate the FORECAST Climate model. This model was used to simulate the effect of two levels of climate change, compared to a control scenario without climate change.*

*To create the RCP 4.5 and RCP 8.5 simulation scenarios we used the forecasts by the Pyrenean Climate Change Observatory (OPCC), recently made available for the mountain chain after an inter-regional effort to homogenize observations and downscaling methods. It is noteworthy that for the Pyrenean region, no significant decrease in rainfall is expected. For CO<sub>2</sub> concentrations, the forecasts of the IPCC's fifth report were taken. Regarding the type of forest, in each case three different stand compositions were simulated: pure Scots pine stands, pure European beech stands and a 50%:50% mixture of both species (compared to maximum stocking levels of each species).*

*Our results indicate that, except pine stands in the Mediterranean site, all stand types are expected to have a higher stem biomass production with greater climate change. The main reason is that increased temperatures without increased drought would lengthen the growth period. In particular, in the continental site, the increased temperatures would eliminate cold as a limiting factor for growth, particularly in autumn. In addition, the increase in CO<sub>2</sub> concentrations would have a fertilizing effect, allowing trees to optimize water use by reducing the stomatal opening. In the case of the continental stands, mixed forests could be more productive than the pure ones, something that would not happen at the Mediterranean site. On the other hand, in all cases climate change would cause a reduction in organic matter accumulation in the soil, as the increase in decomposition rates associated with increased temperatures exceeds the increased litterfall inputs due to increased tree growth. This increased organic matter decomposition would also have a fertilizing effect on trees, further increasing stand growth.*

*As a conclusion, an increase in temperatures and CO<sub>2</sub> concentration without an increase in drought (as predicted for the Pyrenees) could increase the productivity of some forests, especially in cold (usually higher) sites.*

## Laburpena

Hurrengo hamarkadetan aldaketa klimatikoak talka bat suposatu lezake mendiko baso ekosistemetan, bereziki klima mediterranean eta kontinentalaren arteko muga zonaldeetan dauden haietan, nafar Pirinioan dauden bezalakoetan. Aldaketa klimatikoaren eragina baso hauetan ikertzeko, Aspuzen (klima mediterranean freskoa, 650 metro itsas mailatik gora) eta Garden (klima kontinental freskoa, 1350 metro itsas mailatik gora) kokatutako lursailak erabili izan ditugu FORECAST Climate modelo kalibratzeko datuak hartzeko. Modelo honekin, bi aldaketa klimatiko maila eta aldaketa klimatikorik gabeko egoera kontrol bat simulatu egin dira.

RCP 4.5 eta RCP 8.5 egoerak simulatzeko, Aldaketa Klimatikoaren Pirinioetako Behatokia (OPCC) egindako aurreikuspenak erabili ditugu. Aipagarria da, behatoki honek ez dituela beherapenik aurreikusten prezipitazioetan. CO<sub>2</sub> kontzentrazioentzat, IPCCaren bostgarren txostenaren aurreikuspenak erabili ditugu. Baso motari dagokionez, egoera bakoitzean pinudi puruak, pagadi puruak eta baso mistoak (%50an espezie bakoitzaren stock maximoa alderatuta) simulatu ditugu.

Gure emaitzek diotenez, leku mediterraneanreko (Aspuz) pinuak izan ezik, beste baso guztietan enbor biomasa produkzioaren hazkundera espero da aldaketa klimatiko handitu ahala. Honetarako arrazoi nagusia, tenperaturen hazkundera, prezipitazioen murrizketarik gabe, hazkundera garaiaren luzapena eragintzen duela izango lirateke. Berezi leku kontinentalean (Garde), tenperaturen hazkundera hotza deuseztatuko luke hazkunderaren faktore mugatzaile bezala, udazkenean batez ere. Gainera, CO<sub>2</sub> kontzentrazioaren hazkundera ongarri efektua izango luke eta uraren erabilera hobetuko luke irekiera estomatikoa murriztuz. Leku kontinentalaren kasuan (Garde), ikus dezakegu baso mistoa puruak baino produktiboagoa dela, leku mediterraneanrean (Aspuz) ez bezala. Beste aldetik, ikusten dugu kasu guztietan aldaketa klimatikoak lurrean humus gutxiago metatzea eragiten duela. Hortaz, deskonposaketa tasan gertatutako hazkundera, humus produkzioan gertatutakoa baino handiagoa izango zen. Deskonposaketa gehiago egoteak, ongarri efektua izango luke basoan.

Ondorio bezala, tenperaturen eta CO<sub>2</sub> kontzentrazioaren hazkundera, lehortearen hazkunderik gabe (Pirinioan aurreikusita dagoen moduan) baso batzuen produkzio handitu lezake, bereziki leku hotzetan (normalean leku altuak direnak).

# Índice

1. Introducción.....	9
2. Objetivos.....	12
3. Materiales y Métodos	
3.1. Áreas de estudio.....	13
3.2. El modelo FORECAST Climate.....	13
3.3. Archivos de calibración e inicialización.....	15
3.4. Datos climáticos de calibración.....	15
3.5. Escenarios de simulación.....	17
3.6. Datos climáticos para las simulaciones.....	17
3.6.1. Precipitación total.....	18
3.6.2. Concentración de CO <sub>2</sub> .....	18
3.6.3. Temperaturas.....	19
3.7. Archivos de manejo.....	20
3.8. Variables utilizadas para la comparación de escenarios...20	
4. Resultados	
4.1. Biomasa de tronco.....	22
4.2. Densidad de árboles vivos.....	25
4.3. Masa de humus.....	28
4.4. Nitrógeno fotosintético.....	31
5. Discusión	
5.1. Biomasa de tronco.....	35
5.2. Densidad de árboles vivos.....	37
5.3. Masa de humus.....	39
5.4. Nitrógeno fotosintético.....	41
5.5. Observaciones sobre los métodos numéricos del modelo y limitaciones del trabajo.....	41
6. Conclusiones.....	43
7. Bibliografía.....	45

# 1. Introducción

El quinto informe del IPCC confirmaba ya en 2014 que el cambio climático que estamos viviendo es tal y que no ha tenido precedentes en los últimos milenios. Se ha observado un aumento en las temperaturas de la atmósfera y los océanos, un descenso en la cantidad de nieve y hielo acumulados, y un aumento del nivel del mar y de la concentración de gases de efecto invernadero (IPCC, 2014).

A la vista del cambio climático que estamos sufriendo, y que cada vez resulta más evidente, desde el ámbito de la ecología forestal cabe preguntarse qué cambios están sufriendo nuestros bosques por efecto del calentamiento global y cómo se espera que evolucionen estos cambios en el futuro.

A pesar de que ya se han realizado algunos estudios en esta línea en otras partes de Europa, hemos considerado necesario realizar un trabajo que se centre en el Pirineo navarro y que aborde los efectos del cambio climático en diferentes tipos de bosque y en diferentes climas.

Si bien nuestro planeta ha experimentado otros cambios climáticos en el pasado, el ritmo de aumento de la temperatura durante el siglo XX supera a la de las transiciones entre periodos glaciares e interglaciares del Holoceno. Entre el año 1949 y el 2010, la temperatura media de los Pirineos ha sufrido un aumento de 0.2°C por década, si bien este aumento no ha sido monótono ni siempre al mismo ritmo. Este aumento ha sido más notorio en los meses de verano y no se han observado grandes diferencias entre la vertiente norte y la sur de dicha cordillera. (OPCC, 2018).

En cuanto a las precipitaciones, en los Pirineos se ha observado un descenso del orden de 2.5% por década en el periodo 1949-2010, siendo este descenso algo mayor en la vertiente sur que en la norte. De la misma manera, también se ha observado un descenso importante en el grosor del manto de nieve (OPCC, 2018).

A futuro, se espera que el cambio climático produzca un aumento tanto de las temperaturas mínimas como de las máximas, siendo este aumento más intenso en las zonas montañosas como las que son objeto de nuestro estudio. En cuanto a las precipitaciones, los modelos no arrojan hasta la fecha resultados significativos sobre su evolución en los Pirineos. Sí que se espera un importante descenso en el espesor del manto de nieve y en el periodo que se espera que esta permanezca cubriendo el suelo (OPCC, 2018).

Este cambio en el clima tendría, según el Observatorio Pirenaico del Cambio (en adelante OPCC), algunos efectos sobre las plantas. Por ejemplo, la menor cobertura de nieve las haría más sensibles a las temperaturas extremas por reducirse el efecto aislante de la nieve, se adelantaría el periodo de aparición de los primeros brotes, se alargaría el periodo de crecimiento y podría darse un cambio en el tipo de especies que viven en estos ecosistemas, sustituyéndose las actuales especies adaptadas al frío por otras más resistentes al calor (OPCC, 2018).

En lo que respecta a los bosques, según el OPCC el aumento de las temperaturas y de la concentración de CO<sub>2</sub> tendría un efecto fertilizante sobre los árboles. Que esta

fertilización se traduzca o no en un mayor crecimiento de los árboles dependería de la disponibilidad hídrica. Así, en las zonas donde el agua sea suficiente se espera un aumento en la productividad, mientras que en aquellas donde el cambio climático provoque un mayor estrés hídrico esta podría verse reducida. Si la productividad de los bosques disminuye, también lo haría su capacidad de secuestrar carbono. (OPCC, 2018)

Otra de las incógnitas que surge es si unos tipos de bosque serán más sensibles al efecto del cambio climático que otros. En esta línea, en los últimos años ha tomado fuerza la hipótesis de que los bosques mixtos podrían ser más productivos y resilientes ante los cambios ambientales que los bosques puros, ya que cuando las condiciones no fuesen óptimas para una especie lo serían para la otra y viceversa. A este fenómeno se le ha llamado crecimiento aditivo (Grosse, 2009).

Los bosques mixtos tienen además algunas ventajas estructurales. Por ejemplo, se ha visto que en estos bosques se reduce la velocidad del viento, aportando mejores condiciones para el crecimiento. Además, la presencia de más de una especie conlleva una entrada más heterogénea de la luz, lo que beneficia la regeneración de diferentes especies (Grosse, 2009). En cuanto a la relación con la humedad y el suelo, se ha observado que los bosques mixtos acumulan más humedad y son más eficientes en la utilización del agua del suelo (Gong et al., 2022). En este trabajo, se toman como objeto de estudio bosques de pino (*Pinus sylvestris*) y haya (*Fagus sylvatica*) puros y bosques mixtos de ambas especies.

Por otro lado, resulta interesante saber si el tipo de clima en el que crece el bosque es determinante en lo que a la respuesta al cambio climático se refiere. Como veremos, el efecto será diferente dependiendo de si el factor limitante es el frío o el estrés hídrico. Así, tomamos bosques de un sitio mediterráneo fresco y de uno continental fresco. Nos fijaremos también si el supuesto efecto beneficioso de los bosques mixtos se observa independientemente del tipo de clima o si por el contrario depende de este.

A pesar de los estudios realizados, aún existe gran incertidumbre sobre los efectos que puede tener el cambio climático en los ecosistemas forestales, y más aún en ecosistemas tan particulares como son los de montaña. Existen algunos trabajos que prevén un aumento bajo ciertas condiciones (Blanco & Bosco Imbert, 2015.; Briceño-Elizondo et al., 2006), otros que afirman que se producirá un descenso (Martínez Del Castillo et al., 2022; Rötzer et al., 2013) y algunos que plantean diferentes escenarios dependiendo del tipo de sitio (Candel-Perez et al., 2017).

Una buena herramienta para prever dichos efectos son los modelos forestales, que con una buena calibración y habiendo sido validados, nos permiten estimar la evolución de los ecosistemas en diferentes escenarios.

En este trabajo tomamos la calibración y la validación hechas en los sucesivos trabajos del grupo de Ecología y Medio Ambiente de la Universidad Pública de Navarra y pasamos directamente a simular dos escenarios de cambio climático y un caso de control sin cambio climático los dos sitios del Pirineo navarro (Aspurz y Garde) en los que el citado grupo tiene las parcelas de estudio.

El pino silvestre (*Pinus sylvestris*) es una de las especies más importantes del Pirineo navarro por su distribución e importancia en la explotación económica de los bosques. En

navarra esta especie está localizada en el noroeste siendo la vegetación dominante en aquellas áreas con clima continental y suelos poco profundos donde las especies caducifolias no prosperan. Desde los años 60, el abandono de tierras agrícolas, el cambio climático y los nuevos modelos de gestión forestal están influyendo en la presencia del pino silvestre (Gárate & Blanco, 2013). Es un árbol monoico y perennifolio que puede llegar a los 30 metros de altura. Para crecer, necesita estar expuesto al sol (Aspurz Tabar, 2015).

El haya (*Fagus sylvatica*) por su parte es una especie muy presente en el norte de España, formando grandes masas también en Navarra, situándose en las partes altas y al norte de la provincia. Se trata de una especie bien adaptada al clima de montaña atlántico ya que precisa de una gran disponibilidad de agua y tolera bien tanto el calor como el frío. Su altitud óptima se encuentra así entre los 1000 y los 1700 metros sobre el nivel del mar. Es un árbol monoico y caducifolio que alcanza los 35 o 40 metros de altura cuando crece junto a otros, abriéndose mucho antes si crece aislado. Al contrario que los pinos, las hayas crecen bien a la sombra y no soportan el pleno sol (Aspurz Tabar, 2015).

Así, se suele decir que los pinos son árboles pioneros, en el sentido de que gracias a su tolerancia al pleno sol son los más adecuados para crecer en un sitio en el que no hay un bosque previo. Las hayas por su parte, llegarían después para crecer a la sombra de estos. A largo plazo, las hayas podrían dominar sobre los pinos dado que les harían sombra y no les permitirían crecer.

## 2. Objetivos

El principal objetivo de este trabajo es predecir, utilizando el modelo FORECAST Climate, el efecto del cambio climático sobre los bosques del Pirineo navarro. Para ello se tomaron dos escenarios con diferente grado de cambio climático y se compararon los resultados de estas simulaciones con un escenario control sin cambio climático.

Además de comparar el crecimiento con diferentes escenarios de cambio climático, se comparó el efecto del mismo entre un sitio con clima mediterráneo (Aspurz) y uno con clima continental (Garde) y en cada sitio se simularon pinares puros, hayedos puros y bosques mixtos.

De esta manera, se pretende observar si unos bosques son más sensibles al cambio climático que otros y aceptar o rechazar la hipótesis de que los bosques mixtos son menos sensibles al cambio climático que los puros. Se pretende también estudiar si esta hipótesis es igualmente válida independientemente del tipo de clima o depende de este.

Para medir la sensibilidad al cambio climático se han tomado como variables la biomasa de tronco y la densidad de árboles vivos, para poder estudiar así tanto la supervivencia de los árboles como su productividad y la relación entre ambas. Se espera que esta información pueda resultar de utilidad para la gestión forestal en las próximas décadas.

Para poder explicar los cambios que vemos en las dos primeras variables se utilizaron la masa de humus y el nitrógeno fotosintético, ya que se pretende poder relacionar el crecimiento de los árboles con los cambios en el suelo y en sus hojas. La primera de estas variables, además, nos ayuda a comprender como afecta el cambio climático a los procesos que se dan en el suelo.

## 3. Materiales y Métodos

### 3.1. Áreas de estudio

Como modelo se utilizaron dos zonas de las localidades de Aspuz y Garde, ambas en el Pirineo navarro. Estas zonas están regeneradas de manera natural hace unos 30 años y desde 1999 se utilizan por el Servicio de Montes del Gobierno de Navarra y por el grupo de Ecología y Medio Ambiente de la Universidad Pública de Navarra como zona de estudio.

El sitio de Aspuz tiene un clima mediterráneo fresco, 650 m de altitud, un 10% de pendiente media y orientación Norte, mientras que el de Garde posee un clima continental fresco, está situado a 1350 msnm, tiene una pendiente media del 45% y orientación Noroeste (Gárate & Blanco, 2013).

Más información sobre los sitios de estudio puede encontrarse en (Blanco, 2005.; González de Andrés et al., 2019).

### 3.2. El modelo FORECAST Climate

FORECAST Climate es un modelo de crecimiento forestal que hace previsiones a nivel de rodal y que es una extensión del modelo FORECAST. La diferencia entre el modelo original y la versión utilizada en este trabajo está en que esta última incluye el efecto de la humedad y la temperatura en los procesos del ecosistema (Seely et al., 2015).

FORECAST es un modelo no espacial (Gárate & Blanco, 2013) y de estructura mixta. Esto significa que tiene una parte mecanicista en la que simula algunos de los procesos que se dan en el bosque, pero también tiene una parte estadística que se utiliza para calibrar los parámetros que rigen dichos mecanismos.

En la medida en que FORECAST es un modelo híbrido, precisa de datos históricos para la calibración de los parámetros. Con estos parámetros el modelo simula los diferentes procesos del ecosistema para calcular el crecimiento en cada año. Tenemos pues que el paso temporal es fijo y siempre de un año.

Además de los archivos de calibración, se requieren archivos de manejo en los que se especifica el nacimiento de árboles y plantas, así como una serie de eventos que podemos incluir relacionados con la gestión forestal, incendios, etc. Finalmente, antes de iniciar las simulaciones debemos incluir un archivo de inicialización que defina las condiciones iniciales de simulación.

En el siguiente diagrama de flujo (Figura 1) se describe esquemáticamente el funcionamiento del modelo base, incluyendo los archivos de datos, las secciones del algoritmo y los archivos de salida de cada ejecución.

