



Gipuzkoako
Foru Aldundia
Diputación Foral
de Gipuzkoa

MEJORA DE LA CAPACIDAD DE LOS BOSQUES DE GIPUZKOA COMO SUMIDEROS DE CARBONO

Proyecto de investigación e innovación en materia de mitigación y adaptación al cambio climático

Garazi Auzmendi

Autora: Garazi Auzmendi Arkarazo

Proyecto desarrollado dentro de la convocatoria de becas de 2018.

Objetivo de la beca: Proyecto de investigación e innovación en materia de mitigación y adaptación al cambio climático.

Departamento de Medio Ambiente y Obras Hidráulicas

Diputación Foral de Gipuzkoa

“La conservación de la Natura no impide el progreso, lo asegura.”

Joaquín Araujo



Resumen ejecutivo

El cambio climático afectará, aunque no por igual, a todas las regiones del planeta y sus impactos negativos no repercutirán únicamente en el medio ambiente, sino que también causará daños a las personas y a la economía. En este contexto, son cada vez más las políticas dirigidas a mitigar la crisis climática y a mejorar la adaptación a sus efectos. Los bosques, además de tener una enorme importancia en los ciclos de carbono mundiales, ofrecen muchos beneficios a la sociedad en forma de servicios ecosistémicos. Por ello, los ecosistemas forestales han despertado mucho interés en lo que respecta a la lucha contra el cambio climático.

Los árboles tienen capacidad para absorber y almacenar el carbono de la atmósfera. Este carácter de sumidero de carbono se debe a su acumulación en la biomasa forestal y a las reservas de carbono del suelo, ya que estas pueden almacenar el carbono sustraído de la atmósfera durante siglos. Por ese motivo, las estrategias de mitigación del cambio climático, tanto a nivel mundial como a nivel regional, proponen tomar medidas para mejorar la capacidad de los bosques como sumideros de carbono.

Según las estimaciones realizadas en este estudio, los bosques de Gipuzkoa tienen gran margen de mejora en lo que respecta al almacenamiento de carbono, dado que se ha comprobado que en la actualidad las existencias de carbono de la cobertura arbórea están lejos de su potencial. En lo que concierne a la biomasa forestal, la aplicación de prácticas dirigidas a favorecer los sumideros de carbono, produciría un aumento de las existencias de carbono almacenado de entre 54% y 207%. En cuanto a las reservas de carbono del suelo, una gestión apropiada posibilitaría incrementar un 249% sus reservas. Por lo tanto, y a pesar de que Gipuzkoa no tiene posibilidades de reforestar grandes extensiones (porque el 61% del territorio ya está cubierto por árboles), se concluye que tiene muchas opciones de mejorar la capacidad de los sumideros de carbono forestales mediante la incorporación de variables basadas en el cambio climático en la gestión forestal.

Entre las medidas más efectivas para aumentar las reservas de carbono están la recuperación de las especies arbóreas autóctonas y la naturalización de los ecosistemas forestales. Además de esto, para los casos en los que se quieran desarrollar explotaciones madereras, se han identificado una serie de medidas para reducir los daños que causan dichas intervenciones en las reservas de carbono, como por ejemplo, no eliminar toda la cubierta arbórea, reducir la intensidad de la explotación y tomar medidas para evitar la compactación y la erosión del suelo.

Estas medidas, además de aumentar la capacidad de los sumideros de carbono, también posibilitarían mejorar la capacidad que tienen tanto los ecosistemas forestales como todo el territorio de Gipuzkoa para adaptarse a las consecuencias del cambio climático. La aplicación de unas buenas prácticas en la gestión forestal favorecería la multifuncionalidad de estos ecosistemas. Puesto que, de cara a escenarios futuros, disminuirían los riesgos que tiene el territorio de Gipuzkoa de sufrir daños en sus recursos hídricos, erosión, deslizamientos de tierra, inundaciones, propagación de plagas y enfermedades que afecten a los árboles y disminución de biodiversidad.

Tan importante como tomar medidas para hacer frente a la crisis climática es el momento en que se ponen en marcha, porque se prevé que cuanto antes se inicien las acciones, el efecto de los impactos futuros será menor. Teniendo en cuenta los beneficios que acarrearía a toda Gipuzkoa la inclusión de criterios basados en el cambio climático en la gestión forestal, se considera imprescindible y urgente implementar políticas que estén en consonancia con el objetivo aludido.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. OBJETIVOS DEL PROYECTO.....	4
3. METODOLOGÍA DE TRABAJO.....	5
4. CONTRIBUCIÓN DE LOS BOSQUES FRENTE AL CAMBIO CLIMÁTICO.....	6
5. CARBONO ALMACENADO EN LOS BOSQUES DE GIPUZKOA	14
5.1. CARBONO ALMACENADO EN LA BIOMASA FORESTAL.....	14
5.1.1. NEIKER-TECNALIA (2014)	14
5.1.2. BASE DE DATOS COPERNICUS (2019)	21
5.1.3. CUARTO INVENTARIO FORESTAL NACIONAL (IFN4)	24
5.1.4. ANÁLISIS DE LAS ESTIMACIONES DE CARBONO DE LA BIOMASA FORESTAL.....	27
5.2. CARBONO ALMACENADO EN EL SUELO FORESTAL.....	28
5.2.1. BASE DE DATOS EUROPEA LUCAS.....	28
5.2.2. DATOS DE MUESTREOS DE LA CAPV (NEIKER-TECNALIA, 2014)	34
5.2.3. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LAS ESTIMACIONES DE CARBONO DEL SUELO FORESTAL.....	36
6. POTENCIAL DE ALMACENAMIENTO DE CARBONO DE LOS BOSQUES DE GIPUZKOA.....	38
6.1. POTENCIAL DE ALMACENAMIENTO DE CARBONO DE LA BIOMASA FORESTAL	38
6.2. POTENCIAL DE ALMACENAMIENTO DE CARBONO DEL SUELO FORESTAL.....	43
6.3. ANÁLISIS Y CONCLUSIONES DE LA CAPACIDAD Y POTENCIAL DE LOS SUMIDEROS FORESTALES	50
7. PRÁCTICAS DE GESTIÓN FORESTAL PARA FOMENTAR LOS SUMIDEROS DE CARBONO	52
7.1. DISTRIBUCIÓN DE LAS ESPECIES ARBÓREAS.....	52
7.2. EDAD, ESTRUCTURA Y MADERA MUERTA DE LOS BOSQUES	55
7.3. PROCESOS DE EXPLOTACIÓN.....	63
7.3.1. Procesos de preparación del suelo.....	63

7.3.2.	Influencia de las extracciones de madera sobre el COS	64
7.3.3.	Influencia de las extracciones de madera sobre la biomasa forestal.....	71
7.4.	INCENDIOS FORESTALES	75
8.	MEJORAR LA CAPACIDAD DE ADAPTACIÓN Y RESILIENCIA DE LOS BOSQUES..	78
8.1.	NECESIDAD DE MEJORAR LA CAPACIDAD DE ADAPTACIÓN Y LA RESILIENCIA.....	78
8.1.1.	CAMBIOS PREVISTOS EN LA TEMPERATURA.....	78
8.1.2.	CAMBIOS PREVISTOS EN LA PRECIPITACIÓN	78
8.1.3.	CAMBIOS PREVISTOS EN LA EVAPOTRANSPIRACIÓN	79
8.1.4.	IMPACTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN GIPUZKOA.....	79
8.1.5.	MEJORAR LA RESILIENCIA Y LA CAPACIDAD DE ADAPTACIÓN A NUEVOS ESCENARIOS	81
8.2.	OPORTUNIDADES DE MEJORAR LA ADAPTACIÓN Y RESILIENCIA DE LOS BOSQUES	82
9.	OTROS BENEFICIOS DERIVADOS DE LAS PRÁCTICAS BASADAS EN EL CAMBIO CLIMÁTICO.....	88
10.	CONCLUSIONES Y PROSPECTIVA.....	94
11.	BIBLIOGRAFÍA.....	98
	ANEXOS	106
I.	PRIMER ANEXO.....	107
	ABREVIATURAS, UNIDADES Y GLOSARIO.....	107
	Abreviaturas	107
	Unidades	108
	Glosario.....	109
II.	SEGUNDO ANEXO.....	113
	DENSIDAD DE LOS FRAGMENTOS DE ROCA.....	113
III.	TERCER ANEXO	114
	CRITERIOS DE ANÁLISIS LITOLÓGICO.....	114

1. INTRODUCCIÓN

Hoy en día, el cambio climático antropogénico es un hecho reconocido a nivel mundial y son muchos los programas y las organizaciones que se han creado para analizar y tratar de minimizar sus efectos, tanto a nivel nacional como internacional (IPCC, UNFCCC, AEMA, CCPCC, etc.).

En el año 1988 la Organización Meteorológica Mundial (*World Meteorological Organization*, WMO) y el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (*United Nations Environment Programme*, UNEP) crearon el Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (*Intergovernmental Panel on Climate Change*, IPCC). Este último reúne, analiza y difunde información sobre el cambio climático y constituye un órgano de referencia a nivel mundial.

En 1992, viendo que el cambio climático era una realidad, surgió una preocupación. De hecho, 189 países, incluyendo los de la Unión Europea y los Estados Unidos de América, se unieron a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (*United Nations Framework Convention on Climate Change*, UNFCCC). El objetivo de esta era analizar qué había que hacer para disminuir el calentamiento de la atmósfera e implementar medidas para hacer frente a los incrementos de temperatura.

Cuando en 2005 se puso en vigor el Protocolo de Kyoto, los gobiernos tomaron fuertes medidas contra el cambio climático que eran jurídicamente vinculantes para 128 estados de todo el mundo.

Por encargo del entonces primer ministro del Reino Unido Tony Blair, el economista N. Stern publicó un informe (conocido como Informe Stern) que tuvo una gran influencia en los medios de todo el mundo. Este informe analizó por primera vez la economía del cambio climático. Stern indicaba que no poner medios para frenar el cambio climático acarreará problemas de abastecimiento de agua y de producción de alimentos, lo que derivará en un aumento de las hambrunas, junto con daños para la salud y el medio ambiente (Stern, 2007). Además de esto, preveía que para el año 2050 el Producto Interior Bruto (PIB) mundial habrá bajado un 5-20% y que existirán más de 200 millones de refugiados. Este economista también defendía que invertir un 1% de PIB actual sería suficiente para hacer frente al problema del cambio climático (Stern, 2007).

De cara a cumplir los objetivos marcados en el Acuerdo de París de 2015, UNFCCC (s.f.) subrayó la necesidad de emprender acciones más fuertes y profundas por parte de los gobiernos. De la misma forma, ponía de relieve el papel que pueden jugar los distintos agentes

(gobiernos, empresas, inversores, ciudadanos, regiones, etc.), impulsando que cada cual trabaje de forma eficiente en su respectivo campo.

Del mismo modo, están en marcha las estrategias de la Comisión Europea para disminuir la concentración de los gases de efecto invernadero, de forma que se han fijado unos objetivos para los años 2020, 2030 y 2050 (European Commission, s.f.). En este sentido, se han propuesto unas estrategias y acciones que los estados miembros deben fomentar en distintos ámbitos. Siendo esto así, tanto la legislación estatal como la autonómica están siendo desarrolladas en la misma línea.

Por esa razón y con el fin de tener un plan unificado de lucha contra el cambio climático para todo el territorio, el Gobierno Vasco ha definido la estrategia Clima 2050 para la Comunidad Autónoma del País Vasco (Gobierno Vasco, 2015). Siguiendo esta misma dinámica, en Gipuzkoa se ha puesto en marcha la Estrategia Guipuzcoana de Lucha Contra el Cambio Climático 2050 (Diputación Foral de Gipuzkoa, 2018). En ella se definen los criterios, objetivos, prácticas y acciones para tratar de hacer frente al cambio climático desde distintos sectores y ámbitos. Entre ellos, se establece el objetivo de analizar la capacidad de los sumideros de carbono (Diputación Foral de Gipuzkoa, 2018) y tratar de aumentar sus reservas (Gobierno Vasco, 2015).

Entre los distintos sectores o ámbitos que se consideran dentro de la lucha contra el cambio climático, la gestión rural cumple un papel importante, de forma que tanto en la legislación europea como en la estatal se reconoce el potencial y la necesidad de implicación del mismo. La propuesta de reglamento del Parlamento Europeo y del Consejo COM(2016) 479 indica que es imprescindible el uso del suelo y los bosques para cumplir con los objetivos de mitigación a largo plazo. Del mismo modo, organismos como la Comisión Europea (European Commission, s.f.) y el IPCC (IPCC, 2000) defienden el potencial de este sector.

Hoy en día, los bosques y los terrenos destinados a la agricultura constituyen las tres cuartas partes del territorio europeo, los cuales fijan una cantidad de carbono muy elevada y evitan que esta vuelva a la atmósfera. Por ejemplo, en Europa los bosques absorben el 10% de las emisiones de gases de efecto invernadero. Por lo tanto, el uso de la tierra y de los bosques (considerando la tierra, los árboles, las plantas, la biomasa y la madera) pueden contribuir a una política climática fuerte. Así, en la lucha contra el cambio climático se cree imprescindible la participación e implicación del sector de Uso de la Tierra, Cambio de Uso de la Tierra y Silvicultura (*Land Use, Land-Use Change and Forestry*, LULUCF).

De la misma forma, además de hacer frente al cambio climático, una gestión sostenible del medio rural posibilitaría la conservación de la biodiversidad y los recursos hídricos. Asimismo,

junto con los beneficios medioambientales, acarrearía beneficios para la sociedad y la economía (IPCC, 2000; Bonan, 2008).

2. OBJETIVOS DEL PROYECTO

A raíz de la responsabilidad que tiene el territorio de Gipuzkoa en este reto global de mitigación y adaptación contra el cambio climático, se pretende estudiar la aportación que puedan hacer los ecosistemas forestales en este sentido.

A la hora de definir los objetivos del proyecto, se ha considerado importante que estos sean coherentes con los objetivos y criterios de los documentos “Estrategia guipuzcoana de lucha contra el Cambio Climático 2050” y “Estrategia de Cambio Climático 2050 del País Vasco”. De esta forma, se pretende realizar una propuesta constructiva acorde a las políticas territoriales, el cual dará pie a conocer mejor las alternativas y posibilidades que tiene Gipuzkoa frente al cambio climático.

Así, se definen los siguientes objetivos de proyecto:

- O.1. Calcular la cantidad de carbono que almacenan en la actualidad las superficies forestales de Gipuzkoa.
- O.2. Calcular el potencial de almacenamiento de carbono de los bosques de Gipuzkoa.
- O.3. Estudiar las posibilidades que existen para fijar carbono en los bosques de Gipuzkoa.
- O.4. Identificar medidas que promuevan el aumento de la capacidad de almacenamiento de carbono de los bosques de Gipuzkoa.
- O.5. Plantear variables basadas en el cambio climático para la gestión forestal de Gipuzkoa.
- O.6. Analizar las posibles prácticas que se podrían llevar a cabo con el fin de conservar (o aumentar) la capacidad de almacenamiento de los sumideros actuales.
- O.7. Estudiar las medidas para mejorar la resiliencia frente al cambio climático de los bosques de Gipuzkoa.

3. METODOLOGÍA DE TRABAJO

Para el desarrollo de este proyecto se ha seguido un procedimiento de trabajo basado en diversas fuentes bibliográficas. En lo que respecta al contenido del trabajo, se pueden diferenciar dos partes:

- I. **Análisis cuantitativo:** Estimaciones de la capacidad y del potencial de los bosques de Gipuzkoa como sumideros de carbono.

Dado que en el presente trabajo no se ha desarrollado ningún estudio empírico, las estimaciones se han basado en datos obtenidos a partir de diversas fuentes de información. El desarrollo de los cálculos se ha realizado empleando dos herramientas principales:

- I.a. Hojas de cálculo: Se ha empleado el *software* Microsoft Excel para tratar los datos obtenidos de las fuentes bibliográficas y realizar los cálculos necesarios.
- I.b. Sistema de Información Geográfica: El tratamiento de información en forma de capas ráster y capas vectoriales, y la obtención de la información necesaria de las mismas, se ha desarrollado mediante el *software* QGIS 3.4.3. En algunos casos QGIS ha servido para obtener mapas que proporcionen información visual para el proyecto. En otros casos, se ha empleado para obtener información cuantitativa que posteriormente ha sido tratada mediante las hojas de cálculo.

- II. **Análisis cualitativo:** Identificación de las variables y prácticas para aumentar la capacidad que tienen los bosques de Gipuzkoa como sumideros de carbono; analizar las variables para mejorar la resiliencia y la adaptación de los bosques de Gipuzkoa.

El análisis cualitativo se ha basado en la consulta de diversas fuentes bibliográficas, de forma que se ha tratado de identificar prácticas y variables que puedan resultar de interés para el territorio de Gipuzkoa.

4. CONTRIBUCIÓN DE LOS BOSQUES FRENTE AL CAMBIO CLIMÁTICO

El almacenamiento de carbono de los bosques es clave en lo que respecta a los sumideros de CO₂ y puede contribuir a mitigar el cambio climático (Ruiz-Peinado, Bravo-Oviedo, López-Senespleda, Bravo y del Río, 2017). Si se observan los datos de la Tabla 1, salta a la vista la importancia que tiene la capacidad de almacenamiento de los bosques en las reservas de carbono mundiales, dado que el 79% de las existencias de carbono se encuentran en los bosques.

Tabla 1: Capacidad como sumideros de carbono de distintos biomas a nivel mundial. Fuente: Lal, 2005.

Bioma	Superficie (Mha)	Densidad de C (t/ha)			Reservas de C (Pg)		
		Vegetación	Suelo	Total	Vegetación	Suelo	Total
Tundra	927	9	105	114	8	97	105
Boreal/Taiga	1.372	64	343	407	88	471	559
Templado	1.038	57	96	153	59	100	159
Tropical	1.755	121	123	244	212	216	428
Humedales	280	20	723	743	6	202	208
Media:		54	189				
Total:	5.672				373	1.086	1.459

Las plantas absorben el CO₂ de la atmósfera mediante la fotosíntesis (Figura 1) y este carbono se fija en la estructura de biomasa de las mismas (Ruiz-Peinado et al., 2017). Según Prentice (2001), aproximadamente la mitad de la producción primaria bruta (GPP, *Gross Primary Production*) es devuelta a la atmósfera a través de la respiración de las plantas; el resto (producción primaria neta (NPP, *Net Primary Production*)), se equilibra mediante la respiración heterótrofa. Como consecuencia del envejecimiento de las fibras vegetales, la mayor parte de la NPP se convierte en detritos; algunos de los cuales se descomponen rápidamente (volviendo a la atmósfera en forma de CO₂), pero otros, por su parte, junto con materiales creados por otros seres vivos, y a raíz de una descomposición parcial, se convierten en carbono orgánico (FAO, 2018; Prentice, 2001). El carbono orgánico del suelo (COS) es el principal componente de la materia orgánica del suelo (MOS) y es imprescindible para equilibrar la estructura del suelo y para la retención y liberación de nutrientes vegetales, así como para la filtración y retención de agua (FAO, 2018). Por si esto fuera poco, el COS es clave en el ciclo global del carbono formado por la atmósfera, la vegetación, el suelo, los ríos y los océanos (FAO, 2018).

Una parte de este carbono orgánico puede pasar al sistema hídrico a causa de la erosión o en forma de carbono orgánico disuelto (DOC), o también puede ser transportado a otras zonas rurales. Ambas posibilidades acarrearán una pérdida de carbono orgánico del ecosistema y, por lo tanto, en cierta medida, una degradación del suelo (FAO, 2018).

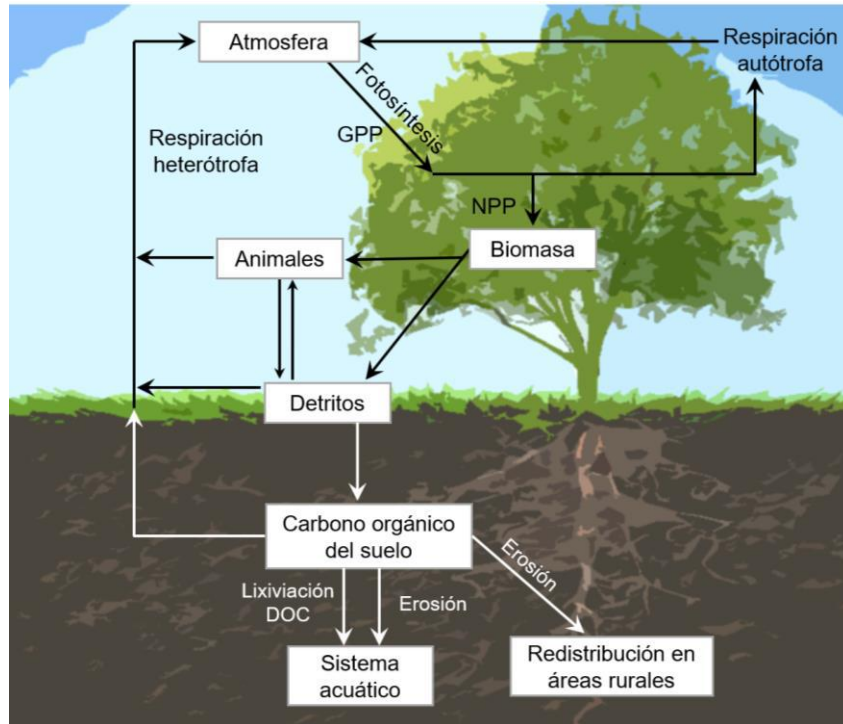


Figura 1: Ciclo del carbono. GPP: Producción primaria bruta (*Gross Primary Production*); NPP: Producción primaria neta (*Net Primary Production*); DOC: Carbono orgánico disuelto (*Dissolved Organic Carbon*). Fuente: Elaborado a partir de FAO (2018), Lal (2004) y Prentice (2001).

De esta forma, mediante los procesos de fotosíntesis, respiración, descomposición y combustión, el carbono se intercambia de forma natural entre distintos sistemas y la atmósfera. Así, mediante las prácticas de LULUCF (uso de la tierra, cambio de uso de la tierra y silvicultura) el ser humano influye tanto en las reservas de carbono como en los procesos de intercambio del mismo (IPCC, 2000).

En lo que respecta a los ecosistemas forestales, existen dos reservas de carbono principales: la biomasa forestal y el suelo, este último creado sobre todo a partir de la descomposición de la hojarasca y los rizomas (Ruiz-Peinado et al., 2017). La madera muerta también puede llegar a almacenar grandes cantidades de carbono en ciertos bosques, en cuyo caso también habría que considerar su contribución, ya que además de constituir una reserva de carbono significativa, las políticas actuales de biodiversidad fomentan el aumento de la cantidad de madera muerta (Ruiz-Peinado et al., 2017). De todas formas, la cantidad de madera muerta presente en los bosques gestionados suele ser notablemente inferior si se compara con la que se encuentra en los bosques maduros y sin gestionar. Esto se debe a que en los bosques gestionados las existencias de madera de gran tamaño son extraídas, por lo que en estos

casos la madera muerta se limita a ramas, ramillas o tocones y el número de troncos largos suele ser muy limitado (Christensen et al., 2005). Mientras que, en un bosque maduro, el 22% del volumen de madera total puede estar formado por madera muerta (Commarmot, Brändli, Hamor eta Lavnyy, 2013), a partir de los datos de Figura 2 se ha calculado una media ponderada de 6,3% para el caso de la Comunidad Autónoma del País Vasco (CAPV). De esta información se deduce que la cantidad de madera muerta presente en los bosques de Gipuzkoa es bastante limitada, y, por lo tanto, para el desarrollo de este estudio solamente se considerarán las reservas de biomasa y suelo.

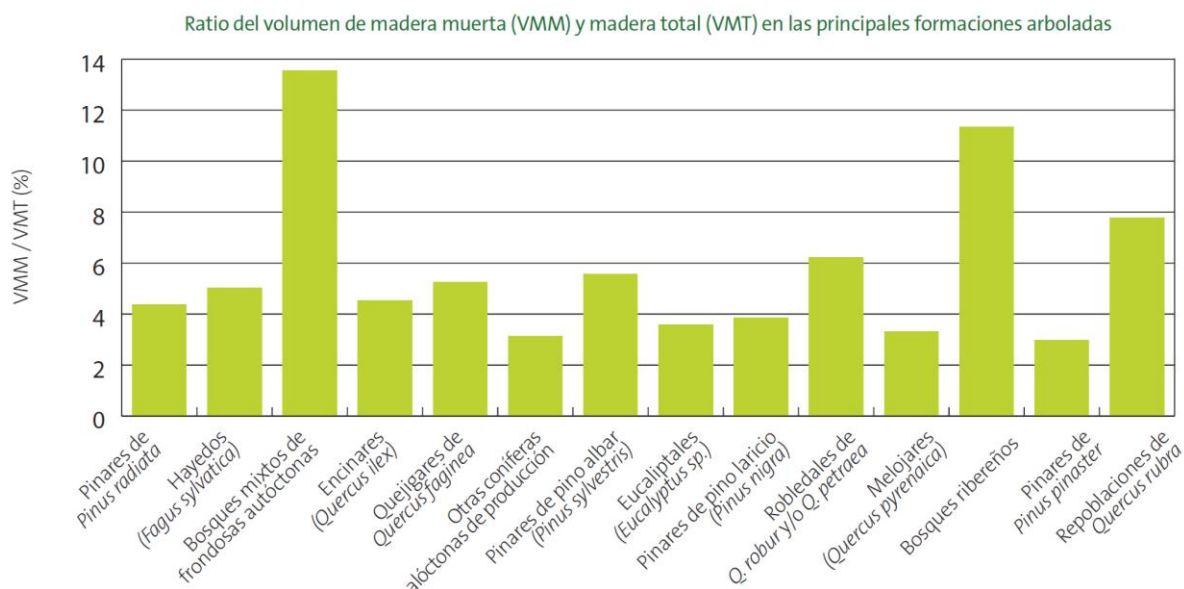


Figura 2: Ratio del volumen de madera muerta (VMM) y madera total (VMT) en las principales formaciones arboladas. Fuente: Cuarto Inventario Forestal Nacional (2013).

Son muchos los investigadores que han realizado estimaciones sobre la capacidad de absorción de carbono que tienen los bosques a nivel global (Ruiz-Peinado et al., 2017). En la Tabla 2 se presentan los resultados de algunas estimaciones de Prentice (2001).

Tabla 2: Estimaciones de las reservas terrestres y la producción primaria neta. Fuente: Prentice (2001).

Bioma	Superficie (Mha)	Sumidero de carbono (Pg)			Densidad de C (t/ha)		NPP* (Pg/año)
		Vegetación	Suelo	Total	Vegetación	Suelo	
Bosque tropical	1,75	340	213	553	194	122	21,9
Bosque templado	1,04	139	153	292	134	147	8,1
Bosque boreal	1,37	57	338	395	42	247	2,6
Total:	4,16	536	704	1.240	-	-	32,6

*Producción primaria neta (*Net Primary Production*, NPP)

Según Pan et al. (2011), las reservas de carbono de los bosques del mundo eran de 861 Pg en 2011, donde el 44% se almacenaba en el primer metro del suelo, el 42% en la biomasa, 8% en madera muerta y 5% en hojarasca. Según ese mismo estudio el almacenamiento anual

neto es de $1,1 \pm 0,8$ Pg C/año. Se considera que en 2015 la quema de combustibles fósiles y los procesos industriales emitieron 9.7 Pg C/año, por lo que se deduce que la absorción neta de los bosques compensó el 11% de las emisiones de CO₂ (Ruiz-Peinado et al., 2017).

La biomasa de las plantas y los árboles posibilita almacenar carbono tanto en el aire (tronco, ramas y hojas) como bajo tierra (raíces), de forma que su capacidad de secuestro estará condicionada por factores bióticos y abióticos. En lo que respecta a los factores bióticos, se encuentran el tipo de gestión que desarrolla el ser humano en esa zona (clareos, prácticas de explotación maderera, perturbaciones causadas por la maquinaria, etc.) y las características propias de la vegetación (especie de árbol, origen, etc.). En cuanto a los factores abióticos, influirán aspectos como el clima, el suelo o la orografía (Neiker-Tecnalia, 2014). Unido a esto, dependiendo de las características de cada especie la distribución de la biomasa y la densidad de carbono serán diferentes (Tabla 3).

Tabla 3: Características de biomasa de distintas especies. Fuente: Neiker-Tecnalia (2014).

Agrupación	Factor de expansión	Distribución de biomasa	Densidad	Concentración de C
	T aérea/t fuste	T raíces/t aérea	t MS ¹ /m ³	(t C/t MS ¹)
<i>Pinus nigra</i>	1,50	0,25	0,40	0,51
<i>Pinus radiata</i>	1,20	0,25	0,38	0,51
<i>Pinus sylvestris</i>	1,40	0,27	0,42	0,51
<i>Pinus halepensis</i>	1,40	0,30	0,40	0,51
<i>Quercus ilex</i>	1,60	0,37	0,58	0,48
<i>Fagus sylvatica</i>	1,40	0,18	0,58	0,48
<i>Quercus robur</i>	1,50	0,28	0,58	0,48
<i>Eucalyptus spp.</i>	1,40	0,28	0,58	0,48
<i>Quercus faginea</i>	1,50	0,28	0,58	0,48

¹ MS: materia seca.

Cuando esta biomasa es afectada por una perturbación, cuyo origen puede residir en la acción humana o en factores naturales, sus reservas de carbono pueden verse afectadas (Harmon, 2001; Lal, 2005; Luysaert et al., 2008; Nunery y Keeton, 2010; Schulze et al., 2000). Por eso, de cara a aumentar la capacidad de los sumideros de carbono es importante minimizar los sucesos que afectan de forma negativa a los mismos o disminuir su intensidad (Nunery y Keeton, 2010).

Dado que las reservas de materia orgánica del suelo pueden emitir o fijar CO₂ de la atmósfera, la capacidad que tiene estas para fijar y estabilizar el carbono orgánico está despertando mucho interés (Llorente, Glaser y Turrión, 2010). Además, hay que tener en cuenta que el suelo es la mayor reserva de carbono orgánico de la biosfera, ya que almacena más carbono

que la vegetación y la atmósfera en su conjunto (Lal, 2004; Schlesinger, 1977). Por lo tanto, conocer la distribución del carbono orgánico del suelo y la influencia que pueda tener el cambio de vegetación sobre el mismo, condicionarán la capacidad que tenemos para prever y reducir las consecuencias del cambio climático (Doblas-Miranda et al., 2013; Jobbágy y Jackson, 2000).

Existen muchos factores que afectan al carbono orgánico del suelo (COS), como, por ejemplo: el tipo y la estructura del suelo, sustrato geológico, tasa de precipitación, temperatura, humedad, cobertura actual e histórica del suelo, altitud, pendiente y prácticas de gestión (Doblas-Miranda et al., 2013). La mayor relación entre el COS y la tasa de precipitación y temperatura se da en el intervalo 0-20 cm, de forma que esta va disminuyendo conforme va aumentando la profundidad. Por el contrario, la correlación entre el carbono orgánico del suelo y las arcillas aumenta con la profundidad (Jobbágy y Jackson, 2000).

La biomasa aérea de los bosques supone un aporte importante de carbono para el suelo, lo que posibilita la acumulación de carbono orgánico en la superficie del suelo (Jobbágy y Jackson, 2000). Tal y como se puede apreciar en la Figura 3, el almacenamiento de carbono de los ecosistemas forestales se divide en distintos componentes (Lal, 2005).

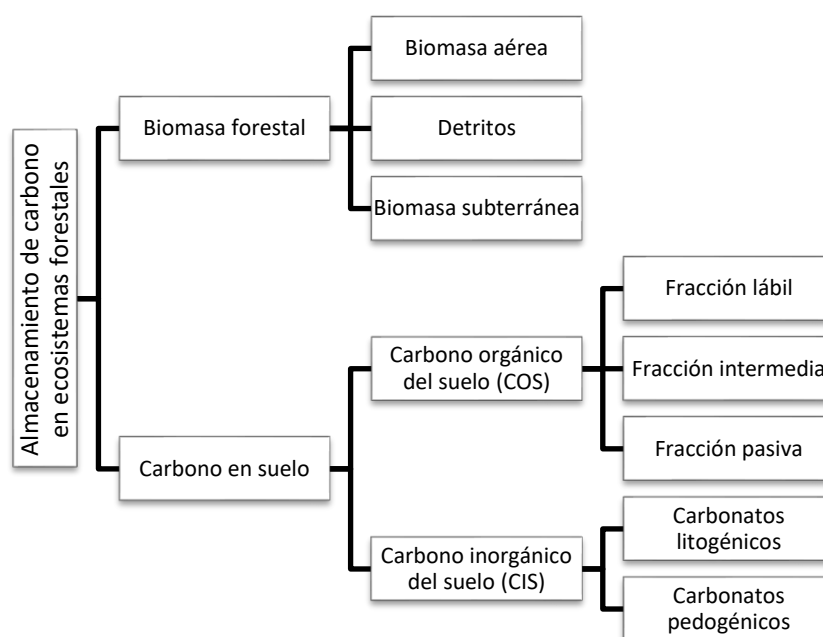


Figura 3: Componentes de las reservas forestales. Fuente: Lal (2005).

Por todo ello, el suelo forestal juega un papel fundamental dentro del ciclo global del carbono (Lal, 2005), pero el cambio climático puede ocasionar pérdidas significativas en estas reservas (Doblas-Miranda et al., 2013). Según Lal (2005), la disminución de las existencias de carbono puede deberse a diversos factores, como, por ejemplo, la reducción de la biomasa aérea o subterránea que vuelve al suelo, cambios en los regímenes de temperatura y precipitación

que aceleran la descomposición de la materia orgánica, perturbaciones ocasionadas por la agricultura u otras explotaciones, disminución de los agregados del suelo, agresiones a la protección física del suelo y la erosión.

Es importante conocer los mecanismos y los factores de las dinámicas del COS para poder identificar y fomentar los sumideros de carbono y de esta forma, conseguir mitigar el cambio climático (Lal, 2005). Por ese motivo, para evaluar el COS no es suficiente con conocer el uso del suelo o los valores medios correspondientes a cada tipo de suelo; la influencia que tienen el clima, la topografía y los modelos de gestión también deberían ser considerados en las estimaciones (Doblas-Miranda et al., 2013). En la misma línea, muchos investigadores reivindican que para prever los cambios en el COS con mayor precisión es necesario desarrollar estudios empíricos que ayuden a comprender mejor los procesos biológicos y físicos que afectan al mismo (Doblas-Miranda et al., 2013; Post y Kwon, 2000).

La concentración del COS es variable en función de la profundidad del suelo; como se puede observar en la Figura 4, se estima que el 50% del COS presente en el primer metro de profundidad se concentra en los primeros 20 cm (Jobbágy y Jackson, 2000). Según Chiti, Díaz-Pinés y Rubio (2012), la cantidad del COS que se concentra en el intervalo 0-30 cm es del 55% en las coníferas y del 58% en las frondosas.

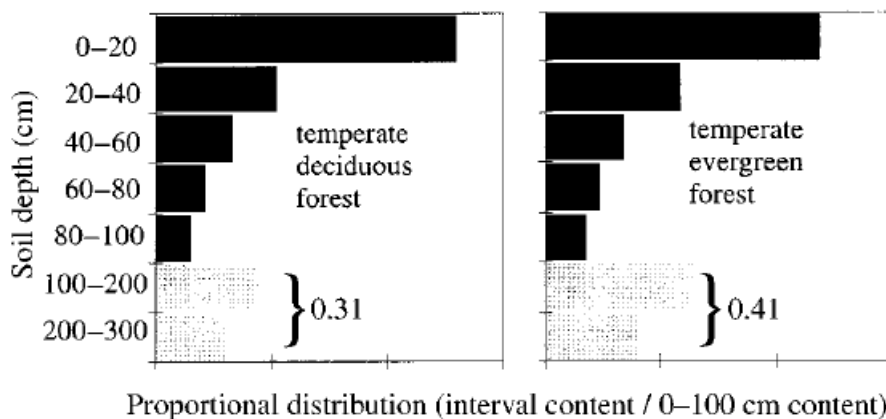


Figura 4: Distribución vertical del COS en bosques templados de hoja caduca (izq.) y hoja perenne (dcha.).
Fuente: Jobbágy y Jackson (2000).

Considerando la capacidad como sumideros de carbono de todos los biomas forestales del mundo, el 37% del carbono se almacena en bosques situados en latitudes bajas, el 14% en latitudes medias y el 49% en latitudes altas (Lal, 2005). En el caso de los bosques templados, la densidad de carbono de la vegetación variará entre 60 y 130 t C/ha. De todas formas, hay que tener en cuenta que dos tercios de todo el carbono que almacenan los bosques a nivel mundial se encuentran en el suelo (Lal, 2005). Se estima que en los bosques templados las

reservas del suelo constituyen el 60% de la cantidad total de carbono almacenado (Dixon et al., 1994).

Entre 1990 y 2015 la cobertura forestal mundial ha disminuido en 129×10^6 ha, sobre todo como consecuencia de la deforestación de las selvas tropicales (FAO, 2015). A pesar de que el ritmo de estas deforestaciones se ha ralentizado, la superficie forestal sigue reduciéndose (FAO, 2015). Mientras que estas deforestaciones implican unas emisiones anuales de 1,6-1,7 Pg C a la atmósfera (alrededor del 20% de las emisiones antropogénicas), se considera que los bosques boreales y templados siguen almacenando carbono, siendo de $0,7 \pm 0,2$ Pg C el carbono fijado anualmente por los bosques templados (Lal, 2005).

Según el IPCC (2014c), sin nuevas políticas de mitigación las emisiones de gases de efecto invernadero aumentarán en todos los sectores excepto en la agricultura, silvicultura y otros usos del suelo (sector AFOLU: *Agriculture, Forestry and Other Land Use*). Esta disminución de las emisiones del sector AFOLU se deberá a la disminución de la deforestación y se prevé que para finales de siglo las absorciones de CO₂ de este sector serán superiores a las emisiones (IPCC, 2014c). Por eso, AFOLU será clave en la estrategia contra el cambio climático. En lo que respecta a la silvicultura, la mejor relación coste-efectividad reside en favorecer la reforestación y promover una gestión forestal sostenible (IPCC, 2014c).

Tradicionalmente el objetivo principal de la gestión forestal de la Comunidad Autónoma del País Vasco (CAPV) ha sido el de aumentar la rentabilidad económica, pero en el contexto actual se cree necesario un planteamiento donde los objetivos de gestión también se dirijan a mejorar el almacenamiento de carbono de los bosques (Neiker-Tecnalia, 2014). Según este mismo estudio, casi toda la superficie forestal estudiada en Bizkaia está un 60% por debajo de su capacidad de almacenamiento, y, además, de los sistemas forestales analizados en la vertiente atlántica, solo el 5% estaría cerca de su límite de saturación. Por todo ello, y considerando que más de la mitad (54%) de la CAPV está cubierta de bosque (IF-2018), se concluye que la gestión forestal de CAPV tiene un gran potencial, ya que una gestión adecuada puede aumentar y promover el almacenamiento de carbono en los bosques y el suelo (Neiker-Tecnalia, 2014). En el mismo sentido, las estrategias de lucha contra el cambio climático publicadas por el Gobierno Vasco (2015) y la Diputación Foral de Gipuzkoa (2018), "*Estrategia de Cambio Climático 2050 del País Vasco*" y "*Estrategia Guipuzcoana de Lucha Contra el Cambio Climático 2050*", respectivamente, definen el objetivo de fomentar la capacidad que tienen los bosques como sumideros de carbono, tanto a nivel de comunidad como de provincia.

Para ello se considera indispensable una ciencia interdisciplinar que conozca de forma integral los servicios climáticos de los bosques y los cambios globales, de forma que se identifiquen y

comprendan las retroactividades aún desconocidas que afectan a la Tierra, para así conocer el potencial que tienen los bosques para mitigar el cambio climático (Bonan, 2008).

Además, no se puede olvidar que las estrategias dirigidas a aumentar el almacenamiento de carbono de los bosques y el suelo, proporcionaría beneficios significativos en otros aspectos (Rodríguez-Loinaz, Amezaga y Onaindia, 2013). Por ejemplo, las gestiones forestales y agrícolas sostenibles favorecerán la mejora de la calidad del agua y del suelo, y en general, de toda la zona rural. Esto, a su vez, traerá beneficios indirectos para las medidas de adaptación contra el cambio climático (Neiker-Tecnalia, 2014).

Asimismo, también hay que considerar que el propio cambio climático afectará directamente a los bosques, ya que se prevén cambios en los regímenes de precipitación y temperatura (Gobierno Vasco, 2016). Entre otros aspectos, en este estudio se mencionan algunas de las consecuencias que puede acarrear el cambio climático a nuestros bosques, como por ejemplo: la disminución de las posibilidades de supervivencia de los bosques y las especies forestales autóctonas, cambios en los periodos vegetativos, efectos negativos para los ecosistemas forestales, variaciones en la conducta de insectos pudiendo convertirse en amenazas para el bienestar del bosque (plagas, etc.), aumento del estrés climático de los bosques, disminución de la supervivencia de los árboles jóvenes, etc. (Herrero, 2017). Por eso, se subraya la importancia de estudiar la vulnerabilidad, sensibilidad y la capacidad de adaptación de los bosques.

En cualquier caso, a pesar de la capacidad que tienen los bosques y el suelo para almacenar carbono, y, por lo tanto, el papel que puedan jugar como recurso potencial para hacer frente al cambio climático, no se debe olvidar que la gestión de estos ecosistemas no debe centrarse únicamente en aumentar las reservas de carbono (Díaz, Hector y Wardle, 2009; IPCC, 2014c; Rodríguez-Loinaz et al., 2013). Es decir, a la hora de plantear las estrategias de gestión de un ecosistema, es preciso tener en cuenta todos los aspectos relacionados con los servicios ecosistémicos y la biodiversidad, dando lugar a una gestión integral (Burrascano et al., 2016).

De la misma forma, es preciso mencionar que las medidas para fomentar el almacenamiento de carbono de los bosques proporcionarían otros beneficios para el medio ambiente y la sociedad, como, por ejemplo, la protección del agua potable y del aire que respiramos, suavizar el problema de inundaciones y disminuir la erosión (Aizpuru, 2017).

5. CARBONO ALMACENADO EN LOS BOSQUES DE GIPUZKOA

Tal y como se ha mencionado anteriormente, a la hora de analizar la capacidad que tienen los bosques de Gipuzkoa como sumideros de carbono, se considerarán dos reservas principales: la biomasa forestal y el suelo. Dado que las estimaciones correspondientes a cada reserva se realizan en base a distintos procedimientos, estos se desarrollarán en apartados diferentes.

5.1. CARBONO ALMACENADO EN LA BIOMASA FORESTAL

En este apartado se realizan las estimaciones para conocer la capacidad actual que tiene la biomasa forestal de Gipuzkoa como sumideros de carbono, considerando tanto la biomasa aérea como las raíces que se encuentran bajo tierra:

5.1.1. NEIKER-TECNALIA (2014)

A la hora de plantear estas estimaciones se han empleado dos fuentes de información como ejes fundamentales:

- El trabajo “*Sumideros de Carbono de la Comunidad Autónoma del País Vasco. Capacidad de secuestro y medidas para su promoción*” publicado por Neiker-Tecnalia en 2014.
- El inventario forestal de la CAPV de 2018 realizado por el Gobierno Vasco (IF-2018).

La metodología para calcular la cantidad de carbono que almacena la biomasa y las características propias de cada especie se han obtenido del estudio Neiker-Tecnalia (2014). Por otra parte, los datos de la superficie que cubre cada especie arbórea, se han deducido del inventario forestal de la CAPV de 2018.

El planteamiento de los cálculos se ha desarrollado siguiendo el proceso que se muestra en la Figura 5, el cual está basado en el trabajo Neiker-Tecnalia (2014). Antes de nada, las especies arbóreas presentes en los bosques de Gipuzkoa se han clasificado en diversas agrupaciones. A continuación, conociendo la capacidad que tiene cada agrupación para almacenar carbono y la superficie que cubren las mismas, se ha estimado la cantidad de carbono que almacena hoy en día la cobertura forestal correspondiente a cada agrupación. Para finalizar, y con el fin de conocer la capacidad total de los bosques de Gipuzkoa como sumideros de carbono, se han sumado todos los valores correspondientes a las agrupaciones.

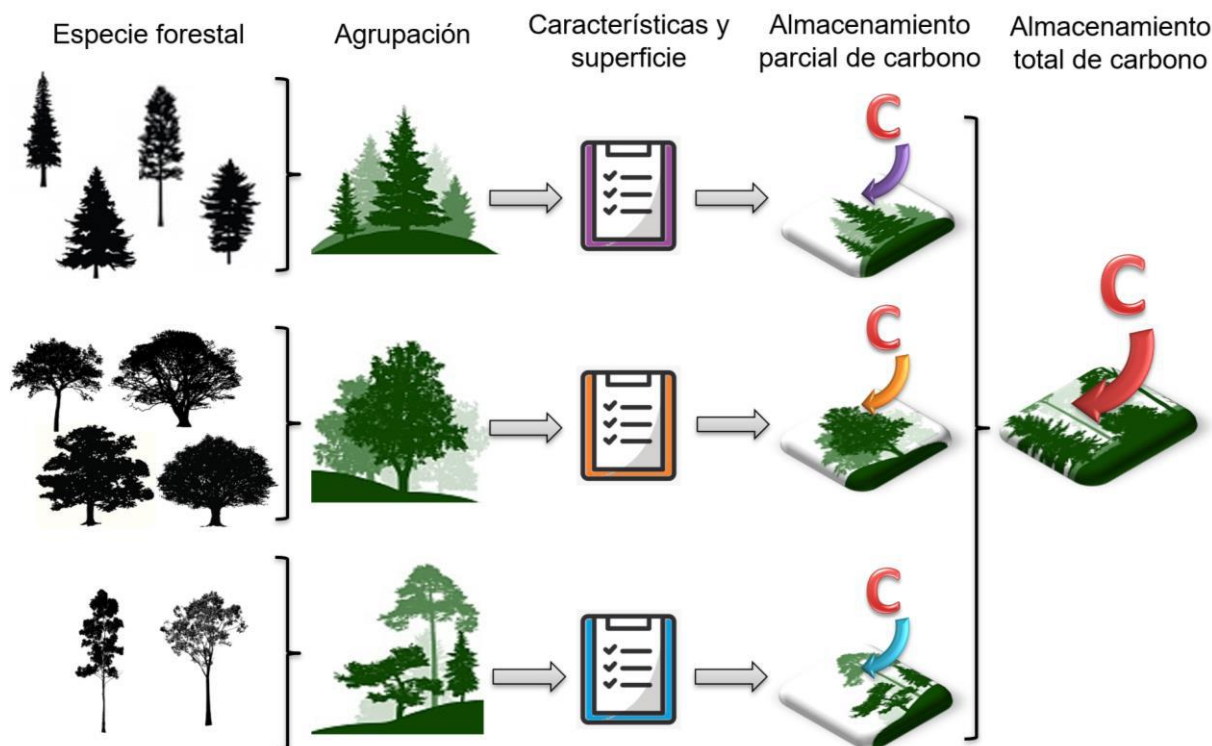


Figura 5: Planteamiento para las estimaciones del carbono almacenado en la biomasa forestal.

Para el desarrollo de este proceso se han tenido que hacer ciertas simplificaciones, por lo que se han considerado las siguientes tres asunciones (Neiker-Tecnalia, 2014):

1) Tasas de crecimiento esperadas y turnos de corta:

Las condiciones particulares del lugar inciden de forma significativa sobre la productividad forestal. Las tasas de crecimiento y los turnos de corta empleados en este estudio corresponden a los valores generales considerados para la CAPV (Tablas 6 y 7). Estos valores se han obtenido a partir de los datos proporcionados por la Confederación de Forestalistas del País Vasco (www.basoa.org) que se han complementado mediante la información disponible en fuentes bibliográficas próximas geográficamente (Neiker-Tecnalia, 2014).

2) Distribución de especies forestales:

En vez de trabajar con características propias de cada especie arbórea, estos se han dividido en distintas agrupaciones (Tabla 5). Por lo tanto, las tasas de crecimiento y los turnos de corta no corresponden a cada especie, sino a cada agrupación. A la hora de clasificar las distintas especies, se han seguido los mismos criterios marcados por Neiker-Tecnalia (2014), sin hacer ninguna excepción.

Para definir la cobertura que tiene cada agrupación en el territorio de Gipuzkoa, se han empleado los datos del inventario forestal del año 2018. Sumando la superficie que cubren

las especies que forman cada agrupación, se ha deducido la superficie total correspondiente a cada agrupación (Tablas 4 y 5).

3) Curva de crecimiento y sostenibilidad en el tiempo:

El crecimiento de los árboles en el tiempo no es lineal, de forma que estos se expresan mediante curvas de incrementos decrecientes (Figura 6).

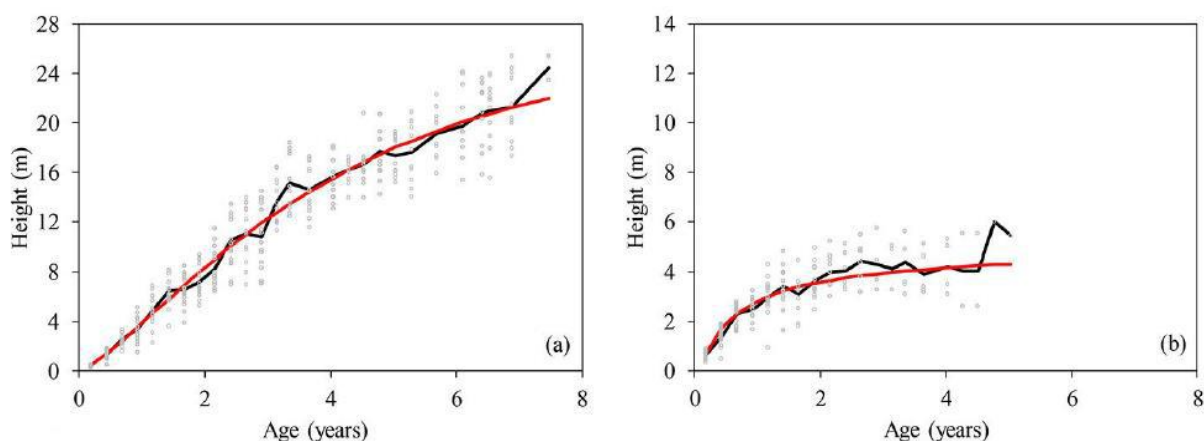


Figura 6: Ejemplos de curvas de crecimiento de árboles. Altura de distintas especies según la edad; los puntos grises reflejan las observaciones realizadas, la línea negra constituye el valor medio de las observaciones y la línea roja es la previsión de crecimiento, para (a) *Eucalyptus urophylla* x *E. grandis*; (b) *Mimosa scabrella*. Fuente: Elli et al. (2017).

Si se observan las curvas de crecimiento, se deduce que a medida que las masas boscosas se van acercando a su máximo de biomasa forestal, la capacidad que tienen para fijar carbono disminuye (Neiker-Tecnalia, 2014). A pesar de que este crecimiento no es proporcional en el tiempo, con el fin de simplificar los cálculos se considerará que las tasas de crecimiento de la biomasa forestal son lineales en el tiempo.

Al igual que en el estudio Neiker-Tecnalia (2014), para calcular la cantidad de carbono que almacena la biomasa forestal se ha considerado un escenario basado en una “gestión sostenible”. Esa gestión se realiza acorde a los turnos de corta correspondientes a cada especie, de modo que las pérdidas de biomasa causadas por las talas anuales serán compensadas por el crecimiento de biomasa anual. Siendo esto así, no se espera un crecimiento neto de biomasa, por lo que las existencias presentes en cada momento serán aproximadamente la mitad de la biomasa forestal máxima.

De la misma forma, cuando se hable de pérdidas de biomasa, solamente se considerarán aquellas producidas por talas, y no las derivadas de plagas, enfermedades, incendios, etc., ya que se contempla que estas últimas ya se han considerado en las tasas de crecimiento.

Tabla 4: Distribución de las distintas especies en Gipuzkoa y la agrupación correspondiente a cada una.
Fuente: IF-2018 y Neiker-Tecnalia (2014).

Inventario forestal de Gipuzkoa 2018		
Especie forestal	Superficie (ha)	Agrupación
<i>Pinus sylvestris</i>	117	<i>Pinus sylvestris</i>
<i>Pinus nigra</i>	7.028	<i>Pinus nigra</i>
<i>Pinus pinaster</i>	1.561	<i>Pinus radiata</i>
<i>Pinus radiata</i>	39.704	<i>Pinus radiata</i>
<i>Picea abies</i>	223	<i>Pinus nigra</i>
<i>Pseudotsuga menziesii</i>	5.132	<i>Pinus nigra</i>
<i>Larix spp.</i>	6.342	<i>Pinus nigra</i>
<i>Chamaecyparis lawsoniana</i>	834	<i>Pinus nigra</i>
Otras coníferas	1.454	<i>Pinus nigra</i>
Total coníferas	62.395	
<i>Quercus robur</i>	8.907	<i>Quercus robur</i>
<i>Quercus petraea</i>	292	<i>Quercus robur</i>
<i>Quercus pyrenaica</i>	299	<i>Quercus ilex</i>
<i>Quercus faginea</i>	68	<i>Quercus faginea</i>
<i>Quercus ilex</i>	2.175	<i>Quercus ilex</i>
<i>Quercus pubescens</i>	1	<i>Quercus robur</i>
Bosques de ribera	826	<i>Quercus robur</i>
<i>Alnus glutinosa</i>	394	<i>Quercus robur</i>
<i>Salix spp.</i>	13	<i>Quercus robur</i>
Plantaciones de frondosas	1.794	<i>Quercus robur</i>
<i>Eucalyptus globulus</i>	417	<i>Eucalyptus spp.</i>
<i>Eucalyptus nitens</i>	185	<i>Eucalyptus spp.</i>
Otros <i>Eucalyptus</i>	4	<i>Eucalyptus spp.</i>
<i>Robinia pseudacacia</i>	589	<i>Quercus robur</i>
<i>Quercus rubra</i>	2.384	<i>Quercus robur</i>
<i>Platanus spp.</i>	209	<i>Quercus robur</i>
<i>Populus alba</i>	20	<i>Quercus robur</i>
<i>Fagus sylvatica</i>	18.099	<i>Fagus sylvatica</i>
<i>Castanea sativa</i>	579	<i>Quercus robur</i>
<i>Betula spp.</i>	381	<i>Quercus robur</i>
<i>Fraxinus spp.</i>	197	<i>Quercus robur</i>
Bosque mixto de cantil	247	<i>Quercus robur</i>
Bosque mixto atlántico	19.010	<i>Quercus robur</i>
Otras frondosas	1.388	<i>Quercus robur</i>
Total frondosas	58.478	
Total	120.873	

Tabla 5: Superficie correspondiente a cada agrupación en Gipuzkoa. Fuente: IF-2018 y Neiker-Tecnalia (2014).

Agrupación	Especies incluidas	Superficie (ha)
<i>Pinus nigra</i> (Conífera, Atlántico, altitud alta)	<i>Pinus nigra</i> <i>Picea</i> sp., <i>Pseudotsuga menziesii</i> , <i>Larix</i> sp., <i>Chamaecyparis lawsoniana</i> , coníferas no incluidas en otros grupos	21.013
<i>Pinus radiata</i> (Conífera, Atlántico, altitud baja)	<i>Pinus radiata</i> <i>Pinus pinaster</i>	41.265
<i>Pinus sylvestris</i> (Conífera, submediterráneo)	<i>Pinus sylvestris</i>	117
<i>Quercus ilex</i> (Froncosa, costa)	<i>Quercus ilex</i> <i>Quercus pyrenaica</i>	2.474
<i>Fagus sylvatica</i> (Froncosa, Atlántico, altitud alta)	<i>Fagus sylvatica</i>	18.099
<i>Quercus robur</i> (Froncosa, Atlántico, altitud baja)	<i>Quercus robur</i> , <i>Quercus pubescens</i> , <i>Quercus rubra</i> , <i>Salix</i> sp., <i>Alnus</i> sp. <i>Robinia pseudoacacia</i> , Árboles ripícolas, <i>Platanus</i> sp., <i>Populus</i> sp., <i>Castanea</i> sp., <i>Betula</i> sp., <i>Fraxinus</i> sp., Bosque mixto, plantaciones de frondosas, frondosas no incluidas en otros grupos	37.231
<i>Eucalyptus spp.</i> (Froncosa, costa)	<i>Eucalyptus globulus</i> <i>Eucalyptus nitens</i> Otros <i>eucalyptus</i>	606
<i>Quercus faginea</i> (Froncosa, submediterráneo)	<i>Quercus faginea</i>	68

Tabla 6: Características de crecimiento de cada agrupación. Fuente: Neiker-Tecnalia (2014).

Agrupación	Crecimiento anual de biomasa (t MS ¹ /ha-año)			Concentración de carbono (t C/t MS ¹)	Crecimiento anual de biomasa (t C/ha-año)		
	Aéreo	Subterráneo	Total		Aéreo	Subterráneo	Total
<i>Pinus nigra</i> y similares	5,24	1,31	6,55	0,51	2,67	0,67	3,34
<i>Pinus radiata</i> y similares	5,39	1,35	6,74	0,51	2,75	0,69	3,44
<i>Pinus sylvestris</i> y similares	3,86	1,04	4,9	0,51	1,97	0,53	2,5
<i>Pinus halepensis</i> y similares	4,02	1,21	5,23	0,51	2,05	0,62	2,66
<i>Quercus ilex</i> y similares	3,01	1,12	4,13	0,48	1,44	0,54	1,98
<i>Fagus sylvatica</i> y similares	3,12	0,56	3,68	0,48	1,5	0,27	1,77
<i>Quercus robur</i> y similares	4,73	1,32	6,05	0,48	2,27	0,63	2,91
<i>Eucalyptus spp.</i>	13,77	3,83	17,6	0,48	6,61	1,84	8,45
<i>Quercus faginea</i> y similares	2,57	0,72	3,29	0,48	1,23	0,35	1,58

¹ MS: materia seca.

Tabla 7: Estimación del carbono almacenado en la biomasa forestal (aérea y subterránea) de Gipuzkoa. Fuente: IF-2018 y Neiker-Tecnalia (2014).

Agrupación	Crecimiento de biomasa	Turno corta	Carbono en biomasa (t C/ha)		Superficie	Cortas en equilibrio		Existencias en equilibrio (T/2)
	(t C/ha-año)	(T, año)	T	T/2	(ha)	(ha/año)	(Gg C/año)	(Gg C)
<i>Pinus nigra</i> y similares	3,34	55	183,7	91,85	21.013	382	70,2	1.930
<i>Pinus radiata</i> y similares	3,44	30	103,2	51,6	41.265	1.376	142,0	2.129
<i>Pinus sylvestris</i> y similares	2,5	60	150	75	117	2	0,3	9
<i>Quercus ilex</i> y similares	1,98	120	237,6	118,8	2.474	21	4,9	294
<i>Fagus sylvatica</i> y similares	1,77	120	212,4	106,2	18.099	151	32,0	1.922
<i>Quercus robur</i> y similares	2,91	120	349,2	174,6	37.231	310	108,3	6.501
<i>Eucalyptus spp.</i>	8,45	20	169	84,5	606	30	5,1	51
<i>Quercus faginea</i> y similares	1,58	120	189,6	94,8	68	1	0,1	6
TOTAL								12.842

Según el procedimiento marcado por Neiker-Tecnalia (2014) y considerando un escenario de gestión sostenible “T/2”, se concluye que la biomasa forestal de Gipuzkoa almacena 12.842 Gg de carbono.

5.1.2. BASE DE DATOS COPERNICUS (2019)

La productividad de los ecosistemas es una característica compleja y dinámica, que está condicionada por múltiples factores (Copernicus, 2019). En teoría, se puede explicar mediante los flujos de carbono, tal y como se muestra en la Figura 7. La producción primaria bruta (GPP, *Gross Primary Production*) es la cantidad de compuestos orgánicos que se producen mediante la fotosíntesis a partir de la absorción de carbono de la atmósfera. La producción primaria neta (NPP, *Net Primary Production*) es el resultado de restar al GPP el carbono correspondiente a la respiración autótrofa. La producción neta del ecosistema (NEP, *Net Ecosystem Production*) es la que se obtiene extrayendo la respiración de la vegetación y la respiración heterótrofa de la descomposición de la materia orgánica del suelo. Por último, la producción neta del bioma (NBP, *Net Biome Production*), hace referencia a la cantidad de carbono que se mantiene en la vegetación, una vez que se han considerado las pérdidas debidas a las extracciones antropogénicas y otras perturbaciones.

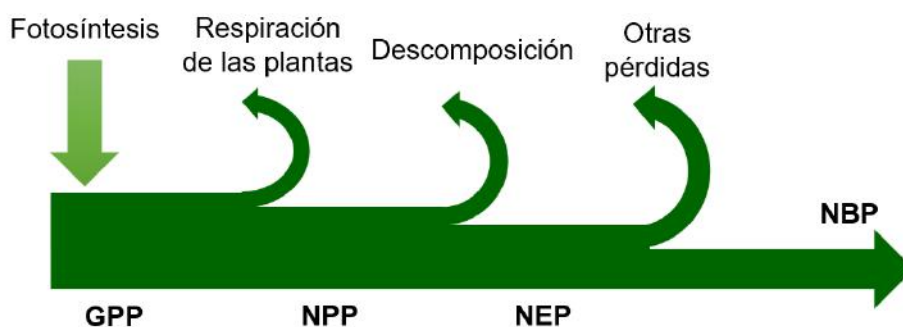


Figura 7: Flujos y procesos de la productividad de ecosistemas. GPP: *Gross Primary Production*, NPP: *Net Primary Production*, NEP: *Net Ecosystem Production*, NBP: *Net Biome Production*. Fuente: Copernicus (2019).

Esta base de datos de la Comisión Europea ofrece información sobre la productividad de materia seca (PMS; *Dry Matter Productivity (DMP)*). Concretamente, es una estimación del crecimiento de biomasa aérea, por lo que informa sobre la cantidad de materia seca producida por hectárea y por día (kg MS/ha-día). La PMS está relacionada directamente con la NPP mencionada anteriormente, de forma que esta dependerá de la materia seca y su contenido de carbono; en el caso de Copernicus (2019), se considera una concentración de 0,45 g C/g MS.

De la base de datos de Copernicus (2019) se han recuperado las estimaciones realizadas en 2018 para el territorio de Gipuzkoa en formato GeoTIFF. En estos mapas se ha considerado la producción de materia seca (PMS) correspondiente a la cobertura arbórea de Gipuzkoa, de forma que se ha calculado un valor medio anual (Tabla 8)

Tabla 8: Media de la productividad de materia seca (PMS) de los bosques de Gipuzkoa para el año 2018.
Fuente: Copernicus (2019).

Mes	PMS (kg/ha-día)	PMS (t/ha-año)
Enero	8,00	2,92
Febrero	8,23	3,00
Marzo	19,58	7,15
Abril	46,53	16,98
Mayo	64,23	23,45
Junio	94,24	34,40
Julio	116,50	42,52
Agosto	103,38	37,73
Septiembre	84,45	30,82
Octubre	34,45	12,57
Noviembre	14,28	5,21
Diciembre	9,41	3,43
Media:	50,27	18,35

La base de datos Copernicus (2019) solamente estima la biomasa aérea y no especifica la relación que guarda con el incremento de la biomasa subterránea. Por ello, la relación entre la biomasa aérea y la subterránea ha sido recuperada del estudio Neiker-Tecnalia (2014). Dado que, en este último, este dato se especifica para cada agrupación de especies, para este apartado se ha calculado una media ponderada (teniendo en cuenta la superficie que cubre cada agrupación en Gipuzkoa). De ahí se deduce que la relación entre la biomasa radical y la aérea es de 0,2512. En lo que respecta al carbono fijado en una determinada cantidad de materia seca, se ha empleado la concentración especificada por Copernicus (2019): 0,45 g C/g MS. Considerando esta información, se han estimado los datos de la Tabla 9:

Tabla 9: Estimación del crecimiento anual de biomasa. Fuente: Copernicus (2019) y Neiker-Tecnalia (2014).

Aéreo	Subterráneo	Total	Concentración de carbono	Crecimiento anual de biomasa
(t MS/ha-año)	(t MS/ha-año)	(t MS/ha-año)	(t C/t MS)	(t C/ha-año)
18,35	4,61	22,96	0,45	10,33

Por lo tanto, a partir de la información proporcionada por Copernicus (2019), se deduce que cada hectárea de los bosques de Gipuzkoa fija una media de 10,33 toneladas de carbono al año. Considerando que según el inventario forestal de 2018 la cobertura forestal de Gipuzkoa

es de 120.873 hectáreas, se ha aplicado el mismo procedimiento del apartado anterior, esta vez empleando valores medios (Tabla 10)

Tabla 10: Estimación de las reservas de carbono de la biomasa forestal.
Fuente: IF-2018, Copernicus (2019) y Neiker-Tecnalia (2014).

Crecimiento anual de biomasa (t C/ha·año)	Turno corta¹ (T, año)	Superficie (ha)	Existencias en equilibrio (T/2) Gg C
10,33	77,42	120.873	48.341

¹ Se ha calculado una media ponderada de los turnos de corta definidos por Neiker-Tecnalia (2014) según la superficie de cada agrupación.

Habiendo considerado las tasas de productividad de materia seca obtenidas de la base de datos Copernicus (2019), se ha estimado que la biomasa forestal de Gipuzkoa almacena 48.341 Gg de carbono. Existe una diferencia notable entre este resultado y el obtenido previamente (12.842 Gg C) a partir de los datos de Neiker-Tecnalia (2014). Se considera que los datos de Neiker-Tecnalia (2014) son más precisos para el caso de Gipuzkoa, por dos razones:

- Mientras que la base de datos Copernicus (2019) se basa en unas estadísticas más generales, Neiker-Tecnalia (2014) reúne datos para el caso de la Comunidad Autónoma del País Vasco. Dado que este último se centra en el mismo territorio que se estudia en el presente trabajo, se cree que los datos tienen menor nivel de incertidumbre.
- Por otra parte, si se compara el valor obtenido a partir de los datos de Copernicus (2019) con las estimaciones de carbono orgánico del suelo (COS) que se trabaja más adelante, se observa que este es más alto que el potencial del COS, cosa que no es razonable. Ya que, según autores como Dixon et al. (1994), Lal (2005), Prentice (2001) y Schlesinger (1977), los bosques tropicales son los únicos bosques cuya biomasa puede almacenar tanto carbono como el suelo, por lo que en los otros casos (como los bosques boreales o templados), las existencias de carbono del suelo serán superiores a las de la biomasa: se estima que en los bosques boreales el 85% del carbono se almacena en el suelo y en los bosques templados el 60% (Dixon et al., 1994). Como las existencias de biomasa forestal deducidas a partir de la base de datos Copernicus (2019) superan el potencial de COS calculado más adelante, se considera que la desviación es demasiado grande.

5.1.3. CUARTO INVENTARIO FORESTAL NACIONAL (IFN4)

Viendo que existe una desviación considerable entre las existencias de carbono deducidas a partir de la base de datos Copernicus (2019) y el estudio de Neiker-Tecnalia (2014), se ha consultado una tercera fuente de información: el Cuarto Inventario Forestal Nacional (2013). En este caso, se ha partido de las existencias volumétricas de los troncos definidas para diferentes especies y, mediante otras características definidas por Neiker-Tecnalia (2014), se ha calculado el carbono almacenado en la biomasa forestal.

En el informe IFN4 las existencias volumétricas de los troncos se definen para las principales formaciones arbóreas, los cuales son:

- | | |
|---------------------------|--|
| ▪ <i>Pinus radiata</i> | ▪ Bosque mixto autóctono |
| ▪ <i>Pinus nigra</i> | ▪ Bosque de galería |
| ▪ <i>Pinus sylvestris</i> | ▪ <i>Quercus ilex</i> |
| ▪ <i>Pinus pinaster</i> | ▪ <i>Quercus faginea</i> |
| ▪ Otras coníferas | ▪ <i>Quercus robur</i> y <i>Q. petraea</i> |
| ▪ <i>Eucalyptus sp.</i> | ▪ <i>Quercus pyrenaica</i> |
| ▪ <i>Fagus sylvatica</i> | ▪ <i>Quercus rubra</i> |

Para conocer la superficie que cubren estas formaciones arbóreas en el territorio de Gipuzkoa, considerando el inventario forestal de 2018, se ha asignado la superficie de cada especie a una formación arbórea (Tabla 11).

Una vez que se conocen las existencias de las formaciones arbóreas (volumen con corteza en m³/ha) y la superficie que abarcan en Gipuzkoa, se han empleado los parámetros definidos por Neiker-Tecnalia (2014) para así calcular las existencias de carbono totales (Tabla 12). Dado que las existencias de las formaciones arbóreas y los otros parámetros se definen para unas agrupaciones de especies, las asignaciones se han realizado entre las especies de mayor semejanza.

Tabla 11: Distribución de las distintas especies en Gipuzkoa y la formación arbórea correspondiente a cada uno.
Fuente: IFN4 y IF-2018.

Inventario forestal de Gipuzkoa 2018		
Especie forestal	Superficie (ha)	Formación arbórea
<i>Pinus sylvestris</i>	117	<i>Pinus sylvestris</i>
<i>Pinus nigra</i>	7.028	<i>Pinus nigra</i>
<i>Pinus pinaster</i>	1.561	<i>Pinus pinaster</i>
<i>Pinus radiata</i>	39.704	<i>Pinus radiata</i>
<i>Picea abies</i>	223	Otras coníferas
<i>Pseudotsuga menziesii</i>	5.132	Otras coníferas
<i>Larix spp.</i>	6.342	Otras coníferas
<i>Chamaecyparis lawsoniana</i>	834	Otras coníferas
Otras coníferas	1.454	Otras coníferas
Total coníferas	62.395	
<i>Quercus robur</i>	8.907	<i>Q. robur</i> y <i>Q. petraea</i>
<i>Quercus petraea</i>	292	<i>Q. robur</i> y <i>Q. petraea</i>
<i>Quercus pyrenaica</i>	299	<i>Quercus pyrenaica</i>
<i>Quercus faginea</i>	68	<i>Quercus faginea</i>
<i>Quercus ilex</i>	2.175	<i>Quercus ilex</i>
<i>Quercus pubescens</i>	1	<i>Q. robur</i> y <i>Q. petraea</i>
<i>Bosques de ribera</i>	826	Bosque de galería
<i>Alnus glutinosa</i>	394	Bosque de galería
<i>Salix spp.</i>	13	Bosque mixto autóctono
Plantaciones de frondosas	1.794	Bosque mixto autóctono
<i>Eucalyptus globulus</i>	417	<i>Eucalyptus sp.</i>
<i>Eucalyptus nitens</i>	185	<i>Eucalyptus sp.</i>
Otros <i>Eucalyptus</i>	4	<i>Eucalyptus sp.</i>
<i>Robinia pseudacacia</i>	589	Bosque mixto autóctono
<i>Quercus rubra</i>	2.384	<i>Quercus rubra</i>
<i>Platanus spp.</i>	209	Bosque mixto autóctono
<i>Populus alba</i>	20	Bosque mixto autóctono
<i>Fagus sylvatica</i>	18.099	<i>Fagus sylvatica</i>
<i>Castanea sativa</i>	579	Bosque mixto autóctono
<i>Betula spp.</i>	381	Bosque mixto autóctono
<i>Fraxinus spp.</i>	197	Bosque mixto autóctono
Bosque mixto de cantil	247	Bosque mixto autóctono
Bosque mixto atlántico	19.010	Bosque mixto autóctono
Otras frondosas	1.388	Bosque mixto autóctono
Total frondosas	58.478	
Total especies	120.873	

Tabla 12: Estimación del carbono almacenado en la biomasa forestal (aérea y subterránea) de Gipuzkoa. Fuente: IFN4, IF-2018 y Neiker-Tecnalia (2014).

Formación arbórea	Superficie (ha)	Vol. con corteza (m ³ /ha) ¹	Vol. con corteza (m ³)	B. aérea/ B. fustal ²	Dens. ³ (t MS/m ³)	MS total/ MS aérea ⁴	MS total (t)	Dens. ⁵ t C/t MS	Existencias C Gg C
<i>Pinus radiata</i>	39.704	221,13	8.779.746	1,20	0,38	1,25	5.006.312	0,51	2.553
<i>Pinus nigra</i>	7.028	194,99	1.370.390	1,50	0,40	1,25	1.027.792	0,51	524
<i>Pinus sylvestris</i>	117	153,80	17.995	1,40	0,42	1,27	13.432	0,51	7
<i>Pinus pinaster</i>	1.561	181,54	283.384	1,20	0,38	1,25	161.589	0,51	82
Otras coníferas	13.985	160,31	2.241.935	1,40	0,40	1,25	1.569.355	0,51	800
<i>Eucalyptus sp.</i>	606	150,81	91.391	1,40	0,58	1,28	94.850	0,48	46
<i>Fagus sylvatica</i>	18.099	185,60	3.359.174	1,50	0,58	1,18	3.447.030	0,48	1.655
B. mixto autóctono	24.427	108,72	2.655.703	1,50	0,58	1,28	2.960.127	0,48	1.421
B. de galería	1.220	115,17	140.507	1,50	0,58	1,28	156.614	0,48	75
<i>Quercus ilex</i>	2.175	43,58	94.787	1,50	0,58	1,37	113.149	0,48	54
<i>Quercus faginea</i>	68	58,70	3.992	1,50	0,58	1,28	4.446	0,48	2
<i>Q. robur</i> – <i>Q. petraea</i>	9.200	138,11	1.270.612	1,50	0,58	1,28	1.416.262	0,48	680
<i>Quercus pyrenaica</i>	299	137,23	41.032	1,50	0,58	1,28	45.735	0,48	22
<i>Quercus rubra</i>	2.384	170,02	405.328	1,50	0,58	1,28	451.790	0,48	217
Existencias en total:									8.138

¹ Volumen con corteza: volumen de biomasa constituido por los troncos (incluyendo la corteza) (m³/ha). Fuente: BIN4.