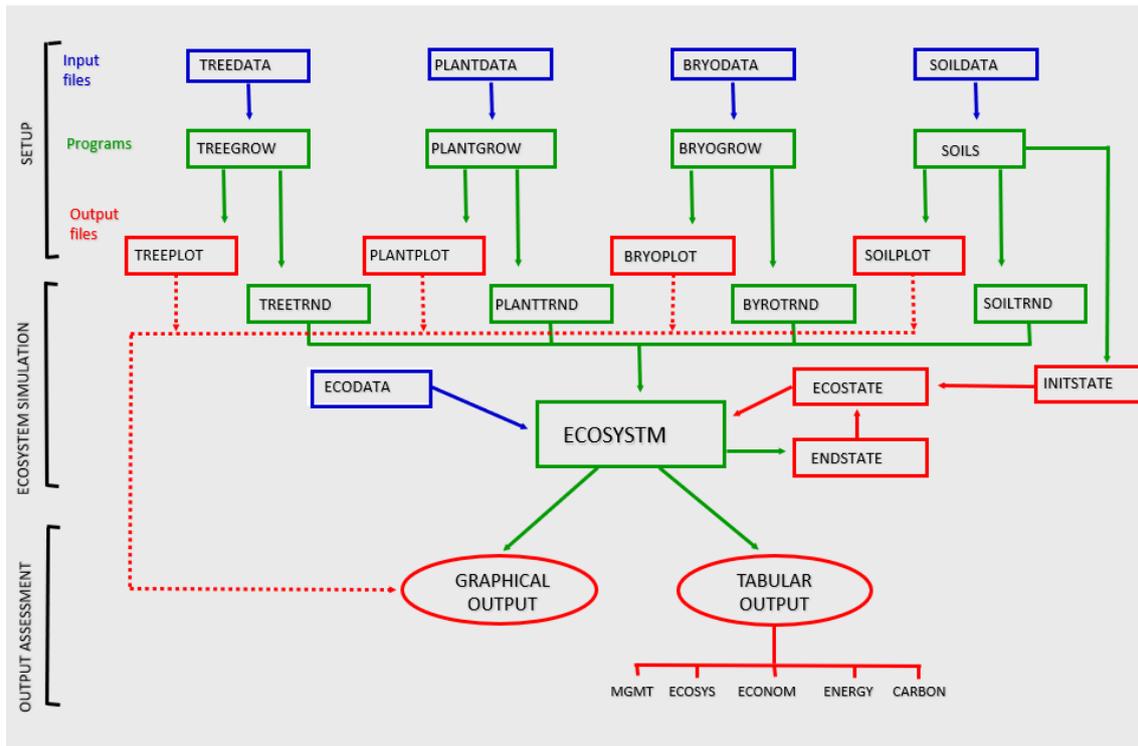


Figura 1: Estructura básica del modelo FORECAST. (Fuente: Blanco, 2013)

Para pasar del modelo original FORECAST al FORECAST Climate se utilizó el modelo ForWaDy. Dado que este modelo arroja resultados diarios, se unen los modelos calculando un índice anual que FORECAST utiliza para estimar como el clima a limitado el crecimiento en cada año (Seely et al., 2015). Para esta parte del modelo, por tanto, también son necesarios unos datos de calibración que relacionen el crecimiento con el clima pasados y unos archivos de simulación con el tipo de clima cuyos efectos queremos predecir. En las figuras 2 y 3 se resume el funcionamiento del modelo ForWaDy y el modo en que este se enlaza con el modelo FORECAST, formando así el modelo FORECAST-Climat.

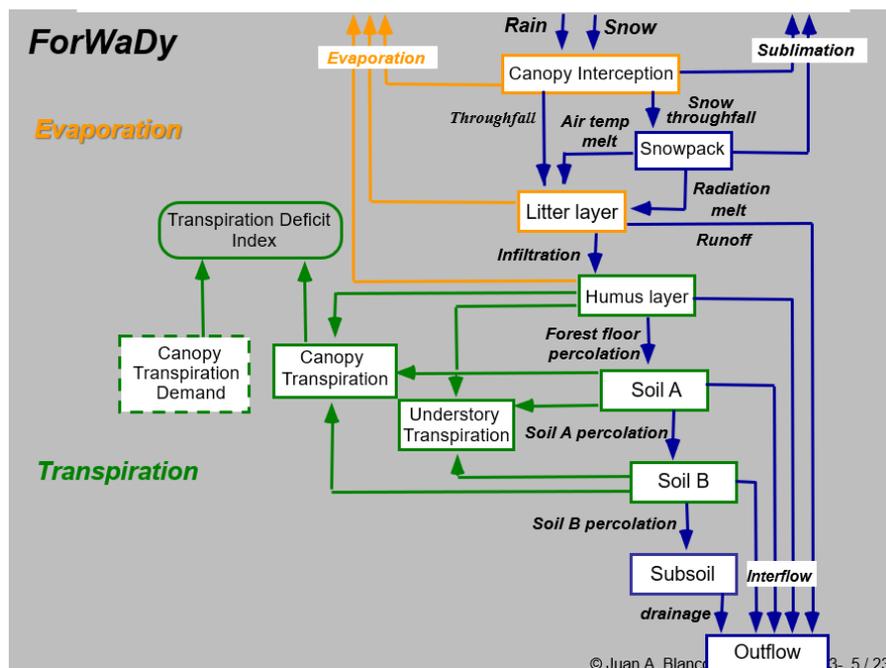


Figura 2: Estructura básica del modelo ForWaDy. (Fuente: Blanco, 2013)

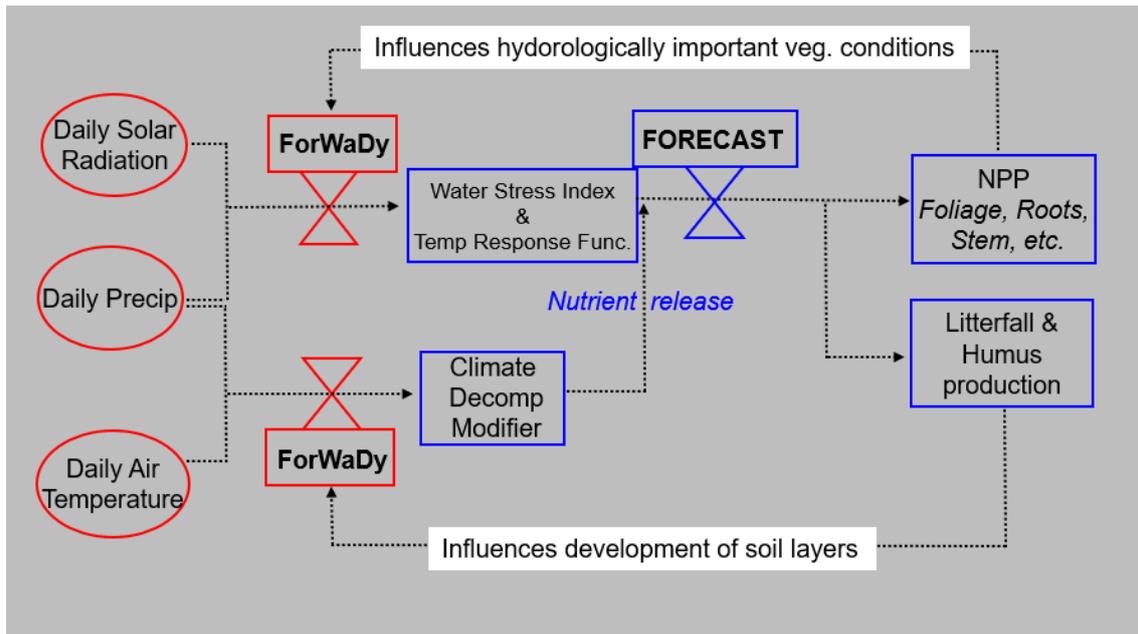


Figura 3: Unión de los modelos FORECAST y ForWaDy para formar FORECAST-Climate. (Fuente: Blanco, 2013)

Para más información sobre este modelo consultar (Kimmins, 1993; Kimmins et al., 1999; Seely et al., 2015).

### 3.3. Archivos de calibración e inicialización

Los archivos de calibración utilizados son una versión actualizada de los utilizados por (González de Andrés et al., 2019). Estos datos se obtuvieron en parte de medidas realizadas en el campo y en parte de la bibliografía.

Para los archivos de inicialización se tomaron los de (González de Andrés et al., 2017). Estos archivos se crean repitiendo una y otra vez ciclos de simulación en el que estado final de una simulación se usa como estado inicial de la siguiente hasta llegar al estado deseado. Así se consigue comenzar las simulaciones del estudio con una cantidad de humus acorde a la realidad, haciendo que el modelo simule un bosque cuya cantidad de materia orgánica en el suelo se ha estabilizado con el paso del tiempo y que, por lo tanto, tiene la capacidad de producción que deseamos simular.

### 3.4. Datos climáticos para la calibración

Para la obtención de datos climáticos para los dos sitios de simulación se recurrió a la base de datos del Gobierno de Navarra (Meteorología y Climatología de Navarra, 2022) Para el sitio de Aspuz se tomaron datos de la estación meteorológica de Navascués, mientras que para el caso de Garde se emplearon datos de la estación de Urzainqui. Ambas son estaciones manuales.

De cada sitio se descargaron datos diarios desde 1991 hasta 2020 de temperatura máxima y mínima y de precipitación acumulada. Dado que los datos ausentes en ambas

series eran muy pocos, y nunca había más de tres datos ausentes seguidos, se optó por interpolar linealmente los datos ausentes. Esta técnica de interpolación tiene la ventaja de ser sencilla y consiste en unir los datos conocidos mediante rectas y tomar los datos ausentes sobre esta recta (Higueras, 2021c).

En el caso de la estación de Navascués, entre las tres variables había 13 datos ausentes de los 32874 totales (0,04%) de los cuales 6 correspondían al año 2016 y 7 al 2019. Para la estación de Urzainqui había 11 datos ausentes (0,03%), todos en 2016.

Para el caso del sitio de Garde, dado que existe una diferencia de altitud considerable entre el sitio en cuestión y la estación meteorológica de Urzainqui, se transformaron los datos usando el modelo MTCLIM-XL\_0.4 que, introduciendo los datos climáticos de la base, nos dará una estimación de los correspondientes al sitio en altura. Este modelo fue presentado en 1987 (Running et al., 1987) y ha sido validado por (Author et al., 1994; Lo et al., 2011).

Además de los datos climáticos que descargamos para la base, el modelo requiere de los siguientes datos adicionales: Altitud sobre el nivel del mar del sitio (1335m) y de la base (722m), latitud del sitio (42°48'50") y de la base (42°49'46"), isoyeta del sitio (1346mm de media en el periodo 1980-2017) y de la base (1217mm de media en el periodo 1990-2021), inclinación del sitio (40%), orientación del sitio (NW, 315°), horizontes este y oeste (0 por defecto), gradientes de temperatura adiabáticos para la temperatura máxima (-5.7°C/km) y la mínima (-3°C/km por defecto) y el número de días cuyos datos queremos transformar (10958).

Dada esta información, el modelo transforma cada valor de temperatura máxima y temperatura mínima con las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned} T_{m\acute{a}x,sitio} &= T_{m\acute{a}x,base} + \Delta Altitud \times T_{m\acute{a}x,gradiente\ adiab\acute{a}tico} \\ T_{m\acute{i}n,sitio} &= T_{m\acute{i}n,base} + \Delta Altitud \times T_{m\acute{i}n,gradiente\ adiab\acute{a}tico} \end{aligned}$$

donde  $T_{gradiente\ adiab\acute{a}tico}$  es el correspondiente gradiente de temperatura adiabático para cada caso. Para la precipitación estimada, la fórmula es:

$$P_{sitio} = P_{base} \times \frac{Isoyeta\ sitio}{Isoyeta\ base}$$

Una vez que hemos hecho esta transformación y tenemos los datos de temperaturas máxima, mínima y precipitación acumulada para ambos sitios, pasamos a completar los datos restantes. En primer lugar, para las concentraciones de CO<sub>2</sub>, tomamos las medias anuales de los valores globales que proporciona el Global Monitoring Laboratory (Trends in Atmospheric Carbon Dioxide, 2022). Para el cálculo de la temperatura media de cada día a partir de la máxima y de la mínima, tomamos la ecuación que usa el modelo MTCLIM-XL\_0.4 (Author et al., 1994), que dice que:

$$T_{media} = 0.45 \times (T_{m\acute{a}x} - T_{media\ aritm\acute{e}tica}) + T_{media\ aritm\acute{e}tica}$$

donde  $T_{media\ aritm\acute{e}tica}$  es la media aritmética de  $T_{m\acute{a}x}$  y  $T_{m\acute{i}n}$ . Así, expresado en función de estos dos valores conocidos, la ecuación queda como:

$$T_{media} = 0.725T_{m\acute{a}x} + 0.275T_{m\acute{i}n}$$

Finalmente, para la fracción de la precipitación que cae en forma de nieve, tomamos 1 si la temperatura media previamente estimada es menor o igual a 0°C y 0 si es mayor. Asumimos en este paso que el punto de fusión del agua a las altitudes de los sitios es igual al del nivel del mar, es decir, 0°C.

Una vez creados los archivos con los datos climáticos de calibración, calibramos con estos archivos el modelo FORECAST Climate. En este proceso el modelo relaciona los datos climáticos con los datos de crecimiento, flujos de nutrientes y el resto de procesos del ecosistema, de tal manera que cuando hagamos simulaciones con otros escenarios climáticos, el modelo ajustará correspondientemente las tasas de crecimiento, descomposición, etc. Calibramos primero la descomposición, después los tres tipos de plantas y finalmente las dos especies de árboles, de tal manera que estos últimos, que son los que en la práctica nos interesan, hayan sido calibrados teniendo en cuenta el resto.

### 3.5. Escenarios de simulación

Se han tomado dos factores a la hora de diseñar las simulaciones. Por un lado, el escenario climático y por otro, el tipo de bosque.

En cuanto al escenario climático, tomamos un caso de ausencia de cambio climático que usamos como control y dos de los escenarios RCP que plantea el quinto informe del IPCC, concretamente el RCP4.5 y el RCP8.5. “Las cuatro trayectorias RCP comprenden un escenario en el que los esfuerzos en mitigación conducen a un nivel de forzamiento muy bajo (RCP2.6), dos escenarios de estabilización (RCP4.5 y RCP6.0) y un escenario con un nivel muy alto de emisiones de GEI (RCP8.5)” (Nuevos escenarios de emisión: RCPs, 2023). En nuestro caso hemos seleccionado dos de ellos para tener una idea de lo que ocurriría en un escenario extremo y en otro más moderado.

Para el tipo de bosque tomamos un escenario en el que solo tenemos pinos, otro solamente con hayas y un tercero de bosque mixto.

Con este diseño de las simulaciones pretendemos poder comparar, para cada tipo de bosque, la diferencia entre la ausencia (control) y la presencia de cambio climático, viendo así si alguno de los tipos de bosque resulta o no más resiliente.

### 3.6. Datos climáticos para las simulaciones

Dado que hemos usado el periodo comprendido entre 1991 y 2020 para la calibración, decidimos hacer las simulaciones entre los años 2021 y 2100. Si comenzásemos las simulaciones directamente en el año 2021, simularíamos árboles que nacen en este año, de modo que para simular árboles de edades similares a los presentes actualmente en las parcelas de Aspuz y Garde, comenzamos las ejecuciones desde 1961, de tal manera que tengamos una presimulación que nos permita llegar al año 2020 con árboles de 60 años de edad y simular los siguientes 80 años.

A continuación, pasamos a describir los datos de los archivos de simulación para las diferentes variables:

### 3.6.1. Precipitación total

Según el informe OPCC-2 (OPCC, 2018), “en cuanto a la evolución futura de las precipitaciones, no se han obtenido cambios significativos a lo largo del siglo XXI”. Por tanto, dado que para la precipitación no hay diferencias de un escenario a otro, para los tres escenarios climáticos optamos por repetir el periodo de 30 años que hemos usado para la calibración una y otra vez hasta completar los 140 años del archivo de simulación. Para cada uno de los sitios (Aspurz o Garde) se usan los datos del lugar.

### 3.6.2. Concentración de CO<sub>2</sub>

Para el periodo de 1979 a 2020 se tomaron las medias anuales que proporciona el Global Monitoring Laboratory (Trends in Atmospheric Carbon Dioxide, 2022). Para los años anteriores, se hizo una regresión lineal de las medias anuales del periodo mencionado y con la ecuación obtenida se extrapolaron las medias anuales del periodo 1961-1978 (Figura 4).