² Relación entre la biomasa aérea y la biomasa fustal. Fuente: Neiker-Tecnalia (2014), página 142, Tabla 7.

³ Densidad: cantidad de materia seca (MS) por cada unidad de volumen de biomasa. Fuente: Neiker-Tecnalia (2014), página 142, Tabla 7.

⁴ Relación entre la materia seca (MS) aérea y la total (aérea + subterránea). Fuente: Neiker-Tecnalia (2014), página 177, Tabla 18.

⁵ Densidad: cantidad de carbono por unidad de materia seca (MS). Fuente: Neiker-Tecnalia (2014), página 177, Tabla 18.

De las existencias de biomasa obtenidas del Cuarto Inventario Forestal Nacional (2013), se ha estimado que en la biomasa forestal de Gipuzkoa se almacenan 8.138 Gg C. A pesar de que este resultado también muestra una desviación respecto a las existencias deducidas de los datos de Neiker-Tecnalia (2014), se considera que la magnitud de la desviación es aceptable (no se aleja tanto como el resultado obtenido de la base de datos Copernicus (2019)). Además, dado que los datos del IFN4 también se derivan de un estudio centrado en la CAPV, se concluye que tendrá un nivel de precisión aceptable.

5.1.4. ANÁLISIS DE LAS ESTIMACIONES DE CARBONO DE LA BIOMASA FORESTAL

Los resultados de las existencias de carbono de la biomasa forestal de Gipuzkoa varían según la fuente de información que se ha empleado (Tabla 13)

Tabla 13: Resultados de las estimaciones de almacenamiento de carbono en la biomasa forestal.

Apartado	Base de datos	Existencias de carbono (Gg C)
5.1.1	Neiker-Tecnalia (2014)	12.842
5.1.2	Copernicus (2019)	48.341
5.1.3	IFN4 (2013)	8.138

A pesar de que existe una desviación entre los resultados obtenidos en los apartados 5.1.1 y 5.1.3, considerando el orden de magnitud de esta, se concluye que esta diferencia es aceptable. Sin embargo, se cree que las existencias de carbono estimadas en el apartado 5.1.2, tienen una desviación demasiado grande. Esta desviación, se achaca en parte al hecho de que la base de datos Copernicus (2019) no tiene en cuenta diversos factores que afectan a la productividad de materia seca y, por consiguiente, a la fijación neta de carbono (enfermedades, plagas, estrés hídrico, escasez de nutrientes, etc.). Además, siendo un resultado de una modelización realizada a nivel europeo, es posible que las estimaciones realizadas para el territorio de Gipuzkoa no sean adecuadas. Por lo tanto, se deduce que el carbono almacenado en la biomasa forestal de Gipuzkoa puede ser de entre 8.138 Gg y 12.842 Gg.

Además de esto, se ha podido conocer la cantidad de carbono por unidad de superficie que pueden almacenar las distintas especies arbóreas. Tal y como se puede observar en la Tabla 14, las especies de frondosas autóctonas tienen mayor capacidad de almacenar carbono que las especies empleadas habitualmente en plantaciones.

Tabla 14: Capacidad como sumidero de carbono de cada agrupación. Fuente: derivado de la Tabla 7.

Agrupación	t C/ha
<i>Pinus nigra</i> y similares	92,7
<i>Pinus radiata</i> y similares	56,7
<i>Pinus sylvestris</i> y similares	81
<i>Eucalyptus spp.</i>	84,7
<i>Quercus ilex</i> y similares	121,2
<i>Fagus sylvatica</i> y similares	110,4
<i>Quercus robur</i> y similares	144,6
<i>Quercus faginea</i> y similares	96

Más allá de los resultados obtenidos en este análisis, otros estudios como los de Pérez, Jandl y Rubio (2007) y Rodríguez-Loinaz et al. (2013) refuerzan esa afirmación (estos trabajos se analizarán en mayor profundidad en el apartado “7.1 DISTRIBUCIÓN DE LAS ESPECIES ARBÓREAS”).

5.2. CARBONO ALMACENADO EN EL SUELO FORESTAL

Para estimar la cantidad de carbono que se almacena en el suelo se han consultado diversas fuentes de información:

5.2.1. BASE DE DATOS EUROPEA LUCAS

Por una parte, se ha empleado una base de datos de nivel europeo denominado LUCAS (*Land Use/Cover Area frame statistical Survey*) (ESDAC, 2019). En ella, se reúne información georreferenciada para el intervalo 0-20 cm del suelo.

En lo que respecta al carbono orgánico del suelo, se definen dos mapas de datos que se muestran a continuación:

- **Previsión de la cantidad de carbono orgánico presente en la capa superior del suelo (g C/kg).** Para crear este mapa (Figura 8) se ha empleado un modelo aditivo generalizado que se ha obtenido a partir del ajuste de las mediciones de carbono orgánico del estudio LUCAS y diversas variables ambientales. Se emplea un soporte de datos GeoTIFF.
- **Mapa de error estándar de las previsiones de carbono orgánico (g C/kg).** Este mapa (Figura 9) muestra el nivel de incertidumbre asociado a las previsiones de la cantidad de carbono orgánico. El error estándar informa de la desviación teórica de las previsiones para cada pixel del mapa mencionado anteriormente. También en este caso, se emplea un soporte de datos GeoTIFF.

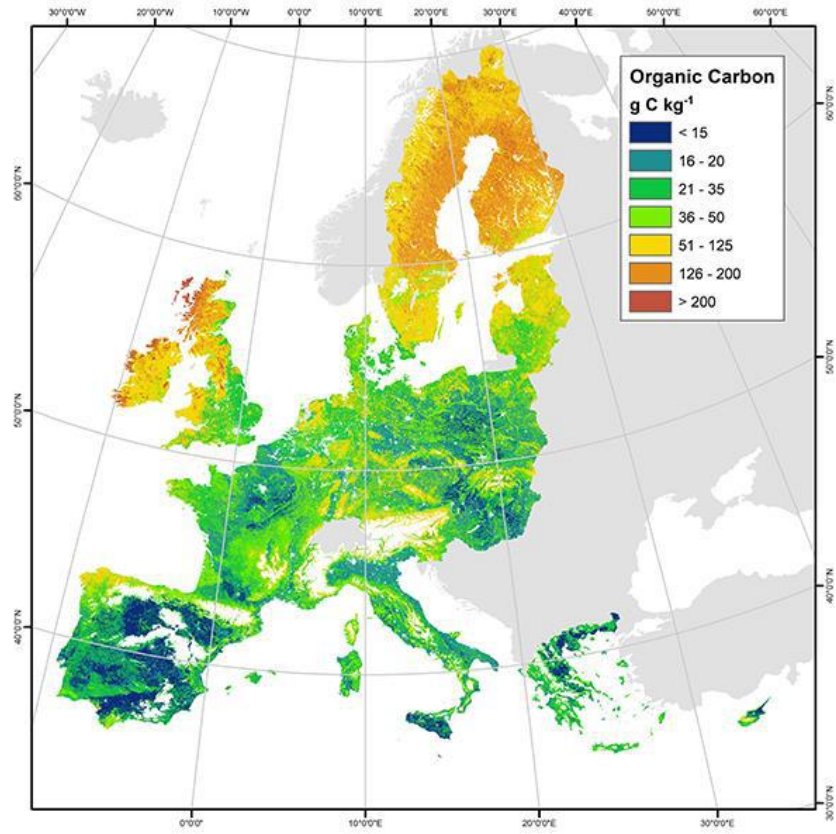


Figura 8: Carbono orgánico del suelo en una profundidad de 0-20 cm (g C/kg). Fuente: ESDAC (2019).

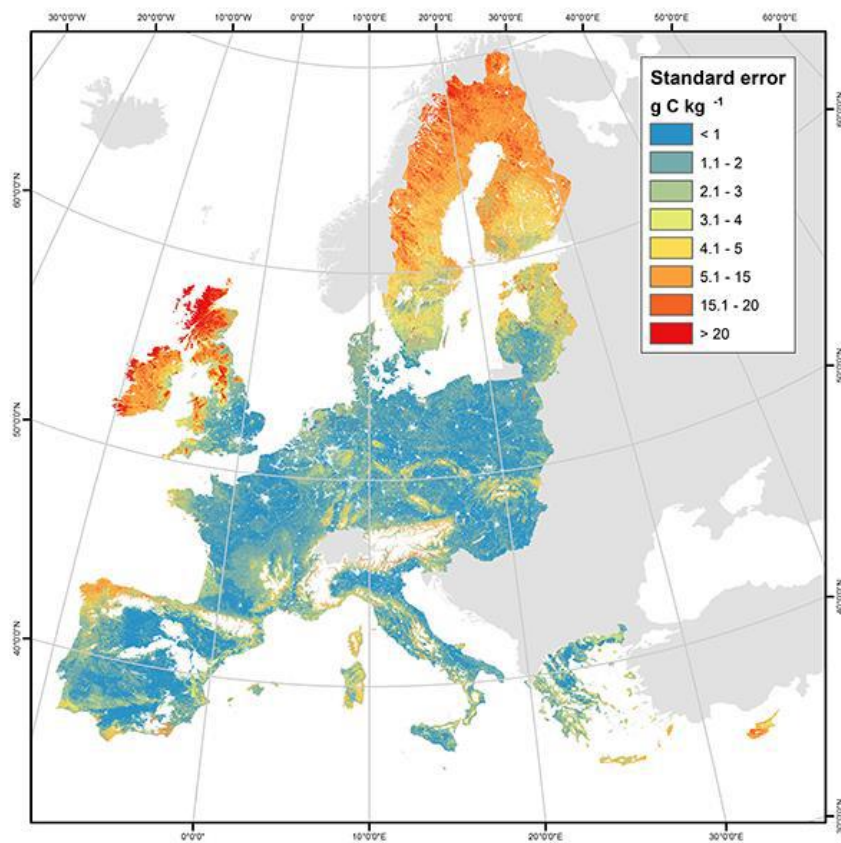


Figura 9: Error estándar del mapa de carbono orgánico (g C/kg). Fuente: ESDAC (2019).

Los mapas LUCAS proporcionan información de toda Europa, por lo que para poder estimar la cantidad de carbono que almacenan los bosques de Gipuzkoa, se ha tenido que extraer la información correspondiente únicamente a la cobertura forestal de Gipuzkoa. Para ello, se ha empleado el mapa de cobertura forestal más actualizado disponible en los servicios de descarga FTP del portal GeoEuskadi (2019), que corresponde al inventario forestal de 2018 (IF-2018) de la CAPV (Figura 10).

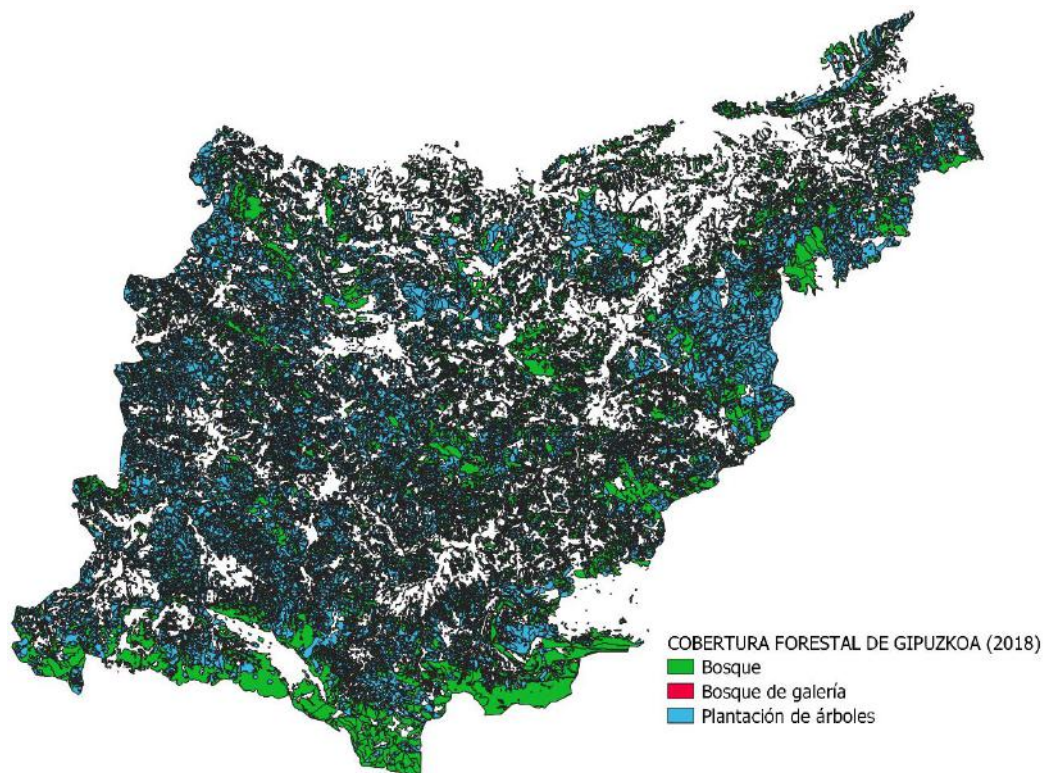


Figura 10: Mapa de cobertura forestal en Gipuzkoa.

Fuente: Elaborado a partir de la información geográfica de GeoEuskadi (2019).

De esta forma, cortando el mapa de previsión de la cantidad de carbono orgánico de la capa superior del suelo europeo (Figura 8) con la superficie de cobertura forestal de Gipuzkoa (Figura 10), se ha obtenido el mapa que resulta de interés para este estudio (Figura 11).

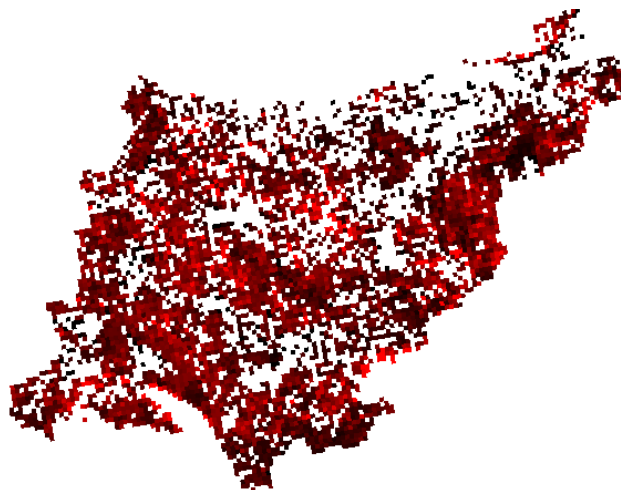


Figura 11: Mapa de previsión de contenido de carbono para las superficies forestales de Gipuzkoa.

Dado que la Figura 11 es un mapa en soporte GeoTIFF, se ha creado una capa vectorial formada por puntos con el fin de obtener el valor de cada pixel (500 x 500 m) en unidades de g C/kg. De esta forma, y considerando la superficie total de la cobertura forestal de Gipuzkoa, se obtiene un valor medio de carbono orgánico de **45,38 g C/kg** (una concentración de carbono orgánico de 4,538%).

Para conocer la densidad del suelo de los bosques de Gipuzkoa, se ha empleado el mapa de densidad ("*Bulk density*") del servicio LUCAS (ESDAC, 2019). Siguiendo el mismo procedimiento empleado previamente para calcular el valor medio del carbono orgánico del suelo, se ha calculado que la densidad media del suelo (considerando la fracción fina constituida por partículas menores de 2 mm) de los bosques de Gipuzkoa es de 0,99 t/m³.

Además, hay que conocer el volumen que ocupa la grava presente en la capa de suelo a analizar (Chiti et al., 2012; Rodríguez-Murillo, 2001). Para ello, se ha empleado el mapa "*Coarse fragments*" de la base de datos LUCAS (ESDAC, 2019). En base al mismo procedimiento empleado anteriormente, se ha concluido que el 20% de la masa del suelo forestal de Gipuzkoa corresponde a las rocas presentes en el mismo.

Para que el resultado que se obtenga sea comparable con los datos de las muestras del trabajo Neiker-Tecnalia (2014), a la hora de definir el volumen de suelo a estudiar, se considerará una profundidad de 0-25 cm. Dado que la información de la base de datos LUCAS hace referencia a una profundidad de 0-20 cm y considerando que la concentración de carbono orgánico disminuye con la profundidad (Jobbágy y Jackson, 2000), se prevé un error en la estimación (la cantidad de carbono orgánico será superior).

Teniendo en cuenta los factores mencionados anteriormente, para poder estimar la cantidad de carbono orgánico del suelo es preciso conocer el volumen de la fracción fina (Figura 12).

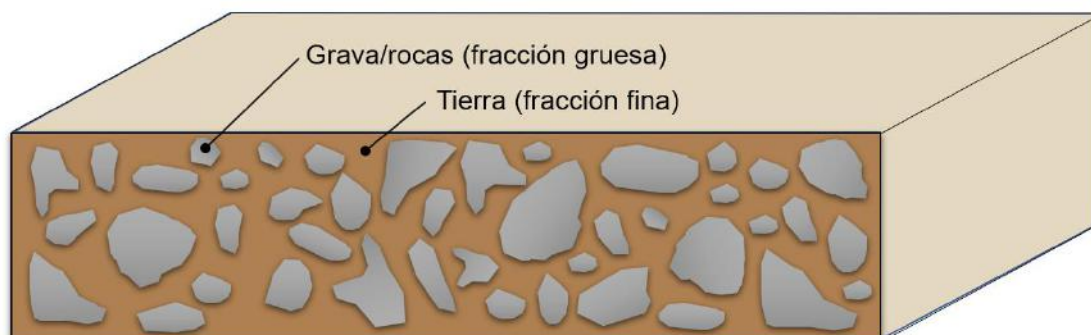


Figura 12: Esquema de la estructura del suelo (fracción fina y gruesa).

Para esto se plantea un sistema de tres ecuaciones y tres incógnitas:

$$\begin{aligned} D_{CF} \cdot V_{CF} + D_{FF} \cdot V_{FF} &= D_T \cdot V_T \\ D_{CF} \cdot V_{CF} &= 0,2 \cdot D_T \cdot V_T \\ V_{CF} + V_{FF} &= V_T \end{aligned}$$

CF: *coarse fragments* (grava o rocas).

FF: *fine fragments* (suelo, formado por partículas < 2 mm).

T: total.

Para emplear el método de sustitución, despejar las variables:

$$\begin{aligned} D_{CF} \cdot V_{CF} + D_{FF} \cdot V_{FF} &= D_T \cdot V_T \\ D_{CF} \cdot V_{CF} = 0,2 \cdot D_T \cdot V_T &\rightarrow D_T = \frac{D_{CF} \cdot V_{CF}}{0,2 \cdot V_T} \\ V_{CF} + V_{FF} = V_T &\rightarrow V_{FF} = V_T - V_{CF} \end{aligned}$$

Sustituir las variables despejadas:

$$D_{CF} \cdot V_{CF} + D_{FF} \cdot (V_T - V_{CF}) = \frac{D_{CF} \cdot V_{CF}}{0,2 \cdot V_T} \cdot V_T$$

Si para calcular el volumen total (V_T) se considera una profundidad de 25 cm en una hectárea (observar la Figura 13 como referencia):

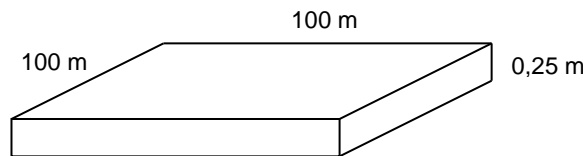


Figura 13: Volumen total (V_T) por unidad de superficie (hectárea).

Y considerando los siguientes valores para el resto de variables:

$D_{CF} = 2.650 \text{ kg/m}^3$ (Carmichael, 1984. Más detalles en el apartado “II SEGUNDO ANEXO”).

$D_{FF} = 990 \text{ kg/m}^3$ (deducido del mapa “*Bulk density*”)

$V_T = 100 \cdot 100 \cdot 0,25 = 2.500 \text{ m}^3$

Sustituyendo estos valores se podrá conocer el volumen de grava (V_{CF}):

$$2650 \text{ kg/m}^3 \cdot V_{CF} + 990 \text{ kg/m}^3 \cdot (2500 \text{ m}^3 - V_{CF}) = \frac{2650 \text{ kg/m}^3 \cdot V_{CF}}{0,2}$$

$$495000 \text{ kg} = 2650 \text{ kg/m}^3 \cdot V_{CF} - 530 \text{ kg/m}^3 \cdot V_{CF} + 198 \text{ kg/m}^3 \cdot V_{CF}$$

$$495000 \text{ kg} = 2318 \text{ kg/m}^3 \cdot V_{CF}$$

$$V_{CF} = \frac{495000 \text{ kg}}{2318 \text{ kg/m}^3} = 213,5 \text{ m}^3$$

Por consiguiente, el volumen de la fracción fina presente en una hectarea y una profundidad de 25 cm es:

$$V_{FF} = V_T - V_{CF} = 2500 \text{ m}^3 - 213,5 \text{ m}^3 = 2286,5 \text{ m}^3$$

Para calcular la cantidad de carbono orgánico por unidad de superficie, hay que multiplicar la concentración de carbono, la densidad de la fracción fina del suelo y el volumen:

$$C(\text{t/ha}) = C(\%) \times D_{FF} (\text{t/m}^3) \times V_{FF} (\text{m}^3/\text{ha})$$

$$C = \frac{4,538}{100} \cdot 0,99 \text{ t/m}^3 \cdot 2286,5 \text{ m}^3/\text{ha}$$

$$C = 102,7 \text{ t/ha}$$

Por lo tanto, según la base de datos LUCAS, la cantidad de carbono orgánico del suelo de los bosques de Gipuzkoa es de 102,7 t C/ha. Si se multiplica este valor con la superficie de la cobertura arbórea de Gipuzkoa (120.873 ha), el resultado es 12.413.657 toneladas, es decir, el carbono almacenado en el suelo forestal de Gipuzkoa es de **12.414 Gg**.

Para conocer el nivel de incertidumbre que pueda tener el mapa de previsiones de carbono orgánico de la base de datos LUCAS, se ha empleado el mapa de error estándar (Figura 9). A partir de este último, se ha calculado que el error estándar medio para la superficie forestal de Gipuzkoa es de 3,66 g C/kg (un error estándar del 8%).

Utilizando la misma fórmula empleada anteriormente, se ha calculado el error estándar por unidad de superficie:

$$C(\text{t/ha}) = C(\%) \times D_{FF} (\text{t/m}^3) \times V_{FF} (\text{m}^3/\text{ha})$$

$$C = \frac{0,366}{100} \cdot 0,99 \text{ t/m}^3 \cdot 2286,5 \text{ m}^3/\text{ha}$$

$$C = 8,28 \text{ t/ha}$$

Multiplicando este valor con la superficie que cubren los bosques de Gipuzkoa (120.873 ha), da como resultado un error estándar de 1.001 Gg.

5.2.2. DATOS DE MUESTREOS DE LA CAPV (NEIKER-TECNALIA, 2014)

En la Tabla 15 se presentan los datos obtenidos a partir de unos muestreos realizados en la CAPV:

Tabla 15: Datos de los muestreos de la CAPV. Fuente: Neiker-Tecnalia (2014).

Especie	Estado de la masa	n ¹	Carbono en suelo ² (t C/ha)	Error estándar (t C/ha)
<i>Eucalyptus globulus</i>	Latizal	16	68,36	18,84
	Repoblado	8	72,93	18,42
<i>Pinus radiata</i>	Fustal	377	72,17	21,82
	Latizal	139	69,61	24,92
	Monte bravo	216	69,44	19,31
	Repoblado	373	64,06	21,19
<i>Pseudotsuga menziesii</i>	Fustal	4	59,55	31,98
	Latizal	2	84,63	38,03
	Monte bravo	84,17	84,17	22,86
	Repoblado	94,93	94,93	41
<i>Fagus sylvatica</i>	-	48	75,17	30,03

¹ Número de muestras analizadas.

² Cantidad de carbono orgánico del suelo en una profundidad de 0-25 cm.

Para extrapolar los valores de la Tabla 15 al territorio de Gipuzkoa, se han calculado los valores medios ponderados de cada especie según el número de muestras analizadas en cada caso (Tabla 17) y considerando las agrupaciones definidas en el trabajo Neiker-Tecnalia (2014) se han asignado los valores de las especies que más se asemejan a cada agrupación (Tabla 16). De esta forma, en la Tabla 17 se ha estimado la cantidad de carbono orgánico almacenado en los primeros 25 cm de suelo de los bosques de Gipuzkoa.

Tabla 16: Asignación de las especies de referencia a los datos de la Tabla 5.

Agrupación	Especies incluidas	Superficie (ha)	Especie de referencia
<i>Pinus nigra</i> (Conífera, Atlántico, altitud alta)	Pinus nigra Picea sp., Pseudotsuga menziesii, Larix sp., Chamaecyparis lawsoniana, coníferas no incluidas en otros grupos	21.013	<i>Pseudotsuga menziesii</i>
<i>Pinus radiata</i> (Conífera, Atlántico, altitud baja)	Pinus radiata Pinus pinaster	41.265	<i>Pinus radiata</i>
<i>Pinus sylvestris</i> (Conífera, submediterráneo)	Pinus sylvestris	117	<i>Pinus radiata</i>
<i>Quercus ilex</i> (Froncosa, costa)	Quercus ilex Quercus pyrenaica	2.474	<i>Fagus sylvatica</i>
<i>Fagus sylvatica</i> (Froncosa, Atlántico, altitud alta)	Fagus sylvatica	18.099	<i>Fagus sylvatica</i>
<i>Quercus robur</i> (Froncosa, Atlántico, altitud baja)	Quercus robur, Quercus pubescens, Quercus rubra, Salix sp., Alnus sp. Robinia pseudoacacia, Árboles ripícolas, Platanus sp., Populus sp., Castanea sp., Betula sp., Fraxinus sp., Bosque mixto, plantaciones de frondosas, frondosas no incluidas en otros grupos	37.231	<i>Fagus sylvatica</i>
<i>Eucalyptus spp.</i> (Froncosa, costa)	Eucalyptus globulus Eucalyptus nitens Otros eucalyptus	606	<i>Eucalyptus globulus</i>
<i>Quercus faginea</i> (Froncosa, submediterráneo)	Quercus faginea	68	<i>Fagus sylvatica</i>

Tabla 17: Estimación de la cantidad de carbono almacenado en los suelos forestales (0-25 cm) de Gipuzkoa.
Fuente: Derivado de Neiker-Tecnalia (2014).

Especie de referencia	Superficie de las especies asignadas (ha)	Media ponderada del carbono en suelo (t C/ha)	Carbono total en suelo (Gg C)
<i>Pinus radiata</i>	41.382	68,82	2.847,91
<i>Pseudotsuga menziesii</i>	21.013	89,16	1.873,55
<i>Fagus sylvatica</i>	57.872	75,17	4.350,24
<i>Eucalyptus globulus</i>	606	69,88	42,35
			9.114

Por lo tanto, según los resultados de los muestreos presentados en el estudio Neiker-Tecnalia (2014), las existencias de carbono orgánico del suelo forestal de Gipuzkoa son de **9.114 Gg**.

5.2.3. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LAS ESTIMACIONES DE CARBONO DEL SUELO FORESTAL

Según las estimaciones basadas en la base de datos LUCAS, en el suelo forestal de Gipuzkoa se almacenan 12.414 Gg de carbono, con un valor medio de 102,7 t/ha. En cambio, a partir de los datos de Neiker-Tecnalia (2014) se han calculado unas existencias de carbono de 9.114 Gg, del cual se deduce un almacenamiento medio de 75,4 t/ha. A pesar de que entre estos dos resultados existe una desviación del 26%, teniendo en cuenta el orden de magnitud de la misma, se considera aceptable. Además, tal y como se ha mencionado anteriormente, el hecho de extrapolar la información de la base de datos LUCAS (originalmente definida para 0-20 cm) a una profundidad de 0-30 cm, ocasionará que el resultado sea ligeramente superior.

Los datos obtenidos de otras fuentes bibliográficas también muestran valores parecidos, por ejemplo, en un estudio realizado en España por Rodríguez-Murillo (2001), para una profundidad de 0-70 cm se estiman valores de 93,6 t C/ha y 75,8 t C/ha para los bosques de frondosas y coníferas, respectivamente. En el mapa de COS de España (Figura 14) realizado por Doblas-Miranda et al. (2013), para el caso de Gipuzkoa la cantidad de carbono orgánico presente en el primer metro es de entre 8 y 14 kg/m² (80 y 140 t/ha). A su vez, según el

Gobierno Vasco (2005), considerando una profundidad de 0-30 cm, los suelos forestales de Gipuzkoa almacenan 80 toneladas de carbono por hectárea.

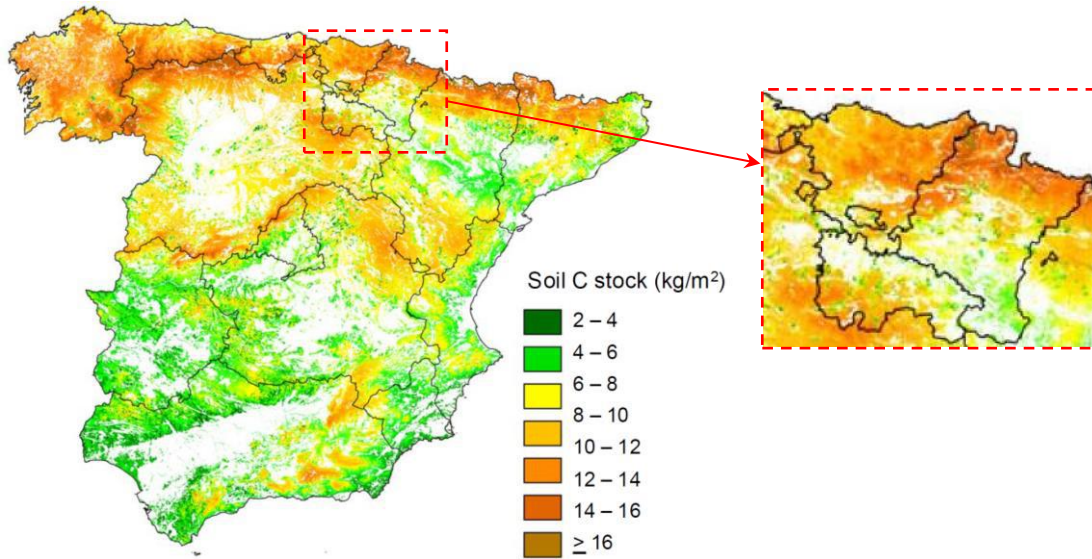


Figura 14: Mapa de COS (0-1 m) de las tierras que no utilizadas para agricultura (bosques, matorrales y pastos) en España. Fuente: Adaptado de Doblas-Miranda et al. (2013).

6. POTENCIAL DE ALMACENAMIENTO DE CARBONO DE LOS BOSQUES DE GIPUZKOA

Después de conocer las existencias de carbono que almacenan los bosques de Gipuzkoa en la actualidad, estas se compararán con su potencial. Para ello, se plantearán diversos escenarios hipotéticos donde se emplean unos modelos de gestión basados en el cambio climático.

6.1. POTENCIAL DE ALMACENAMIENTO DE CARBONO DE LA BIOMASA FORESTAL

Considerando que se mantiene la superficie actual de la cubierta arbórea de Gipuzkoa, para estimar el potencial de almacenamiento de carbono de la biomasa forestal, se han identificado dos de los principales factores que favorecerían el mismo: la especie forestal y el tipo de gestión.

Con el objetivo de identificar las especies forestales más efectivas de cara a fomentar el potencial de los sumideros de carbono, en la Tabla 18 se ha reunido la información más relevante de las Tablas 7 y 14.

Tabla 18: Capacidad de sumidero de carbono que tiene cada agrupación.

Agrupación	Superficie (ha)	Existencias en equilibrio (T/2) (Gg C)	Almacenamiento de carbono (t C/ha)
<i>Pinus nigra</i> y similares	21.013	1.930	91,85
<i>Pinus radiata</i> y similares	41.265	2.129	51,6
<i>Pinus sylvestris</i> y similares	117	9	75
<i>Quercus ilex</i> y similares	2.474	294	118,8
<i>Fagus sylvatica</i> y similares	18.099	1.922	106,2
<i>Quercus robur</i> y similares	37.231	6.501	174,6
<i>Eucalyptus spp.</i>	606	51	84,5
<i>Quercus faginea</i> y similares	68	6	94,8

Si se observan estos datos, es evidente que son las especies propias de la vegetación potencial las que mayor capacidad de almacenamiento de carbono tienen por unidad de superficie, como es el caso de las agrupaciones *Quercus ilex*, *Fagus sylvatica* y *Quercus robur*. Un estudio realizado en Bizkaia por Rodríguez-Loinaz et al. (2013) también refuerza

esta afirmación, concluyendo que las especies con mayor capacidad de almacenamiento de carbono son las especies autóctonas.

Teniendo en cuenta estos criterios, se ha planteado un escenario donde la superficie de la cobertura forestal de Gipuzkoa ocupada actualmente por plantaciones de árboles es sustituida por especies potenciales. Por lo tanto, en este estudio la biomasa forestal autóctona de Gipuzkoa se dividirá en dos grupos principales: hasta una altitud de 600 metros predominarán los robledales: agrupación *Quercus robur*; en cambio, por encima del límite de 600 metros, los hayedos: agrupación *Fagus sylvatica* (Aizpuru, Catalán y Garín, 2010; Loidi, Biurrun, Campos, García-Mijangos y Herrera, 2009). En el mapa de altitud de la Figura 15 se destaca el límite de los 600 metros. De acuerdo a los criterios expuestos anteriormente, en las zonas de color verde el potencial de biomasa forestal corresponderá a los robledales y en las zonas azules a los hayedos.

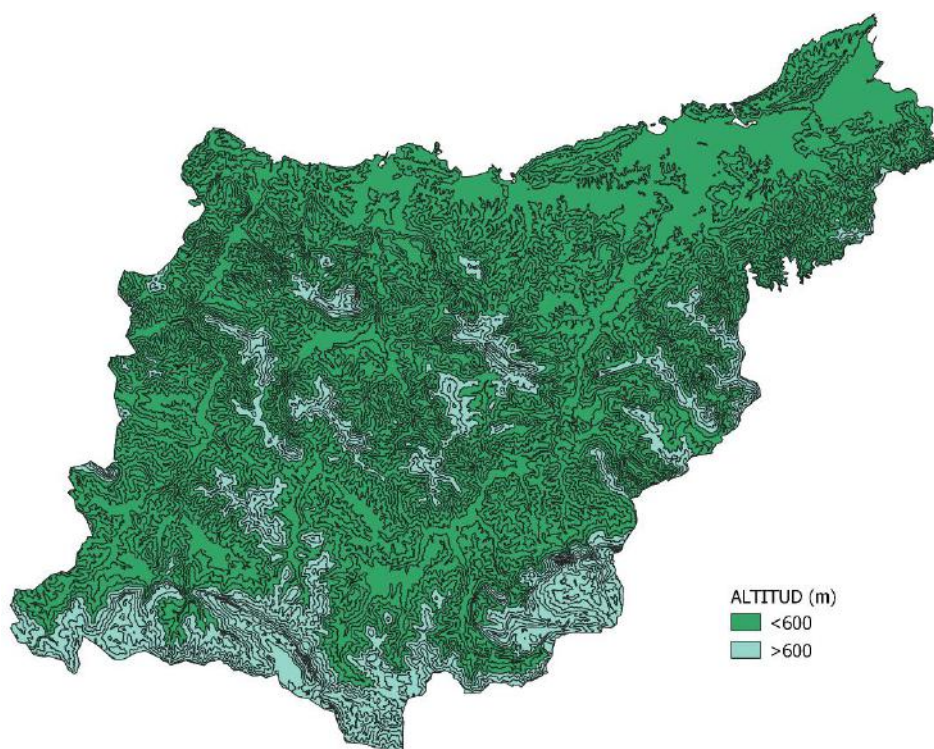


Figura 15: Límite de los 600 metros en el mapa de altitud de Gipuzkoa. Fuente: Elaborado a partir de la información geográfica de GeoEuskadi (2019).

Con el objetivo de conocer a qué altitud se encuentran los terrenos cubiertos por las plantaciones de árboles, las superficies cubiertas por plantaciones y las cotas superiores a 600 metros se han plasmado en la misma imagen (Figura 16). Tal y como se puede observar en ella, en proporción son muy pocas las plantaciones forestales que se sitúan por encima de la cota de 600 metros. Siendo esto así, y de cara a simplificar los cálculos, en el escenario hipotético que se plantea en este apartado se considerará que en las superficies cubiertas por plantaciones prevalece la agrupación *Quercus robur*.

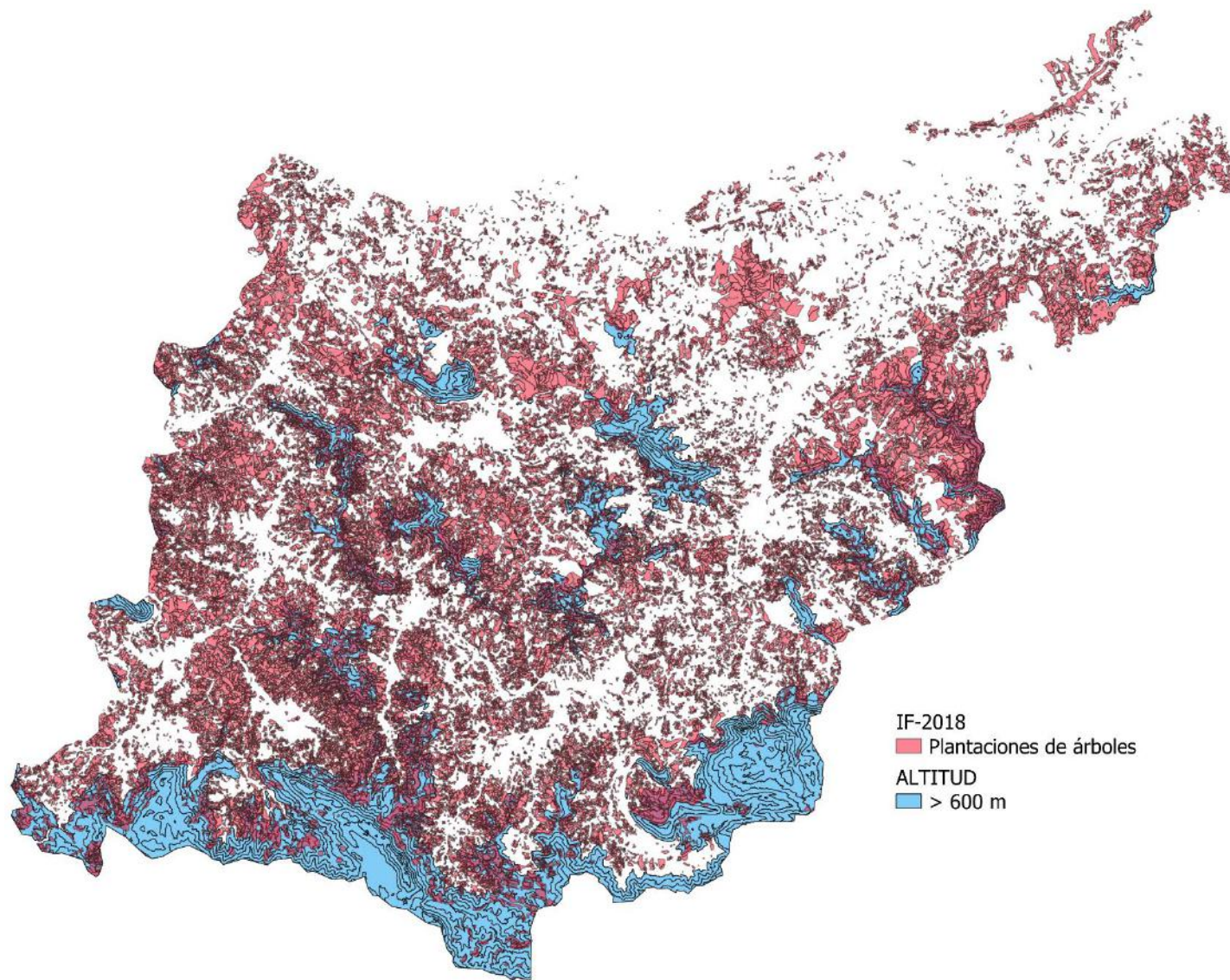


Figura 16: Altitud de las plantaciones de árboles: en rojo: superficie cubierta por plantaciones; en azul: altitudes superiores a los 600 m. Fuente: Elaborado a partir de la información geográfica de GeoEuskadi (2019).

Si se calcula la superficie total que abarcan las plantaciones de árboles en la distribución de especies de la Tabla 18, se concluye que en total cubren 63.001 hectáreas (Tabla 19).

Tabla 19: Distribución de cada agrupación forestal en Gipuzkoa; plantaciones marcadas en verde.

Agrupación	Superficie (ha)
<i>Pinus nigra</i> y similares	21.013
<i>Pinus radiata</i> y similares	41.265
<i>Pinus sylvestris</i> y similares	117
<i>Quercus ilex</i> y similares	2.474
<i>Fagus sylvatica</i> y similares	18.099
<i>Quercus robur</i> y similares	37.231
<i>Eucalyptus spp.</i>	606
<i>Quercus faginea</i> y similares	68
Plantaciones de árboles:	63.001

Por lo tanto, si en la superficie ocupada actualmente por plantaciones, estas cubiertas arbóreas se sustituyeran por especies potenciales (siguiendo los criterios establecidos anteriormente), se plantearía la situación hipotética de la Tabla 20. En ese escenario, se considera que las 63.001 hectáreas correspondientes a las especies de plantación son cubiertas por especies como *Quercus robur* y similares (las áreas correspondientes a las agrupaciones *Quercus ilex*, *Fagus sylvatica* y *Quercus faginea* se mantienen).

Tabla 20: Distribución hipotética de especies para promover el potencial de los bosques como sumideros.

Agrupación	Superficie (ha)
<i>Quercus ilex</i> y similares	2.474
<i>Fagus sylvatica</i> y similares	18.099
<i>Quercus robur</i> y similares	100.232
<i>Quercus faginea</i> y similares	68

En el escenario que se plantea en la Tabla 20, al mismo tiempo, se analizarán dos situaciones basadas en dos tipos de gestión diferentes:

- Tal y como se ha hecho anteriormente, el escenario T/2 propuesto por Neiker-Tecnalia (2014) (Tabla 21).
- Escenario sin explotación maderera (Tabla 22).

Tabla 21: Potencial de secuestro de la biomasa forestal de Gipuzkoa en una situación de equilibrio T/2.

Agrupación	Crecimiento de biomasa	Turno corta	Carbono presente en biomasa (t C/ha)		Superficie	Cortas en equilibrio		Existencias en equilibrio (T/2)
	(t C/ha-año)	(T, año)	T	T/2	(ha)	ha/año	Gg C/año	Gg C
<i>Quercus ilex</i> y similares	1,98	120	237,6	118,8	2.474	21	4,9	294
<i>Fagus sylvatica</i> y similares	1,77	120	212,4	106,2	18.099	151	32,0	1.922
<i>Quercus robur</i> y similares	2,91	120	349,2	174,6	100.232	835	291,7	17.501
<i>Quercus faginea</i> y similares	1,58	120	189,6	94,8	68	1	0,1	6
TOTAL								19.723

Tabla 22: Potencial de secuestro de la biomasa forestal de Gipuzkoa en un escenario sin explotación maderera.

Agrupación	Crecimiento de biomasa	Turno corta	Carbono presente en biomasa (t C/ha)	Superficie	Existencias totales
	(t C/ha-año)	(T, año)	T	(ha)	Gg C
<i>Quercus ilex</i> y similares	1,98	120	237,6	2.474	588
<i>Fagus sylvatica</i> y similares	1,77	120	212,4	18.099	3.844
<i>Quercus robur</i> y similares	2,91	120	349,2	100.232	35.001
<i>Quercus faginea</i> y similares	1,58	120	189,6	68	13
TOTAL					39.446

Un tipo de gestión basado en los criterios definidos en el apartado 5.1 posibilitaría almacenar 19.723 Gg de carbono en la biomasa forestal de Gipuzkoa (Tabla 21). Frente a esto, en un escenario sin talas, a partir del momento en el que los bosques alcanzan su máximo nivel de biomasa, estos almacenarían 39.446 Gg de carbono (el doble que en el escenario anterior). Por lo tanto, si se tomara en cuenta el único objetivo de aumentar las existencias de carbono de los bosques, el escenario óptimo sería aquel sin intervención humana.

6.2. POTENCIAL DE ALMACENAMIENTO DE CARBONO DEL SUELO FORESTAL

Tal y como se ha mencionado anteriormente, la mayor relación entre el carbono orgánico del suelo y las tasas de precipitación y temperatura se da en el intervalo 0-20 cm, de forma que disminuye a medida que aumenta la profundidad. En cambio, la correlación entre el carbono orgánico del suelo y las arcillas aumenta con la profundidad (Jobbágy y Jackson, 2000). Ante esta realidad, Neiker-Tecnalia (2014) plantea la siguiente clasificación respecto a la distribución vertical del COS:

a) Materia orgánica del suelo no protegida o libre.

Esta fracción de la materia orgánica del suelo es la más fácilmente accesible para los microorganismos y puede ser metabolizado en un tiempo relativamente breve (de unos pocos meses a pocos años).

b) Materia orgánica del suelo físicamente protegida.

A medida que la materia orgánica libre va descomponiéndose, mezclándose y combinándose con los componentes minerales del suelo, esta fracción queda protegida por oclusión en el interior de los agregados que se han formado.

c) Materia orgánica del suelo ligada a minerales de arcilla y limos (o capacidad predeterminada).

Gracias a las uniones entre la materia orgánica y los compuestos minerales derivados de la roca original, se forman complejos organo-minerales muy estables que pueden durar más de 100 años en el suelo. En este sentido, la capacidad de estabilizar carbono que tiene un suelo viene predeterminada por su cantidad de arcillas y limos, lo que al mismo tiempo está condicionada por la litología de cada lugar.

La distribución del carbono orgánico del suelo se explica mediante el modelo conceptual de la Figura 17:

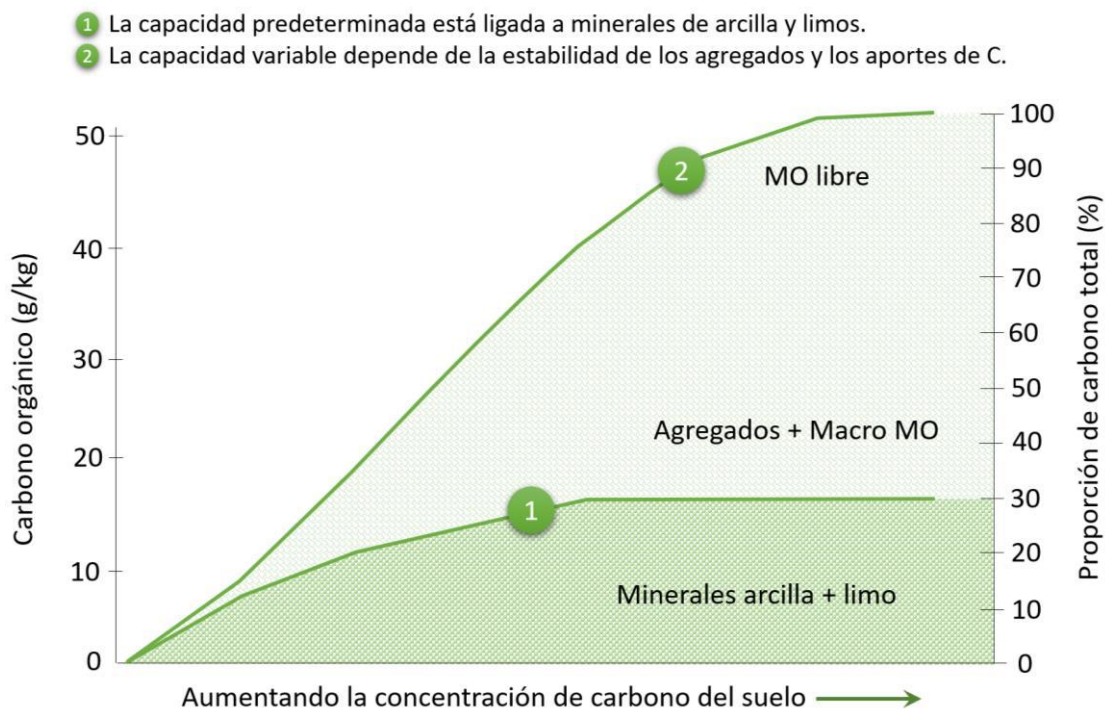


Figura 17: Modelo conceptual de la distribución del contenido y la proporción del carbono orgánico del suelo; se presentan los distintos tipos de capacidad. Fuente: adaptado de Carter (2002).

La materia orgánica del suelo ligada a arcillas y limos (la cual se denomina capacidad predeterminada), es del orden del 30% de la materia orgánica en la mayoría de los suelos (Neiker-Tecnalia, 2014). Siendo esto así, la capacidad predeterminada puede emplearse para estimar el potencial de carbono orgánico del suelo: si el carbono orgánico unido a las arcillas y limos constituye el 30%, se puede deducir el 100%.

Dado que la capacidad predeterminada depende del contenido de arcillas y limos, y teniendo en cuenta que en suelos jóvenes como los de la CAPV este está unido en gran medida a la litología del lugar (Neiker-Tecnalia, 2014), se ha comenzado por analizar el mapa litológico de Gipuzkoa (Figura 18).

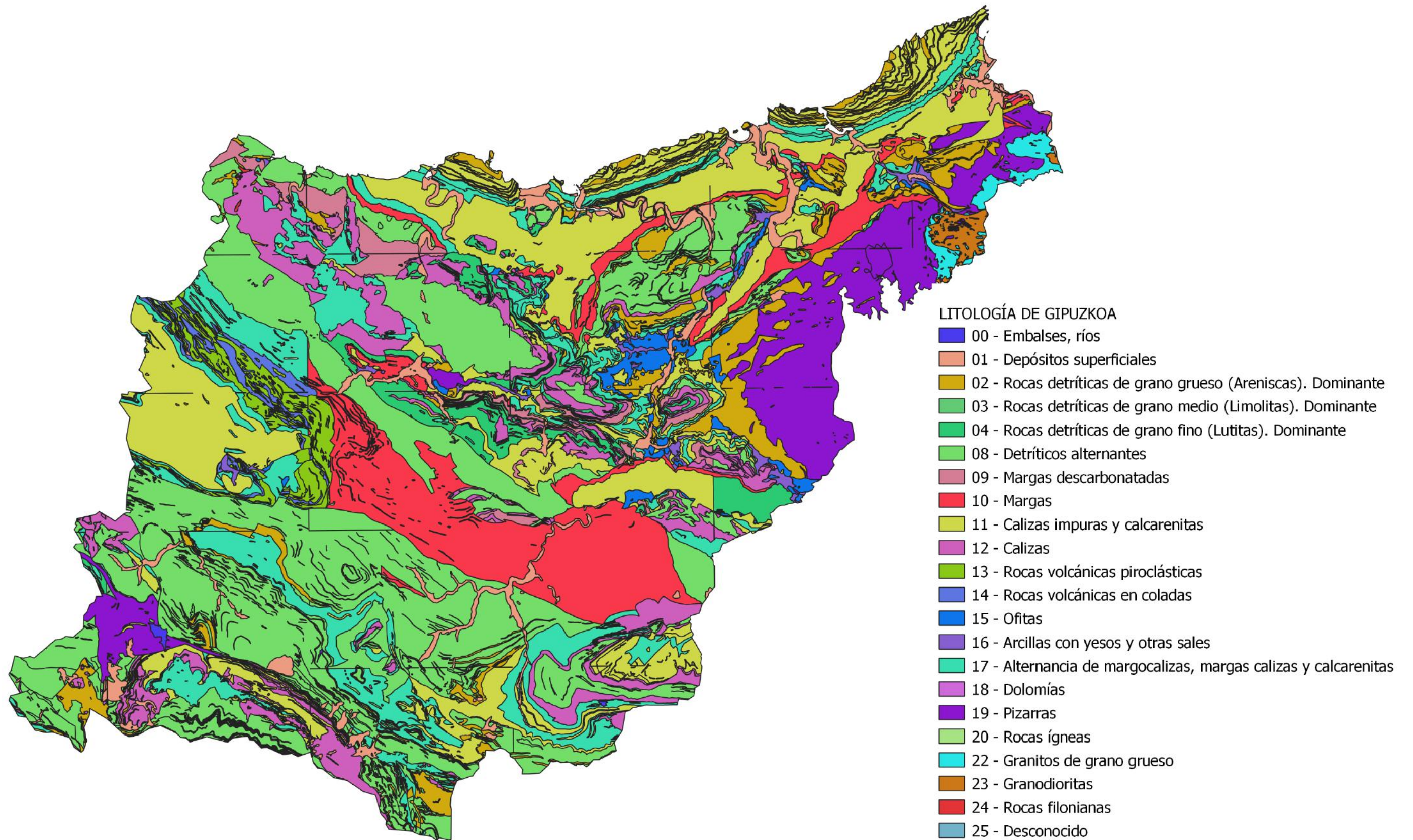


Figura 18: Mapa litológico de Gipuzkoa. Fuente: Elaborado a partir de la información geográfica de GeoEuskadi (2019).

Para conocer el nivel de capacidad predeterminada que pueda tener el suelo según el tipo de litología, se han recuperado los procedimientos empleados en el estudio Neiker-Tecnalia (2014). En él, el mapa litológico se divide en 10 clústeres o subgrupos y en este apartado también se ha clasificado la distribución litológica de la Figura 18 en 10 clústeres (Figura 19). Los criterios que se han seguido para realizar esta clasificación se describen en el apartado “III TERCER ANEXO”.

Ya que en este trabajo solamente se estudian los bosques de Gipuzkoa, en el mapa dividido en 10 clústeres solamente se ha considerado la superficie correspondiente a los mismos, justamente el definido por el inventario forestal de 2018 (GeoEuskadi, 2019). De esta manera, para desarrollar los cálculos se ha empleado el mapa de la Figura 20.

Entre la cobertura forestal de Gipuzkoa considerada en el inventario forestal de 2018 de la CAPV (120.591 ha) y la superficie del mapa de la Figura 20 existe una desviación de 282 hectáreas. Se deduce que esta diferencia de superficie se debe a la falta de precisión de los cálculos de corte realizados en el programa de GIS. A la hora de calcular el potencial de almacenamiento de carbono del suelo de los bosques de Gipuzkoa, la superficie correspondiente a esa desviación se ha multiplicado con una media ponderada de la capacidad predeterminada de los 10 clústeres (Tabla 23). De esta forma, se ha tenido en cuenta la superficie correspondiente a toda la cobertura forestal de Gipuzkoa (las 120.873 ha definidas por el inventario forestal de 2018).

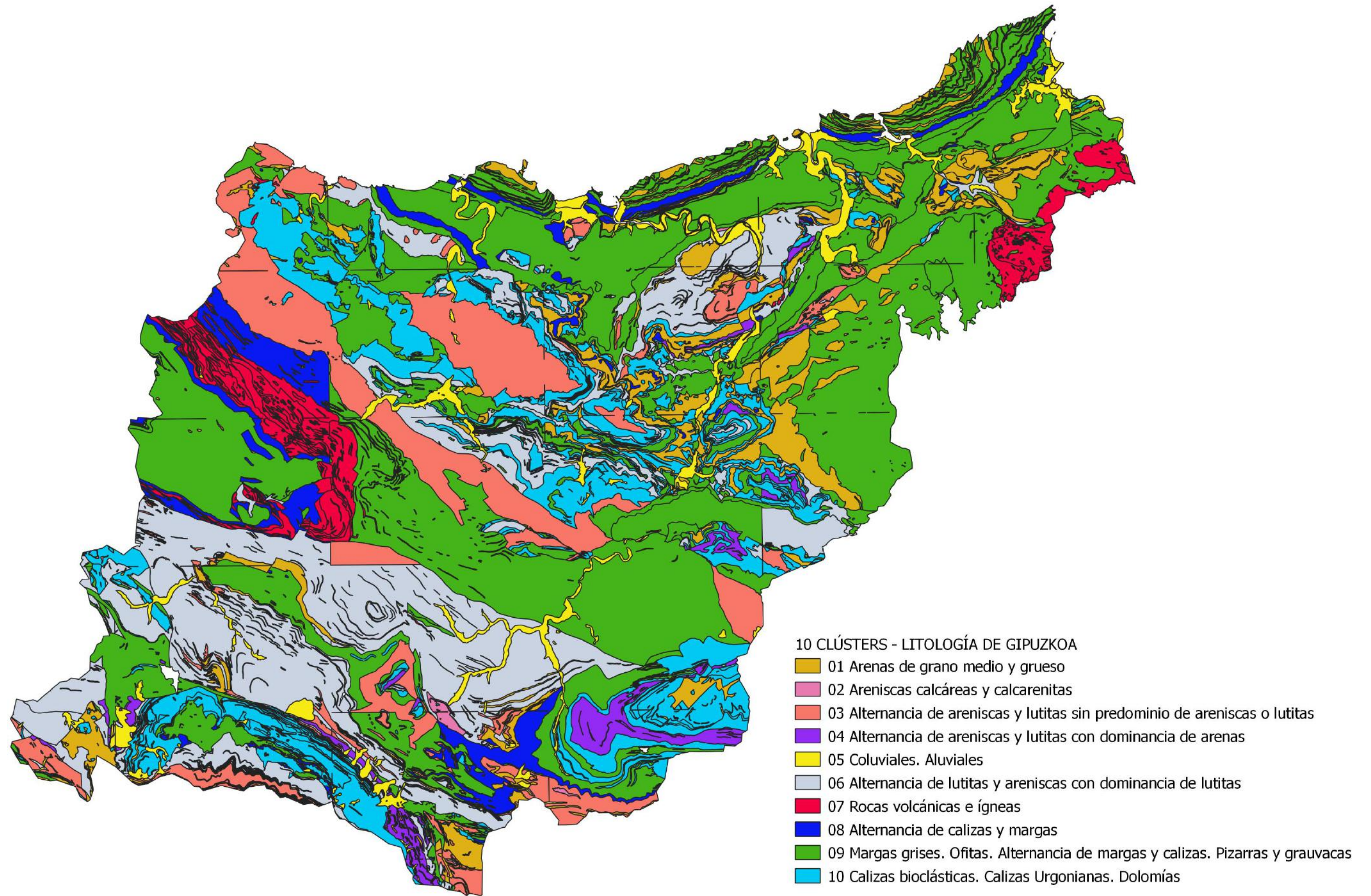


Figura 19: Clasificación del mapa litológico de Gipuzkoa en 10 clústeres.

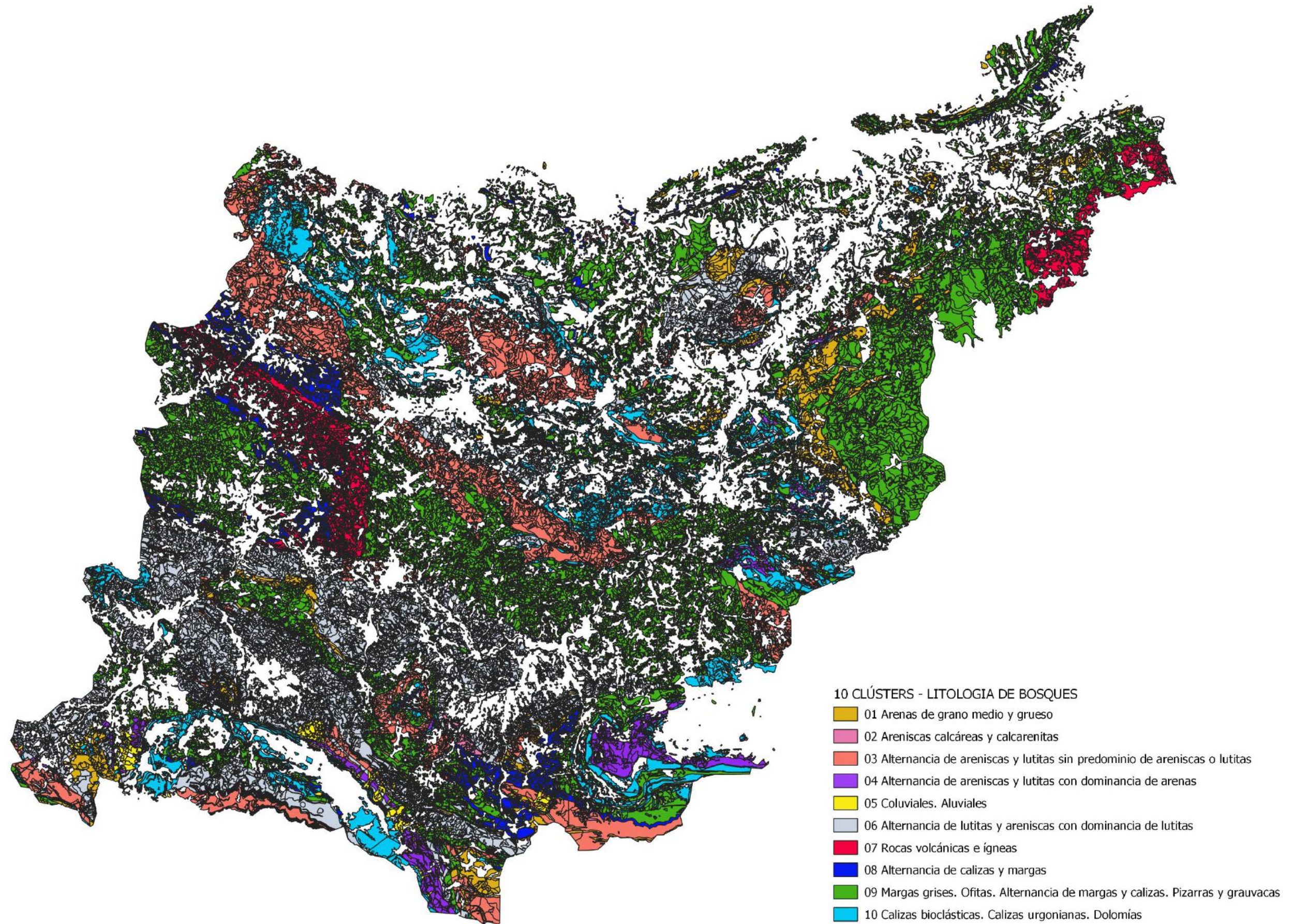


Figura 20: Clasificación del mapa litológico de las superficies forestales de Gipuzkoa en 10 clústeres.

Tabla 23: Potencial de almacenamiento de carbono del suelo de las superficies forestales de Gipuzkoa. Fuente: Neiker-Tecnalia (2014), GeoEuskadi (2019) e IF-2018.

Clase litológica	Superficie		Capacidad predeterm.	Potencial secuestro	
	(ha)	(%)	(t C/ha)	(t C/ha)	(Gg C)
01 Arenas de grano medio y grueso	8.007	6,6	62	208	1.661
02 Areniscas calcáreas y calcarenitas	197	0,2	69	229	45
03 Alternancia de areniscas y lutitas sin predominio de areniscas o lutitas	15.575	12,9	77	255	3.977
04 Alternancia de areniscas y lutitas con dominancia de arenas	2.580	2,1	74	248	640
05 Coluviales. Aluviales	1.354	1,1	75	249	338
06 Alternancia de lutitas y areniscas con dominancia de lutitas	22.760	18,9	79	263	5.980
07 Rocas volcánicas e ígneas	5.911	4,9	79	263	1.555
08 Alternancia de calizas y margas	4.643	3,9	80	267	1.238
09 Margas grises. Ofitas. Alternancia de margas y calizas. Pizarras y grauvacas	46.130	38,3	81	271	12.503
10 Calizas bioclásticas. Calizas urgonianas. Dolomías	13.434	11,1	85	282	3.790
	120.591				31.727
Superficie forestal total de Gipuzkoa según el inventario forestal de la CAPV de 2018 (ha):	120.873				
			Media ponderada capacidad predeterm.¹ (t C/ha)	Potencial secuestro (t C/ha)	Potencial secuestro (Gg C)
Diferencia entre el IF-2018 (120.873 ha) y la superficie analizada (120.591 ha):	282 ha		79	263	74
Potencial de secuestro mediante carbono orgánico del suelo para la cobertura forestal total de Gipuzkoa:				31.801	

¹ La media ponderada de la capacidad predeterminada se ha calculado según la superficie correspondiente a cada clúster.

6.3. ANÁLISIS Y CONCLUSIONES DE LA CAPACIDAD Y POTENCIAL DE LOS SUMIDEROS FORESTALES

En la Tabla 24 se reúnen los resultados de las estimaciones de las existencias actuales de carbono de los bosques de Gipuzkoa y su potencial:

Tabla 24: Estimaciones de almacenamiento de carbono de las superficies forestales: actual y potencial.

		Almacenamiento de carbono (Gg)	
Biomasa forestal	Actualmente	Neiker-Tecnalia (NT)	12.842
		Copernicus DMP	48.341
		IFN4	8.138
	Potencial	NT – Escenario T/2	19.723
		NT – Sin explotación	39.446
Suelo forestal	Actualmente	Lucas	12.414
		Neiker-Tecnalia	9.114
	Potencial	Neiker-Tecnalia	31.801

Se concluye que existen desviaciones notables entre los resultados de las estimaciones basadas en diferentes fuentes de información, tanto en lo que respecta a la biomasa forestal como al COS. Esto pone de manifiesto el nivel de incertidumbre que tienen las estimaciones de las existencias de carbono. Tal y como se ha explicado en el apartado 5.1.4, y dado que el resultado obtenido a partir de la base de datos Copernicus (2019) se aleja demasiado de las otras estimaciones, se ha decidido no tenerlo en cuenta.

A pesar de que estas estimaciones tendrán un error respecto a los valores reales, estos muestran que existe un gran margen de mejora entre el escenario actual y el óptimo. Por ejemplo, si se comparan los resultados obtenidos a partir de la misma base de datos (Neiker-Tecnalia, 2014):

- El hecho de reemplazar las plantaciones de especies de crecimiento rápido por especies potenciales (manteniendo la situación T/2) mejoraría el almacenamiento de la biomasa forestal en un 54% (de 12.842 Gg a 19.723 Gg).
- Si además de reemplazar las plantaciones de especies de crecimiento rápido por especies potenciales, se permitiera el desarrollo de la cobertura forestal sin intervención humana, la biomasa forestal llegaría a triplicarse (de 12.842 Gg a 39.446 Gg).

- Las reservas de carbono orgánico del suelo almacenan menos de un tercio de su potencial: a pesar de que la capacidad máxima es de 31.801 Gg, según las estimaciones solamente se almacenan 9.114 Gg de carbono en el COS de los bosques de Gipuzkoa.

Aunque se estima que en las reservas de carbono de los bosques templados el 60% se almacena en el suelo (Dixon et al., 1994), según los resultados obtenidos este sería del 40%: 12.842 Gg en la biomasa forestal y 9.114 Gg en el COS. El Gobierno Vasco (2011) afirma que en la mayoría de los casos la pérdida del COS es el resultado de un sistema de gestión intensivo desarrollado durante décadas, por lo que se cree que se deberían incorporar variables basadas en el cambio climático a la gestión forestal, para así mejorar la capacidad que tienen los bosques o las plantaciones como sumideros de carbono.

7. PRÁCTICAS DE GESTIÓN FORESTAL PARA FOMENTAR LOS SUMIDEROS DE CARBONO

En este apartado se han identificado diversas prácticas para fomentar las existencias de carbono que almacenan los bosques. Los ecosistemas forestales son muy complejos y su capacidad como sumideros de carbono estará condicionada por muchos factores, por lo que no todos los proyectos forestales fijan carbono en la misma medida, de forma que muchos de ellos emiten carbono a la atmósfera (Harmon, 2001). Además, la gestión forestal, más allá de condicionar la fortaleza de los sumideros, afecta a los intercambios de vapor de agua y energía entre los bosques y la atmósfera, lo que a su vez puede tener consecuencias en el cambio climático (Naudts et al., 2016). Por eso, en opinión de estos investigadores, una gestión forestal dirigida a mitigar el cambio climático debe tener en cuenta los cambios biogeoquímicos (emisiones de gases de efecto invernadero) y los cambios biofísicos (los relativos a los flujos de agua y energía).

7.1. DISTRIBUCIÓN DE LAS ESPECIES ARBÓREAS

Según las estimaciones realizadas en los apartados 5 y 6, es evidente que en el caso de Gipuzkoa son los bosques formados por especies autóctonas los que tienen mayor capacidad como sumideros de carbono. En este mismo contexto, son muchos los investigadores de nivel mundial y regional que defienden las ventajas y beneficios que proporcionan los bosques autóctonos frente a las plantaciones de árboles exóticos (Díaz et al., 2009; Lewis, Wheeler, Mitchard y Koch, 2019; Pérez et al., 2007; Rodríguez-Loinaz et al., 2013; Ruiz-Peinado et al., 2017).

Dado que la investigación de Rodríguez-Loinaz et al. (2013) se centra en el territorio de Bizkaia, y como se considera que la situación y los resultados son, en gran medida, extrapolables a Gipuzkoa, se le hará una mención especial en las siguientes líneas.

Rodríguez-Loinaz et al. (2013) proponen tres escenarios para el territorio de Bizkaia donde se fomentan diferentes especies arbóreas:

- **Escenario de servicios:** Las plantaciones de eucalipto y pino situadas en pendientes iguales o superiores al 30%, gradualmente (a medida que se completan los turnos de corta), son remplazados por especies de frondosas autóctonas (*Quercus robur* y *Fagus sylvatica*).
- **Escenario de biomasa:** Las plantaciones de pino, gradualmente, se convertirán en plantaciones de eucalipto.

- **Escenario donde se mantiene la gestión actual:** Se mantendrá la distribución actual de las especies, suponiendo que después de una tala se vuelve a plantar la misma especie.

Hay que mencionar que, a la hora de estimar las existencias de carbono de cada escenario, Rodríguez-Loinaz et al. (2013) únicamente han considerado la biomasa forestal (sin tener en cuenta el suelo y otras reservas). Tal y como se puede observar en la Figura 21, a pesar de que a corto y a medio plazo ocurre lo contrario, se concluye que a largo plazo (más de 50 años) el escenario de servicios almacena más carbono que los otros dos. De esta forma, al final del periodo analizado (110-150 años), el escenario de servicios almacena un 38% y un 70% más de carbono que los escenarios de gestión actual y de biomasa, respectivamente (Rodríguez-Loinaz et al., 2013). Además, Rodríguez-Loinaz et al. (2013) prevén que, si se considerara el carbono almacenado en el suelo, esta diferencia sería aún mayor.

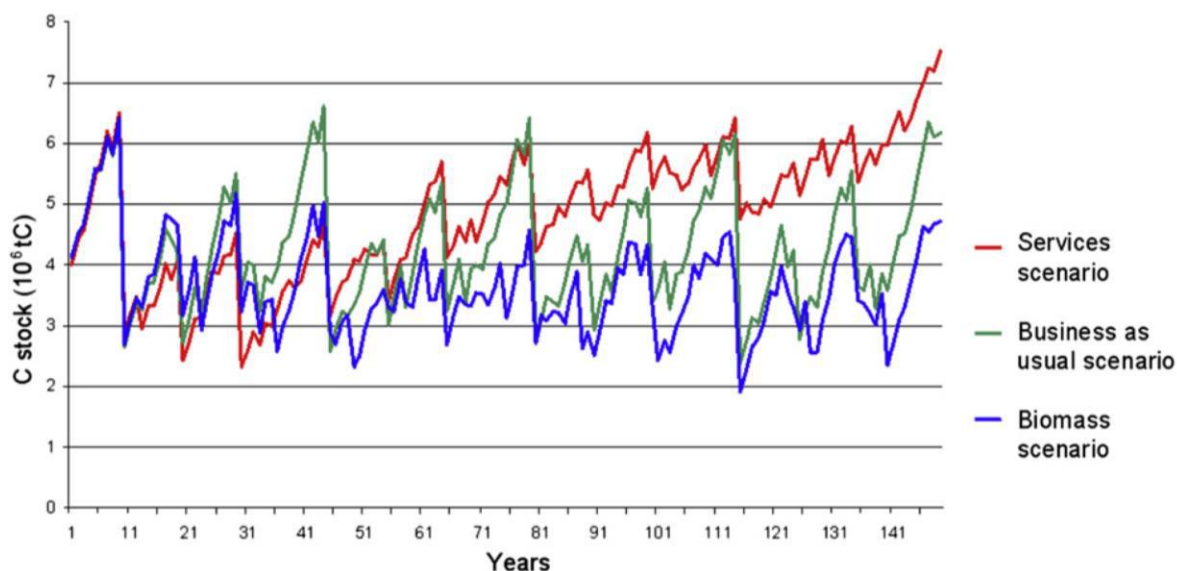


Figura 21: Evolución de las existencias de biomasa en los tres escenarios estudiados.
Fuente: Rodríguez-Loinaz et al. (2013).

Pérez et al. (2007) han estimado la capacidad de fijar carbono que tienen tres distribuciones de especies diferentes en un estudio situado en Austria, considerando la biomasa aérea y subterránea, el carbono orgánico del suelo y la madera extraída. De esta forma, plantean tres escenarios:

- **Masa de abeto rojo:** combinación de abeto rojo (*Picea abies*) y roble (*Quercus robur x petraea*).
- **Masa de pino:** cobertura forestal formada por pino rojo (*Pinus sylvestris*).
- **Masa de roble:** robledal autóctono (*Quercus robur x petraea*).

Una vez más, de los datos de la Figura 22 se deduce que las especies con mayor capacidad para fijar carbono son los robledales (*Quercus robur x petraea*) (Pérez et al., 2007).