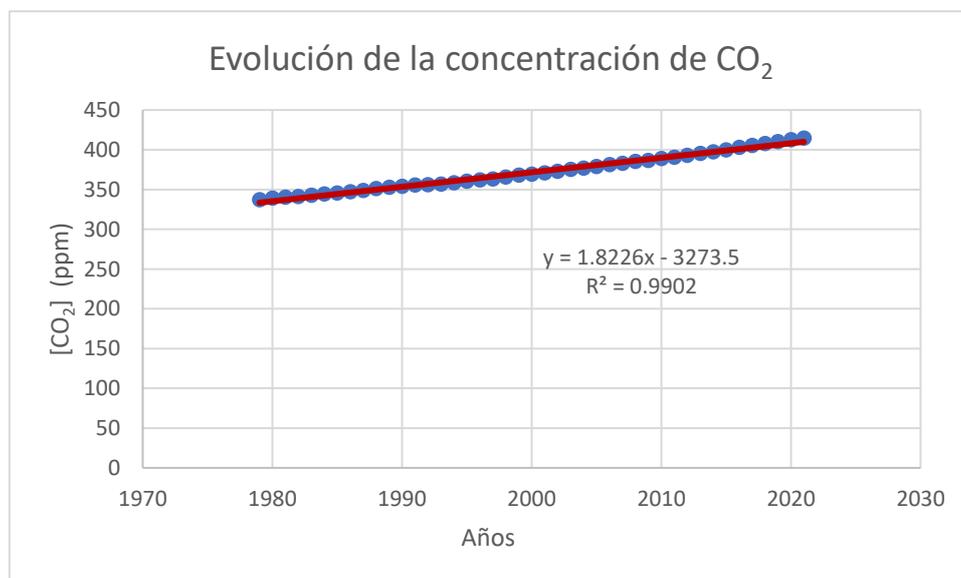


Figura 4: Evolución en la concentración de CO<sub>2</sub> entre los años 1979 y 2021 y regresión lineal hecha con los mismos valores.

Este periodo de 1961 a 2021 se simuló de la misma manera para los tres escenarios climáticos. A partir de este punto, para el escenario de ausencia de cambio climático se dejó constante la concentración del 2021 hasta final de siglo, mientras que para los otros dos escenarios tomamos como referencia las previsiones del quinto informe del IPCC (Nuevos escenarios de emisión: RCPs, 2023)

Para el escenario RCP4.5 la previsión es que la concentración aumente hasta las 538ppm en 2050 y después se estabilice, mientras que para el escenario RCP8.5 se espera que siga aumentando durante todo el siglo y llegue a las 936ppm en 2100. En ambos casos decidimos suponer que el aumento será lineal.

Así, para el escenario RCP4.5, partimos de las 414.71ppm del 2021 y vamos aumentando 4.25ppm por año hasta el 2050, año a partir del cual mantenemos la concentración constante. Para el escenario RCP8.5, partimos del mismo punto y vamos aumentando 6.60ppm por año hasta llegar al 2100.

### 3.6.3. Temperaturas

Para el periodo de presimulación (1961-2020), tomamos los 30 años de datos de calibración y los repetimos dos veces sin introducir variaciones adicionales. Si bien el informe del OPCC señala que ha habido un aumento en las temperaturas en estas últimas décadas, también afirma que este aumento no ha sido regular. “Entre 1949 y 2010 la temperatura media en los Pirineos ha experimentado un claro aumento, aunque el calentamiento no ha sido ni constante ni regular” (OPCC, 2018). Es por ello que decidimos no introducir cambios en este periodo.

Para el periodo de simulación (2021-2100), volvemos a diferenciar los tres escenarios. En el caso sin cambio climático, volvemos a repetir los 30 años de datos hasta completar el periodo.

En los dos escenarios RCP, repetimos una y otra vez los datos de calibración, pero en este caso le sumamos a los datos de cada año el valor que corresponda según las trayectorias marcadas por el OPCC. Para ello tomamos las medias de las horquillas que prevé el informe para los años 2030, 2050 y 2100 y suponemos que el aumento será lineal entre estos puntos, obteniendo los aumentos anuales que vemos en las siguientes tablas (Tablas 1 a 4).

*Tabla 1: Aumento de las temperaturas máximas desde 2010 para el escenario RCP4.5*

RCP4.5 Temperaturas máximas	
2050	2100
1.15°C	1.85°C
0.02875°C/año	0.014°C/año

*Tabla 2: Aumento de las temperaturas mínimas desde 2010 para el escenario RCP4.5*

RCP4.5 Temperaturas mínimas	
2050	2100
0.8°C	1.35°C
0.02°C/año	0.011°C/año

Tabla 3: Aumento de las temperaturas máximas desde 2010 para el escenario RCP8.5

RCP8.5 Temperaturas máximas		
2030	2050	2100
0.65°C	1.8°C	4.5°C
0.0325°C/año	0.0575°C/año	0.054°C/año

Tabla 4: Aumento de las temperaturas mínimas desde 2010 para el escenario RCP8.5

RCP8.5 Temperaturas mínimas		
2030	2050	2100
0.35°C	1.3°C	3.6°C
0.0175°C/año	0.0475°C/año	0.046°C/año

Cabe mencionar que dado que ya se ha dado un aumento de las temperaturas en el periodo en el que se tomaron los datos de calibración (1991-2020), cuando repetimos estos datos de forma consecutiva, estamos provocando un escalón en los datos por cada repetición del ciclo, que no se correspondería con la suavidad que se espera de la evolución real del clima y que provoca un artefacto cada vez que empieza un periodo de 30 años.

Una alternativa a este problema hubiese sido tomar el último año o una media de los últimos, pero en este caso deberíamos suponer que estos años han sido realmente representativos y no años anómalos. Dada la extensión de ese trabajo, hemos decidido dejar este escalón y suponer que parte de él pueda representar la variabilidad natural del planeta independiente del cambio climático.

### 3.7. Archivos de manejo

A la hora de crear los archivos de manejo para FORECAST Climate en los que especificamos los eventos que han de ocurrir durante la simulación, simplemente seleccionamos la opción de que el clima afecte tanto al crecimiento como a la descomposición, e indicamos que en el quinto año nazcan 5000 árboles (2500 de cada especie en el caso mixto), de tal manera que, en el año 60, que es cuando termina el periodo de presimulación, estos tengan 55 años, edad similar a la de la cohorte actual en Garde.

### 3.8. Variables utilizadas para la comparación de escenarios

Para comparar los efectos del cambio climático en los diferentes tipos de bosque usamos las siguientes 4 variables:

En primer lugar, la biomasa de tronco, para tener una idea del crecimiento de los árboles y de la productividad del bosque. En segundo lugar, la densidad de árboles vivos, para saber si los cambios en la primera variable se deben únicamente a que los árboles crecen más o menos o también a que su mortalidad se ve afectada. Esta variable nos permite además saber si se da una mortalidad muy alta en los primeros años o si esta es más progresiva.

Por otro lado, para saber los efectos sobre los procesos de descomposición, analizamos la evolución de la biomasa total de humus, para saber si este se produce y se descompone a mayor o menor velocidad en los diferentes escenarios.

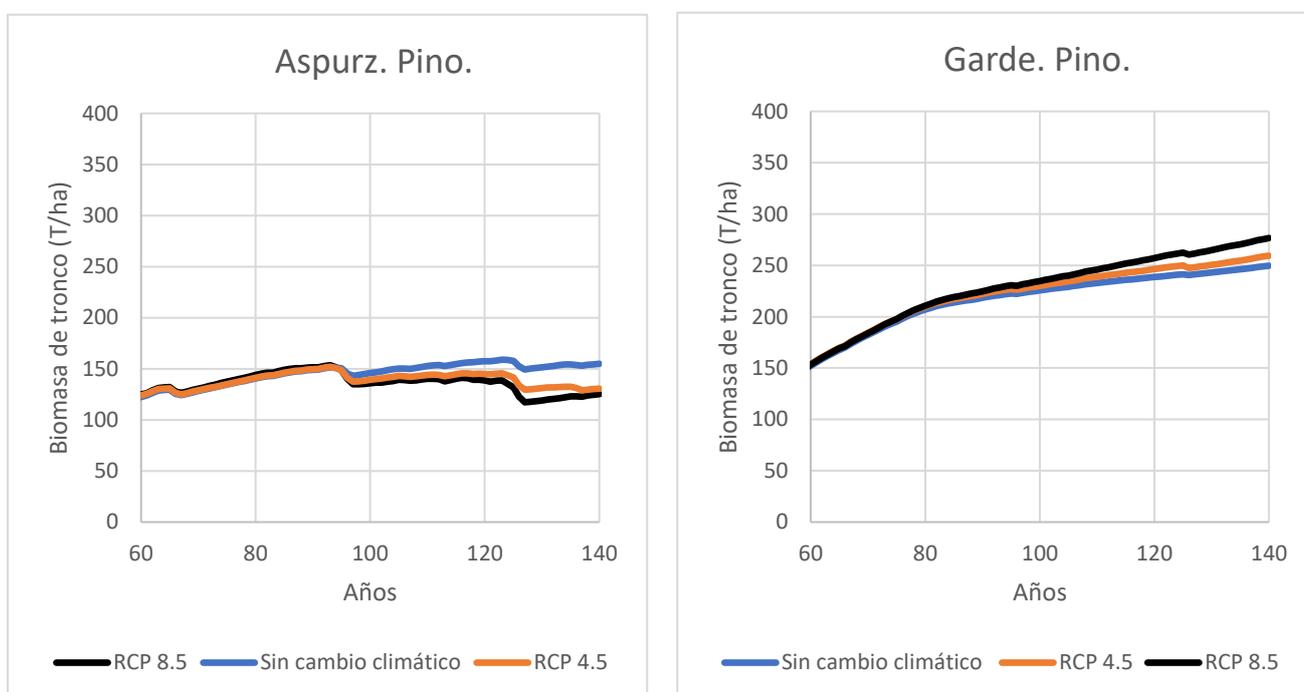
Finalmente, tomamos la cantidad de nitrógeno utilizado para la fotosíntesis por ser esta la variable central del modelo y la que determina el crecimiento de los árboles. Como veremos, los cambios en esta variable se ven claramente reflejados en la producción primaria.

## 4. Resultados

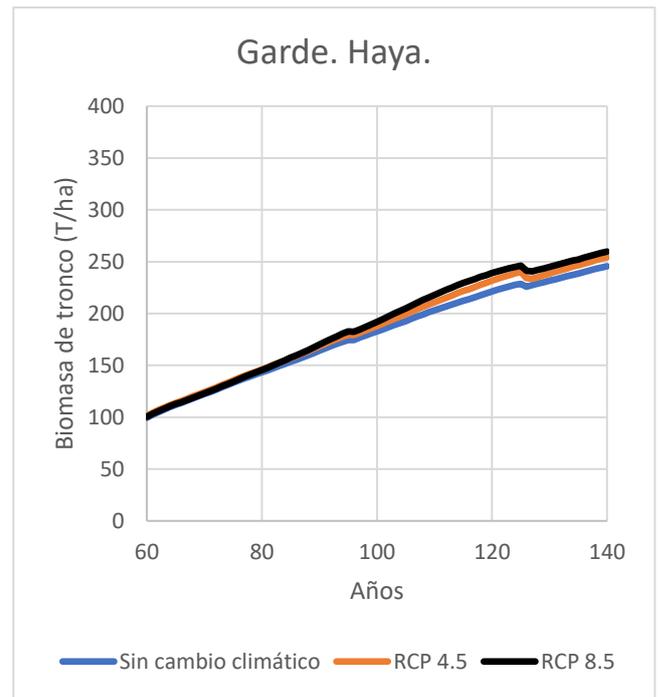
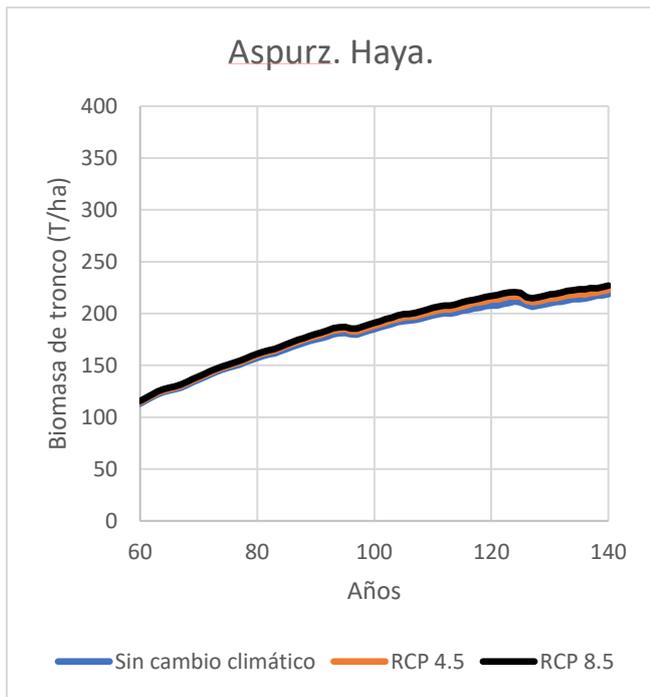
### 4.1. Biomasa de tronco

En líneas generales observamos que, si comparamos los diferentes escenarios climáticos, en Aspurz tenemos que la biomasa de haya aumenta mientras que la de pino baja (Figuras 5, 7 y 9), mientras que en Garde vemos un aumento en la biomasa de tronco para todos los tipos de bosque cuando el cambio climático es más severo (Figuras 6, 8 y 10).

Comparando sitios, vemos que en Garde los pinos producen más biomasa que las hayas cuando crecen por separado, mientras que en Aspurz las hayas crecen mucho más. En los escenarios mixtos los pinos siempre crecen más que las hayas.



*Figuras 5 y 6: Previsión de la evolución de la biomasa de tronco para un pinar puro en Aspurz (5) y Garde (6).*



Figuras 7 y 8: Previsión de la evolución de la biomasa de tronco para un hayedo puro en Aspurz (7) y Garde (8).

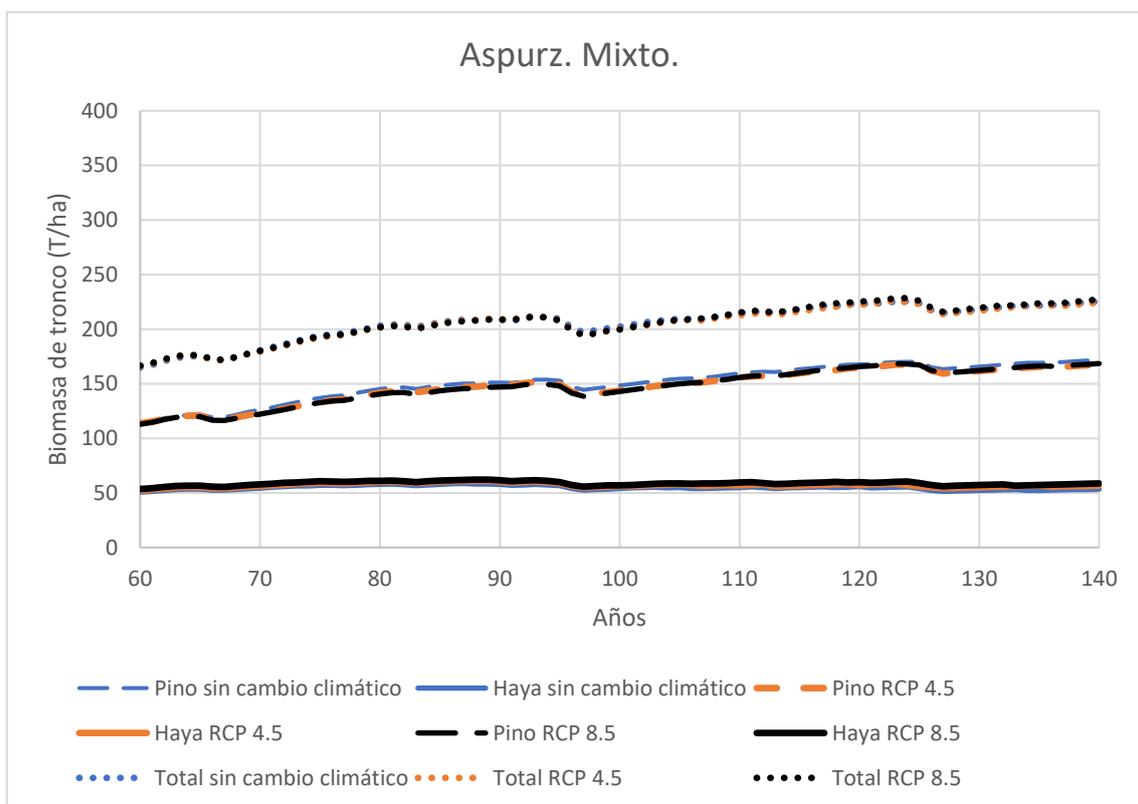


Figura 9: Previsión de la evolución de la biomasa de tronco para un bosque mixto de pinos y hayas en Aspurz.

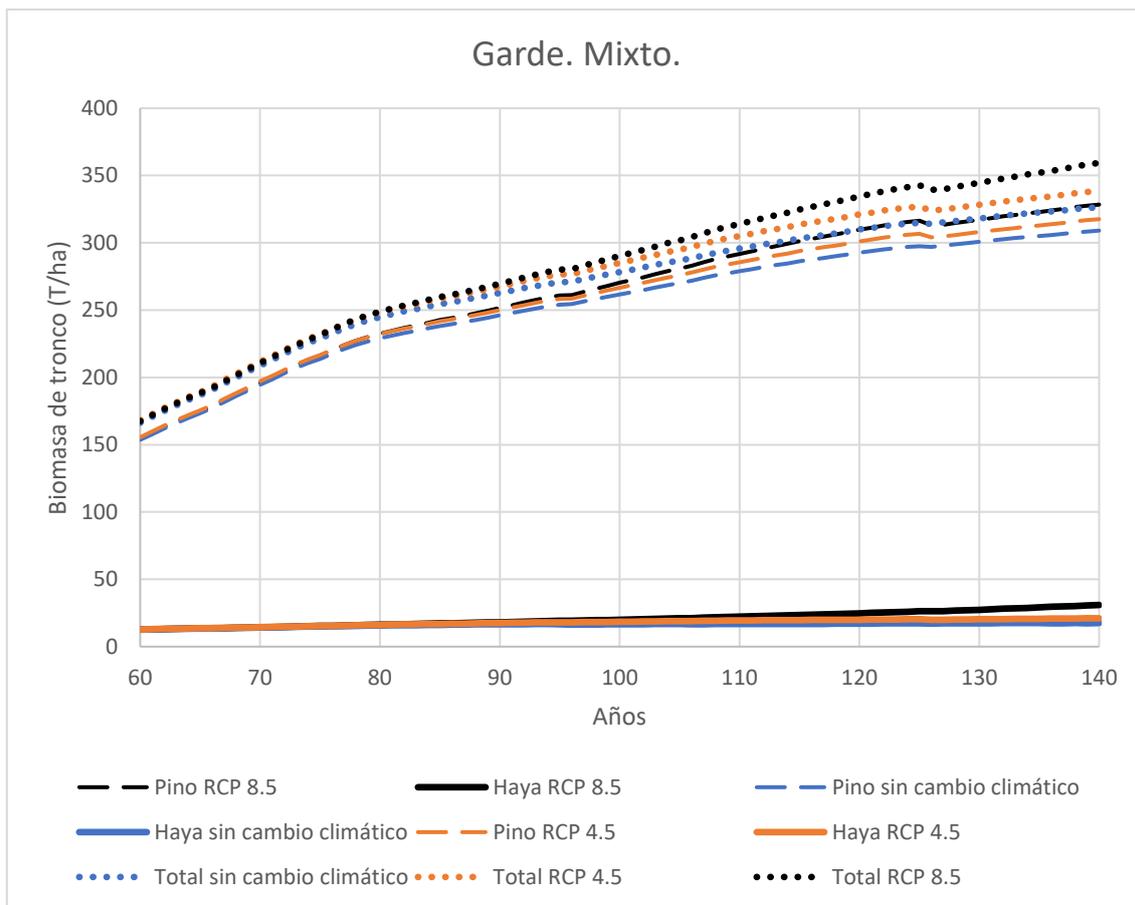


Figura 10: Previsión de la evolución de la biomasa de tronco para un bosque mixto de pinos y hayas en Garde.

Yendo a los datos cuantitativos, podemos observar los siguientes porcentajes de aumento o descenso respecto al clima control al final de la simulación (Tablas 5 y 6):

Tabla 5: Previsión de la biomasa de tronco alcanzada en el año 2100 para los diferentes tipos de bosque en Aspuz.

Aspuz. Biomasa de tronco simulada para el año 2100 (T/ha).			
	Sin cambio climático	RCP 4.5 (absoluto/cambio respecto al control)	RCP 8.5 (absoluto/ cambio respecto al control)
Pino	155.06	130.62 (-15.76%)	125.35 (-19.15%)
Haya	218.65	222.79 (+1.89%)	226.96 (+3.80%)
Mixto Pino	171.99	167.67 (-2.51%)	168.83 (-2.01%)
Mixto Haya	53.51	56.71 (+5.99%)	58.61 (+9.54%)
Mixto Total	225.38	224.38 (-0.49%)	227.15 (+0.73%)

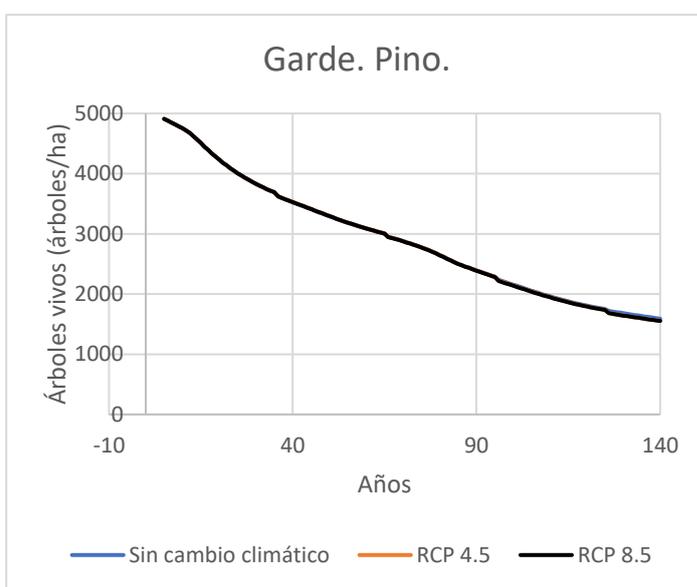
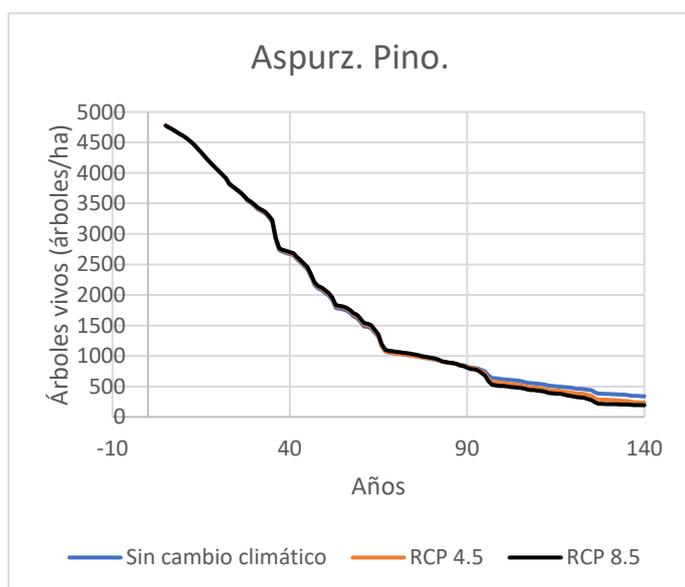
Tabla 6: Previsión de la biomasa de tronco alcanzada en el año 2100 para los diferentes tipos de bosque en Garde.

Garde. Biomasa de tronco simulada para el año 2100 (T/ha).			
	Sin cambio climático	RCP 4.5 (absoluto/cambio respecto al control)	RCP 8.5 (absoluto/ cambio respecto al control)
Pino	249.63	259.37 (+3.90%)	276.61 (+10.81%)
Haya	245.59	254.21 (+3.51%)	259.76 (+5.77%)
Mixto Pino	309.07	317.53 (+2.74%)	328.37 (+6.25%)
Mixto Haya	17.47	21.03 (+20.36%)	30.93 (+77.05%)
Total	326.54	338.56 (+3.68%)	359.31 (+10.04%)

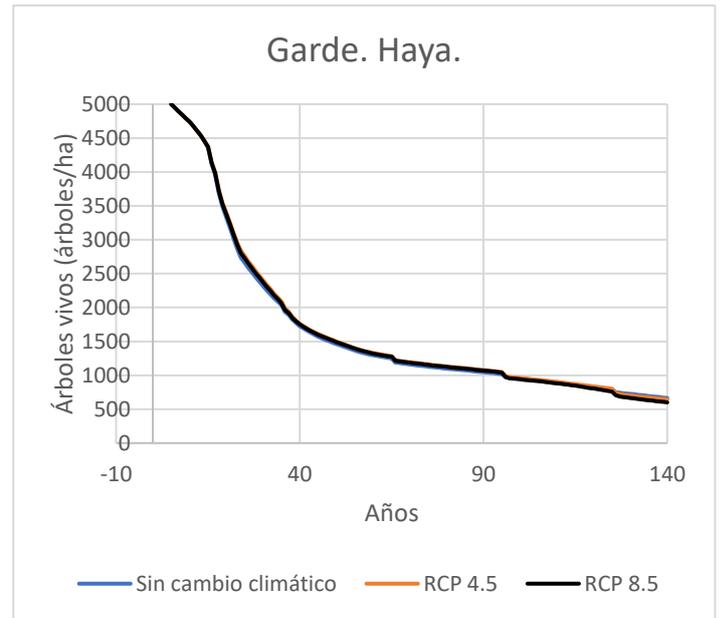
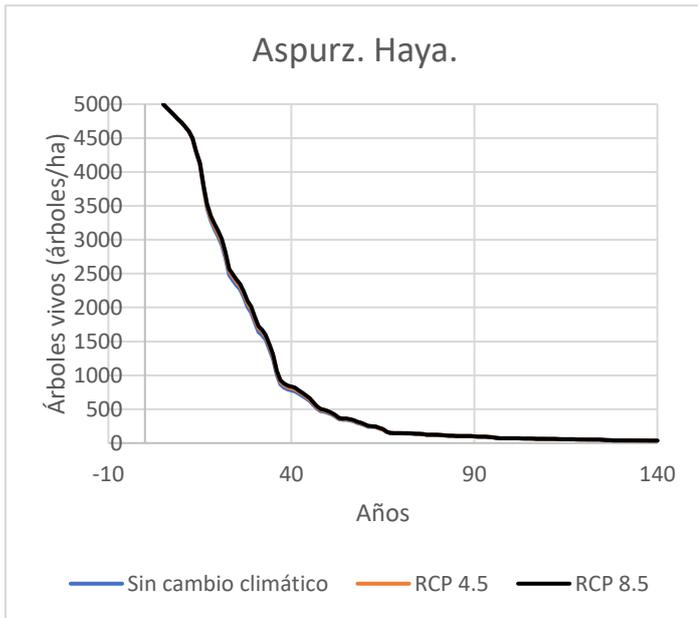
## 4.2. Densidad de árboles vivos

Dado que la mayor parte de las muertes se producen en los años de presimulación, hemos decidido incluir también estos años para esta variable a la hora de representar los resultados. Si bien estos años no son objeto de estudio, poder ver cómo se comporta el bosque durante la presimulación resulta de relevancia para explicar su comportamiento posterior y sus diferentes respuestas al cambio climático.

Con esta variable hemos observado que en todos los escenarios, con un cambio climático más severo la mortalidad aumenta. La única excepción ha sido la de las hayas en el bosque mixto de Garde, donde vemos una disminución de la mortalidad. Donde más destaca el aumento de la mortalidad es en los pinos de Aspurz, especialmente en los del pinar puro, observándose en el resto de casos un aumento de la mortalidad relativamente moderado (Ver figuras de 11 a 16).



Figuras 11 y 12: Previsión de la evolución de la densidad de árboles vivos para un pinar puro en Aspurz (11) y Garde (12).



Figuras 13 y 14: Previsión de la evolución de la densidad de árboles vivos para un hayedo puro en Aspurz (13) y Garde (14).

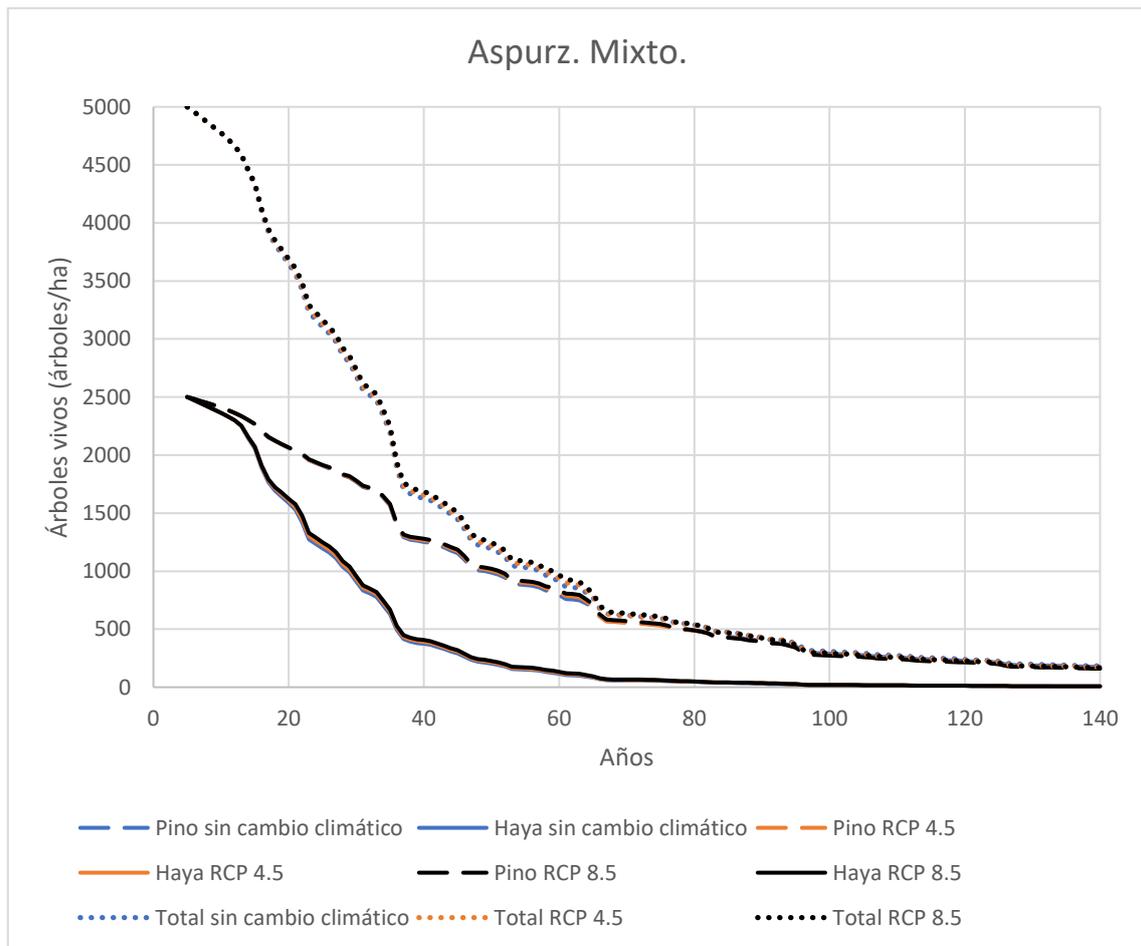


Figura 15: Previsión de la evolución de la densidad de árboles vivos para un bosque mixto de pinos y hayas en Aspurz.

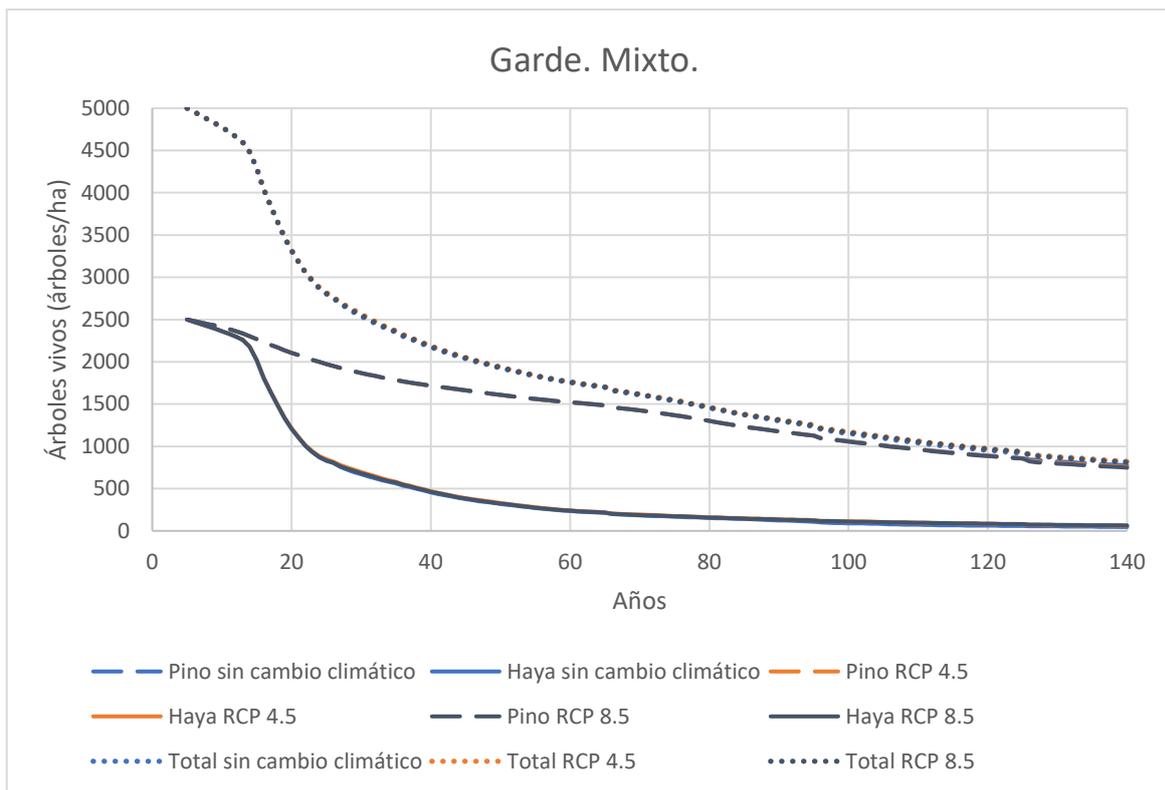


Figura 16: Previsión de la evolución de la densidad de árboles vivos para un bosque mixto de pinos y hayas en Garde.

Además de las gráficas decidimos incluir, como en la anterior variable, los datos absolutos y relativos del último año de la simulación (Tablas 7 y 8). Sin embargo, se debe tener en cuenta que, en el caso de esta variable, no solo es importante conocer el estado final, sino como varía la tasa de mortalidad a lo largo de la simulación.