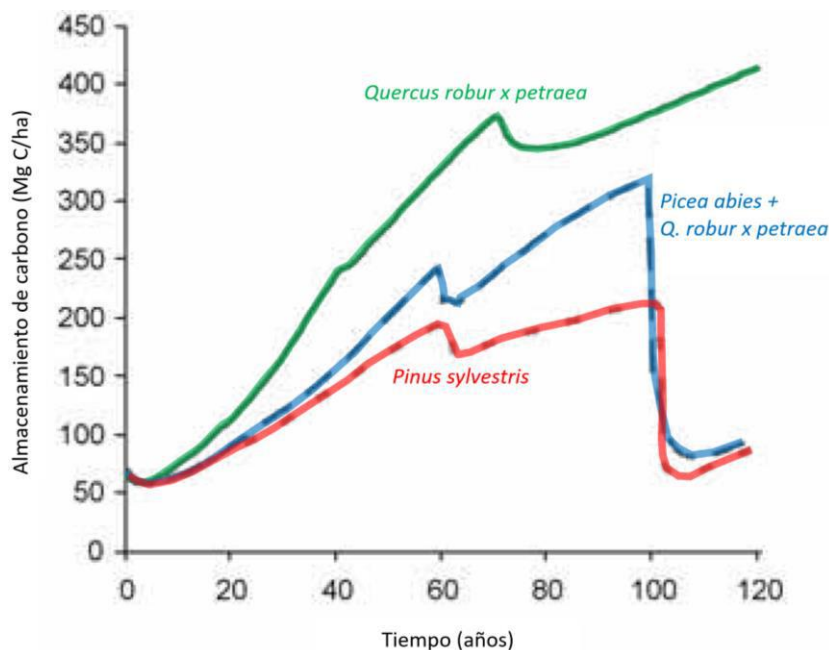


Figura 22: Almacenamiento total de carbono en el tiempo de distintas especies; la disminución repentina de las existencias se atribuye a aclarados o talas. Fuente: adaptado de Pérez et al. (2007).

En este sentido, y según Ruiz-Peinado et al. (2017), del mismo modo que las especies frondosas pueden producir un aumento del 25% del COS, las plantaciones de especies como *Pinus spp.* y *Eucalyptus spp.* pueden disminuirlo un 12%. No obstante, estos autores admiten que los procesos de estabilización de carbono en el suelo son lentos, pudiendo durar incluso más de un siglo. Por ello, puede ocurrir que estos incrementos del COS no sean detectables a corto-medio plazo (Ruiz-Peinado et al., 2017).

Además, frente a las coberturas forestales compuestas por una única especie, se deduce que los bosques formados por diferentes especies tienen mayor capacidad de almacenar carbono; esto se obtiene mediante una mejora de la calidad de la hojarasca, fijación de carbono, estratificación de las raíces, equilibrio de los recursos hídricos, microclima del suelo y accesibilidad de nutrientes (Ruiz-Peinado et al., 2017).

El servicio como sumidero de carbono viene condicionado por varios factores, como, por ejemplo, la velocidad que tiene la vegetación para absorber carbono y convertirlo en biomasa, las existencias de carbono que puede almacenar un sistema y la sostenibilidad que tienen estas en el tiempo (Rodríguez-Loinaz et al., 2013). Por lo tanto, y a pesar de que las especies de crecimiento rápido absorben carbono más rápidamente, la cantidad de existencias y su sostenibilidad en el tiempo condicionan mucho más la mitigación del cambio climático que la velocidad de absorción de carbono (Thomas, Malczewski y Saprúnoff, 2007). Además, según Ruiz-Peinado et al. (2017), hay que prestar especial atención a las explotaciones intensivas de especies de crecimiento rápido, ya que advierten que su productividad puede sufrir consecuencias negativas a largo plazo.

En base a los resultados de los apartados 5 y 6, y al estudio bibliográfico realizado, se concluye que las especies más apropiadas para aumentar la capacidad de los sumideros de carbono del territorio de Gipuzkoa son las especies de árboles autóctonas.

7.2. EDAD, ESTRUCTURA Y MADERA MUERTA DE LOS BOSQUES

Frente a las plantaciones de árboles, los “bosques naturales” tienen mucha más capacidad para almacenar carbono: estas, más allá de ser bosques formados por especies autóctonas, son ecosistemas que no han sufrido perturbaciones humanas (o cuyas consecuencias han sido muy leves) (Lewis et al., 2019). Por eso, además de las especies arbóreas, hay muchas otras características que hay que tener en cuenta.

Una de las diferencias más notables entre coberturas que han sido gestionadas de forma intensiva o aquellas que no han sufrido alteraciones humanas, es la clase diamétrica de los árboles. De esta manera, las coberturas arbóreas que han soportado explotaciones humanas, casi no presentan individuos de grandes diámetros (Figura 23); al contrario, en bosques maduros, se pueden encontrar árboles de clase diamétrica mucho mayor (Figura 24). En el caso de estos últimos, es habitual encontrar una media de 10 ± 1 árboles por hectárea que tienen un diámetro igual o superior a 80 cm (Commarmot et al., 2013).

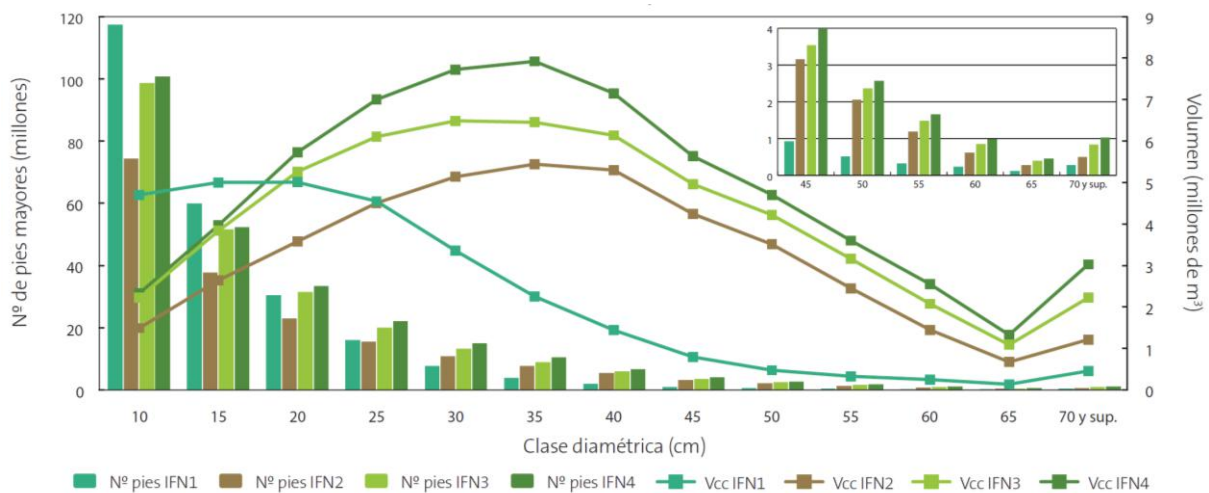


Figura 23: Evolución de la cantidad de árboles (representado por las columnas verticales, en millones) y el volumen (representado por las líneas, en millones de m³) de las diferentes clases diamétricas en la CAPV. Columna azul: número de árboles según el Primer Inventario Forestal Nacional (IFN1); columna marrón: número de árboles según el Segundo Inventario Forestal Nacional (IFN2); columna verde claro: número de árboles según el Tercer Inventario Forestal Nacional (IFN3); columna verde oscuro: número de árboles según el Cuarto Inventario Forestal Nacional (IFN4). Línea azul: volumen según IFN1; línea marrón: volumen según IFN2; línea verde claro: volumen según IFN3; línea verde oscuro: volumen según IFN4.

Fuente: Cuarto Inventario Forestal Nacional (2013).

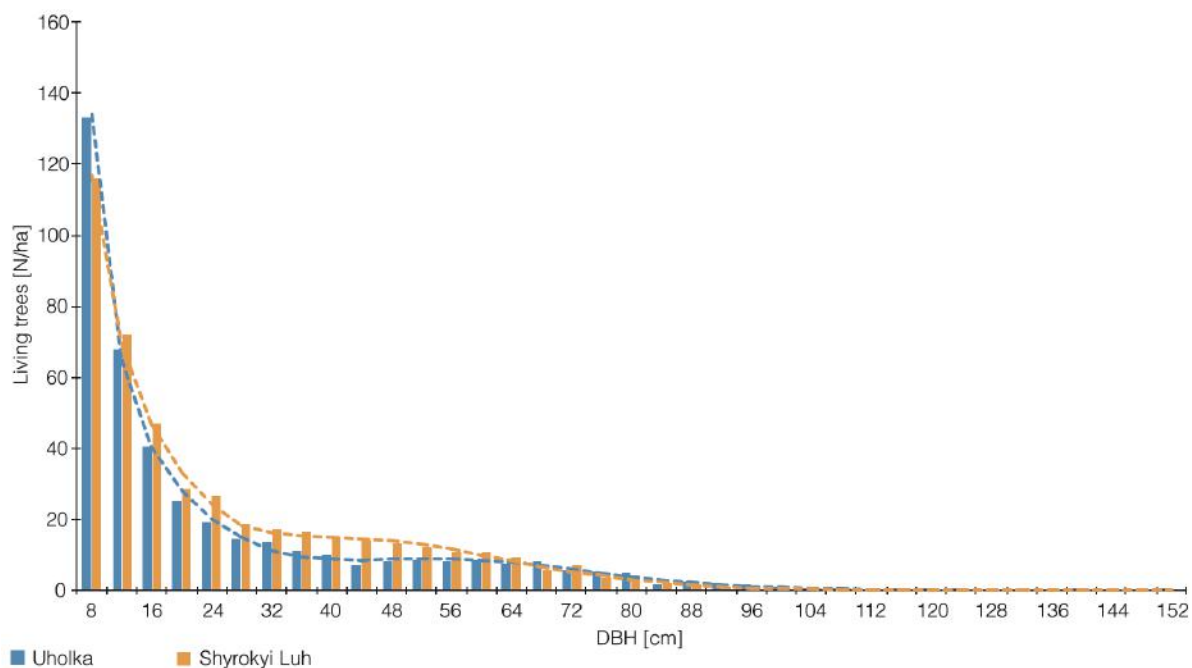


Figura 24: Existencias de las diferentes clases diamétricas (n/ha) en dos zonas (Uholka y Shyrokyi Luh) de un hayedo primitivo de Ucrania. DBH: diámetro a la altura del pecho (*diameter at breast height*): a una altura de 1,3 metros. Fuente: Commarmot et al. (2013).

Muchas personas que se dedican al sector forestal creen que los bosques jóvenes son las estructuras más apropiadas para fijar carbono, ya que estos crecen más rápido que los bosques maduros (Harmon, 2001). Además, según este punto de vista, los bosques maduros presentar más árboles muertos, cuya descomposición provoca que sus emisiones de carbono sean superiores a los de los bosques jóvenes.

Harmon (2001) cree que según la escala que se analice, esta afirmación no tiene por qué ser cierta, sobre todo si se aplica la escala del ecosistema. En su opinión, a la hora de estimar el almacenamiento de carbono no hay que tener en cuenta únicamente el crecimiento de los árboles, sino que se deberían considerar factores como la fotosíntesis y la respiración de las plantas, muerte de los árboles, producción de hojarasca, descomposición y formación de la materia orgánica estable del suelo forestal, perturbaciones causadas por talas o incendios, y la fabricación y uso de productos derivados de la madera. Si se incorpora este enfoque al contexto anterior, a pesar de que un bosque joven pueda tener grandes tasas de crecimiento de biomasa, si se calcula el balance neto de carbono, es posible que se deduzca que está emitiendo carbono a la atmósfera: en bosques jóvenes, es habitual encontrar ramas y restos de madera apilados como consecuencia de las últimas actividades de tala, y si se considera la descomposición de todo este material, puede ocurrir que, aunque los árboles estén creciendo rápidamente, el bosque esté emitiendo más carbono a la atmósfera del que se asimila mediante fotosíntesis (Harmon, 2001; Luysaert et al., 2008). Por el contrario, en el caso de los bosques maduros, normalmente la producción neta de los ecosistemas (NEP)

suele ser positiva, de manera que la probabilidad máxima para que unos bosques de 60, 180 y 300 años supongan unas emisiones netas a la atmósfera es de 0,20, 0,25 y 0,35, respectivamente (Luyssaert et al., 2008). Según estos autores, los bosques que tienen más de 200 años absorben una media de $2,4 \pm 0,8$ t C/ha cada año. Por consiguiente, a la hora de realizar estimaciones concretas sobre la capacidad de los sumideros de carbono, hay que tener en cuenta componentes que no están directamente relacionados con los árboles (Harmon, 2001; Balboa-Murias, Rojo, Álvarez y Merino, 2006).

Según algunos puntos de vista, aquellos sistemas que no asimilan carbono mediante procesos de fotosíntesis (y que además emiten carbono por la descomposición) no son capaces de almacenar carbono. Por eso, siguiendo esa lógica, solamente se consideran las plantas vivas a modo de sumideros de carbono a largo plazo. A pesar de que esto puede ser cierto en una escala de un árbol muerto o una simple hoja, los detritos, el suelo o ciertos productos de madera tiene capacidad de almacenar carbono a largo plazo (Harmon, 2001; Ruiz-Peinado et al., 2017). Según Harmon (2001), estas tres reservas mencionadas anteriormente no pueden asimilar carbono de la atmósfera mediante fotosíntesis, pero pueden almacenar carbono permanentemente, si se mantienen los aportes de carbono que reciben a lo largo del tiempo.

En opinión de Harmon (2001), es verdad que por ejemplo, cuando un árbol muere, su descomposición supone unas emisiones de carbono a la atmósfera, pero este proceso puede durar décadas (Luyssaert et al., 2008) y al mismo tiempo, si los árboles mueren a un ritmo constante, las existencias de carbono almacenadas en los árboles se irán sumando, aumentando las reservas de carbono (Figura 25).

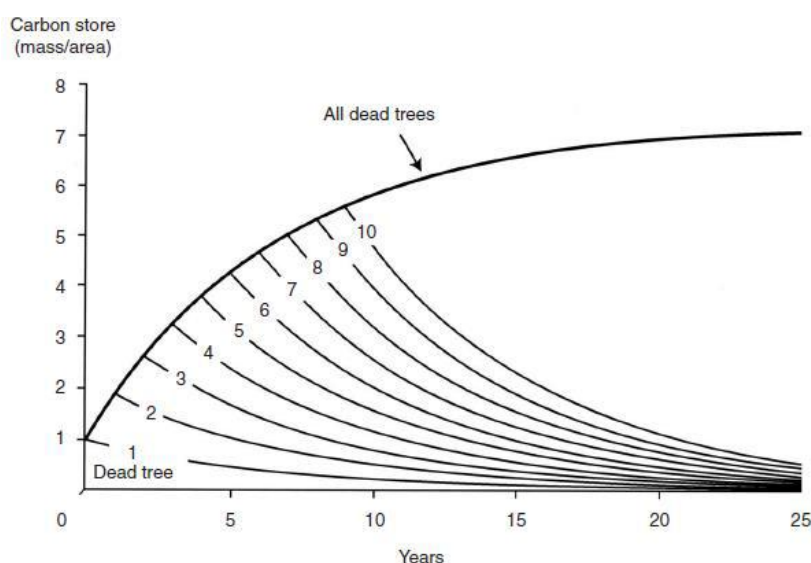


Figura 25: Comparación de la capacidad de secuestro de carbono de un árbol muerto o de más. En este ejemplo los árboles muertos van sumándose al ecosistema. A pesar de que la descomposición de cada árbol muerto supone una emisión de carbono, la línea superior muestra la suma de todas las existencias, la cual demuestra que la suma sigue aumentando a lo largo de los años. Fuente: Harmon (2001).

Además, a pesar de que algunos estudios dicen lo contrario (Franklin et al., 1981; Odum, 1969), la producción primaria neta (NPP) de los bosques maduros no es cero. En consecuencia, Harmon (2001) afirma que existen bosques maduros que resultan más productivos que los jóvenes. Según este investigador, irónicamente, es la propia producción de toda la materia muerta de los bosques maduros lo que evita que tengan emisiones netas a la atmósfera.

El volumen de madera muerta contabilizado en unas reservas forestales ubicadas en unos hayedos de Europa, muestra un valor medio de 130 m³/ha, donde en diferentes zonas se han observado mediciones de entre casi cero y 550 m³/ha (Christensen et al., 2005). En la Tabla 25 se ve claramente que tanto el volumen de madera muerta como el ratio “madera muerta:madera viva” son mayores a medida que la reserva es más antigua.

Tabla 25: Observaciones realizadas en algunos hayedos declarados como reservas: volumen da madera muerta, volumen de árboles vivos, relación entre el volumen de madera muerta y árboles vivos, y el porcentaje que constituyen los troncos muertos (aún en pie) frente a la cantidad total de madera muerta.

Fuente: Christensen et al. (2005).

	Declarado hace tiempo, zona montañosa	Declarado hace tiempo, zona no tan montañosa	Declarado recientemente, zona montañosa	Declarado recientemente, zona no tan montañosa	Total
Madera muerta (m ³ /ha)	220 ± 115 (16)	132 ± 70 (20)	117 ± 74 (6)	99 ± 98 (43)	130 ± 103 (86)
Volumen vivo (m ³ /ha)	625 ± 110 (16)	538 ± 148 (18)	529 ± 88 (6)	545 ± 143 (36)	559 ± 136 (77)
Relación madera-viva/muerta (%)	36 ± 21 (16)	29 ± 18 (18)	21 ± 14 (6)	12 ± 7 (36)	22 ± 17 (77)
Relación entre el volumen de troncos muertos/madera muerta (%)	41 ± 19 (14)	29 ± 13 (19)	47 ± 19 (5)	23 ± 15 (43)	29 ± 17 (82)

Valores medios ± error estándar y entre paréntesis el número de zonas. Para contabilizar la madera muerta se ha considerado un diámetro > 5 cm.

Además de eso, hay que tener en cuenta que la propia madera muerta se divide en diversas etapas de decadencia. Por ejemplo, en el caso de un hayedo maduro situado en Ucrania, la madera muerta constituye el 22% del volumen total de la biomasa, de forma que se estiman unas existencias de 163 m³/ha (Commarmot et al., 2013) cuya distribución se muestra en la Figura 26.

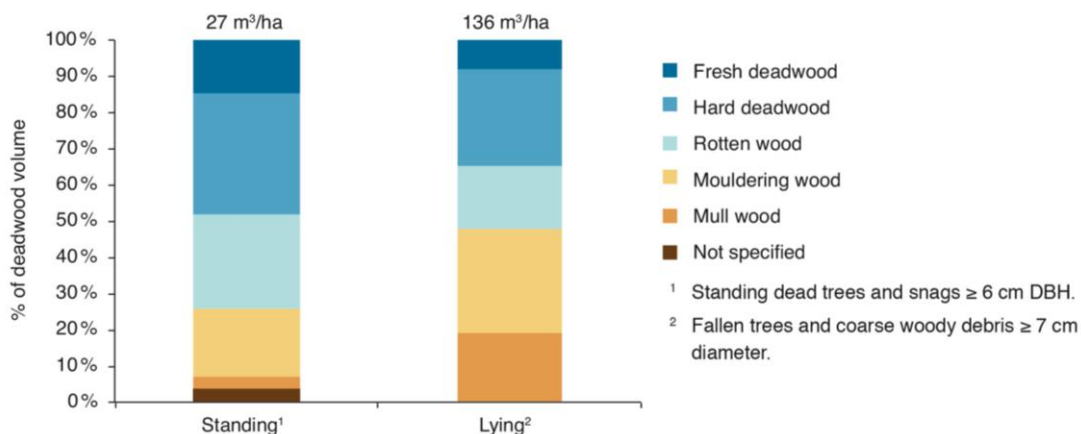


Figura 26: Distribución en porcentaje de las distintas etapas de decadencia de la madera muerta, en las estructuras que aún se mantienen en pie y en las ya caídas. Fuente: Commarmot et al. (2013).

Hoy en día, en los bosques gestionados con fines productivos, el volumen medio de madera muerta suele ser inferior a 10 m³/ha (Christensen et al., 2005). De los datos obtenidos del Cuarto Inventario Forestal Nacional (2013) se deduce que para el caso de la CAPV el volumen medio de madera muerta es de 10,96 m³/ha (Tabla 26). Además, hay que tener en cuenta que los datos de la Tabla 26 son generales, por lo que, si se observasen únicamente los bosques gestionados, se prevé que el volumen de madera muerta sería aún más bajo.

Tabla 26: Densidad de madera muerta en las principales formaciones boscosas. Fuente: Cuarto Inventario Forestal Nacional (2013).

Formación boscosa	Volumen (m ³ /ha)
<i>Pinus radiata</i> pinares	11,10
Hayedos (<i>Fagus sylvatica</i>)	9,80
Bosque mixto autóctono de hoja caduca	16,30
Encinares (<i>Quercus ilex</i>)	2,40
<i>Quercus faginea</i>	4,40
Otras coníferas	8,20
<i>Pinus sylvestris</i> pinares	10,30
Eucaliptos (<i>Eucalyptus sp.</i>)	5,10
<i>Pinus nigra</i> pinares	9,10
<i>Q. robur</i> y/o <i>Q. petraea</i> robledales	7,70
Melojares (<i>Quercus pyrenaica</i>)	5,00
Bosques de ribera	13,00
<i>Pinus pinaster</i> pinares	6,90
Replantaciones de <i>Quercus rubra</i>	8,80
Media ponderada¹:	10,96

¹Para calcular la media se ha considerado la superficie forestal de Gipuzkoa según el IF-2018.

De aquí se deduce que la cantidad de madera muerta de los bosques sin gestionar es 10-20 veces mayor que el de los bosques gestionados de forma intensiva (Christensen et al., 2005).

Se estima que, en los últimos dos siglos y medio, el haber puesto en producción 417.000 km² de bosques sin gestionar ha causado la emisión de 3,5 Pg de carbono a la atmósfera. Esto se debe a que en los bosques sin gestionar se almacenaba un 24%, 43%, 8% y 6% más carbono en la biomasa viva, trozos de ramas, hojarasca y el suelo, respectivamente (Naudts et al., 2016).

En algunos casos, los matorrales también pueden ser importantes en lo que respecta al almacenamiento de carbono, ya que, además de aumentar la biomasa aérea, contribuirán a incrementar la materia orgánica del suelo (Li et al., 2016). Por ejemplo, en los bosques abiertos de *Quercus ilex* del oeste de España, como la densidad de la cobertura arbórea es menor, la aportación que hacen los matorrales a la biomasa total puede ser de entre el 20-29% (Ruiz-Peinado et al., 2017). Además, según estos últimos, el matorral ayuda en el proceso de regeneración de nuevos árboles.

La Figura 27 destaca la superioridad que tienen los bosques naturales como sumideros de carbono frente a las plantaciones. Mediante la iniciativa Bonn Challenge y otras estrategias nacionales, 43 países se han comprometido a recuperar los bosques naturales, pero como existen opiniones de que estos, a medio plazo, podrían ser reemplazadas por plantaciones, se han planteado cuatro escenarios posibles, para así conocer la contribución de almacenamiento de carbono de cada uno de ellos (Lewis et al. 2019).

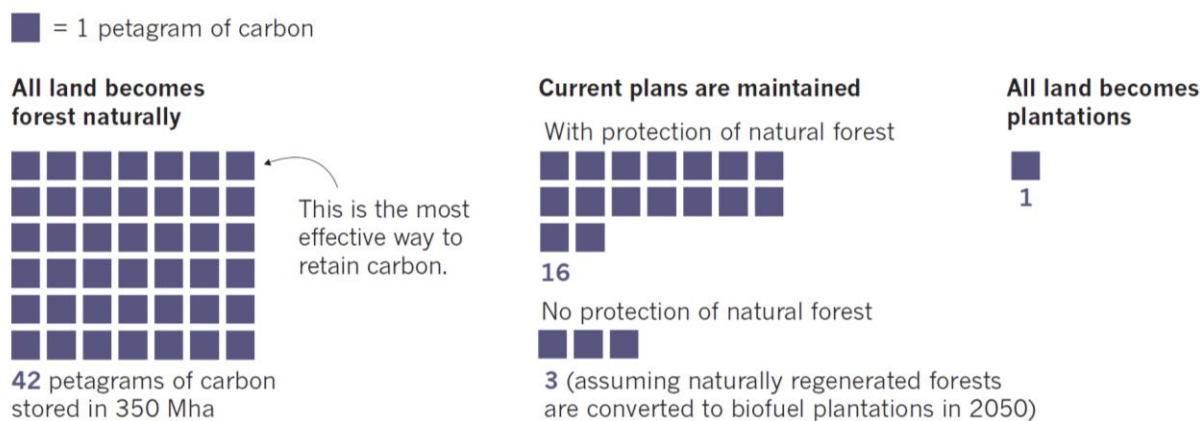


Figura 27: El almacenamiento de carbono de 4 escenarios planteados considerando 43 países que mediante la iniciativa Bonn Challenge u otras estrategias nacionales se han comprometido a recuperar los bosques.
Fuente: Lewis et al. (2019).

Por eso, a largo plazo, proteger los bosques naturales de las perturbaciones humanas resulta tan importante como su recuperación (Lewis et al., 2019). De hecho, según las últimas investigaciones (Figura 28), los bosques maduros, además de almacenar grandes existencias de carbono, continúan aumentando su biomasa a través de los siglos (Luyssaert et al., 2008).

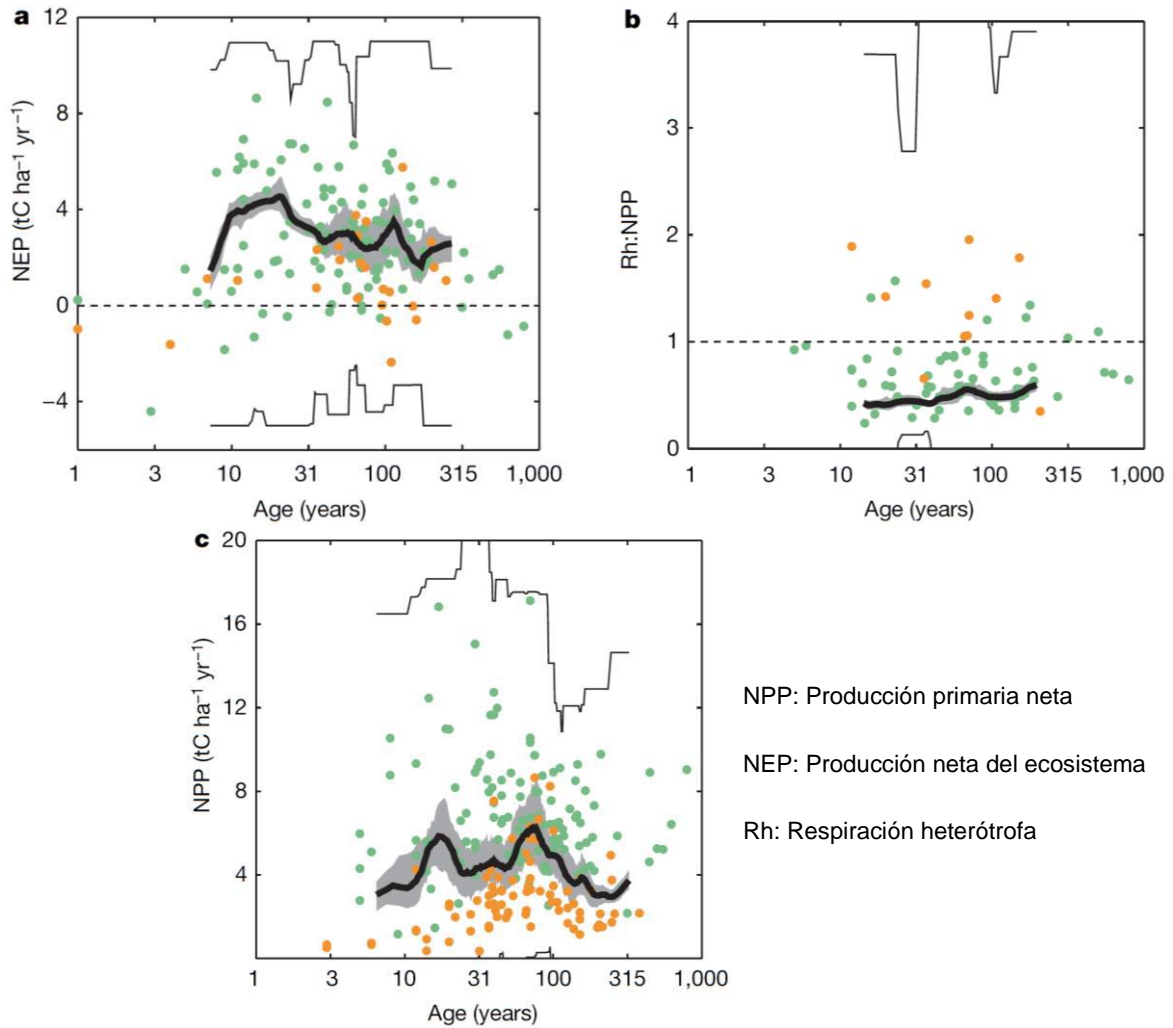


Figura 28: Variación de flujos de carbono durante el tiempo. a) NEP observado en el tiempo; b) Relación entre respiración heterótrofa y NPP en el tiempo: $Rh:NPP < 1$ indica un almacenamiento de carbono; c) NPP observado en el tiempo. Los puntos verdes indican observaciones realizadas en bosques templados y los naranjas, de los bosques boreales; la línea gruesa negra refleja el valor medio de las observaciones y la zona gris indica un intervalo de confianza del 95%; la línea fina negra (donde se pueda observar) muestra las observaciones de flujo individuales con un intervalo de confianza del 95%. Fuente: Luyssaert et al. (2008).

En el mismo sentido, Luyssaert et al. (2008) afirman que la biomasa forestal está ligada principalmente a los troncos de los árboles (Figura 29). Para que un árbol llegue a ser maduro, es preciso que este sobreviva a las perturbaciones que puedan dañarlo (incendios, plagas, vendavales, avalanchas, etc.), por eso, las masas jóvenes son más habituales que las maduras, incluso en los bosques sin gestionar. A nivel de paisaje, existirá un mosaico de bosques caracterizados por la época donde estos sufrieron la última perturbación de sustitución. A pesar de tener edades y densidades diferentes, tal y como se muestra en la Figura 29, se espera que estos bosques mantengan la misma relación entre la biomasa y la densidad (Luyssaert et al., 2008).

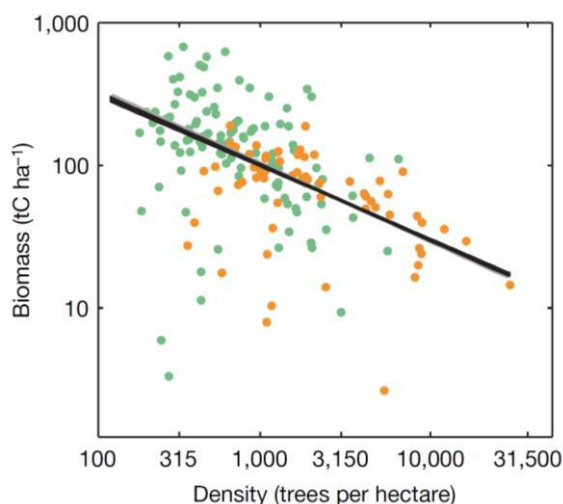


Figura 29: Cantidad de biomasa según la densidad de árboles. Los puntos indican los valores observados en distintos bosques, con especies y tasas de crecimiento diferentes. Los puntos verdes indican observaciones realizadas en bosques templados y los naranjas, de los bosques boreales; la línea negra muestra el valor medio de las observaciones y la zona gris (difícilmente apreciable) indica un intervalo de confianza del 95%.
Fuente: Luyssaert et al. (2008).

Balboa-Murias et al. (2006) destacan la importancia que tiene la función de almacenar carbono (tanto en el suelo como en la biomasa) que tienen los bosques naturales maduros. En el mismo sentido, Schulze, Wirth y Heimann (2000) defienden que, frente a los bosques jóvenes que promueve el protocolo de Kyoto, el hecho de proteger los bosques naturales maduros tiene una mayor influencia en el ciclo mundial del carbono. De hecho, y a pesar de que los procedimientos de estimación, la escala que se aplica y las diversas variables (GPP, NPP, NEP, NBP...) pueden acarrear incertidumbres y causar malentendidos, si se consideran los ecosistemas en su totalidad, son los bosques maduros los que tienen mayor potencial como sumideros de carbono (Balboa-Murias et al., 2006; Harmon, 2001; Luyssaert et al., 2008; Ruiz-Peinado et al., 2017; Schulze et al., 2000).

Según el sistema forestal que se aplique, la estructura de edad será diferente. Por ejemplo, con razones económicas por medio, en el modelo de gestión más habitual se fomentan las estructuras formadas por árboles de la misma edad, siendo la madera el producto más importante (Ruiz-Peinado et al, 2017). Por el contrario, las estructuras de diferentes edades, además de tener una mayor capacidad como sumideros de carbono, son una buena opción para mejorar otros servicios ecosistémicos, como, por ejemplo, la protección del suelo y los recursos hídricos, mejora de la biodiversidad y el incremento de otros productos (setas, hongos, frutos silvestres, etc.) (Pukkala, 2016). La razón por la que las estructuras de diferentes de edades son una mejor alternativa para almacenar carbono es que estas proporcionan protección y un aporte continuo de hojarasca al suelo; en las estructuras de la misma edad, en ciertos periodos de tiempo el suelo estará sin ningún tipo de cobertura (o con muy poca), lo que puede provocar pérdidas de carbono (Puhlick et al., 2016; Ruiz-Peinado et al, 2017).

7.3. PROCESOS DE EXPLOTACIÓN

Aunque es evidente que el tipo de gestión que se desarrolla en un bosque afecta directamente a la biomasa forestal, este también puede tener consecuencias en las reservas de carbono del suelo. Según el grupo funcional de la vegetación, la distribución vertical del carbono orgánico del suelo cambia notablemente. Por ejemplo, si se observa la distribución relativa del COS en el primer metro de suelo, se verá que este es más profundo en los matorrales, medio en los prados y más superficial en los bosques: considerando el primer metro del suelo, en caso de los matorrales, en los primeros 20 cm se almacena el 33% del COS, en los prados el 42% y en los bosques el 50% (Jobbágy y Jackson, 2000). Entre las acciones que afectan al COS, se encuentran, por ejemplo, las talas de árboles, preparación del suelo, drenaje del agua, la plantación de especies adaptadas, etc. y la forma de desarrollar los mismos puede afectar directamente al COS, de forma que las consecuencias dependerán de la intensidad de las intervenciones y el tipo de bosque (Lal, 2005). A medida que las acciones llevadas a cabo en la gestión forestal influirán en el COS, estos también afectarán a la calidad y a la productividad del suelo (Lal, 2005).

A pesar de que el mayor incremento en el almacenamiento de carbono se consigue mediante procesos de forestación o reforestación, considerando el uso del suelo actual en la CAPV, la reforestación de grandes superficies es limitada, sobre todo en la vertiente cantábrica (Gobierno Vasco, 2005). Ya que, según el inventario forestal de 2018 de la CAPV, el 47% de Araba, 59% de Bizkaia y el 61% de Gipuzkoa están ya cubiertos por árboles. Por eso, hay que dar importancia a mejorar el almacenamiento de carbono mediante prácticas forestales apropiadas (Diputación Foral de Gipuzkoa, 2018; Gobierno Vasco, 2016).

7.3.1. *Procesos de preparación del suelo*

Ya que en la mayoría de las intervenciones humanas se emplea maquinaria pesada, la compactación causada por las prácticas de preparación del suelo pueden provocar la disminución del almacenamiento de carbono a corto-medio plazo (Ruiz-Peinado et al., 2017), por lo que según Lal (2005), sería interesante evitar la compactación del suelo. A la hora de realizar plantaciones de árboles, es importante dirigir la preparación del suelo forestal a mejorar su calidad, para así, conseguir aumentar las reservas de carbono (Lal, 2005). En este mismo sentido, el Gobierno Vasco (2005) propone emplear técnicas poco agresivas para evitar la erosión del suelo.

Para acelerar la recuperación de los bosques naturales es posible realizar plantaciones de especies arbóreas autóctonas, pero la regeneración natural es la alternativa más barata y

técnicamente más fácil (Lewis et al., 2019). Según este mismo estudio, la expansión de las superficies en proceso de regeneración natural se puede impulsar mediante la legislación y medidas de promoción enfocadas a ello.

7.3.2. Influencia de las extracciones de madera sobre el COS

Además de las pérdidas de las existencias de carbono ocasionadas por la disminución de biomasa causada por las extracciones de madera, existen muchos otros factores que afectan a las reservas de carbono. De hecho, tanto las labores de explotación como los posteriores procesos de reforestación (naturales o desarrollados por los humanos) provocan perturbaciones en el suelo y en la vegetación, como, por ejemplo, el incremento de la descomposición de residuos de madera, hojarasca y la materia orgánica del suelo (respiración heterótrofa), de manera que esta puede ser superior al crecimiento de biomasa NPP (Luysaert et al., 2008). En ese caso, considerando los flujos netos de ese sistema, se emitiría más carbono a la atmósfera del que se absorbe de la misma.

Son diversas las razones del incremento de la respiración heterótrofa: el hecho de perder o disminuir la cobertura forestal provocará que la radiación solar que llegue al suelo sea mayor, y, por lo tanto, mediante fotodegradación o por el incremento de la temperatura del suelo, se puede acelerar la descomposición de la materia orgánica del suelo (Barkley et al., 2015; Ruiz-Peinado et al., 2017). Por si esto fuera poco, la cantidad de hojarasca que fertiliza el suelo disminuirá y la erosión causada por las intervenciones humanas puede acarrear más efectos negativos para el COS (Lal, 2005).