En especial, resulta interesante saber si la mayor parte de la mortalidad se da en los primeros años o esta es más paulatina.

Tabla 7: Previsión de la densidad de árboles vivos alcanzada en el año 2100 para los diferentes tipos de bosque en Aspurz.

Aspurz. Densidad de árboles vivos simulados para el año 2100 (Árboles/ha)			
	Sin cambio climático	RCP 4.5 (absoluto/cambio respecto al control)	RCP 8.5 (absoluto/cambio respecto al control)
Pino	339	232 (-31.52%)	192 (-43.36%)
Haya	38	37 (-2.63%)	36 (-5.26%)
Mixto Pino	178	164 (-7.87%)	160 (-10.11%)
Mixto Haya	8	8	8
Mixto Total	183	172 (-6.01%)	168 (-8.20%)

Tabla 8: Previsión de la densidad de árboles vivos alcanzada en el año 2100 para los diferentes tipos de bosque en Garde.

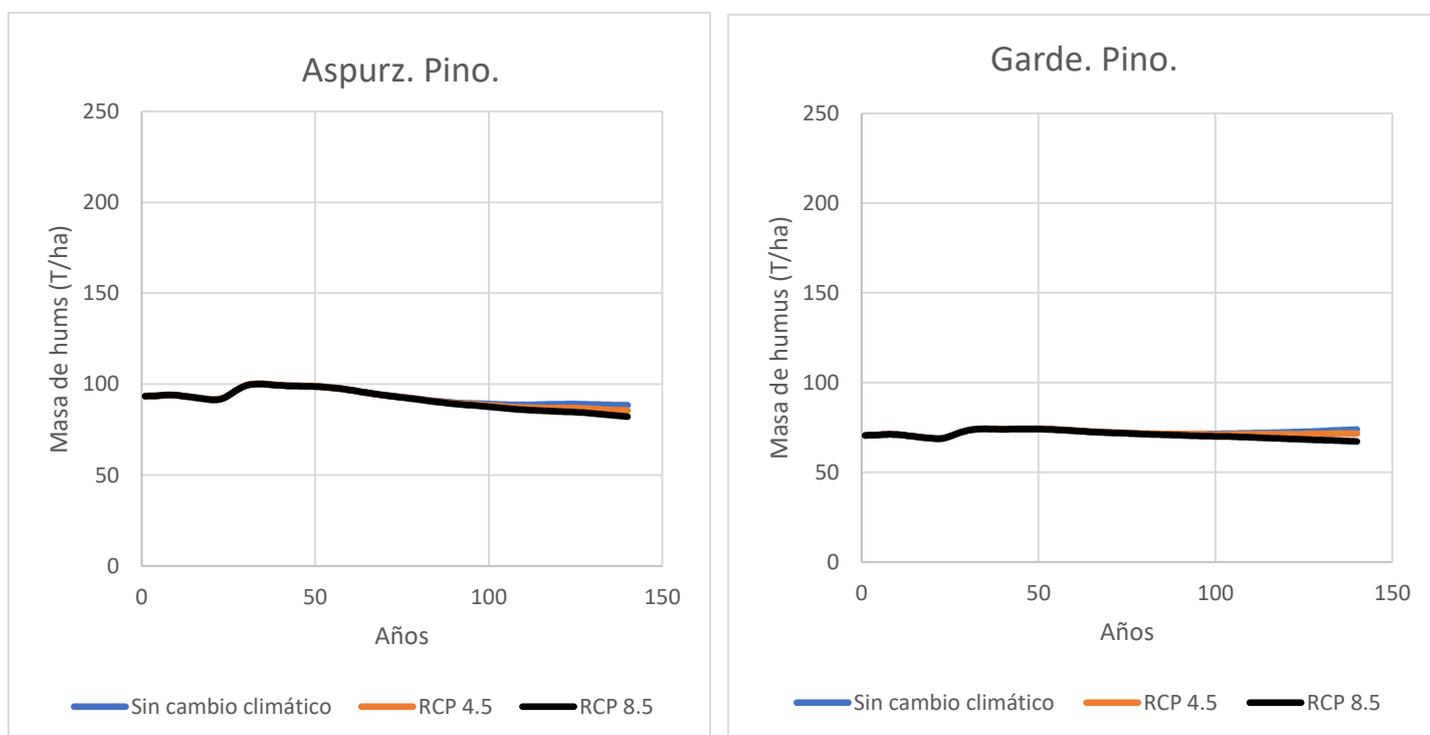
Garde. Densidad de árboles vivos simulados para el año 2100 (Árboles/ha)			
	Sin cambio climático	RCP 4.5 (absoluto/cambio respecto al control)	RCP 8.5 (absoluto/cambio respecto al control)
Pino	1591	1555 (-2.26%)	1554 (-2.32%)
Haya	665	664 (-0.15%)	600 (-9.77%)
Mixto Pino	773	757 (-2.07%)	747 (-3.36%)
Mixto Haya	46	63 (+36.96%)	64 (+36.13%)
Total	819	820 (+0.12%)	811 (-0.98%)

### 4.3. Masa de humus

Respecto a la masa de humus, hemos decidido incluir de nuevo tanto el periodo de la propia simulación como el de presimulación.

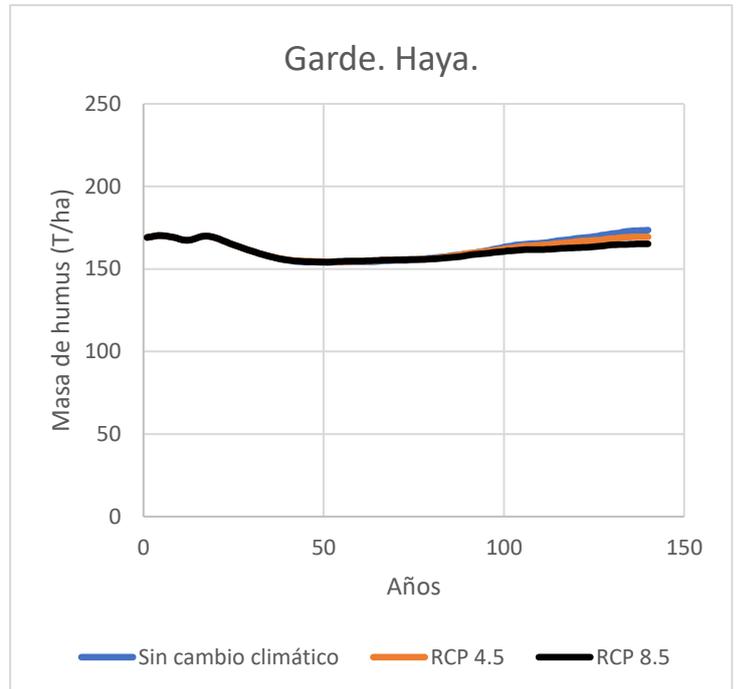
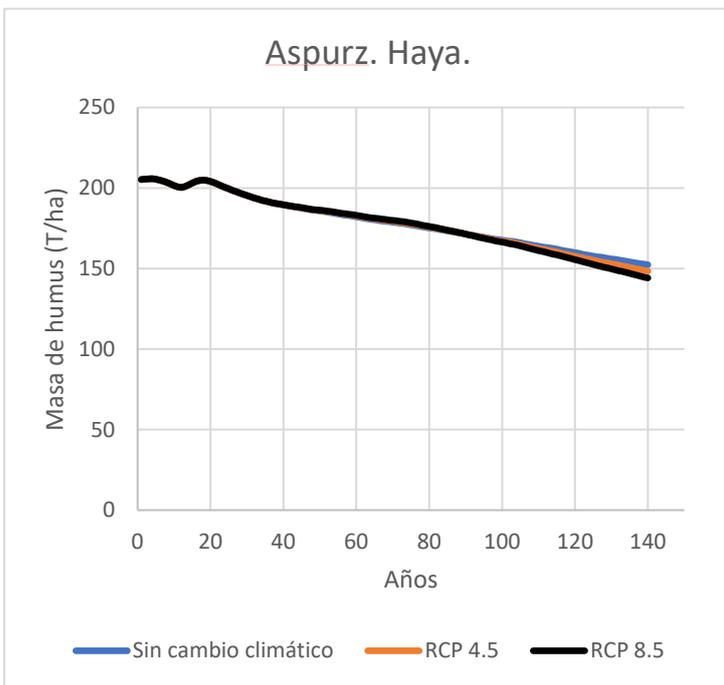
Si bien el periodo de estudio comienza a partir del año 60, puede resultar interesante observar las pequeñas oscilaciones que se dan antes de este momento y que coinciden con los años de máximo crecimiento de los árboles hasta el cierre de copas. Es una vez pasado este periodo cuando comenzamos a observar las tendencias que comentaremos en la discusión.

Como vemos en las figuras 17 a 22, el modelo prevé que a mayor aumento de las temperaturas (mayor cambio climático), la acumulación de humus sea menor en todos los casos.



Figuras 17 y 18: Previsión de la evolución de la masa de humus para un pinar puro en Aspuz (17) y Garde (18).

Esta reducción es algo superior en el caso de los pinares puros. Comparando los bosques mixtos de ambos sitios, observamos que en el de Garde la reducción en la acumulación de humus es menor que en el de Aspurz.



Figuras 19 y 20: Previsión de la evolución de la masa de humus para un hayedo puro en Aspurz (19) y Garde (20).

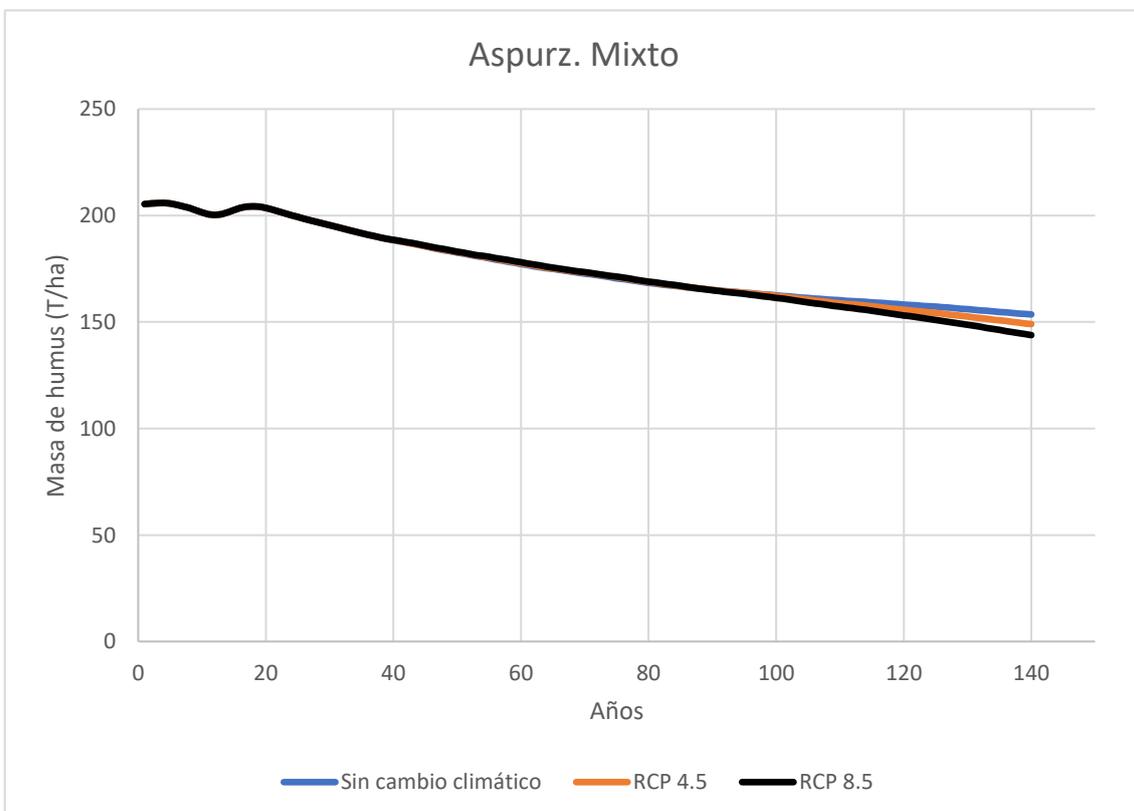


Figura 21: Previsión de la evolución de la masa de humus para un bosque mixto de pinos y hayas en Aspurz.

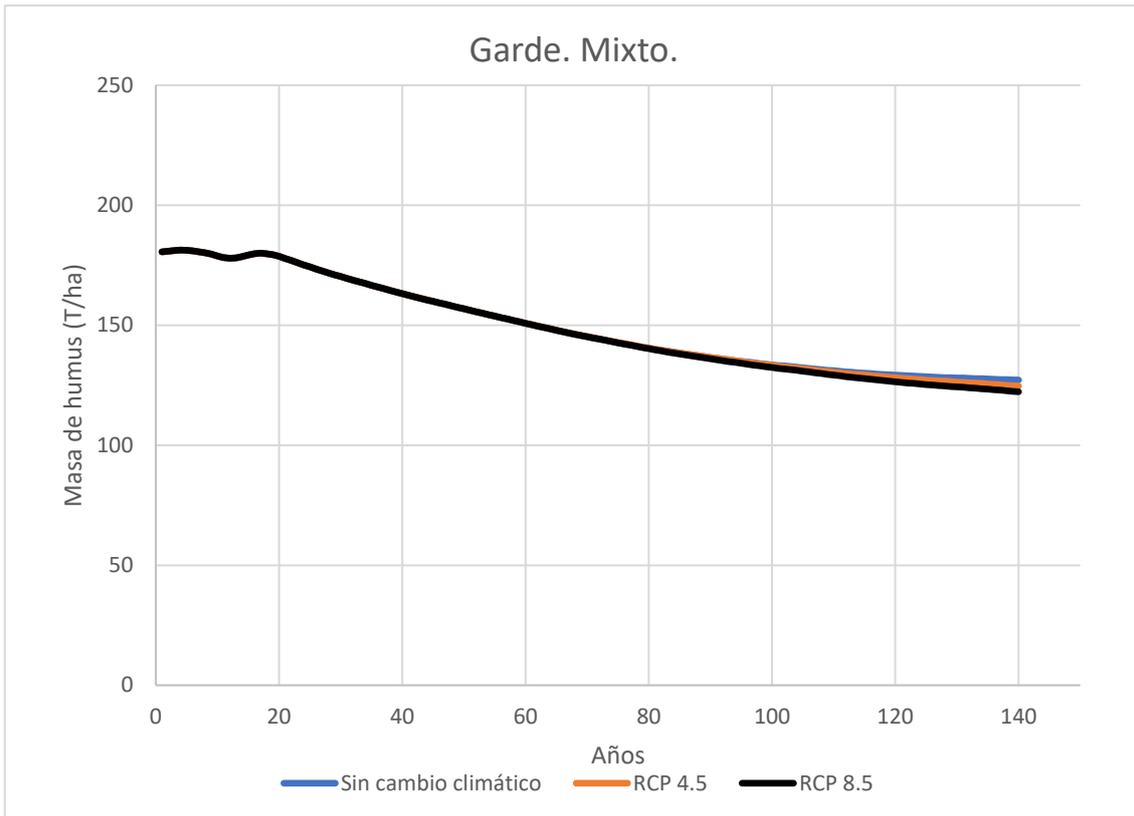


Figura 22: Previsión de la evolución de la masa de humus para un bosque mixto de pinos y hayas en Garde.

Dado que cualitativamente el resultado es el mismo en todos los casos, resulta más útil estudiar las cifras concretas de algunos instantes de la simulación. Se debe tener en cuenta, eso sí, que como vemos en las gráficas presentadas arriba, estas diferencias no son apenas observables hasta los últimos años de la simulación, lo que nos indica la dificultad de observar las consecuencias del cambio climático en el humus a corto plazo.

A continuación, mostramos los datos del último año de simulación (Tablas 9 y 10):

Tabla 9: Previsión de la masa de humus alcanzada en el año 2100 para los diferentes tipos de bosque en Aspuz.