El gráfico denominado “Covington Curve” (Figura 30) describe las dinámicas posteriores a una tala y concluye que en los 20 años posteriores a estas intervenciones se pierde el 50% del COS. Esta pérdida se atribuye a la disminución del aporte de hojarasca, cambios en las existencias leñosas y herbáceas, cambios en la distribución vertical de las raíces de la vegetación, alteraciones en los regímenes de agua y temperatura del suelo que aumentan la descomposición y la disminución de la producción primaria neta (NPP) (Lal, 2005).

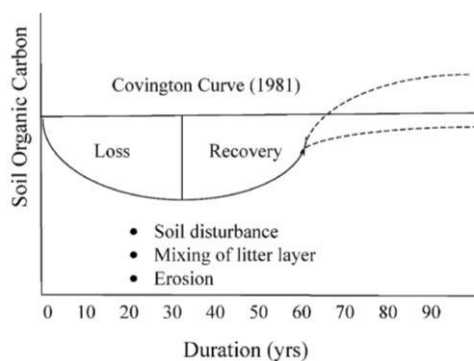


Figura 30: Curva Covington. La pérdida de COS a causa de las talas y su evolución en el tiempo. Fuente: Lal (2005).

Puede ocurrir que, a raíz de las labores de explotación, el suelo forestal se mezcle con el suelo mineral y que esto tenga consecuencias en el COS (Ruiz-Peinado et al., 2017). Además de esto, con el aumento del nivel de exposición del suelo, se intensifica la erosión y puede causar la lixiviación del carbono orgánico disuelto (Lal, 2005). Como consecuencia de esto, Puhlick et al. (2016) concluyen que, si se tiene en cuenta el almacenamiento medio de carbono de todo el ecosistema, los sistemas forestales de tala selectiva tienen mayor capacidad de almacenamiento de carbono que los explotados mediante “matarrasa”. Como causa de esta última práctica, se elimina toda la cobertura arbórea de una zona concreta y esto provoca que una parte importante del carbono almacenado en el suelo vuelva a la atmósfera (Lacroix, Petrenko y Friedland, 2016). Según estos, las reservas estables de carbono relacionadas con los minerales son notablemente superiores en los bosques maduros en comparación con las zonas que han sufrido talas.

Petrenko y Friedland (2014) defienden que, antes de afirmar que dirigir la biomasa arbórea a la bioenergía tiene como resultado un flujo de carbono neutro, es preciso conocer el efecto que tienen las explotaciones forestales en el equilibrio de carbono de los ecosistemas. Ya que, el hecho de eliminar de golpe amplias coberturas arbóreas es una perturbación grave para los ecosistemas del lugar, de modo que esto puede acarrear pérdidas significativas en las reservas de carbono. Como consecuencia, y con el fin de reducir las emisiones de carbono, antes de promover la biomasa forestal como alternativa a los combustibles fósiles, en primer lugar, se necesita información precisa sobre las condiciones de equilibrio del carbono (Petrenko y Friedland, 2014).

Tal y como se ha mencionado anteriormente, las labores de explotación aumentan la erosión del suelo y esto puede causar pérdidas de COS (Lal, 2005). En los procesos de erosión del suelo, este se desplaza debido a la influencia de diferentes agentes y, a la vez, acarrea una disminución del COS, de forma que tiene consecuencias en las reservas de carbono (ESDAC, 2019; Olson, Al-Kaisi, Lal y Cihacek, 2016). Por eso, para mantener o aumentar la capacidad de los sumideros de carbono es imprescindible poner en marcha estrategias para reducir la erosión.

Los deslizamientos de tierra causados por las labores de explotación pueden crear canales (Figura 31) que aumenten la erosión por agua; el suelo será más vulnerable según la pendiente de la zona, su nivel de humedad, su estructura y sus características (Barkley et al., 2015; Florida Forest Service, 2018).



Figura 31: Canales formados como consecuencia de la tala y extracción de árboles.
Fuente: Barkley et al. (2015).

Por eso, es importante conocer las características del suelo de cada lugar, para así planificar las intervenciones humanas que se llevarán a cabo y, de esta forma, tratar de minimizar la erosión que causaran las mismas (Barkley et al., 2015). Es preciso analizar bien el planteamiento de las pistas dirigidas a la explotación forestal, ya que con frecuencia son estas las que causan los mayores problemas de erosión; es por esto que su recorrido, dimensiones y diseño deben enfocarse a minimizar la erosión (Barkley et al., 2015; Florida Forest Service, 2018). Además de su construcción, Barkley et al. (2015) subrayan la importancia del mantenimiento de las mismas, sobre todo centrado a minimizar la erosión del suelo y a proteger los recursos hídricos, ya que, más allá de las consecuencias que pueden afectar a los sumideros de carbono, de cara a proteger el suministro y la calidad de los recursos hídricos, el imprescindible desarrollar una gestión forestal apropiada. Por todo ello, de debe prestar especial atención a las explotaciones cercanas a barrancos, arroyuelos y arroyos, de cara a minimizar la erosión y los efectos que puedan tener las explotaciones forestales sobre los recursos hídricos (Florida Forest Service, 2018).

Las pérdidas de suelo más importantes ocurren en los territorios administrativos explotadas de forma más intensiva (Borrelli, Panagos, Märker, Modugno y Schütt, 2017). En una investigación realizada por estos últimos en Italia, mientras que las menores pérdidas de suelo (0,33 t/ha por año) de observan en bosques que no han sufrido perturbaciones, en zonas explotadas mediante “matarrasa” estas crecen notablemente, de forma que se han estimado valores de 25,66 t/ha anuales en el primer año. Según Borrelli et al. (2017), las grandes

pérdidas de suelo muestran la tendencia del suelo para sufrir erosión, sobre todo donde la erosividad de la lluvia es alta y la pendiente de la zona es grande (>%25). Cuando la cobertura forestal es eliminada por completo (prácticas de “matarrasa”) en terrenos con pendientes superiores al 20%, las altas tasas de precipitación, por medio de la erosión, causan una notable degradación del suelo (Borrelli et al., 2017).

Como se puede observar en la Figura 32, la mayor parte de la superficie de Gipuzkoa tiene pendientes superiores al 30% (GeoEuskadi, 2019). Por si esto fuera poco, según ESDAC (2019), la tendencia de erosión causada por la lluvia en el territorio de Gipuzkoa se sitúa entre las más altas de Europa (Figura 33) y se prevé que esta aumentará en el futuro, sobre todo en el interior (Figura 34). A la hora de realizar estas estimaciones, se tienen en cuenta tanto la cantidad de precipitación como su intensidad (Panagos et al., 2015).

Por lo tanto, el sector forestal debe preocuparse de los impactos que causan las labores de explotación, sobre todo, debe evaluar con mucho cuidado los factores de gestión de las zonas con tendencia a sufrir problemas de erosión (Elliot, Page-Dumroese y Robichaud, 1999).

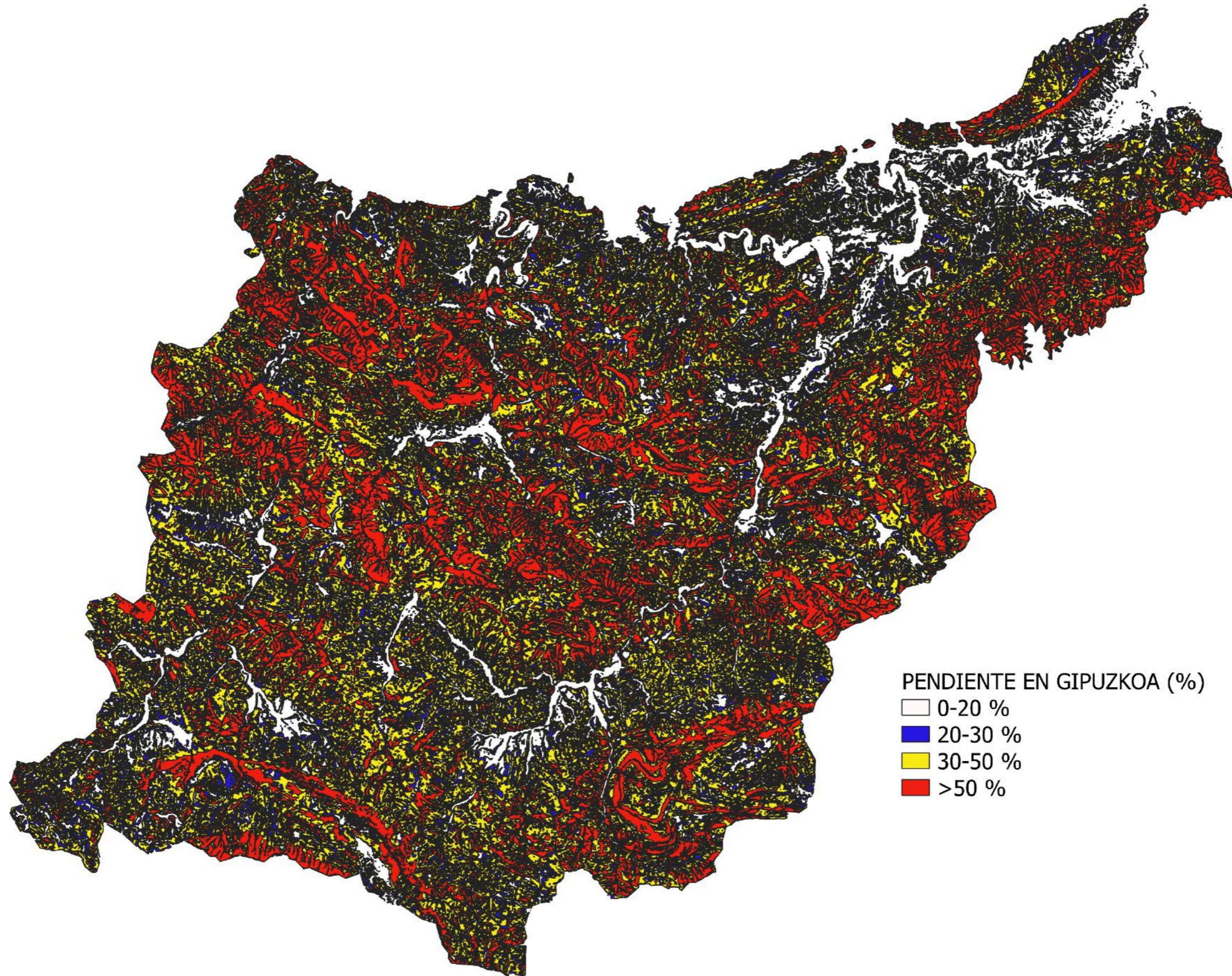


Figura 32: Mapa de pendientes de Gipuzkoa. Fuente: Elaborado a partir de la información geográfica de GeoEuskadi (2019).

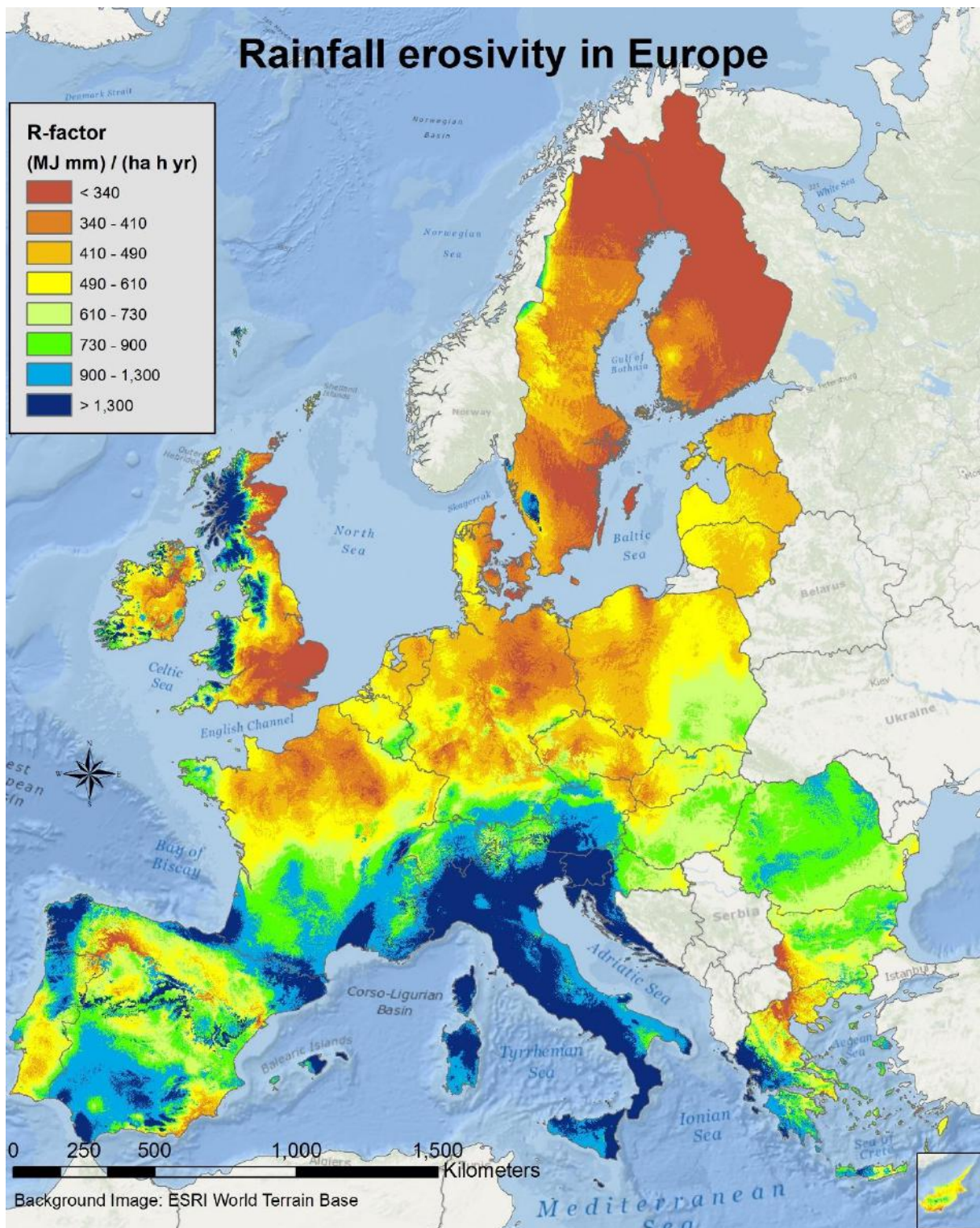


Figura 33: Erosividad a causa de la lluvia en Europa. Fuente: ESDAC (2019).

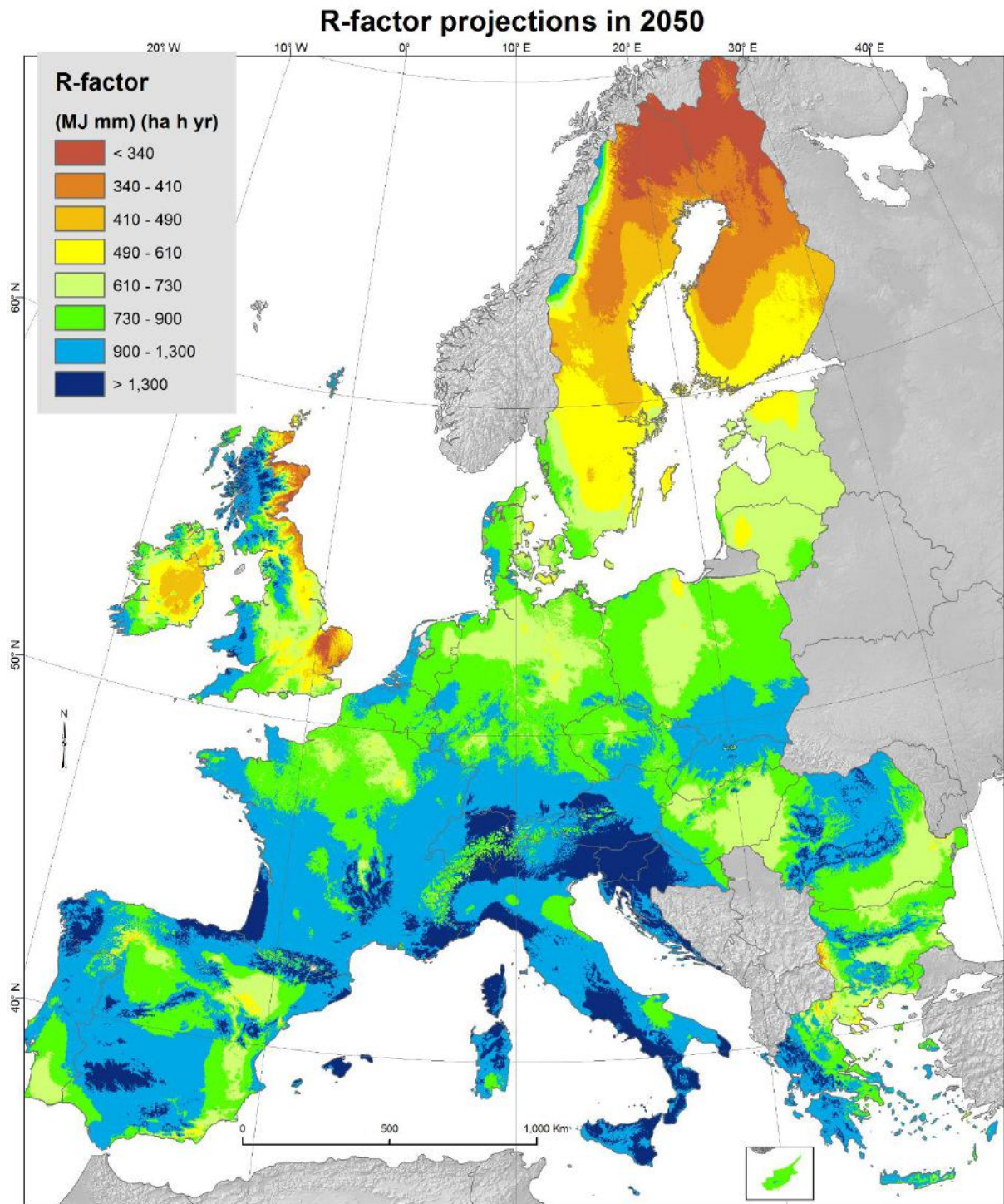


Figura 34: Previsiones de erosividad a causa de la lluvia en Europa para el año 2050. Fuente: ESDAC (2019).

7.3.3. Influencia de las extracciones de madera sobre la biomasa forestal

Llevar a cabo explotaciones forestales en un bosque o una plantación de árboles, tendrá consecuencias en sus existencias de carbono (Harmon, 2001; Lal, 2005; Luysaert et al., 2008; Nunery y Keeton, 2010; Schulze et al., 2000). De esta forma, la extracción de madera supondrá una pérdida de biomasa, la cual, posteriormente aumentará debido al incremento de la NPP (Schulze et al., 2000). Esto causará una respuesta en forma de “diente de sierra” (Figura 35).

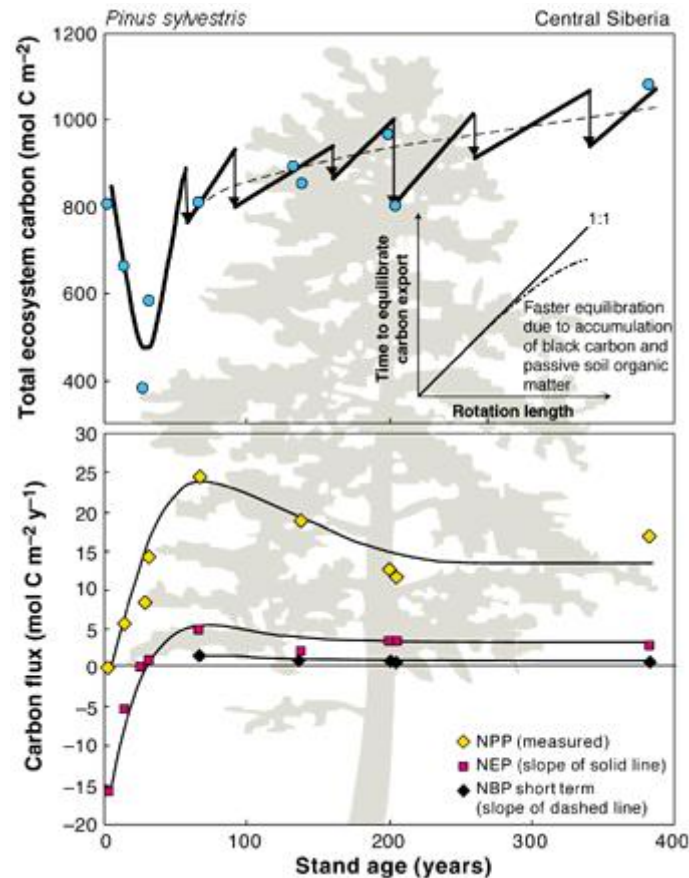


Figura 35: Variación de las existencias y flujos de carbono en el tiempo. En el gráfico superior las flechas indican las pérdidas ocasionadas por talas (o pequeños incendios), que posteriormente tienden a recuperarse (la pendiente estará ligada a la NEP). Fuente: Schulze et al. (2000).

Como se puede observar en la Figura 35, para compensar la pérdida de carbono causada por las extracciones de madera, en condiciones constantes se necesitaría un turno de corta (línea 1:1), pero si se alarga el turno de corta, se puede almacenar más carbono en las reservas permanentes. Por consiguiente, al alargar los turnos de corta, el tiempo necesario para alcanzar la situación de equilibrio disminuye, ya que se almacena más carbono del que se extrae (Ruiz-Peinado et al, 2017; Schulze et al., 2000). Para aumentar las reservas de carbono, Canadell y Raupach (2008) también recomiendan alargar los ciclos de explotación o reducir las perturbaciones. Por su parte, Balboa-Murias et al. (2006) proponen disminuir la

intensidad de las explotaciones y establecer medidas de conservación, para así recuperar la estructura de los bosques y, al mismo tiempo, restaurar las reservas de carbono y los ciclos de los nutrientes de otro tipo. En este contexto, el IPCC (2014c) propone desarrollar una gestión sostenible para mantener e incrementar las existencias de carbono de los bosques.

Según Ruiz-Peinado et al. (2017), tradicionalmente los turnos de corta óptimos se han fijado en base a objetivos económicos, ignorando el potencial que tienen todavía los árboles para seguir creciendo (y, en consecuencia, acumulando carbono). Además de esto, alargar los turnos de corta, aumentaría la producción de hojarasca, posibilitando un mayor almacenamiento de carbono en el suelo. Asimismo, aplicando unos turnos de corta más largos, los productos de madera obtenidos serían de mayor tamaño, ofreciendo una mejor opción para almacenar carbono en productos de ciclo de vida largo (Lewis et al., 2019; Ruiz-Peinado et al., 2017). De hecho, una de las propuestas del Gobierno Vasco (2005) es la de conseguir un almacenamiento de carbono a largo plazo mediante la promoción de la producción de productos forestales de ciclo de vida largo. No obstante, estos productos y los tipos de gestión empleados para obtenerlos, tendrán consecuencias en la cantidad de existencias que se almacenan en las reservas de carbono.

Algunos investigadores afirman que los bosques gestionados de forma sostenible almacenan más carbono que los bosques sin gestionar, siempre que se tengan en cuenta las reservas de los productos de ciclo de vida largo. Otros, en cambio, han demostrado que son los bosques maduros sin gestionar los que poseen mayor potencial para almacenar carbono (Luyssaert et al., 2008). Con el objetivo de despejar estas dudas, Nunery y Keeton (2010) han estudiado la capacidad de almacenar carbono que tienen varios tipos de gestión de diferente intensidad, para cuyo desarrollo han tenido en cuenta la biomasa aérea, cantidad de madera muerta y los productos de ciclo de vida largo fabricados a partir de las extracciones de madera realizadas (Figura 36). En este estudio, se han contemplado los siguientes tipos de gestión y criterios:

- Eliminar toda la cobertura arbórea (*Clearcut*). En este caso no se mantiene la estructura de la cobertura arbórea, ya que se extraen todas las estructuras de diámetro superior a los 5 cm a la altura del pecho (retención estructural baja).
 - *Clearcut_High*: frecuencia de cosecha alta (80 años).
 - *Clearcut_Low*: frecuencia de cosecha baja (120 años).

- Talas intermitentes, se da paso a la regeneración natural de nuevos árboles sin eliminar todos los individuos maduros (*Shelterwood cutting*). Se considera que la

retención estructural es alta porque la cobertura arbórea se elimina parcialmente (teniendo en cuenta que por hectárea se mantienen 6 árboles maduros).

- *Shelterwood_High*: frecuencia de cosecha alta (80 años).
 - *Shelterwood_Low*: frecuencia de cosecha baja (120 años).
- Selección individual de árboles (*Individual Tree Selection, ITS*).
 - *ITS_LowHigh*: retención estructural baja; frecuencia de cosecha alta (15 años).
 - *ITS_LowLow*: retención estructural baja; frecuencia de cosecha baja (30 años).
 - *ITS_HighHigh*: retención estructural alta; frecuencia de cosecha alta (15 años).
 - *ITS_HighLow*: retención estructural alta; frecuencia de cosecha baja (30 años).

En la Figura 36 se comparan las existencias de carbono de la biomasa total (biomasa aérea, cantidad de madera muerta y productos de ciclo de vida largo) de estos tipos de gestión con las existencias de un bosque sin gestionar:

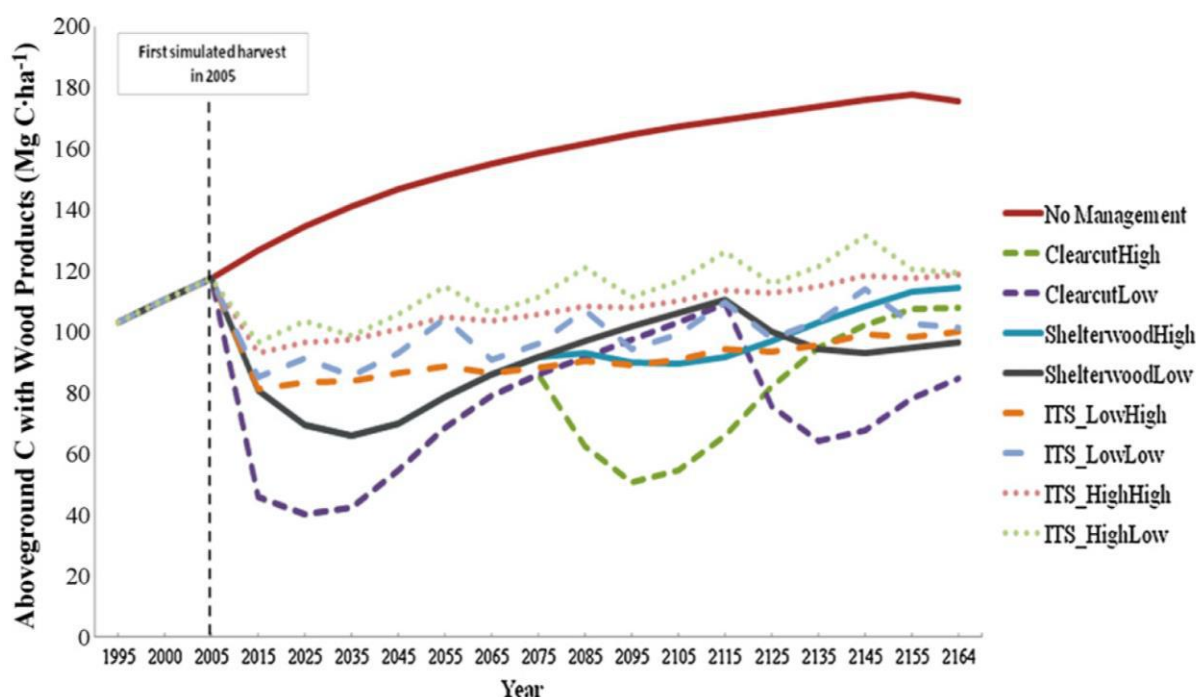


Figura 36: Almacenamiento de carbono en la biomasa (considerando biomasa aérea, madera muerta y los productos de ciclo de vida largo) de nueve tipos diferentes de gestión durante el tiempo.
Fuente: Nunery y Keeton (2010).

Según los resultados (Figura 36) de las simulaciones de Nunery y Keeton (2010), los tipos de gestión más intensivos son los que tienen menores existencias de carbono, de manera que el sumidero de carbono más pobre corresponde a las prácticas de eliminación total de la cobertura arbórea. A medida que disminuye la intensidad de las explotaciones, el gradiente de las existencias de carbono aumenta, de modo que alcanza su máximo en los bosques sin gestionar. Por lo tanto, de cara a aumentar las existencias de carbono de los bosques

gestionados, habría que evitar la tala de toda la cobertura arbórea y, en su lugar, se tendrían que fomentar otros tipos de gestión de menor intensidad.

Asimismo, en la Figura 37 se concreta en qué reservas se encuentran las existencias de carbono de cada tipo de gestión (Nunery y Keeton, 2010).

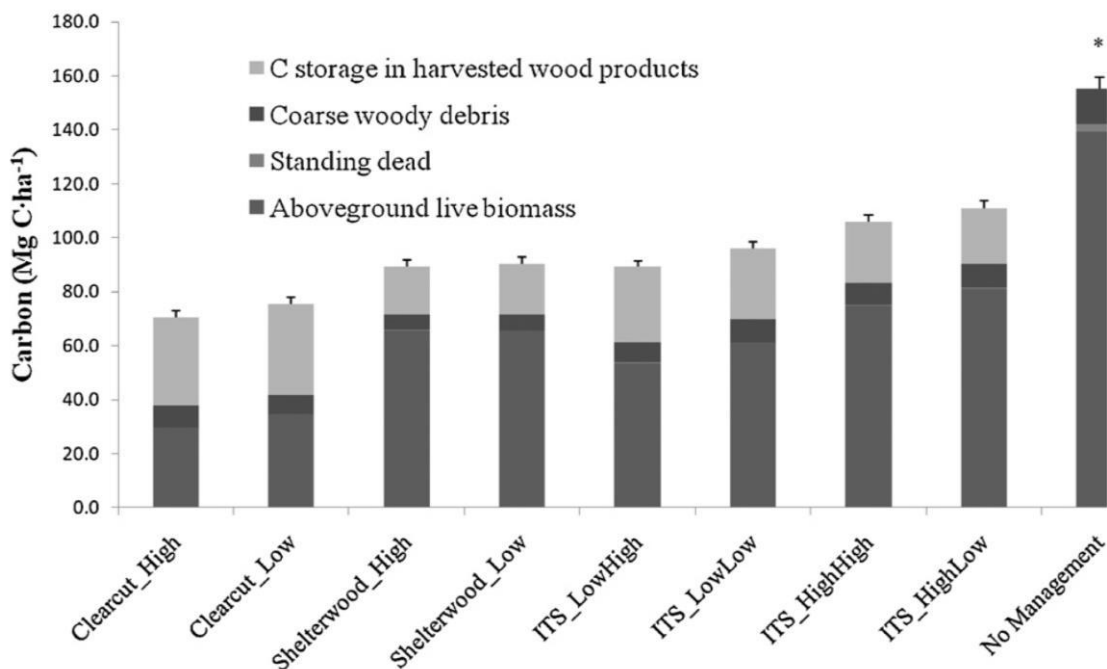


Figura 37: Reservas medias y su distribución por cada tipo de gestión. Fuente: Nunery y Keeton (2010).

Los datos de la Figura 37 coinciden con las afirmaciones estudiadas en el apartado 7.2. Ya que, en los bosques o plantaciones de árboles gestionados no existen árboles muertos que permanecen en pie y la cantidad de madera muerta es inferior al de los bosques sin gestionar. A pesar de que se han considerado diferentes tipos de gestión y se han incluido las reservas de carbono de sus productos de ciclo de vida largo, este estudio de Nunery y Keeton (2010) también muestra que la mejor alternativa para almacenar carbono son los bosques sin gestionar.

En opinión del Gobierno Vasco (2005), el hecho de abandonar temporalmente las medidas establecidas para aumentar la capacidad de los sumideros, a menudo causan rápidas pérdidas de carbono. Por lo tanto, para que las medidas que se tomen sean efectivas, la puesta en marcha de ciertas prácticas debe ir de la mano de un compromiso a largo plazo (Gobierno Vasco, 2005).

7.4. INCENDIOS FORESTALES

Aunque el territorio de Gipuzkoa no haya sufrido episodios graves de incendios en los últimos años (Figura 38), dados los cambios que está sufriendo el clima, de cara a futuro, se prevé un aumento del riesgo de incendios forestales (Diputación Foral de Gipuzkoa, 2018; Gobierno Vasco, 2015). Tal y como se puede observar en las Figuras 39 y 40, a pesar de que no se prevén situaciones de riesgo extremo de incendios en el territorio de Gipuzkoa, se espera que estos aumenten.

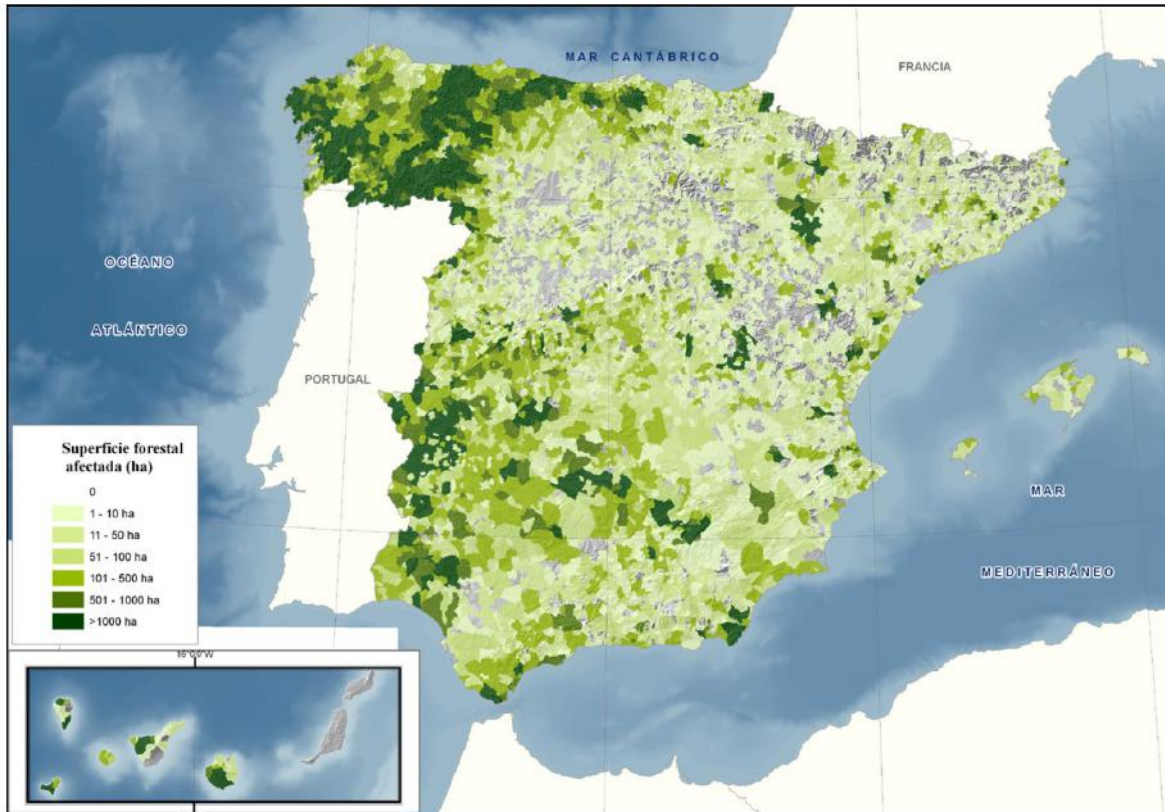


Figura 38: Superficie forestal afectada por incendios por cada municipio entre 2001-2010.
Fuente: Cubo et al. (2012)

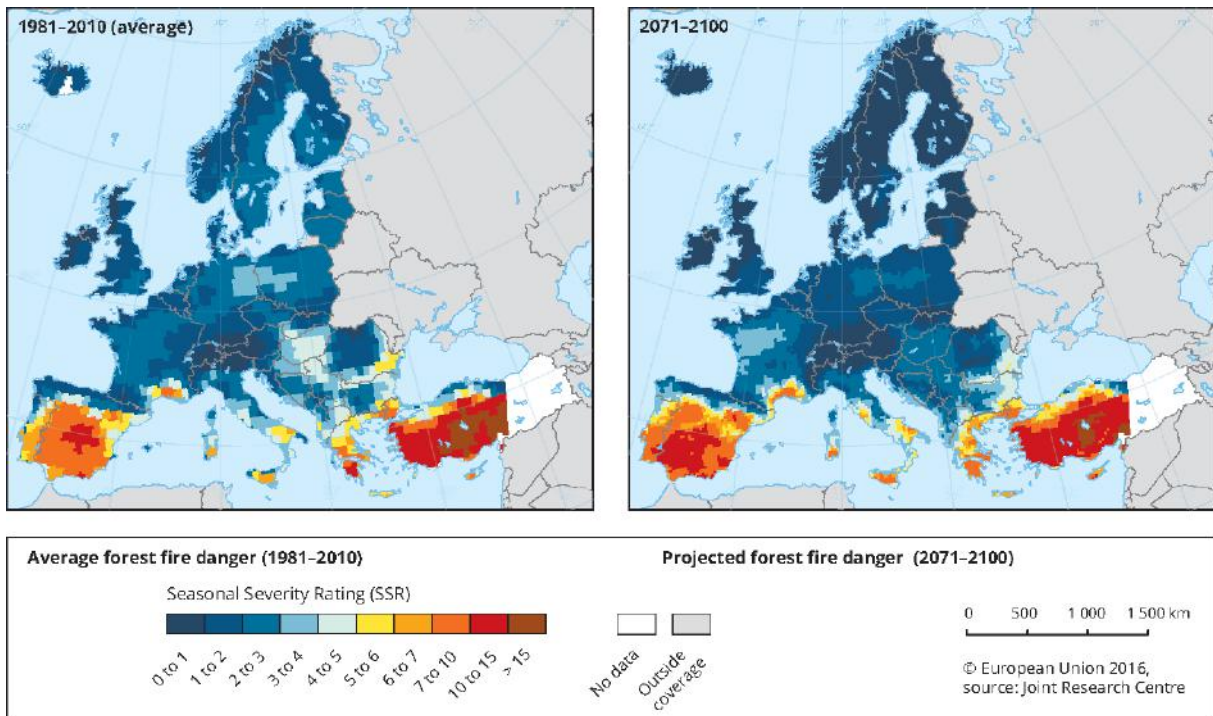


Figura 39: Previsión del riesgo de incendios en Europa. Fuente: European Environment Agency (2016).