Aspuz. Masa de humus simulada para el año 2100 (T/ha).			
	Sin cambio climático	RCP 4.5 (absoluto/cambio respecto al control)	RCP 8.5 (absoluto/ cambio respecto al control)
Pino	88.52	85.53 (-3.37%)	82.12 (-7.22%)
Haya	152.33	148.42 (-2.56%)	144.15 (-5.36%)
Mixto	153.57	149.05 (-2.94%)	143.86 (-6.32%)

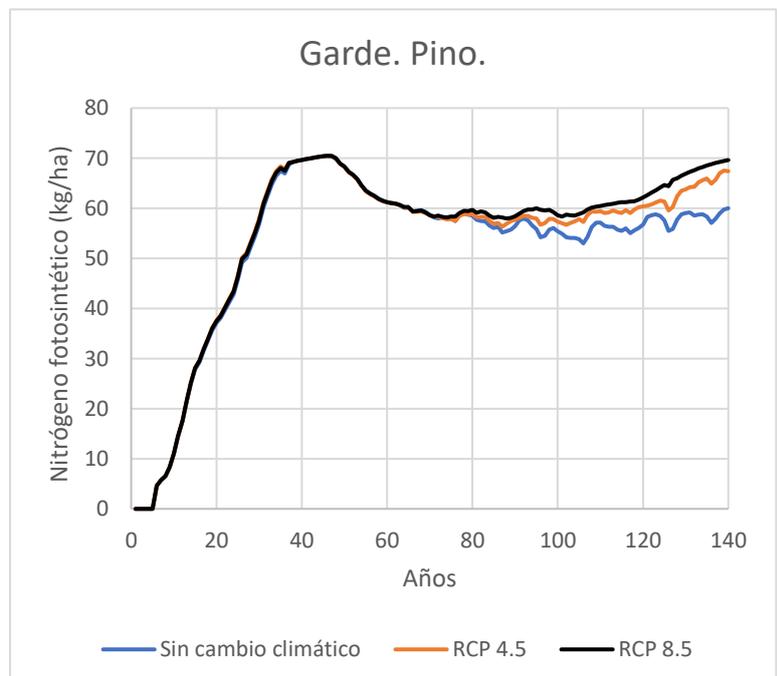
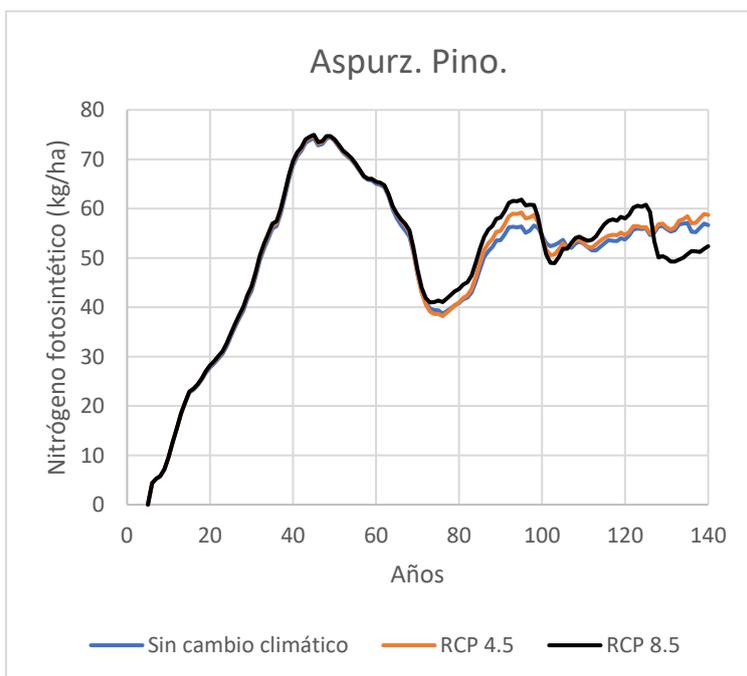
Tabla 10: Previsión de la masa de humus alcanzada en el año 2100 para los diferentes tipos de bosque en Garde.

Garde. Masa de humus simulada para el año 2100 (T/ha).			
	Sin cambio climático	RCP 4.5 (absoluto/cambio respecto al control)	RCP 8.5 (absoluto/ cambio respecto al control)
Pino	73.85	71.55 (-3.12%)	67.18 (-9.94%)
Haya	173.52	169.54 (-2.29%)	165.21 (-4.79%)
Mixto	127.18	124.67 (-1.98%)	122.28 (-3.86%)

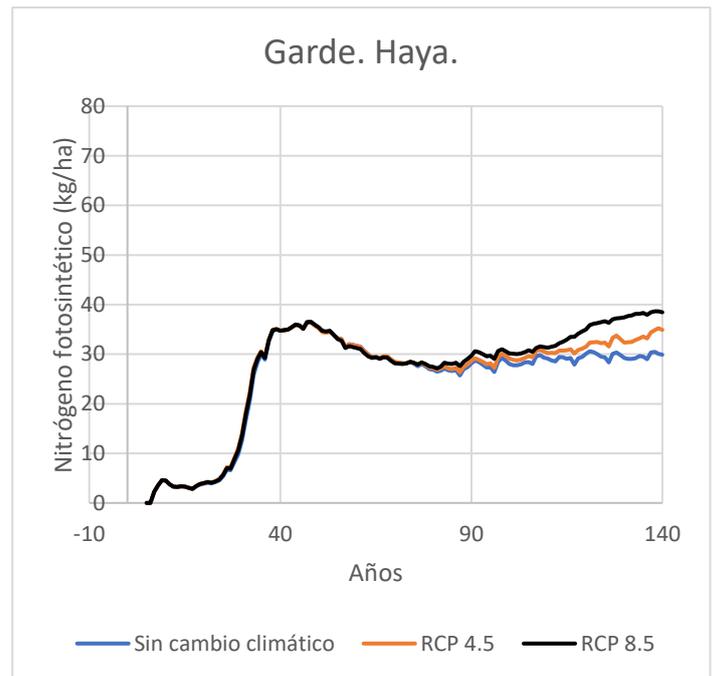
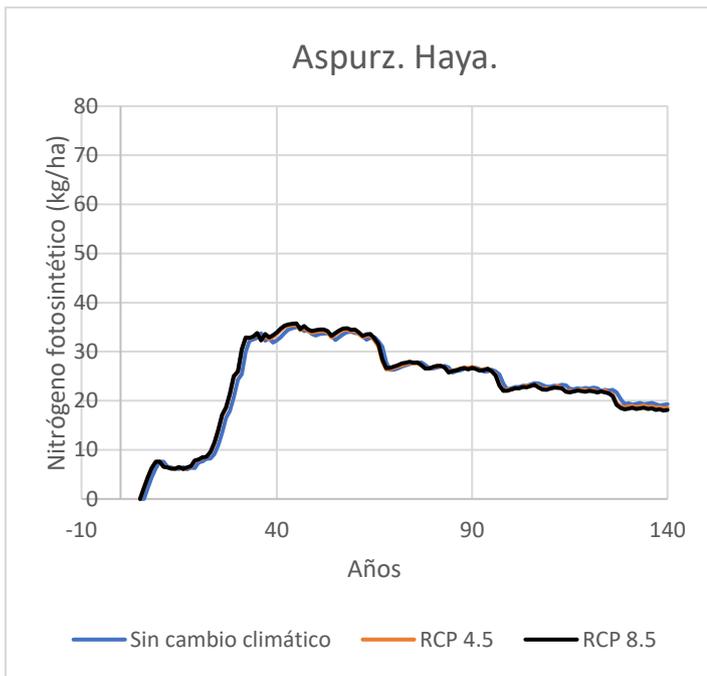
#### 4.4. Nitrógeno fotosintético

El interés de esta variable está principalmente en su capacidad para explicar los cambios que hemos visto en el resto de las variables. La cantidad de nitrógeno fotosintético es la variable que determina la capacidad de crecimiento de los árboles y es por tanto la variable central del modelo.

Como trataremos de explicar en las conclusiones, los cambios que vemos en las gráficas expuestas a continuación pueden relacionarse con las variaciones vistas en las variables anteriores (Figuras 23 a 28). Esta variable tiene la ventaja de que fenómenos que podían pasar desapercibidos en el resto de resultados, como el cierre de copas, una segunda etapa de crecimiento tras el autoclareo o algunos aspectos de la competencia interespecífica, son aquí más visibles.



Figuras 23 y 24: Previsión de la evolución de la cantidad nitrógeno fotosintético para un pinar puro en Aspurz (23) y Garde (24).



Figuras 25 y 26: Previsión de la evolución de la cantidad nitrógeno fotosintético para un hayedo puro en Aspurz (25) y Garde (26).

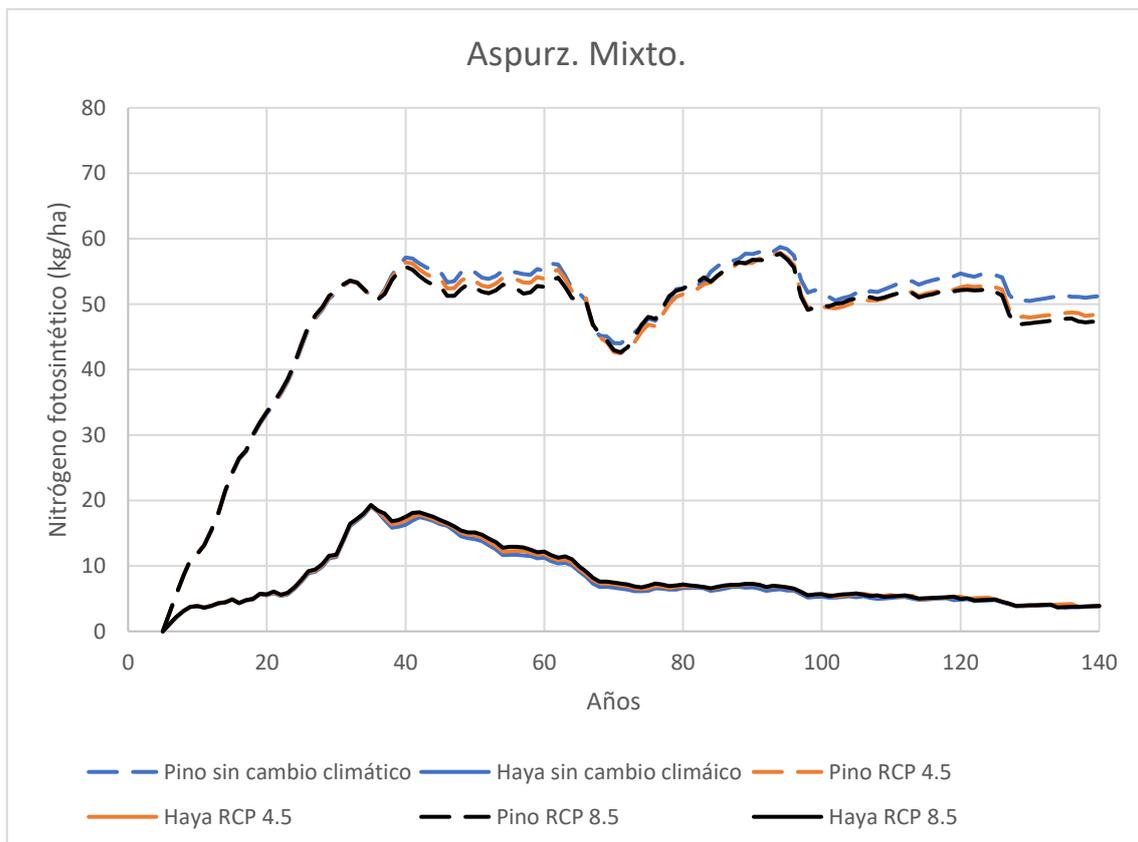


Figura 27: Previsión de la evolución de la cantidad de nitrógeno fotosintético para un bosque mixto de pinos y hayas en Aspurz.

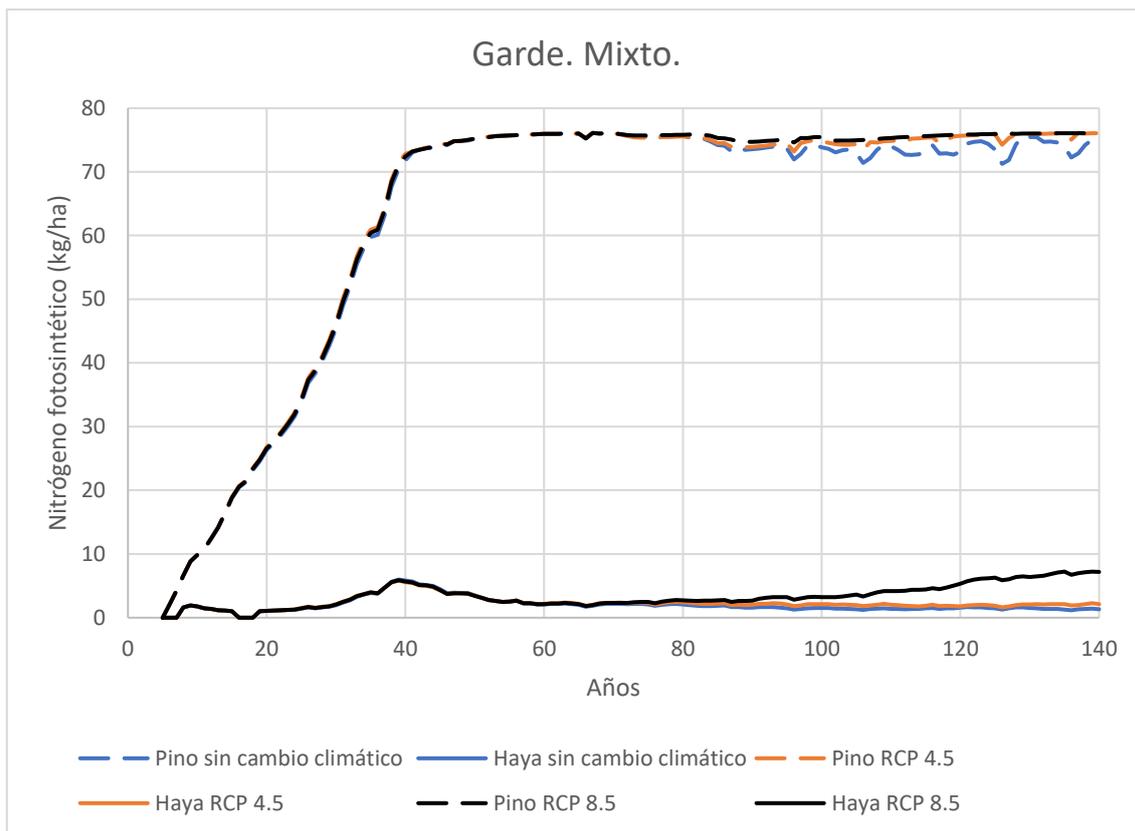


Figura 28: Previsión de la evolución de la cantidad de nitrógeno fotosintético para un bosque mixto de pinos y hayas en Garde.

Dado que es la variable que más oscilaciones presenta, es tal vez donde los datos concretos del último año resultan menos explicativos. En cualquier caso, estos se han incluido para dar una idea de las diferencias entre unas oscilaciones y otras (Tablas 11 y 12).

Tabla 11: Previsión del nitrógeno fotosintético alcanzado en el año 2100 para los diferentes tipos de bosque en Aspurz.

Aspurz. Nitrógeno fotosintético simulado para el año 2100 (Kg/ha).			
	Sin cambio climático	RCP 4.5 (absoluto/cambio respecto al control)	RCP 8.5 (absoluto/ cambio respecto al control)
Pino	56.62	58.72 (+3.71%)	52.37 (-7.51%)
Haya	19.00	18.56 (-2.34%)	18.11 (-4.69%)
Mixto Pino	51.23	48.40 (-5.52%)	47.38 (-7.52%)
Mixto Haya	3.81	3.86 (+1.31%)	3.88 (+1.84%)
Mixto Total	55.04	52.26 (-5.05%)	51.26 (-6.87%)

Tabla 12: Previsión del nitrógeno fotosintético alcanzado en el año 2100 para los diferentes tipos de bosque en Aspurz.

Garde. Nitrógeno fotosintético simulado para el año 2100 (Kg/ha).			
	Sin cambio climático	RCP 4.5 (absoluto/cambio respecto al control)	RCP 8.5 (absoluto/ cambio respecto al control)
Pino	60.00	67.40 (+12.33%)	69.65 (+16.08%)
Haya	29.90	34.89 (+16.69%)	38.47 (+28.66%)
Mixto			
Pino	74.71	76.06 (+1.81%)	76.08 (+1.83%)
Haya	1.33	2.13 (+60.15%)	7.18 (+439.85%)
Total	76.04	78.19 (+2.83%)	83.26 (+9.50%)

## 5. Discusión

### 5.1. Biomasa de tronco

A la vista de los resultados en esta variable caben comentar varios aspectos. En primer lugar, para el sitio mediterráneo (Aspurz), vemos que cuando tenemos una única especie, las hayas son considerablemente más productivas que los pinos para todos los escenarios climáticos. Además, los aumentos de las temperaturas, es decir, escenarios de cambio climático más severos, aumentan aún más la producción de las hayas (+1.89% y +3.80% respectivamente), mientras que reducen la de los pinos (-15.76% y -19.15%). Observamos pues que, para este sitio, los pinares son mucho más sensibles al aumento de las temperaturas y que, además, les afecta negativamente.

En cuanto al bosque mixto, vemos que para Aspurz la productividad es muy similar a la del hayedo y que, en los escenarios de cambio climático, el cambio respecto al control no llega al 1%, observándose un descenso para el escenario intermedio y un aumento para el más severo. Vemos pues que en un sitio mediterráneo como Aspurz, si bien los bosques mixtos no presentan diferencias importantes en su productividad, sí que son algo menos sensibles a las variaciones de temperatura.

En los bosques mixtos, además, los pinos crecen mucho más que las hayas, lo que puede deberse a que al haber simulado un escenario en el que ambas poblaciones nacen a la vez, los pinos tienen la ventaja competitiva de un crecimiento más rápido. Así, compiten mejor por los recursos del suelo sin verse perjudicados por la sombra de las hayas que apenas crecen.

He aquí una de las limitaciones de este estudio, pues para simular un bosque más realista se deberían incluir diferentes cohortes para que los resultados reflejasen la desventaja adaptativa que tienen los pinos por no poder crecer a la sombra de las hayas.

Para el sitio con clima continental (Garde), vemos que las diferencias en la productividad de los bosques puros se invierten, siendo el pinar más productivo que el hayedo, si bien con una diferencia mucho menor que en el primer caso. En este caso, el bosque mixto sí que es considerablemente más productivo que los bosques puros. Para el caso de mayor cambio climático, por ejemplo, tenemos 359.31 T/ha para el bosque mixto en el año 2100 frente a las 276.61 T/ha y las 259.76 T/ha del pinar y el hayedo respectivamente.

En los tres casos, a mayor cambio climático mayor productividad, habiendo un aumento menor en el caso del hayedo que en los otros dos casos. En cuanto a las razones para ello, Blanco e Imbert afirman que “En bosques continentales o sub-alpinos de los Pirineos occidentales la reducción de la limitación al crecimiento por temperatura y por un alargamiento del periodo vegetativo podría generar más biomasa” (Blanco & Bosco Imbert, 2015).

Cabe señalar que a pesar de que las hayas parecen menos sensible al cambio climático en este sitio, en el bosque mixto presentan un aumento porcentual mucho mayor que el de los pinos, si bien es cierto que partían de valores menores. Vemos pues, que

para el sitio de Garde el bosque mixto es considerablemente más productivo que cualquiera de los bosques puros.

Este aumento que vemos en la productividad de *F. sylvatica* contradice los resultados de (Martínez Del Castillo et al., 2022), que prevén una disminución en la productividad de los hayedos de toda Europa y especialmente de los más meridionales. En la misma línea están (Rötzer et al., 2013) en sus previsiones para los hayedos puros de Alemania. Hay que tener en cuenta que estos últimos citan las sequías como principal causa de la mortalidad de las hayas y de la reducción de la producción, y afirman que el alargamiento del periodo de crecimiento compensa parcialmente este efecto.

En nuestro caso, ya que no hemos introducido un descenso en las precipitaciones por indicación del informe del OPCC (OPCC, 2018), observamos los beneficios del alargamiento de este periodo, pero no los efectos negativos de las sequías.

Si comparamos sitios, además de lo comentado arriba, se debe mencionar que los artefactos introducidos en los datos climáticos de simulación por la repetición de ciclos de 30 años son mucho más visibles en los resultados de Aspurz que en los de Garde y sobre todo en el caso del pinar. Esto indicaría que este sitio es más sensible a los cambios en las temperaturas.

Según el segundo informe del OPCC, tanto el aumento de las temperaturas medias como de la concentración de CO<sub>2</sub> podría tener un efecto fertilizante para los árboles. Así, en las zonas donde haya disponibilidad de agua suficiente la productividad aumentaría (Informe Cambio climático en los pirineos, 2018). De este modo, vemos que el aumento en el crecimiento de las hayas ha sido mayor en Garde. Esto, además de por el cambio en el tipo de clima, podría deberse al aumento de la altitud (Dulamsuren et al., 2017), de tal manera que los sitios a bajas altitudes tienen como factor limitante las precipitaciones y los más altos están limitados por las bajas temperaturas, de tal manera que un aumento de estas les es más beneficioso.

En la misma línea se expresan (Martínez-Vilalta et al., 2012), que añaden que el nitrógeno de origen antropogénico y los cambios en la gestión de los bosques han provocado un aumento de la productividad de *P. sylvestris* durante el siglo XX. Sobre esto último, sin embargo, (Bosela et al., 2018) señalan que a largo plazo no se observan, para las hayas, diferencias entre los bosques con o sin manejo forestal en lo que a sensibilidad al cambio climático se refiere.

Lo que diferencia nuestro trabajo de muchos otros similares es que no hemos supuesto un aumento de la sequía. Este es el factor que en otros trabajos se presenta como el que provocaría daños en el bosque. Por lo tanto, parece importante que para futuros trabajos se determine en que sitios del Pirineo o Prepirineo navarro podría darse sequía y cómo afectaría esta, ya que si bien el informe del OPCC (OPCC, 2018) no observa tendencias descendientes para las precipitaciones a lo largo del Pirineo, sí que parece probable que en los sitios mediterráneos aumenten las sequías.

Vemos pues, que en un escenario como el simulado en el que el cambio climático conlleva un aumento en la temperatura y en el CO<sub>2</sub>, pero no un aumento de las sequías, la capacidad de secuestrar CO<sub>2</sub> y la producción de los bosques aumenta como norma general.

Sobre el crecimiento de *P. sylvestris*, Bogino et al. dicen que la temperatura afecta de una manera u otra a las poblaciones de pinos dependiendo del sitio en el que se encuentre el pinar y de la estación del año donde se den los cambios en las temperaturas, siendo el aumento de las temperaturas beneficioso en invierno, pero perjudicial en otoño y verano (Bogino et al., 2009). Nuestro estudio no tiene la complejidad suficiente para introducir el factor de la estacionalidad, por lo que nos hemos limitado a estudiar el efecto de un aumento en la media anual.

Los mismos autores afirman que los rodales jóvenes son más sensibles a los cambios en las variables climáticas que los de mayor edad.

Por poner un ejemplo de simulaciones similares realizadas en otros lugares y con otros modelos, (Briceño-Elizondo et al., 2006), realizó un estudio similar para poblaciones de *P. sylvestris* en Noruega utilizando el modelo FINNFOR y de nuevo concluyó que el aumento de las temperaturas y de la concentración de CO<sub>2</sub> mejora la productividad. Además, menciona una aceleración en la descomposición del humus similar a la que observamos nosotros y que comentaremos posteriormente.

Para poblaciones de *Pinus nigra* y en estudios realizados en la serranía de cuenca, (Candel-Pérez et al., 2012), observan que a altitudes bajas y altas podría haber una correlación negativa entre temperatura y crecimiento, mientras que en zonas medias la tendencia se invertiría. En nuestro caso tenemos que en Garde, que es el sitio más alto, es donde observamos el aumento en la productividad de *Pinus sylvestris*, mientras que en Aspurz esta se reduce. Esto podría deberse a que en los sitios más altos el frío sería un factor limitante del crecimiento y por tanto el aumento de las temperaturas es beneficioso, mientras que en los sitios bajos el aumento de las temperaturas estivales provoca un mayor estrés hídrico.

## 5.2. Densidad de árboles vivos

Si comparamos la mortalidad que hay en los bosques puros en el sitio de Aspurz, observamos que la de las hayas es mucho mayor. De 5000 árboles que nacen de cada especie, en el caso del control llegan al final de la simulación 339 pinos y 38 hayas. Además, en el caso de las hayas la mortalidad se da en su mayoría en los años de presimulación (del 0 al 60), mientras que en el caso de los pinos esta es algo más paulatina.

En el caso del bosque mixto, la mortalidad es intermedia entre la del hayedo y la del pinar (178 en el caso del control en el año 2100), sin embargo, en este caso la mortalidad de las hayas es aún mayor. Este es otro indicador de que, al nacer a la vez, las hayas no pueden competir con los pinos en los bosques mixtos.

En cuanto a la influencia del cambio climático, vemos que los pinos sufren un aumento de la mortalidad mayor que las hayas (-43.36% y -5.26% respectivamente para el escenario RCP8.5), si bien es verdad que en estas últimas puede que no se note el efecto por tener ya pocos individuos vivos en el clima control. Es interesante observar que en el bosque mixto el porcentaje de pinos vivos respecto del control no se reduce tanto como en el pinar puro (-10.11% en RCP8.5), por lo que parece que, en términos de

supervivencia, los pinos que viven en un bosque mixto soportan mejor el cambio climático que los del pinar puro.

Si vamos al caso de Garde, la principal diferencia es que en todos los casos la supervivencia es mucho mayor que en el caso mediterráneo. Vemos también, que en todos los casos la caída en el número de individuos vivos no es tan drástica como en Aspurz. Según (Martínez-Vilalta et al., 2012), la mortalidad y el crecimiento de los pinos dependerían de los mismos factores ambientales y de ahí que en el sitio mediterráneo, y por lo tanto más seco, la mortalidad sea mayor.

En cuanto a los escenarios de cambio climático, los bosques puros siguen sufriendo cierto aumento en la mortalidad, pero menor que en Aspurz, sobre todo para el pinar. Es destacable que en el bosque mixto las hayas llegan al final de la simulación con un 30% más de árboles vivos que en el caso control aproximadamente. Así, los bosques mixtos apenas ven afectada la supervivencia de sus árboles con el cambio climático más severo (-0.98% respecto al control) y de hecho se incrementa ligeramente en el cambio climático intermedio (+0.12%).

Este aumento de la supervivencia de las hayas y de la mortalidad de los pinos en los bosques mixtos contradice los resultados de (Geßler et al., 2007) y (Martínez del Castillo et al., 2022), que sugieren que la competitividad de las hayas se vería reducida bajo el cambio climático.

A la vista de estas las dos variables analizadas hasta el momento, vemos que es el bosque de Garde, y no el de Aspurz, el que parece que cumple la hipótesis de que los bosques mixtos resultan preferibles. Como hemos visto, el bosque mixto de Garde produce más biomasa que los puros del mismo sitio, esta biomasa aumenta con el cambio climático y, además, en términos de supervivencia de los árboles es el que mejor resiste.

El hecho de que en el sitio mediterráneo no se observen los beneficios de los bosques mixtos podría deberse a que existe una mayor competencia entre especies que anula los beneficios de este tipo de bosque. Esto estaría provocado por una mayor velocidad de crecimiento de las hayas en los bosques mixtos del sitio mediterráneo (comparado con el continental), que haría que a los pinos les llegue menos sol y crezcan menos. Así lo vemos en las figuras 6 y 7, donde se comprueba que en Aspurz las hayas tienen algo más de biomasa que en Garde, y que esto va unido a un menor crecimiento de los pinos.

Por otro lado, vemos que, aunque la primera variable indicaba que en general (salvo en los pinares mediterráneos), el aumento en las temperaturas provoca un aumento en la producción primaria, esta no está acompañada de una mayor supervivencia sino, precisamente, de un aumento de la mortalidad.

Esto podría deberse a que la mejora en las condiciones de crecimiento ha producido un aumento en la competencia intraespecífica que ha producido un efecto de auto-clareo. Esto provocaría que queden menos árboles con vida pero que los que queden produzcan más biomasa. El aumento de las temperaturas y de la concentración de CO<sub>2</sub>, por tanto, no solo aumentaría la producción primaria, sino que concentraría la biomasa producida en un menor número de troncos.

Según (Gil et. al. 2018) este aumento en la mortalidad de las hayas estaría relacionado con el aumento de las temperaturas e indican que este aumento, junto con una mayor frecuencia y duración de las olas de calor, forzaría a los hayedos a desplazarse a mayores altitudes y, por tanto, a zonas menos favorables.

En comparación con otros sitios de la península ibérica, (del Río et al., 2018), señalan la alta vulnerabilidad de los hayedos peninsulares frente a los cambios en temperatura y precipitación asociados al cambio climático y destacan especialmente el peligro que corren las poblaciones de las zonas limítrofes entre el clima templado y el mediterráneo. Sin embargo, señalan que podrían aparecer nuevas zonas favorables para esta especie en la Cordillera Cantábrica y el Pirineo.

En cuanto a tendencias generales, (Martínez-Vilalta et al., 2012) dicen que hasta la fecha no se observa un aumento de la mortalidad de pino silvestre generalizado en la Península Ibérica y que los patrones que se observan podrían deberse a un auto-aclareo fruto de la alta densidad de pinos en aquellos sitios donde estos han sido replantados. En nuestro caso, debemos tener en cuenta que en todos los casos le hemos pedido al modelo que nazcan 5000 árboles por hectárea a la vez. Estos podrían ser más de los que son capaces de vivir en ese terreno incluso en condiciones óptimas y de ahí que veamos una alta mortalidad en los primeros años.

Estos autores añaden que, en el futuro, para predecir la mortalidad debida al cambio climático se deberían tener en cuenta otros factores como una mayor frecuencia de incendios o plagas.

### 5.3. Masa de humus

Para analizar esta variable debemos tener en cuenta que la masa de humus acumulada depende, por un lado, de la velocidad a la que los árboles producen hojarasca y, por otro, de la tasa de descomposición de la hojarasca primero y del humus después.

Así, para Aspurz vemos que en los hayedos puros se acumula más humus que en los pinares, lo que se debe a que las primeras producen más humus que los segundos, principalmente debido a la hojarasca. El bosque mixto está algo por encima del hayedo en cantidad de humus para el escenario control y para RCP4.5, pero no así para RCP8.5.

Vemos por tanto que para el escenario de cambio climático más severo el aumento en la producción de humus en los hayedos es mayor que en los bosques mixtos suponiendo que la tasa de descomposición sea la misma. Si bien es cierto que esto no tiene por qué ser así cuando tenemos bosques diferentes, debemos tener en cuenta que la mayor parte del humus producido en los bosques mixtos proviene de las hayas y, por lo tanto, cabe esperar que su tasa de descomposición sea similar a la de los hayedos.

En cuanto al efecto del cambio climático, vemos que en todos los casos el humus acumulado al final de la simulación disminuye al aumentar el cambio climático. Esto podría deberse a que un aumento de las temperaturas con unas precipitaciones similares acelera los procesos de descomposición del humus.

Estos resultados están en línea con los de Blanco e Imbert, que dicen que un aumento de las temperaturas aumentaría la velocidad de descomposición del humus y la hojarasca al aumentar la velocidad de los organismos que trocean, consumen y descomponen la hojarasca (Blanco & Bosco Imbert, 2015). Según ellos, una mayor aridez sí que produciría una tasa de descomposición menor, sin embargo, en nuestro escenario, en el que la precipitación no varía, no vemos tal efecto.

Este aumento en la descomposición del humus, sumado al reservorio de humus del que se partía, podría estar relacionado con el aumento en la productividad que sea visto, ya que una mayor descomposición haría el suelo más rico en nutrientes beneficiando a los árboles.

Vemos, además, que si bien el humus producido por los pinos parece algo más sensible a este efecto, las diferencias no son muy llamativas.

Vemos también en el caso de Aspurz que una vez superados los años de presimulación, la masa de humus es monótonamente descendiente, lo cual quiere decir que el humus se descompone más rápido de lo que se produce, lo que quiere decir que, pasado este periodo de crecimiento rápido de los árboles, la tasa de descomposición del humus supera la velocidad de su producción.

Por tanto, si bien el periodo de nuestras simulaciones no es tan extenso como para captar este efecto, llegaría un momento en el que las reservas de humus se agotarían y dejaríamos de ver el efecto fertilizante de una rápida descomposición. Así, comprobamos que el efecto beneficioso que tiene la elevación de las temperaturas por su efecto en el humus no es indefinido.

Aunque se escapa de la extensión de este trabajo, resultaría interesante estudiar si una vez alcanzado este punto, el efecto beneficioso del aumento de las temperaturas y del CO<sub>2</sub> se sigue manteniendo al mismo ritmo o se ve significativamente reducido. Esto nos permitiría saber en qué grado el aumento en la productividad que hemos visto se debe a factores fisiológicos, como una mayor eficiencia en la apertura estomática, o a otros como a un aumento de la disponibilidad de nutrientes en el suelo.

En el caso de Garde, observamos que el pinar y el bosque mixto acumula menos humus que en Aspurz, mientras que en el caso del hayedo el humus aumenta. Esto contradice los resultados de Blanco e Imbert, que aseguran que en un escenario continental la mayor tasa de descomposición se compensa con una mayor producción (Blanco & Bosco Imbert, 2015). De nuevo, observamos el aumento de las temperaturas aumenta la tasa de descomposición, lo que se traduce en una menor acumulación de humus.

La principal diferencia con Aspurz está en que, en este caso, durante el periodo de simulación (a partir del año 60) la masa de humus en los bosques puros aumenta en lugar de disminuir, con la excepción del pinar en el escenario RCP8.5, donde vuelve a disminuir. Esto indica que se sigue produciendo humus a un ritmo superior al que se descompone y el aumento en la tasa de descomposición provocado por el cambio climático no es suficiente para revertir este efecto, salvo en la excepción mencionada.

## 5.4. Nitrógeno fotosintético

Lo que se observa en todos los casos es que en los primeros años, cuando el crecimiento de los árboles es muy rápido, el nitrógeno fotosintético aumenta muy rápidamente. Pasado este periodo de aumento vemos que comienza a estabilizarse o decaer.

Este máximo de nitrógeno fotosintético coincide con el momento de cierre de copas de los bosques, momento en el que hay una mayor área foliar. Pasado este punto los árboles comienzan a darse sombra unos a otros y algunas hojas empiezan a caerse, de tal manera que el nitrógeno fotosintético disminuye.

Después de cerrarse las copas vemos que se observan algunos escalones descendentes que coinciden con los artefactos en los archivos de simulación del clima debidos a la repetición de periodos de 30 años. Estos escalones estarían relacionados con un aumento de la mortalidad que se refleja en la cantidad de nitrógeno fotosintético. Vemos que estos artefactos son más visibles en las gráficas de esta variable que en las anteriores, por lo que puede ser una variable útil para analizar los cambios en el clima.

En el caso de Garde, además, vemos que tras darse unos años de descenso volvemos a intuir cierto aumento. Esto se debería a que tras morirse gran parte de los árboles los que quedan tienen poca competencia y pueden volver a crecer y, por tanto, a aumentar el nitrógeno fotosintético.

Es de especial interés observar los casos del bosque mixto para comprender la ventaja adaptativa que supone para los pinos el tener un crecimiento más acelerado. Esto les permite poder acceder a los recursos del suelo antes de que las hayas crezcan lo suficiente para darles sombra. Así, los pinos apenas dejan nitrógeno suficiente para las hayas, de manera que estas tienen un crecimiento mínimo que les permite sobrevivir, pero no dominar sobre los pinos, cosa que sí que ocurriría si hubiese hayas de más edad que diesen sombra a los pinos.