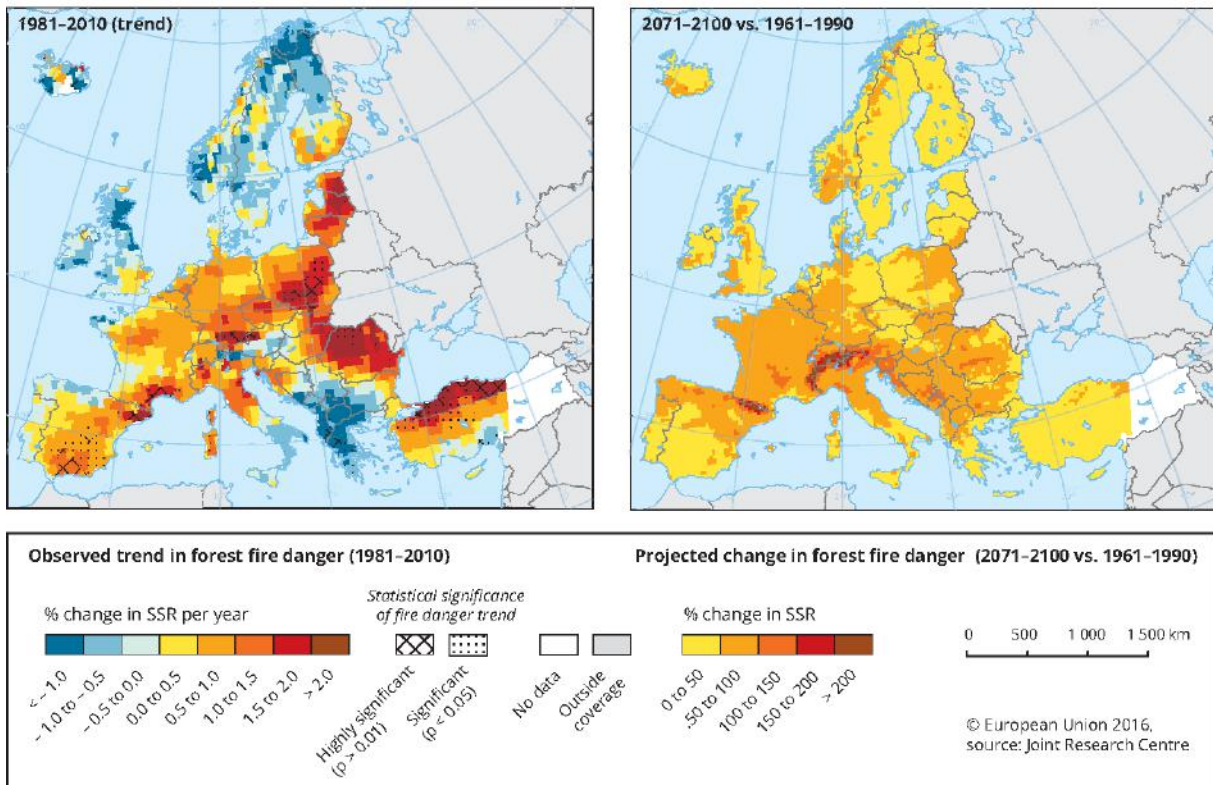


Figura 40: Previsión de la tendencia del riesgo de incendios y su variabilidad. Fuente: European Environment Agency (2016)

Los incendios forestales tendrán consecuencias directas en las existencias de carbono de las coberturas arbóreas, tanto por la combustión de la biomasa como por los efectos que

causarán en el COS (Lal, 2005). Por eso, las estrategias para promover los sumideros de carbono, también deben tener en cuenta la prevención de incendios (Gobierno Vasco, 2015) y, por lo tanto, es importante conocer los diferentes factores que afectan a estos.

Por una parte, está la inflamabilidad de la vegetación. De esta forma, si una planta tiene mayor capacidad para arder y propagar el fuego, se considerará que es más inflamable. Por ejemplo, el hecho de tener hojas y ramas finas, estar formado por madera ligera y/o tener componentes volátiles, aumentará la inflamabilidad (Pausas, 2017). La propia estructura del árbol también es relevante: los que tienen gran cantidad de ramas en la base son más inflamables que los que tienen ramas y copas altas, ya que estos dificultan que el fuego del suelo se propague al árbol (Pausas, 2017). Además, Zald y Dunn (2018) afirman que las masas compuestas por árboles jóvenes son más vulnerables ante los incendios. En su opinión, las coberturas forestales homogéneas asociadas a las gestiones intensivas también pueden facilitar la propagación de los incendios.

Los eucaliptos y los pinos, por ejemplo, tienen carácter pirófilo y además de estar formados por materiales muy inflamables, desprenden componentes volátiles que aceleran la propagación del fuego (Cordero, 2017; Robertson, 2018). Al contrario, los robles arden más lentamente y dificultan que el fuego se extienda (California Native Plant Society, d. g.; Cordero, 2017). Además, frente a las plantaciones de árboles, los robledales ofrecen más sombra y mantienen una humedad relativa más alta, reduciendo el riesgo de incendio (Cordero, 2017). En la misma línea, en el caso de los hayedos europeos, el fuego no se considera un factor perturbador importante (Christensen et al., 2005).

No obstante, además de la especie forestal, la cantidad de “combustible” presente en las plantaciones y en los bosques es un factor significativo, ya que, la hojarasca, ramas u otro tipo de masas vegetales pueden facilitar la propagación del fuego (Robertson, 2018). De la misma forma, se puede pensar que las coberturas arbóreas de alta densidad facilitarán la transmisión del fuego, pero al mismo tiempo, reduciendo la influencia del viento pueden llegar a ralentizarlo (Robertson, 2018). La propia topografía puede influir en la propagación de un incendio, ya que, en zonas de mucha pendiente la inclinación puede ayudar a que el fuego se extienda da abajo a arriba (Robertson, 2018).

Por eso, es necesario diseñar gestiones apropiadas para reducir el riesgo de incendios y evitar su propagación, sobre todo en coberturas donde predominen especies muy inflamables (Pausas, 2017).

8. MEJORAR LA CAPACIDAD DE ADAPTACIÓN Y RESILIENCIA DE LOS BOSQUES

8.1. NECESIDAD DE MEJORAR LA CAPACIDAD DE ADAPTACIÓN Y LA RESILIENCIA

A pesar de que, en la lucha contra el cambio climático, el hecho de tomar medidas para tratar de mitigarlo tiene una enorme importancia, también hay que plantear medidas de adaptación para las condiciones futuras que ya se prevén. De hecho, se espera que el clima del territorio de Gipuzkoa experimente cambios más notables durante las próximas décadas (Diputación Foral de Gipuzkoa, 2018; Gobierno Vasco, 2011, 2015). En este contexto, el IPCC (2014c) argumenta que, además de aplicar políticas de mitigación del cambio climático en la gestión y en la conservación de los bosques, tomar medidas para la adaptación resulta más efectivo. En el mismo sentido, la falta de capacidad de adaptación a los efectos del cambio climático, aumenta la vulnerabilidad de los sistemas ante los escenarios futuros (IPCC, 2014a).

8.1.1. CAMBIOS PREVISTOS EN LA TEMPERATURA

Según las previsiones que se realizan en el informe Gipuzkoa Klima 2050 (Diputación Foral de Gipuzkoa, 2018), las temperaturas medias del territorio de Gipuzkoa aumentarán entre 1,5 °C y 5 °C, de modo que estos serán más acusados a finales del siglo. Este incremento de temperatura afectará de manera bastante homogénea a todo el territorio de la CAPV, aunque resulte algo más leve en la costa (Gobierno Vasco, 2016).

En lo que respecta a las temperaturas extremas, se espera que el número de días fríos disminuya (los días de heladas ($T_{\min} < 0$ °C) disminuirán) y, por otra parte, se prevé que los días calurosos aumentarán. Además, se calcula que las olas de calor serán más largas y que estas ocurrirán más a menudo. En este sentido, también se cree que la cantidad de noches tropicales ($T_{\min} > 20$ °C) aumentará (Gobierno Vasco, 2016). Al mismo tiempo, se espera que la diferencia entre las temperaturas mínimas y máximas diarias incrementará (Diputación Foral de Gipuzkoa, 2018).

8.1.2. CAMBIOS PREVISTOS EN LA PRECIPITACIÓN

Tanto los modelos globales como los regionales prevén una disminución de las tasas de precipitación en la CAPV. Según los modelos regionales, aunque no se aprecia una tendencia estacional clara, las precipitaciones anuales descenderán entre un 10% y un 20% para finales de siglo (Diputación Foral de Gipuzkoa, 2018; Gobierno Vasco, 2016). Al mismo tiempo, se

espera que la cantidad de días con precipitaciones suaves (<1 mm por día) disminuya y que las precipitaciones intensas (superiores a los 30 mm diarios) aumenten (Gobierno Vasco, 2011 y 2016). Por lo tanto, los días de lluvia serán más escasos, pero supondrán lluvias más fuertes. Además, después de los días de lluvia, se esperan temporadas de sequía más largas (Gobierno Vasco, 2016).

8.1.3. CAMBIOS PREVISTOS EN LA EVAPOTRANSPIRACIÓN

De los escenarios analizados por el Gobierno Vasco (2016) se concluye que el nivel de evapotranspiración de Gipuzkoa aumentará, de modo que este tendrá un gradiente descendente de suroeste a nordeste.

8.1.4. IMPACTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN GIPUZKOA

El cambio climático puede afectar a la productividad de los ecosistemas, a la distribución de biomasa aérea y subterránea, y a la población microbiana; es muy complejo saber cómo afectará todo esto a los ecosistemas forestales (Lal, 2005), pero los resultados de diversas investigaciones hacen previsiones parecidas. De esta forma, considerando los cambios previstos en las variables climáticas, se cree que el territorio de Gipuzkoa sufrirá los siguientes impactos y consecuencias (Diputación Foral de Gipuzkoa, 2018; Gobierno Vasco, 2011, 2016):

En general:

- Los eventos climáticos extraordinarios aumentarán: fenómenos de sequía, fuertes lluvias, olas de calor largas, vendavales, etc.
- Las fuertes precipitaciones pueden aumentar el peligro de inundaciones, causar deslizamientos de tierra u otro tipo de daños.
- La disminución de los recursos hídricos puede afectar al suministro de agua.
- ...

En los ecosistemas forestales:

- La distribución territorial de las especies arbóreas puede sufrir cambios.
- Cambios en las características y procesos del suelo: aumento de la descomposición de la materia orgánica y la erosión, salinización del suelo y pérdida de biodiversidad.
- La aceleración de la descomposición del carbono orgánico almacenado en el suelo, a largo plazo, puede ocasionar la pérdida de las reservas del suelo, de modo que estos emitirían carbono a la atmósfera en vez de fijarlo.

- El periodo de producción de las explotaciones forestales puede cambiar, afectando a la rentabilidad económica de ciertas especies. Las consecuencias del cambio climático pueden afectar de forma notable a la fisiología de las especies forestales. De esta forma, en el ciclo anual, las hojas de las especies de hoja caduca aguantarán más tiempo, por lo que la producción aumentará. Sin embargo, en el caso de las especies de hoja perenne, se producirá una disminución de la vida media de las hojas, y, por consiguiente, la regeneración de hojas y raíces finas se acelerará, reduciendo las reservas del árbol y aumentando su vulnerabilidad ante episodios adversos.
- El incremento de la temperatura media puede originar un aumento de la duración estacional de crecimiento de la flora en el territorio.
- El cambio del régimen de precipitaciones puede acelerar la erosión del suelo. Dado que la gravedad y la frecuencia de las sequías estivales serán mayores, esto puede poner en riesgo la salud y la supervivencia de los árboles. Del mismo modo, puede afectar a la capacidad de absorber carbono que tienen los bosques.
- Ya que se prevé que los eventos extremos (tormentas, vendavales, ciclogénesis explosivas, etc.) ocurrirán con mayor frecuencia, la cantidad de árboles dañados por perturbaciones naturales aumentará.
- En general, se prevé que el incremento de las temperaturas causado por el cambio climático, aumentará el problema de plagas, ya que esto facilitará su desarrollo y ayudará a su supervivencia en invierno.
- Se prevé que la frecuencia e intensidad de los incendios forestales aumentará (Figura 41).

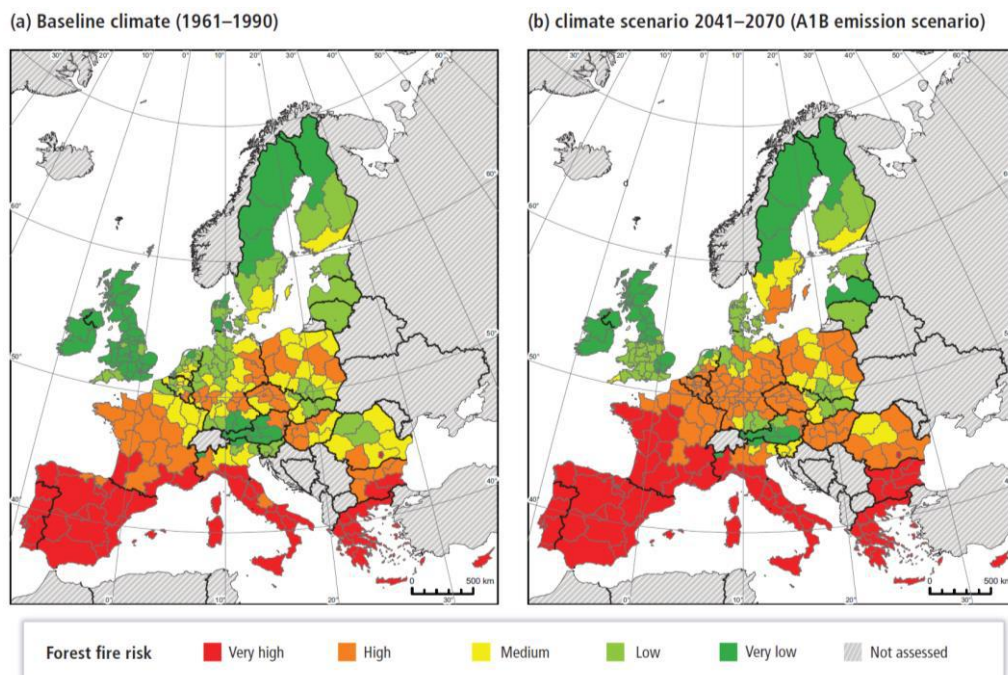


Figura 41: Riesgo de incendios forestales en escenarios pasados (1961-1990) y futuros (2041-2070). Fuente: IPCC (2014b).

Herrero (2007) advierte de que, debido a la influencia que tendrá el cambio climático en las temperaturas y las tasas de precipitación, la fisiología de los árboles puede verse afectada, pudiendo causar daños graves a la salud de los mismos. Por ejemplo, puede disminuir la capacidad que tienen los árboles para transportar agua a las hojas (conductancia hidráulica), y, en casos extremos, incluso perder la capacidad para conducir agua a las hojas (embolia por cavitación). Estas consecuencias pueden generar desequilibrios en el balance de carbono, y, en algunos casos, pueden ocasionar la muerte de los individuos (Herrero, 2007). Más allá del impacto causado a unos individuos aislados, las consecuencias del cambio climático en la fisiología y la fenología de los árboles puede provocar cambios en el funcionamiento del ecosistema. Por si esto fuera poco, además de la influencia directa de las sequías y olas de calor, también se deben tener en cuenta las amenazas de plagas, patógenos y parásitos, ya que estos normalmente atacan a árboles previamente debilitados (Herrero, 2007).

8.1.5. MEJORAR LA RESILIENCIA Y LA CAPACIDAD DE ADAPTACIÓN A NUEVOS ESCENARIOS

En el contexto de afrontar los impactos del cambio climático se mencionan los conceptos “capacidad de adaptación” y “resiliencia”:

- **Capacidad de adaptación:** es la capacidad de una especie, o de las poblaciones que la constituyen, de hacer frente al cambio climático persistiendo in situ, ocupando microhábitats locales más apropiados o migrando a regiones climáticamente más favorables (Herrero, 2017). En algunos sistemas naturales, las intervenciones humanas pueden facilitar la adaptación a los impactos del clima (IPCC, 2014a).
- **Resiliencia:** la capacidad de un organismo o sistema de recuperar su función y estructura después de una perturbación o cambio exógeno (Herrero, 2017).

Dado que el cambio climático afecta al funcionamiento de los bosques, además de tener en cuenta variables para mitigar el cambio climático, la gestión forestal debería de tener como objetivo la adaptación de los bosques a los efectos del mismo. Ya que, cuanto mayor capacidad de adaptación tenga un bosque, los impactos del cambio climático serán menores (Ruiz-Peinado et al., 2017).

Para reducir la debilidad del territorio de Gipuzkoa frente a los efectos negativos causados por el cambio climático, el Gobierno Vasco (2015) y la Diputación Foral de Gipuzkoa (2018) subrayan la necesidad de aumentar la capacidad de adaptación y la resiliencia. Siendo esto así, en los últimos informes estratégicos contra el cambio climático (Klima 2050 y Gipuzkoa Klima 2050) desarrollados por estas dos instituciones, han dirigido los objetivos cuarto y quinto a mejorar la resiliencia del medio ambiente y del primer sector. De hecho, en opinión del

Gobierno Vasco (2015) el cambio climático tendrá efectos significativos en las masas forestales, y dado que más del 60% del territorio de Gipuzkoa está cubierto por árboles (IF-2018), se concluye que se debe trabajar en este ámbito para mejorar la resiliencia de los mismos.

8.2. OPORTUNIDADES DE MEJORAR LA ADAPTACIÓN Y RESILIENCIA DE LOS BOSQUES

Tal y como se ha mencionado anteriormente, en las estrategias de lucha contra el cambio climático del Gobierno Vasco (2015) y la Diputación Foral de Gipuzkoa (2018) se impulsan prácticas para aumentar la capacidad como sumideros de carbono de los bosques. Pero además de eso, con el objetivo de aumentar el nivel de adaptación del territorio, proponen mejorar la resiliencia de los ecosistemas forestales. Por ejemplo, el cuarto objetivo del documento Gipuzkoa Klima 2050 es “Aumentar la resiliencia del medio natural” y dentro del mismo se definen las siguientes líneas de actuación:

1. Mejora de la diversidad estructural y funcional de los bosques.
2. Protección y seguimiento de hábitats y especies vulnerables al cambio climático.
3. Restaurar y desfragmentar los ecosistemas fluviales.
4. Protección y vigilancia de los acuíferos: los manantiales y zonas de recarga.

(Diputación Foral de Gipuzkoa, 2018, pág. 154.).

A pesar de que, a primera vista, se pueda pensar que la única línea de actuación relacionada con los bosques sea la primera, todos estos objetivos están, de alguna u otra forma, relacionados con los ecosistemas forestales. Por ejemplo, algunos de los hábitats y especies que se mencionan en el segundo punto pueden estar relacionados con los ecosistemas forestales; cuando se habla de restaurar los ecosistemas fluviales, en cierta medida, se basará en el incremento de la extensión y mejora de la situación de los bosques de galería; por último, la gestión forestal cumple un papel importante en la estrategia de protección de los acuíferos (Calder, Hofer, Vermont y Warren, 2007; Ernst, Gullick y Nixon, 2004). Considerando todo esto, el hecho de aumentar la resiliencia de los bosques traerá beneficios en otros ámbitos, más allá de los sistemas unidos directamente a los bosques (esto se trata en más profundidad en el apartado “9 OTROS BENEFICIOS DERIVADOS DE LAS PRÁCTICAS BASADAS EN EL CAMBIO CLIMÁTICO”).

En el mismo sentido, el Gobierno Vasco (2015), en su novena línea de actuación, fija el objetivo de restaurar especies y hábitats vulnerables para favorecer la multifuncionalidad de los ecosistemas naturales como reguladores de procesos biológicos y geológicos. Dentro de

esto, la regeneración de los ecosistemas y su naturalización se consideran necesarias para mantener la resiliencia del territorio.

En lo que respecta a las estructuras forestales, en lugar de rodales formados por árboles monoespecíficos coetáneos, un aumento en la heterogeneidad de las masas, dirigido a bosques mixtos con individuos de diferentes edades, aumentará la resistencia y resiliencia de las masas frente a episodios catastróficos derivados del cambio climático (Gobierno Vasco, 2011; Messier et al., 2019). Ya que, aparte de los efectos climáticos directos, las coberturas forestales formadas por una única especie y con individuos de la misma edad, resultan más vulnerables ante los ataques de plagas y patógenos, dado que facilitan su movilidad, y, por lo tanto, les permite incrementar sus efectos nocivos (Herrero, 2007).

En este contexto, es interesante analizar las funciones que cumplen las distintas especies de árboles y su influencia. Así, se trabajan los conceptos de diversidad funcional y redundancia funcional, y, para que la resiliencia de un sistema sea buena, la redundancia es tan importante como la diversidad (Figura 42).

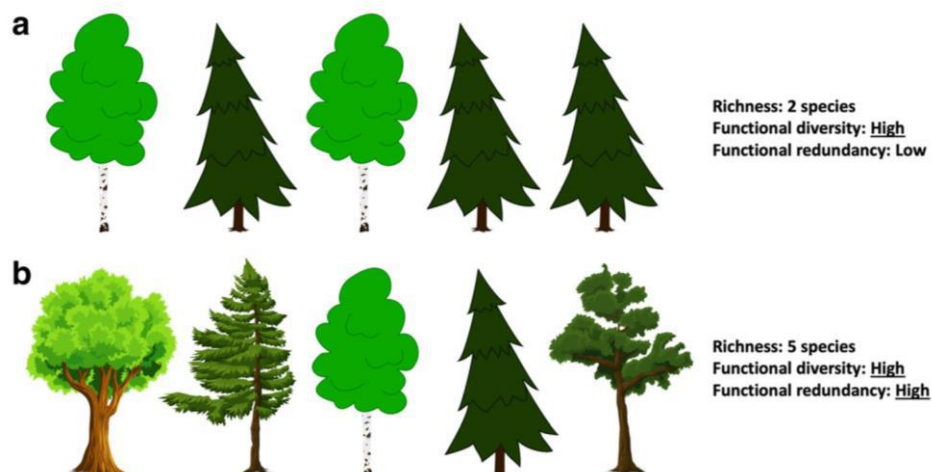


Figura 42: Diagrama que representa dos coberturas forestales formadas por diferentes especies.
Fuente: Messier et al. (2019).

La cobertura “a” puede tener una gran diversidad funcional, porque las dos especies arbóreas que la forman tienen características funcionales muy diferentes. Sin embargo, siendo las características funcionales tan diferentes, su redundancia es muy limitada, por lo que, si una de las dos especies se pierde, muchas de las funciones asociadas a la misma desaparecerán. Por el contrario, la cobertura “b”, además de tener una diversidad funcional alta, las diferentes especies comparten algunas características funcionales entre ellas; de esta forma, si se pierde alguna especie en la cobertura “b”, la mayor parte de las características funcionales se mantendrá (Messier et al. 2019). Esta explicación se ha simplificado mediante el esquema de la Figura 43.

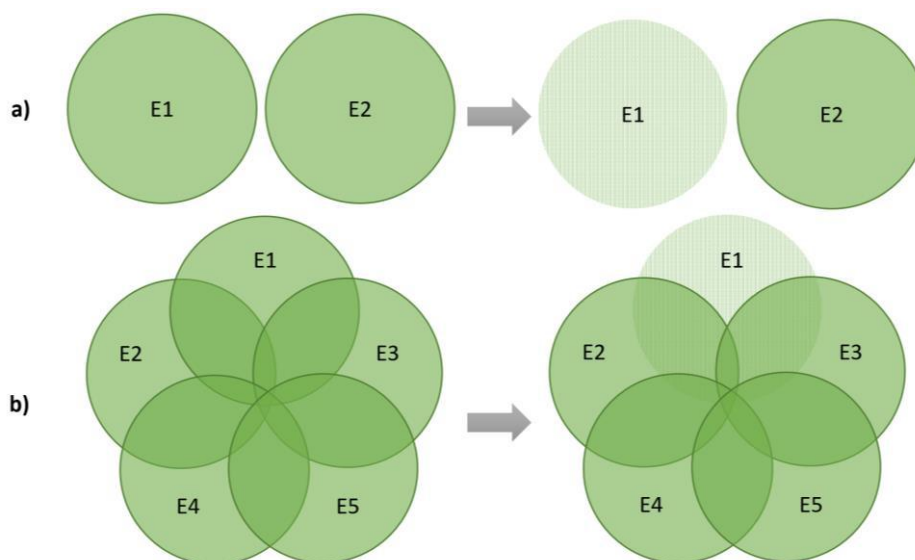


Figura 43: Esquema que representa la diversidad funcional y la redundancia funcional.

Por lo tanto, la diversidad y la redundancia funcional se consideran indicadores apropiados para cuantificar la resiliencia de los bosques; los ecosistemas forestales de especies, edades y estructuras diferentes, están mejor preparados para hacer frente a las diversas perturbaciones del presente y del futuro (Messier et al., 2019).

En la Tabla 27 se reúnen ciertas estrategias para mejorar la capacidad de adaptación frente al cambio climático de los bosques, de forma que se realizan propuestas de actuaciones concretas para su desarrollo.

Tabla 27: Ejemplos de estrategias de adaptación, con sus correspondientes objetivos y propuestas.
Fuente: Herrero (2007).

Estrategias de adaptación	Objetivos	Actuaciones a realizar
Reducción de la densidad arbórea	Reducción de la competencia interindividual por los recursos	Aclareos
Favorecer la heterogeneidad estructural	Favorecer distintas respuestas frente a perturbaciones a nivel de paisaje	Aclareos a pequeña escala
Favorecer la diversidad de especies	Favorecer distintas respuestas frente a perturbaciones a nivel de comunidad	Claras selectivas Plantaciones o siembras
Aumentar el número de árboles grandes y viejos	Aumentar la resistencia frente a sequías y olas de calor	Claras selectivas Alargar los turnos de corta
Favorecer la cobertura de matorral	Promover procesos de facilitación para el reclutamiento de especies arbóreas	Claras selectivas Plantaciones o siembras
Favorecer la diversidad genética	Favorecer distintas respuestas frente a perturbaciones a nivel de especie	Plantaciones o siembras Corredores ecológicos Migración asistida (!)

En las siguientes líneas se profundiza en las propuestas resumidas en la Tabla 27 (Herrero, 2007):

- ✓ Aunque es verdad que las temperaturas altas y las sequías pueden causar la decadencia de los bosques de alta densidad, el tamaño de los árboles puede ayudar a modular este efecto. Ya que, los árboles de menor tamaño son especialmente vulnerables a las sequías (seguramente debido a un sistema radicular poco desarrollado).
- ✓ Los bosques de densidad arbórea alta y heterogeneidad estructural baja son especialmente vulnerables para sufrir procesos de decadencia debido a sequías o los efectos de plagas o patógenos. En este contexto, es recomendable realizar aclareos en las zonas más afectadas por las sequías u olas de calor (ya que así disminuirá la competencia por los recursos hídricos). Además, estos aclareos pueden realizarse fomentando la diversidad estructural y biológica, manteniendo los árboles más viejos junto con otras especies de árboles y arbustos.
- ✓ La diversidad de especies aumenta la resistencia y resiliencia del bosque, ya que, muchas especies responden de forma distinta al estrés climático y, además, pueden presentar diferencias en el uso de los recursos. De la misma forma, una mayor diversidad de genotipos de una misma especie con distinta tolerancia al estrés climático puede favorecer la resistencia y la resiliencia del bosque.
- ✓ La intensidad de los aclareos dependerá de cada caso particular, considerando siempre que los aclareos fuertes pueden afectar a la estabilidad de la masa (frente a vientos fuertes y tormentas, o alterar el microclima del bosque, lo que supone un estrés hídrico para el arbolado en la época estival). Otra alternativa es la de realizar aclareos a pequeña escala, fomentando la heterogeneidad estructural del bosque, formado de rodales de diferente densidad arbórea, tamaño y edad. También se pueden considerar casos de no intervención, lo que permitirá la observación de la dinámica natural del bosque.
- ✓ Dado que son los árboles más jóvenes los que resultan más vulnerables frente a los efectos del cambio climático, con el alargamiento de los turnos de corta y aumentando los diámetros mínimos de corta se favorecerán unos bosques más maduros, los cuales resultan más resistentes frente al cambio climático. Por el contrario, el acortamiento de un turno de corta podría ser apropiado cuando hay indicios de decaimiento o se quiere promover la colonización por parte de otra especie más xerófila.

- ✓ En una gestión enfocada a la adaptación, la interacción entre las distintas especies también es un factor a tener cuenta. Así, ciertos tipos de interacción entre individuos de la misma o diferente especie pueden facilitar la regeneración natural, incluso en zonas con condiciones de aridez o habitados por herbívoros, como es el ejemplo de ciertos tipos de matorrales que promueven procesos de regeneración forestal.

- ✓ La migración asistida hace referencia al traslado de material de reproducción (juveniles o individuos adultos) dentro o fuera de la distribución geográfica de las especies, con el objetivo de anticiparse al cambio climático. No obstante, hoy por hoy, es objeto de debate dentro de la comunidad científica y no existe consenso sobre su utilización. Esto se debe a que las poblaciones locales suelen ser las mejor adaptadas a las condiciones ambientales de su zona y puede ocurrir que no soporten bien las condiciones de otras áreas geográficas. Además de esto, la migración asistida puede acarrear invasiones biológicas, contaminación genética de las poblaciones receptoras, daños en la manipulación de las poblaciones a trasladar y posibles alteraciones de los servicios ecosistémicos. Por lo tanto, resulta necesario tener en cuenta la vulnerabilidad y exposición de las especies y la eficacia de posibles medidas de adaptación antes de considerar la migración asistida.

La fragmentación actual de las coberturas arbóreas, ha dado lugar a pequeños bosques y plantaciones con conexiones limitadas entre ellos, de forma que estos tienen menor resiliencia frente a las perturbaciones causadas por el ser humano o la naturaleza (Messier et al., 2019). En este contexto, Herrero (2007) propone fomentar corredores ecológicos.

Según el Gobierno Vasco (2011), la aplicación de actuaciones para la adaptación a los nuevos escenarios del cambio climático, además de promover el almacenamiento de las existencias de carbono del suelo, puede contribuir a reducir la erosión, de forma que esto retroalimentará el bienestar de los sistemas forestales. En un principio, a pesar de que parece que el alargamiento de la época de crecimiento de los árboles y el posible efecto fertilizador causado por el aumento de la concentración de CO₂ de la atmósfera provocará un incremento en el crecimiento de los árboles, puede ocurrir que las tasas de mortalidad de ciertas especies aumenten a causa de las sequías (Herrero, 2007). Por eso, el Gobierno Vasco (2011) subraya la necesidad de observar la respuesta que tienen las distintas especies frente al estrés hídrico. Herrero (2007) reclama la colaboración entre gestores, técnicos y científicos, de cara a estudiar y hacer el seguimiento del proceso de adaptación al cambio climático.

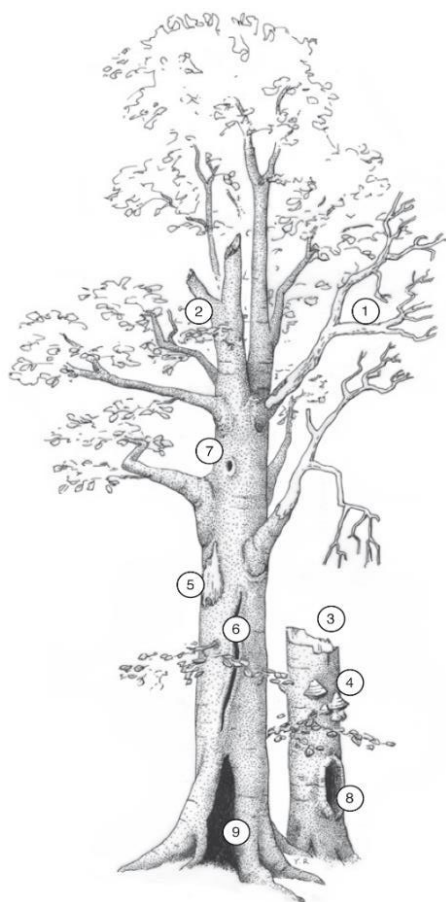
En opinión del Gobierno Vasco (2015) es imprescindible aumentar la resiliencia del medio ambiente y del primer sector (incluyendo la silvicultura), para reducir el riesgo de futuras

catástrofes y posibilitar una gestión sostenible de los recursos hídricos. Para ello, se quiere fomentar la restauración y la naturalización de los ecosistemas, poner en marcha estrategias para reducir el riesgo de incendio y posibilitar la migración de especies mediante la recuperación de las conexiones entre ecosistemas. Unido a esto, el Gobierno Vasco (2015) fija el objetivo de mejorar la gestión forestal para reforestar las zonas degradadas y aumentar la superficie de bosque natural. En el mismo sentido, en la Estrategia de Cambio Climático 2050 del País Vasco se le otorga preferencia al tema de los recursos hídricos y, dados los servicios que ofrecen los bosques en este sentido, se quiere subrayar la necesidad de incorporar variables basadas en el cambio climático en la gestión de los mismos.

9. OTROS BENEFICIOS DERIVADOS DE LAS PRÁCTICAS BASADAS EN EL CAMBIO CLIMÁTICO

Son las zonas templadas las que han cambiado de la forma más intensiva y extensa: algunos ecosistemas y organismos han desaparecido del todo y los últimos restos de los ecosistemas naturales están muy dispersos y modificados, y claro, los bosques no son una excepción. La acción humana intensiva sigue siendo una amenaza permanente para la biota (Franklin, 1988). La CAPV es una región altamente urbanizada y con gran densidad de población y, como consecuencia, la diversidad biológica está sometida a una fuerte presión (Gobierno Vasco, 2011).

Se ha concluido que, de cara a aumentar la capacidad de los sumideros de carbono, conviene fomentar el bosque autóctono y promover su maduración. Tal y como se ha estudiado previamente, a medida que la intervención humana disminuye, la estructura de los bosques se vuelve cada vez más compleja y esto tiene un enorme efecto en la diversidad de hábitats y especies (Rozas, Zas y Solla, 2012). Ya que, los árboles más viejos son estructuras muy importantes para la biodiversidad de los bosques (Herrero, 2007), dado que estos suelen albergar muchos microhábitats (Figura 44).



- 1 Copa con madera muerta: \geq %10 del volumen de la copa
- 2 Copa rota (tronco o ramas): \geq %10 del volumen de la copa
- 3 Tronco roto
- 4 Yesca, hongos
- 5 Daños superficiales (núcleo de madera a la vista): \geq 300 cm²
- 6 Grieta en núcleo de madera: \geq 1 m de longitud
- 7 Agujero en núcleo de madera: diámetro \geq 3 cm y profundidad \geq 5 cm
- 8 Agujero en la parte inferior del tronco, por debajo de 1,5 m
- 9 Tronco hueco: diámetro del hueco \geq %50 que el diámetro del tronco

Figura 44: Microhábitats de los árboles vivos.
Fuente: Commarmot et al. (2013).

En este sentido, Commarmot et al. (2013) han estudiado los microhábitats de los árboles vivos de un hayedo maduro (Tabla 28) y en él se concluye que un tercio de estos tienen algún tipo de microhábitat.

Tabla 28: Número, porcentaje y diámetro de los árboles vivos con microhábitats.
Fuente: Commarmot et al. (2013).