## 5.5. Observaciones sobre los métodos numéricos del modelo y limitaciones del trabajo

Al realizar las simulaciones, se observó que incluso en los años de presimulación, en los que el clima simulado es el mismo para los tres escenarios, aparecían desde el principio pequeñas divergencias de unos escenarios a otros. Tras revisar los archivos de simulación del clima y repetir las simulaciones para descartar cualquier error, se ha concluido que la explicación más razonable es que se haya dado un caso de cancelación de cifras significativas por la manera en el que el modelo está programado.

Este problema, que en general es de difícil solución, aparece cuando en un programa se restan dos valores similares, de tal manera que al realizar la operación se reduce el número de cifras significativas. Como el ordenador siempre guarda el mismo número de cifras significativas, al producirse esta pérdida de información, completa las restantes con ceros o números arbitrarios (Higuera, 2021a)

En este caso, creemos que el origen de las divergencias puede estar en esta pérdida de precisión al realizar los cálculos. En cualquier caso, el error cometido ha sido despreciable y no afecta a las conclusiones, más aún teniendo en cuenta que cuando hacemos simulaciones como las de este trabajo, nos interesa más conocer la tendencia que obtener resultados cuantitativos de mucha precisión.

Por otro lado, cabe mencionar los breves tiempos de ejecución que presenta el programa de FORECAST Climate en comparación con otros programas que simulen evoluciones temporales de cualquier sistema.

La razón radica en que mientras que habitualmente la evolución temporal de un sistema se modela mediante ecuaciones diferenciales que posteriormente se integran numéricamente con el método numérico más adecuado, el modelo aquí utilizado toma un paso temporal fijo de un año y, por lo tanto, transforma las ecuaciones diferenciales en ecuaciones algebraicas.

Esto sería equivalente a definir el modelo matemáticamente con ecuaciones diferenciales y usar un método de integración de un paso, explícito y con paso temporal constante, es decir, que para calcular el valor de una variable en un año determinado, solamente usa los valores de las variables en el año anterior (Higueras, 2021b).

Es precisamente el que sea de un paso y de paso constante lo que nos permite transformar automáticamente las ecuaciones diferenciales en algebraicas y por tanto reduce notablemente el coste computacional.

Finalmente, este trabajo tiene algunas limitaciones que no podemos dejar de comentar. En primer lugar, a la hora de crear los archivos de simulación del clima, repetimos una y otra vez el mismo periodo de 30 años añadiendo a cada año el aumento en las temperaturas y el CO<sub>2</sub> correspondiente. Sin embargo, como se ha comentado en la sección de materiales y métodos, al hacer esto provocamos un escalón en los datos cada 30 años, ya que estos años que hemos tomado como referencia ya tienen de por sí un aumento progresivo de temperatura y CO<sub>2</sub>.

Un trabajo más profundo debería intentar eliminar estos artefactos, tal vez sustituyendo la repetición de los 30 años de datos por datos creados aleatoriamente a partir de la media y la desviación típica de los datos existentes. En cualquier caso, sigue permaneciendo el problema de qué valores tomamos como base, ya que los datos de los que disponemos ya expresan el cambio climático de las últimas décadas.

Además de esta limitación, debemos mencionar que a la hora de simular los bosques decidimos, por simplificar, que todos los árboles nacieran a la vez. Esto por un lado no es realista, ya que en la mayoría de los bosques, a excepción de aquellos muy moldeados por la acción humana, existen árboles de diferentes edades que se comportan de forma diferente desde el punto de vista ecológico. Además, como hemos visto, en el caso de los bosques mixtos, plantar a la vez pinos y hayas hace que los primeros, por su rápido crecimiento, tomen una ventaja de partida que posteriormente las hayas no son capaces de compensar. Esto no está en línea con lo que observamos hoy en día en los bosques pirenaicos, donde vemos que en ausencia de gestión forestal las hayas dominarían.

## 6. Conclusiones

La principal conclusión de este trabajo es que a excepción de los pinos en el sitio mediterráneo (Aspurz), en el resto de los escenarios simulados se ha observado que a mayor cambio climático, mayor es el aumento en la producción de biomasa de tronco. Este aumento se daría por tres factores:

En primer lugar, el aumento de las temperaturas, en ausencia del aumento de la sequía, alargaría el periodo de crecimiento de los árboles y eliminaría el frío como factor limitante del crecimiento. El frío es un factor limitante sobre todo en los sitios continentales y en altura como el de Garde, y de ahí el aumento previsto en la productividad de este sitio.

El segundo de los factores sería el CO<sub>2</sub>. El aumento de la concentración de este gas tendría por un lado un efecto fertilizante y además optimizaría la utilización del agua por parte de los árboles al reducir el tiempo necesario de apertura estomática para su captación.

El tercer factor está relacionado con el humus. Nuestras simulaciones nos indican que a más cambio climático observamos una menor acumulación de humus en el suelo, lo que significa que el aumento en la tasa de descomposición supera al aumento en la producción de humus por el mayor crecimiento de los árboles. Este aumento en la descomposición provocaría que los nutrientes presentes en el humus llegaran a ser accesibles a las plantas más rápidamente, teniendo por tanto un efecto fertilizante. Se debe tener en cuenta, eso sí, que a largo plazo las reservas de humus podrían agotarse y este efecto dejaría de darse.

La excepción que suponen los pinos del sitio mediterráneo (Aspurz), que no ven su producción aumentada sino disminuida, se debe a que el factor que limita su crecimiento sería la disponibilidad hídrica y no el frío.

Si comparamos sitios, vemos que en el sitio mediterráneo las hayas son más productivas que los pinos, fenómeno que se invierte en el caso continental, si bien con valores más parecidos entre especies. Sobre el humus, vemos que en el sitio continental se acumula más humus que en el mediterráneo en el caso del hayedo, pero menos en el caso del pinar y del bosque mixto.

Sobre los beneficios del bosque mixto, en el sitio mediterráneo (Aspurz) no vemos que este presente una mayor productividad que los bosques puros, cosa que si observamos en el sitio continental (Garde). En términos de supervivencia, volvemos a ver que es solamente en el sitio continental donde los bosques mixtos resisten mejor el cambio climático, sufriendo un menor aumento de la mortalidad.

En cuanto a los efectos del cambio climático en la mortalidad, vemos que estos son menos perjudiciales en el sitio continental (Garde) y especialmente destaca el caso del bosque mixto, en el que incluso vemos una mayor supervivencia de las hayas. Si comparamos ambas especies, vemos que en ambos sitios las hayas resisten mejor que los pinos en términos de mortalidad.

Por otro lado, cabe mencionar que el nitrógeno fotosintético, tal y como era de esperar por ser la variable central del modelo, ha demostrado ser una buena variable para relacionar con los cambios en el resto de las variables de estudio y para evaluar la sensibilidad del modelo a los artefactos e imperfecciones que puedan aparecer en los archivos de simulación.

## 7. Bibliografía

- Aspurz Tabar, J. (2015). «ESTUDIO DEL DESFRONDE EN BOSQUES MIXTOS DEL PIRINEO NAVARRO: COMPARACIÓN DE DATOS DE CAMPO CON DATOS DEL MODELO ECOLÓGICO FORECAST» presentado por.
- Author, O., Glassy, J. M., & Running, S. W. (1994). Validating Diurnal Climatology Logic of the MT-CLIM Model Across a Climatic Gradient in. En *Source: Ecological Applications* (Vol. 4, Número 2).
- Blanco, J.A. (2005). La práctica de las claras forestales y su influencia en los ciclos de nutrientes en dos bosques de pino silvestre del Pirineo navarro. En *Ecosistemas* (Vol. 14. Pag. 182-188)
- Blanco, J.A. (2013). Explicit Simulation of Hydrological Processes in FORECAST. *Technical workshop – National Dong Hwa University, Hualien, Taiwan.*
- Blanco, J.A. (2013). The Ecosystem Simulation Model. FORECAST. *Technical workshop – National Dong Hwa University, Hualien, Taiwan.*
- Blanco, J. A., & Bosco Imbert, J. (2015). *SilvAdapt-MODEL: SILVICULTURAL ADAPTATION TO CLIMATE CHANGE IN MESO-MEDITERRANEAN FORESTS: IDENTIFYING CHALLENGES THROUGH AN ENSEMBLE OF ECOLOGICAL MODELS* View project *Spatial patterns of biotic interactions in mixed forests along environmental gradients and considering long-term effects (BIOINTFOREST)* View project.  
<https://www.researchgate.net/publication/286922087>
- Bogino, S., José, M., Nieto, F., Bogino, F. B., & Bravo, M. J. &. (2009). Climate Effect on Radial Growth of *Pinus sylvestris* at Its Southern and Western Distribution Limits. *Silva Fennica*, 43(4).  
<http://www.metla.fi/silvafennica/full/sf43/sf434609.pdf>
- Bosela, M., Lukac, M., Castagneri, D., Sedmák, R., Biber, P., Carrer, M., Konôpka, B., Nola, P., Nagel, T. A., Popa, I., Roibu, C. C., Svoboda, M., Trotsiuk, V., & Büntgen, U. (2018). Contrasting effects of environmental change on the radial growth of co-occurring beech and fir trees across Europe. *The Science of the total environment*, 615, 1460-1469. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.09.092>
- Briceño-Elizondo, E., Garcia-Gonzalo, J., Peltola, H., Matala, J., & Kellomäki, S. (2006). Sensitivity of growth of Scots pine, Norway spruce and silver birch to climate change and forest management in boreal conditions. *Forest Ecology and Management*, 232(1-3), 152-167. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2006.05.062>
- Candel-Perez, D., Blanco, J. A., Gonzalez De Andres, E., Lo, Y. H., Imbert, J. B., & Castillo, F. J. (2017). Simulando la interacción entre la densidad inicial y los flujos de agua y nutrientes para comprender el desarrollo de rodales mixtos de *Pinus sylvestris* y *Fagus sylvatica* bajo cambio climático. *Ecosistemas*, 26(2), 38-51. <https://doi.org/10.7818/ECOS.2017.26-2.05>
- Candel-Pérez, D., Lucas-Borja, M. E., & Linares, J. C. (2012). Predicciones del crecimiento en poblaciones de pino laricio (*Pinus nigra* Arn. ssp. *salzmannii*) bajo diferentes escenarios futuros de cambio climático. *Ecosistemas*, 21(3), 41-49. <https://doi.org/10.7818/ECOS.2012.21-3.06>
- del Río, S., Álvarez-Esteban, R., Cano, E., Pinto-Gomes, C., & Penas, Á. (2018). Potential impacts of climate change on habitat suitability of *Fagus sylvatica* L. forests in Spain. *Plant Biosystems*, 152(6), 1205-1213. <https://doi.org/10.1080/11263504.2018.1435572>

- Dulamsuren, C., Hauck, M., Kopp, G., Ruff, M., & Leuschner, C. (2017). European beech responds to climate change with growth decline at lower, and growth increase at higher elevations in the center of its distribution range (SW Germany). *Trees - Structure and Function*, 31(2), 673-686. <https://doi.org/10.1007/s00468-016-1499-x>
- Gárate, M., & Blanco, J. A. (2013). Importance of root biomass characterization when simulating forest ecosystems. *Ecosistemas*, 22(3), 66-73. <https://doi.org/10.7818/ECOS.2013.22-3.10>
- Geßler, A., Keitel, C., Kreuzwieser, J., Matyssek, R., Seiler, W., & Rennenberg, H. (2007). Potential risks for European beech (*Fagus sylvatica* L.) in a changing climate. En *Trees - Structure and Function* (Vol. 21, Número 1, pp. 1-11). <https://doi.org/10.1007/s00468-006-0107-x>
- TRENDS IN ATMOSPHERIC CARBON DIOXIDE (2022). Global Monitoring Laboratory [sitio web]. Datos tomados en diciembre de 2022.
- Gil et. al. (2018). Las áreas protegidas en el contexto del cambio global. Incorporación de la adaptación al cambio climático en la planificación y gestión. *Oficina Técnica EUROPARC-España*.
- Gong, C., Tan, Q., Liu, G., & Xu, M. (2022). Advantage of mixed trees in the trade-off between soil water storage and tree biomass: A meta-analysis from artificially planted forests in Chinese Loess Plateau. *CATENA*, 214, 106232. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106232>
- González de Andrés, E., Blanco, J. A., Imbert, J. B., Guan, B. T., Lo, Y.-H., & Castillo, F. J. (2019). ENSO and NAO affect long-term leaf litter dynamics and stoichiometry of Scots pine and European beech mixedwoods. *Global change biology*, 25(9), 3070-3090. <https://doi.org/10.1111/gcb.14672>
- González de Andrés, E., Seely, B., Blanco, J. A., Imbert, J. B., Lo, Y. H., & Castillo, F. J. (2017). Increased complementarity in water-limited environments in Scots pine and European beech mixtures under climate change. *Ecohydrology*, 10(2). <https://doi.org/10.1002/eco.1810>
- Grosse, H. (2009). *CONSIDERACIONES SOBRE EL FUNCIONAMIENTO DE BOSQUES MIXTOS* Some of the authors of this publication are also working on these related projects: *FOREST POLICY* View project *SILVICULTURE (NATIVE FOREST)* View project. <https://www.researchgate.net/publication/262837794>
- IPCC. (2014). Cambio climático 2014. Informe de síntesis. Enlace en: [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/SYR\\_AR5\\_FINAL\\_full\\_es.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/SYR_AR5_FINAL_full_es.pdf)
- Kimmins. (1993). Scientific foundations for the simulation of ecosystem function and management in FORCYTE-11. En *Forestry Canada* (Information Report NOR-X-328).
- Kimmins, J. P., Mailly, D., & Seely, B. (1999). Modelling forest ecosystem net primary production: the hybrid simulation approach used in FORECAST. En *Ecological Modelling* (Vol. 122). [www.elsevier.com/locate/ecolmodel](http://www.elsevier.com/locate/ecolmodel)
- Lo, Y.-H., Blanco, J. A., Seely, B., Welham, C., & (Hamish) Kimmins, J. P. (2011). Generating reliable meteorological data in mountainous areas with scarce presence of weather records: The performance of MTCLIM in interior British Columbia, Canada. *Environmental Modelling & Software*, 26(5), 644-657. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2010.11.005>
- Martinez del Castillo, E., Zang, C. S., Buras, A., Hackett-Pain, A., Esper, J., Serrano-Notivoli, R., Hartl, C., Weigel, R., Klesse, S., Resco de Dios, V., Scharnweber, T., Dorado-Liñán, I., van der Maaten-Theunissen, M., van der Maaten, E., Jump, A., Mikac, S., Banzragch, B. E., Beck, W., Cavin, L., ... de Luis, M. (2022). Climate-

- change-driven growth decline of European beech forests. *Communications Biology*, 5(1). <https://doi.org/10.1038/s42003-022-03107-3>
- Martinez Del Castillo, E., Zang, C. S., Buras, A., Hacket-Pain, A., Esper, J., Serrano-Notivoli, R., Hartl, C., Weigel, R., Klesse, S., Resco de Dios, V., Scharnweber, T., Dorado-Liñán, I., van der Maaten-Theunissen, M., van der Maaten, E., Jump, A., Mikac, S., Banzragch, B.-E., Beck, W., Cavin, L., ... de Luis, M. (2022). Climate-change-driven growth decline of European beech forests. *Communications biology*, 5(1), 163. <https://doi.org/10.1038/s42003-022-03107-3>
- Martínez-Vilalta, J., Aguadé, D., Banqué, M., Barba, J., Curiel Yuste, J., Galiano, L., García, N., Gómez, M., Hereş, A. M., López, B. C., Lloret, F., Poyatos, R., Retana, J., Sus, O., Vayreda, J., & Vilà-Cabrera, A. (2012). Las poblaciones ibéricas de pino albar ante el cambio climático: con la muerte en los talones. *Ecosistemas*, 21(3), 15-21. <https://doi.org/10.7818/ECOS.2012.21-3.03>
- METEOROLOGÍA Y CLIMATOLOGÍA DE NAVARRA (2022). Gobierno de Navarra [sitio web]. Datos tomados en diciembre de 2022. Enlace en: <http://meteo.navarra.es/estaciones/mapadeestaciones.cfm>
- NUEVOS ESCENARIOS DE EMISIÓN: RCPs, (2023). Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. Gobierno de España. [sitio web]. Consultado el 30 de abril de 2023. Enlace en: [http://www.oscc.gob.es/es/general/salud\\_cambio\\_climatico/Nuevos\\_escenarios\\_emision\\_RCPs.htm](http://www.oscc.gob.es/es/general/salud_cambio_climatico/Nuevos_escenarios_emision_RCPs.htm)
- OPCC. (2018). Informe Cambio Climático en los Pirineos.
- Rötzer, T., Liao, Y., Goergen, K., Schüler, G., & Pretzsch, H. (2013). Modelling the impact of climate change on the productivity and water-use efficiency of a central European beech forest. *Climate Research*, 58(1), 81-95. <https://doi.org/10.3354/cr01179>
- Running et al. (1987). Extrapolation of synoptic meteorological data in mountainous terrain and its use for simulating forest evapotranspiration and photosynthesis.
- Seely, B., Welham, C., & Scoullar, K. (2015). Application of a Hybrid Forest Growth Model to Evaluate Climate Change Impacts on Productivity, Nutrient Cycling and Mortality in a Montane Forest Ecosystem. *PloS one*, 10(8), e0135034. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0135034>