Tipo de microhábitat	Observaciones		Diámetro medio ¹
	n/ha	%	(cm)
Madera muerta en la copa	81,9	18,8	23,4
Copa rota	39,8	9,1	20,7
Tronco roto	8,4	1,9	20,7
Yesca, hongos	2,2	0,5	63,8
Daño superficial	26,7	6,1	40,8
Grieta en el núcleo de madera	9,8	2,2	41,8
Agujero en el núcleo de madera	13,6	3,1	35,3
Agujero en la base del tronco	9,9	2,3	43,8
Tronco hueco	3,8	0,9	56,7
Cualquier tipo de microhábitat:	150,1	34,5	26,5
Nº de árboles:	435,0		24,8

¹ El diámetro medio se mide a una altura de 1,3 metros.

Más allá de la contribución de los árboles que están vivos, también la madera muerta es muy relevante en este contexto. Debido a que, además de aumentar la capacidad como sumideros de carbono de los bosques (apartado 7.2), la madera muerta es un sustrato básico para muchas especies (vertebrados, invertebrados, algas, briofitos, plantas vasculares, hongos, mohos y líquenes) (MCPFE, 2015). La madera muerta se puede considerar un conjunto de microhábitats que evoluciona permanentemente, de forma que su fase de decadencia se puede diferenciar por la presencia de especies asociadas a la misma. Dada la escasez de madera muerta en los bosques gestionados, muchas de las especies unidas a estos hábitats están en riesgo (MCPFE, 2015), por eso, de cara a una silvicultura sostenible y a la conservación de la biodiversidad, se está haciendo un esfuerzo por aumentar la cantidad de madera muerta en los bosques gestionados (Christensen et al., 2005; Ruiz-Peinado et al., 2017). De esta forma, los árboles muertos que resisten en pie y el volumen de madera muerta, constituyen uno de los nueve indicadores de la gestión forestal sostenible de Europa (MCPFE, 2015).

Además, extraer toda la cobertura forestal a causa de las explotaciones humanas es una perturbación recurrente e importante para los seres vivos propios del lugar, pudiendo poner en peligro la supervivencia de ciertas especies (Rodríguez-Loinaz et al., 2013). Por si esto fuera poco, según estos investigadores, las especies arbóreas de hoja perenne impiden la presencia de ciertas plantas, ya que algunos de estos suelen necesitar la luz de primavera para poder florecer.

Por lo tanto, se concluye que el proceso de naturalización de los bosques, además de aumentar la capacidad como sumideros de carbono, también traería beneficios desde un punto de vista de biodiversidad. En este sentido, Díaz et al. (2009) defienden que esto, al mismo tiempo, contribuiría a aumentar la capacidad que tiene el bosque para almacenar carbono.

Tal y como se ha analizado en el apartado 7.3, las plantaciones monoespecíficas de especies de crecimiento rápido y la gestión intensiva unida a estas, suele provocar la compactación y pérdida del suelo y la turbidez del agua (Rodríguez-Loinaz et al., 2013). El hecho de aumentar y proteger el carbono orgánico del suelo forestal ayudará a estabilizar la estructura del suelo, posibilitando la retención y liberación de nutrientes vegetales, y permitiendo la infiltración y almacenamiento de agua en el suelo (FAO, 2018). Esto último, adquiere una importancia especial, ya que afecta a los recursos hídricos que resultan tan necesarios para la sociedad. Según el Gobierno Vasco (2011, 2015) y la Diputación Foral de Gipuzkoa (2018), la vulnerabilidad de los recursos de agua dulce frente al cambio climático es evidente y existen certezas de que estos sufrirán graves impactos; se prevé que esto tendrá muchas consecuencias en los ecosistemas y la sociedad, como problemas de suministro de agua, entre otros. Frente a esto, la naturalización de los bosques protege y mejora la calidad de los recursos hídricos, ofreciendo protección a los acuíferos y a los puntos de recarga (Greiber, Van Ham, Jansse y Gaworska, 2009; IPCC, 2014c). Evitando la compactación del suelo causada por los trabajos de preparación del mismo y el carácter hidrófobo de especies como el pino o el eucalipto, se mejoraría el control de los flujos de agua; a su vez, disminuyendo la intensidad de la gestión, se reduciría la erosión del suelo (Rodríguez-Loinaz et al., 2013). Unido a esto, el almacenamiento de carbono en la biomasa forestal ayuda a disminuir la erosión causada por el viento, porque la cobertura forestal protege el suelo de sus efectos (IPCC, 2014c).

Tal y como se ha mencionado anteriormente, a causa del cambio climático se esperan cambios en los regímenes de precipitación y se cree que los fenómenos de vendavales y fuertes lluvias aumentarán. Como consecuencia, el régimen hidrológico puede sufrir efectos negativos y se prevé que los problemas de inundaciones, deslizamientos de tierra y la erosión

del suelo aumentarán (Diputación Foral de Gipuzkoa, 2018; Gobierno Vasco, 2011, 2015). El desarrollo de las buenas prácticas propuestas en el apartado 7 ayudaría a mejorar el control y la regulación de los flujos de agua, mitigando los problemas de deslizamientos de tierra y erosión (Barkley et al., 2015; Calder et al., 2007; Greiber et al., 2009; IPCC, 2014c; Rodríguez-Loinaz et al., 2013). La recuperación de los bosques de galería que hoy en día resultan tan escasos (solamente 921 hectáreas según el inventario forestal de 2018), ayudaría a aumentar el control de inundaciones y suavizar sus impactos (Gobierno Vasco, 2011). Por lo que se cree necesario tomar medidas para aumentar la extensión de los bosques de galería y restaurar estos ecosistemas.

En el contexto del cambio climático, más allá de la contribución que puedan hacer los bosques como sumideros de carbono, existen otras variables que resultan menos evidentes: los efectos biogeofísicos. Los factores de albedo y evapotranspiración, por ejemplo, varían en función del uso del suelo y la vegetación (Figuras 45 y 46) y, dependiendo de estos, se mitigarán o aumentarán las consecuencias del cambio climático (Bonan, 2008).

El albedo (Figura 45) expresa la capacidad de reflejar la radiación solar y, cuanto mayor sea este, más rayos solares se reflejarán. De esta forma, evitando que el suelo o la vegetación absorban esta radiación, se mitiga el calentamiento del suelo (Bonan, 2008). Dado que la nieve es un fenómeno meteorológico poco frecuente en el territorio de Gipuzkoa, en la Figura 45 se deberían considerar los valores correspondientes a los escenarios sin nieve. Ya que el 86% de las plantaciones de Gipuzkoa están formados por coníferas y el 90% de estas son especies de hoja acicular perenne (IF-2018), se concluye que el hecho de reemplazarlas por bosques de frondosas autóctonas, provocaría un cierto incremento en el albedo de estas coberturas.

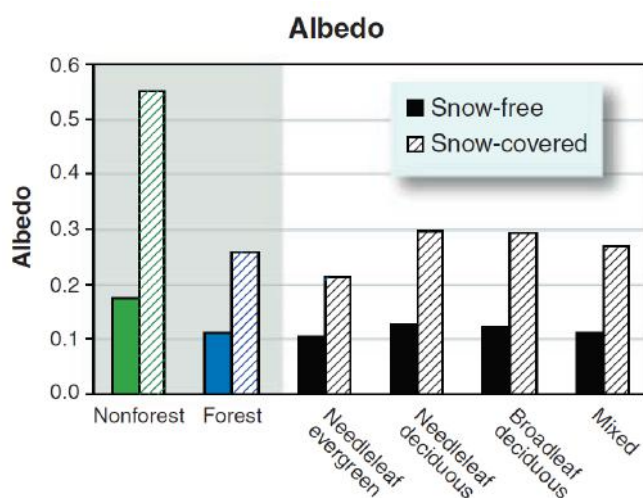


Figura 45: Albedo de distintos tipos de cobertura y especies con (barras jaspeadas) o sin nieve (barras llenas). De izquierda a derecha: superficie no forestal (verde), bosque (azul), hoja acicular perenne, hoja acicular caduca, frondosa caduca, mixto. Fuente: Bonan (2008).

Por medio de la evapotranspiración (Figura 46), los árboles intervienen en los ciclos hidrológicos mediante el intercambio de energía y humedad que tienen con el aire. Como consecuencia de la evapotranspiración, los árboles liberan agua a la atmósfera y los flujos de energía de ese fenómeno posibilitan el enfriamiento del clima (Bonan, 2008). Tal y como se puede observar en la Figura 46, los bosques de frondosas tienen un nivel de evapotranspiración superior a los de los pinares, de forma que tienen mayor capacidad para mitigar los aumentos de temperatura.

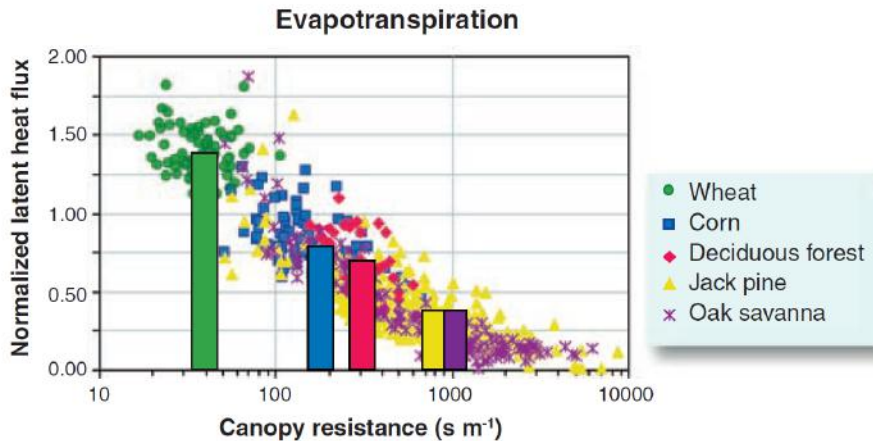


Figura 46: Nivel de evapotranspiración por cada tipo de cobertura: trigo (verde), maíz (azul), bosque de frondosas (rojo), pino Banks "*Pinus banksiana*" (amarillo), sabana con roble (morado). Fuente: Bonan (2008).

En el mismo sentido, en un estudio realizado a nivel europeo (Figura 47) por Naudts et al. (2016), se ha observado que, a causa de reemplazar las especies de frondosas autóctonas por plantaciones de coníferas, ha disminuido el nivel de evapotranspiración y la presión del vapor de agua. Esto ha reducido la capacidad que tiene la atmósfera para liberar calor termal y ha provocado un calentamiento de 0,08 K (Naudts et al., 2016). Frente a esto, el recuperar los bosques frondosos autóctonos ayudaría a evitar estos efectos negativos.

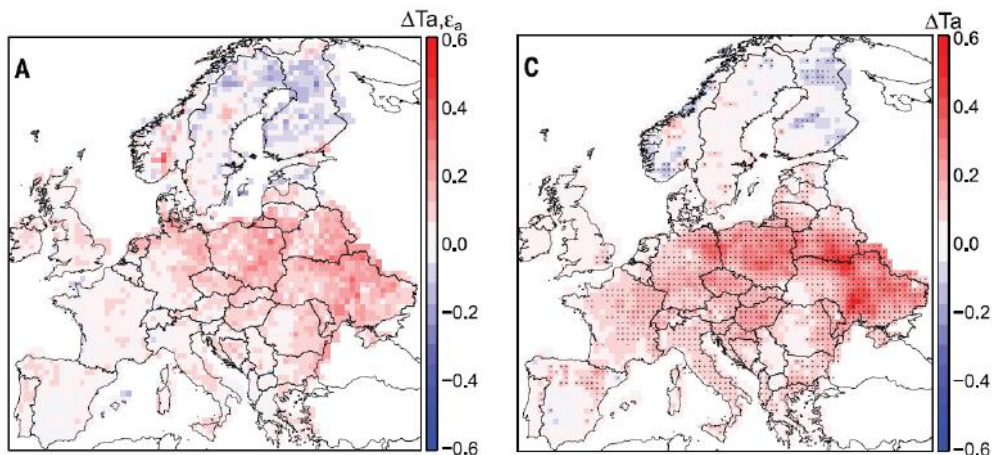


Figura 47: Variación de temperatura causada por cambios en las especies forestales (grados Kelvin) desde 1750. A: Variaciones de temperatura causadas por cambios en la emisividad de las especies sustituidas. C: Variación de temperatura total por el cambio de especies forestales. Fuente: Naudts et al. (2016).

Dado que el albedo y los niveles de evapotranspiración de las zonas sin cobertura forestal son mayores, y a pesar de que pueda parecer que estos tienen mejores características para mitigar el calentamiento del clima, esto no se cumple en todos los casos. Según Bonan (2008), las tierras de agricultura y los bosques del oeste de Europa tienen una temperatura radiativa superficial parecida cuando el suelo está húmedo, pero frente a las sequías la respuesta es muy diferente. A pesar de que la temperatura radiativa y los flujos de calor de los bosques aumenten, la vegetación se mantiene verde. Por el contrario, en las tierras de agricultura, el verdor de la vegetación disminuye un ~50% y la superficie terrestre se calienta 13 °C más que en los bosques. Esta diferencia en la respuesta frente a las sequías, es consecuencia de las profundas raíces que tienen los árboles, por lo que tienen la capacidad de acceder a reservas de agua más profundas (Bonan, 2008).

Por si esto fuera poco, en opinión de Rodríguez-Loinaz et al. (2013), sustituir las plantaciones de árboles por bosque autóctono crearía un entorno más diverso y, por consiguiente, aumentaría la belleza del paisaje.

Por lo tanto, habría que ir hacia una gestión que tenga en cuenta todos los beneficios y servicios que ofrecen los bosques a la sociedad, y no dirigirlo únicamente a obtener beneficios económicos, tal y como se ha hecho tradicionalmente (Gobierno Vasco, 2011). Según el IPCC (2014c), en muchos casos, la implantación de sistemas agrarios y forestales para mitigar el cambio climático suele estar limitado por el capital. En ese tipo de situaciones, los pagos por carbono o los mecanismos de compensación pueden ofrecer una nueva fuente de financiación; por ejemplo, los pagos por mitigación pueden contribuir a la rentabilidad de productos forestales no derivados de la madera. Además, los pagos por carbono pueden completarse con pagos por biodiversidad y servicios ecosistémicos (IPCC, 2014c). Según Aizpuru (2017), teniendo en cuenta el valor comercial y el no comercial, y si la disminución de las plantaciones de especies exóticas se equilibrase con un incremento idéntico de bosques autóctonos, esto no supondría una pérdida económica para la CAPV, ya que la pérdida del valor comercial de las plantaciones se compensaría con creces por el valor económico de los servicios ecosistémicos que proveen los bosques. Por ejemplo, se calcula que la disminución de un 20% de las plantaciones exóticas (alrededor de 40.000 ha), supondría unos beneficios económicos de 50 millones (Aizpuru, 2017). Unido a esto, Rodríguez-Loinaz et al. (2013) argumentan que el precio del haya y del roble son superiores a los del pino y el eucalipto, y considerando que las especies de frondosas reparan los daños medio ambientales causados por las especies de crecimiento rápido, proponen dirigir las subvenciones relacionadas con el pino y el eucalipto a pagar los servicios ecosistémicos que ofrecen las frondosas autóctonas.

10. CONCLUSIONES Y PROSPECTIVA

Mediante los cálculos realizados se han estimado las existencias de carbono que se almacenan en los bosques y las plantaciones de árboles de Gipuzkoa, así como el máximo potencial de estos sumideros de carbono. Dado que se han empleado diferentes fuentes de información y, a pesar de que se han observado desviaciones entre sus resultados, se concluye que existe un gran margen de mejora en lo que respecta a estos sumideros de carbono.

Considerando los resultados obtenidos en el apartado 5.1 y los criterios recogidos del análisis bibliográfico, se concluye que, para aumentar la capacidad de los bosques de Gipuzkoa como sumideros de carbono, habría que dar pie al bosque autóctono y fomentar su maduración. Por lo tanto, lo más apropiado sería reemplazar las plantaciones de árboles (formadas sobre todo por coníferas) por especies autóctonas (bosques mixtos, robledales, hayedos, etc.). Además de esto, se ha observado que reducir las labores de explotación y su intensidad proporcionaría beneficios notables.

Por ejemplo, si se consideran los valores deducidos de los datos de Neiker-Tecnalia (2014), se ha estimado que la cantidad de carbono almacenada en los suelos forestales es solamente de un 29% del potencial. El Gobierno Vasco (2011) indica que en la mayoría de los casos esta situación suele ser causada por una gestión forestal intensiva desarrollada durante décadas. El hecho de que la concentración de carbono orgánico del suelo sea baja, muestra su degradación y esto afecta directamente a su productividad y a su capacidad de retener agua (FAO, 2018). Por todo ello, se concluye que existe una necesidad importante para mejorar el estado del suelo y los servicios que provee.

En lo que respecta a la biomasa forestal, y tomando como base los datos de Neiker-Tecnalia (2014), se observa que su capacidad como sumidero de carbono puede mejorarse entre un 54% y un 207%, de forma que ese porcentaje estará condicionado sobre todo por la intensidad de las explotaciones madereras. De esta forma, sustituyendo las plantaciones de árboles de crecimiento rápido por especies autóctonas y desarrollando una gestión que mantenga la mitad de las existencias máximas de biomasa, el almacenamiento de carbono de la biomasa forestal aumentaría de 12.842 Gg a 19.723 Gg (un incremento del 54%). Si además de reemplazar las plantaciones de árboles de crecimiento rápido por especies potenciales, se permitiera el desarrollo de la cobertura forestal actual sin intervención humana, las existencias de biomasa forestal llegarían a triplicarse (de 12.842 Gg a 39.446 Gg).

Con la restauración de los ecosistemas forestales de Gipuzkoa, además de incrementar la capacidad como sumideros de carbono, se conseguiría mejorar la resiliencia de los bosques y de todo el territorio. Ya que, el aumento de la biodiversidad de los bosques (de los árboles y otros seres vivos), mejoraría la resistencia que tienen estos frente a distintos episodios adversos. Esto, al mismo tiempo, contribuiría a reducir la erosión del suelo y a la protección de los recursos hídricos. Además, dado que se prevé que estos últimos pueden sufrir impactos significativos a causa del cambio climático, de cara a mejorar la adaptación del territorio, es de vital importancia fomentar políticas que garanticen el suministro y la calidad de los recursos hídricos.

Los criterios citados anteriormente, coinciden con las necesidades subrayadas por el Gobierno Vasco (2015) y la Diputación Foral de Gipuzkoa (2018) en sus estrategias contra el cambio climático. Ya que, estas administraciones reconocen que la restauración de los ecosistemas forestales diversos es clave en la lucha contra el cambio climático que afronta el territorio.

Se concluye que con la labor realizada se han cumplido los objetivos fijados para el proyecto. Además de estimar el rol que juega la cobertura forestal de Gipuzkoa como sumidero de carbono y calcular su potencial, se han identificado unas buenas prácticas para aumentar su capacidad. Asimismo, dan pie a la adaptación y a la mejora de la resiliencia frente a los efectos del cambio climático, de forma que son compatibles con las estrategias regionales.

Aunque no sea de igual manera, el cambio climático afectará a todas las regiones del planeta y sus impactos negativos no los sufrirá únicamente el medio ambiente, ya que este también causará daños a las personas y a la economía (Diputación Foral de Gipuzkoa, 2018).

El acuerdo de París de UNFCCC reconoce que la reforestación y la gestión forestal son claves para las estrategias de almacenamiento de carbono, ya que, mediante la fijación de CO₂ de la atmósfera, se espera que estos mitiguen el calentamiento global. En Europa, en los últimos dos siglos y medio el cambio del uso de la tierra ha posibilitado un aumento del 10% de la cobertura forestal, de forma que el 85% de esta superficie corresponde a los bosques gestionados, pero se ha fracasado en el objetivo de conseguir un almacenamiento neto de CO₂: las exploraciones madereras han causado la liberación del carbono almacenado en la biomasa forestal, en la madera muerta y en las reservas del suelo (Naudts et al., 2016). Por si esto fuera poco, el hecho de reemplazar los bosques formados por árboles frondosos por plantaciones de coníferas ha originado cambios en el albedo, cubierta del dosel y en la evapotranspiración del suelo, de forma que, en vez de mitigarlo, esto ha aumentado el calentamiento (Naudts et al., 2016). En opinión de estos últimos, si se quiere combatir el el calentamiento global mediante la gestión forestal, es indispensable trabajar este

planteamiento; ya que todas las gestiones forestales no sirven para hacer frente al cambio climático.

Las políticas forestales desarrolladas en la CAPV durante las últimas décadas han tenido el único objetivo de obtener beneficios económicos (Gobierno Vasco, 2011; Neiker-Tecnalia, 2014) y esto ha provocado actuar con irresponsabilidad respecto a otros servicios que ofrecen los bosques (Rodríguez-Loinaz et al., 2013). En esta situación, se reivindica la necesidad de un cambio de paradigma en la gestión forestal (Gobierno Vasco, 2011). En el escenario actual, recuperar las especies de frondosas autóctonas y desarrollar una gestión responsable, además de aumentar la capacidad de los sumideros de carbono, sería una oportunidad para restaurar la estructura y las funciones de los ecosistemas y mejorar los servicios ecológicos que proveen (Rodríguez-Loinaz et al., 2013). De hecho, el aumento de la capacidad de los sumideros de carbono de los bosques no debería comprometer o condicionar otros servicios ecosistémicos, ya que precisamente se debe buscar la multifuncionalidad de estos sistemas (Díaz et al., 2009; Rodríguez-Loinaz et al., 2013).

El Gobierno Vasco (2015) fija el objetivo de promover la innovación, mejora y la transferencia de conocimiento en diversos sectores, de modo que se priorizarán los sectores que podrían verse afectados por las consecuencias del cambio climático. Los ecosistemas terrestres sufrirán los efectos del cambio climático en las próximas décadas y, por lo tanto, es imprescindible tener en cuenta las condiciones que se prevén para un futuro cercano en la gestión de los mismos (Gobierno Vasco, 2011). En el mismo sentido, la Diputación Foral de Gipuzkoa (2018) subraya que las estrategias que se trabajen deben proporcionar oportunidades a largo plazo.

A pesar de que las estrategias de cambio climático para el 2050 del País Vasco (Gobierno Vasco, 2015) y Gipuzkoa (Diputación Foral de Gipuzkoa, 2018) consideran criterios interesantes para la gestión forestal, se observa la necesidad de un impulso real para la puesta en práctica de los mismos. Ya que, las políticas forestales que se fomentan hoy en día contradicen las estrategias de lucha contra el cambio climático: mientras que el Gobierno Vasco (2015) en su línea de actuación 12, de cara a aumentar la fortaleza de los sumideros de carbono del País Vasco, fija el objetivo de “aumentar la superficie de bosque natural”, las políticas forestales habituales siguen promoviendo la plantación de árboles de crecimiento rápido y su explotación intensiva (el 60% de la cobertura arbórea de Gipuzkoa está constituida por plantaciones, donde el 86% son coníferas). Dada la decadencia que han sufrido los pinares de Insignis en el último año como consecuencia del hongo “*Lecanosticta acicola*”, ha quedado en evidencia la escasa resiliencia que tienen las plantaciones de árboles

mono-específicas. Por ello, se reivindica la necesidad de políticas precisas y progresistas para empezar a aplicar las estrategias contra el cambio climático en la gestión forestal.

Por ejemplo, el IPCC (2014c) propone normativas específicas y medidas de promoción económica, para que los gestores que reduzcan las explotaciones madereras, pero protejan otros servicios ecosistémicos reciban una compensación. De la misma forma, el IPCC (2014c) cree que los procesos de mitigación y adaptación deben ir acompañados de investigación, desarrollo y su difusión, buscando siempre la multifuncionalidad del sector.

Al mismo tiempo que se ponen en marcha modelos de gestión que vayan acorde al conocimiento científico, es imprescindible seguir investigando la interacción entre la crisis climática y los bosques. Ya que, existe una gran incertidumbre sobre la influencia que tendrán los bosques templados en el clima y los impactos que sufrirán los mismos (Bonan, 2008). Por eso, se deberían priorizar el seguimiento, investigación y la transferencia de conocimiento de los ecosistemas forestales. De esta forma, los criterios de gestión de los bosques deberían basarse en el conocimiento científico, para así enforarlos a la conservación de la naturaleza y al bienestar de toda la sociedad.

El territorio de Gipuzkoa y sus habitantes sufrirán los efectos del cambio climático. Los servicios ecosistémicos (aire limpio, abastecimiento de agua de calidad, etc.) resultan imprescindibles para el bienestar de la sociedad y según las proyecciones, estas sufrirán impactos negativos en escenarios futuros. Una de las consecuencias más graves para la sociedad estará asociada a la provisión y a la calidad de recursos hídricos. Son muchos los servicios ecosistémicos que proveen los bosques y gestionarlos de forma apropiada ayudará a mitigar el cambio climático, mejorará la adaptación a sus efectos y disminuirán sus impactos. Hoy en día la crisis climática es ya una realidad, pero de momento se carece de una gestión forestal que le haga frente.

11. BIBLIOGRAFÍA

- Aizpuru, I. (2017). Bosques y cambio climático. *Naturaldia, 25 temas de rabiosa actualidad*. Donostia: Departamento de Medio Ambiente y Obras Hidráulicas de la Diputación Foral de Gipuzkoa.
- Aizpuru, I., Catalán, P. y Garín, F. (2010). *Euskal Herriko Zuhaitz eta Zuhaixken Gida*. Gasteiz: Servicio Central de Publicaciones del Gobierno Vasco.
- Balboa-Murias, M. A., Rojo, A., Álvarez, J. G. y Merino, A. (2006). Carbon and nutrient stocks in mature *Quercus robur* L. stands in NW Spain. *Annals of Science*, 63, 557–565.
- Barkley, Y., Brooks, R., Keefe, R., Kimsey, M., McFarland, A. y Schnepf, C. (2015). Idaho Forestry, Best Management Practices Field Guide. Moscow: University of Idaho.
- Bonan, G.B. (2008). Forests and Climate Change: Forcings, Feedbacks, and the Climate Benefits of Forests. *Science*, 320, 1444-1449.
- Borrelli, P., Panagos, P., Märker, M., Modugno, S. y Schütt, B. (2017). Assessment of the impacts of clear-cutting on soil loss bywater erosion in Italian forests: First comprehensive monitoring and modelling approach. *Catena* 149, 770–781.
- Burrascano, S., Chytrý, M., Kuemmerle, T., Giarrizzo, E., Luysaert, S. Sabatin, F.M. y Blasi, C. (2016). Current European policies are unlikely to jointly foster carbon sequestration and protect biodiversity. *Biological Conservation*, 201, 370-376.
- Calder, I., Hofer, T., Vermont, S. y Warren, P. (2007). Towards a new understanding of forests and water. *Unasyuva*, 58(229), 3-10.
- California Native Plant Society (d. g.). *Native plant landscaping to reduce wildfire risk*. <https://www.cnpsd.org/wildfire>
- Canadell, J. G. y Raupach, M. R. (2008). Managing Forests for Climate Change Mitigation. *Science*, 320, 1456-1457.
- Carmichael, R. (Ed.) (1984). Handbook of Physical Properties of Rocks, vol III. Boca Raton: CRC Press.
- Carter, M. R. (2002). Soil Quality for sustainable land management: Organic matter and aggregation interactions that maintain soil function. *Agronomy Journal* 94, 38-47.

- Chiti, T., Díaz-Pinés, E. y Rubio, A. (2012). Soil organic carbon stocks of conifers, broadleaf and evergreen broadleaf forests of Spain. *Biology and Fertility of Soils*, 48, 817–826.
- Christensen, M., Hahn, K., Mountford, E. P., Ódor, P., Standovár, T., Rozenbergar, D., Diaci, J., Wijdeven, S., Meyer, P., Winter, S. y Vrska, T. (2005). Dead wood in European beech (*Fagus sylvatica*) forest reserves. *Forest Ecology and Management*, 210, 267-282.
- Commarmot, B., Brändli, U.-B., Hamor, F. y Lavnyy, V. (2013). *Inventory of the Largest Primeval Beech Forest in Europe. A Swiss-Ukrainian Scientific Adventure*. Birmensdorf, Swiss Federal Research Institute WSL; L'viv, Ukrainian National Forestry University; Rakhiv, Carpathian Biosphere Reserve.
- Copernicus (2019). Dry Matter Productivity, Copernicus Global Land Service: Providing biogeophysical products of global land surface. <https://land.copernicus.eu/global/products/DMP>, European Commission, Joint Research Centre.
- Cordero, A. (2017). Large scale eucalypt plantations associated to increased fire risk. PeerJ Preprints. <https://doi.org/10.7287/peerj.preprints.3348v1>
- Cuarto Inventario Forestal Nacional (2013). *Cuarto Inventario Forestal Nacional de la Comunidad Autónoma del País Vasco/Euskadi*. Madrid: Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente.
- Cubo, J. E., Enríquez, E., Gallar, J. J., Jemes, V., López, M., Mateo, M. L., Muñoz, A. y Parra, P. J. (2012). *Los Incendios Forestales en España: decenio 2001-2010*. Madrid: Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente.
- Díaz, S., Hector, A. y Wardle, D. A. (2009). Biodiversity in forest carbon sequestration initiatives: not just a side benefit. *Environmental Sustainability*, 1, 55-60.
- Diputación Foral de Gipuzkoa (2018). *Estrategia Guipuzcoana de Lucha Contra el Cambio Climático 2050*.
- Dixon, R. K., Brown, S., Houghton, R. A., Solomon, A. M., Trexler, M. C. y Wisniewski, J. (1994). *Carbon pools and fluxes of global forest ecosystems*. *Science* 263, 185–190.
- Doblas-Miranda, E., Rovira, R., Brotons, L., Martínez-Vilalta, J., Retana, J., Pla, M., y Vayreda, J. (2013). Soil carbon stocks and their variability across the forests, shrublands and grasslands of peninsular Spain. *Biogeosciences*, 10, 8353–8361.

- Elli, E. F., Caron, B. O., Behling, A., Eloy, E., Queiroz De Souza, V., Schwerz, F. y Stolzle, J. R. (2017). Climatic factors defining the height growth curve of forest species. *iForest Biogeosciences and Forestry*, 10, 547-553.
- Elliot, W. J., Page-Dumroese, D. y Robichaud, P. R. (1999). The effects of forest management on erosion and soil productivity. *USDA Forest Service, Idaho*.
- Ernst, C., Gullick, R. y Nixon, K. (2004). Protecting the Source: Conserving Forests to Protect Water. *American Water Works Association: Opflow*, 30(5), 3-7.
- ESDAC, European Soil Data Centre (2019). esdac.jrc.ec.europa.eu, European Commission, Joint Research Centre.
- European Commission (sin fecha). *Energy, Climate change, Environment*. Recuperado el 30 de abril de 2018 de: <https://ec.europa.eu/>
- European Environment Agency (2016). How is climate change affecting forest fire risk in Europe? Joint Research Centre. <https://www.eea.europa.eu/>
- FAO (2015). *Evaluación de los recursos forestales mundiales 2015*. Roma: FAO.
- FAO (2018). *Mapa de carbono orgánico del suelo*. Roma: Alianza Mundial por el Suelo.
- Florida Forest Service (2018). *Silviculture Best Management Practices, 2017 Implementation Survey Report*. Florida Department of Agriculture and Consumer Services.
- Franklin, J. F. (1988). Chapter 18 Structural and Functional Diversity in Temperate Forests. Wilson, E. O. y Peter, F. M., (Ed.), *Biodiversity*, Washington (DC): National Academies Press (US).
- Franklin, J. F., Cromack, K., Denison, W., McKee, A., Maser, C., Sedell, J., Swanson, F. y Juday, G. (1981). *Ecological characteristics of old-growth douglas-fir forests*. USDA Forest Service General Technical Report PNW-118.
- GeoEuskadi (2019). Servicio de descargas FTP. <ftp://ftp.geo.euskadi.eus/cartografia>, Gobierno Vasco.
- Gobierno Vasco (2005). Inventario de carbono orgánico en suelos y biomasa de la Comunidad Autónoma del País Vasco. *Serie Programa Marco Ambiental, nº 48*.
- Gobierno Vasco (2011). *Cambio Climático: impacto y adaptación en la Comunidad Autónoma del País Vasco*. Gasteiz: Servicio Central de Publicaciones del Gobierno Vasco.

- Gobierno Vasco (2015). *Estrategia de Cambio Climático 2050 del País Vasco*. Donostia: Servicio Central de Publicaciones del Gobierno Vasco.
- Gobierno Vasco (2016). *Proyecto Klimatek 2016: Elaboración de escenarios regionales de cambio climático de alta resolución sobre el País Vasco*. Bilbo: Ihobe.
- Greiber, T., Van Ham, C., Jansse, G. y Gaworska, M. (2009). Final report study on the Economic value of groundwater and biodiversity in European forests. Bruselas: IUCN y CEPF.
- Harmon, M. E. (2001). Carbon Sequestration in Forests: Addressing the Scale Question. *Journal of Forestry*, 24-29.
- Herrero, A. (2017). Impactos, vulnerabilidad y adaptación al Cambio Climático en los bosques ibéricos. *Munibe Ciencias Naturales*, 65, 7-28.
- IF-2018. Inventario Forestal de la CAPV de 2018. <http://www.euskadi.eus/eaeko-baso-inbentarioa-2018/web01-a3estbin/eu/>, Gobierno Vasco.
- Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya (s.f.). *Generalitat de Catalunya*. Recuperado el 16 de junio de 2019 de: <http://www.icgc.cat/es/Ciudadano/Informate/Recursos-geologicos/Suelos/Concepto-de-suelo>
- IPBES (2019). IPBES-7 Plenary: Summary for policymakers of the global assessment report on biodiversity and ecosystem services of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services. Recuperado el 6 de junio de 2019 de: <https://www.ipbes.net/>
- IPCC (2000). *Informe especial del IPCC: Uso de la tierra, cambio de uso de la tierra y silvicultura. Resumen para responsables de políticas*. Recuperado el 30 de abril de 2018 de: <https://www.ipcc.ch/>
- IPCC (2014a). *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Field, C.B., V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea, and L.L. White (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1132 pp.

- IPCC (2014b). *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part B: Regional Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Barros, V.R., C.B. Field, D.J. Dokken, M.D. Mastrandrea, K.J. Mach, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea, and L.L. White (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 688.
- IPCC (2014c). *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Edenhofer, O., R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, E. Farahani, S. Kadner, K. Seyboth, A. Adler, I. Baum, S. Brunner, P. Eickemeier, B. Kriemann, J. Savolainen, S. Schlömer, C. von Stechow, T. Zwickel and J.C. Minx (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido y Nueva York, NY, EEUU.
- Jobbágy, E. G. y Jackson, R. B. (2000). The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation. *Ecological Applications*, 10(2), 423-436.
- Lacroix, E. M., Petrenko, C. L. y Friedland, A. J. (2016). Evidence for losses from strongly bound SOM pools after clear cutting in a Northern hardwood forest. *Soil Science*, 181, 202–207.
- Lal, R. (2004). Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science*, 304, 1623-1627.
- Lal, R. (2005). Forest soils and carbon sequestration. *Forest Ecology and Management*, 220, 242-258.
- Lewis, S. L., Wheeler, C. E., Mitchard, E. y Koch, A. (2019). Regenerate natural forests to store carbon. *Nature*, 568, 25-28.
- Li, H., Shen, H., Chen, L., Liu, T., Hu, H., Zhao, X., Zhou, L., Zhang, P. y Fang, J. (2016). Effects of shrub encroachment on soil organic carbon in global grasslands. *Scientific Reports*, 6:28974.
- Loidi, J., Biurrun, I., Campos, J.A., García-Mijangos, I. y Herrera, M. (2009). *La vegetación de la Comunidad Autónoma del País Vasco*. Gobierno Vasco, Leioa (Bizkaia).
- Llorente, M., Glaser, B. y Turrión, M. B. (2010). Storage of organic carbon and Black carbon in density fractions of calcareous soils under different land uses. *Geoderma*, 159, 31–38.

- Luyssaert, S., Schulze, E. D., Börner, A., Knohl, A., Hessenmöller, D., Law, B. E., Ciais, P. y Grace, J. (2008). Old-growth forests as global carbon sinks. *Nature*, 455, 213-215.
- MCPFE (2015). Criterion 4: Maintenance, Conservation and Appropriate Enhancement of Biological Diversity in Forest Ecosystems. *FOREST EUROPE, 2015: State of Europe's Forests 2015 (pp. 133-164.)*. Madrid: Ministerial Conference on the Protection of Forests in Europe.
- Melillo, J. M., Frey, S. D., DeAngelis, K. M., Werner, W. J., Bernard, M. J., Bowles, F. P., Pold, G., Knorr, M. A. y Grandy, A. S. (2017). Long-term pattern and magnitude of soil carbon feedback to the climate system in a warming world. *Science*, 358, 101–105.
- Messier, C., Bauhus, J., Doyon, F., Maure, F., Sousa-Silva, R., Nolet, P., Mina, M., Aquilué, N., Fortin, M. J. y Puettmann, K. (2019). The functional complex network approach to foster forest resilience to global changes. *Forest Ecosystems*, 6:21.
- Naudts, K., Chen, Y., McGrath, M. J., Ryder, J., Valade, A., Otto, J. y Luyssaert, S. (2016). Europe's forest management did not mitigate climate warming. *Science*, 351, 597-599.
- Neiker-Tecnalia (2014). *Sumideros de Carbono de la Comunidad Autónoma del País Vasco. Capacidad de secuestro y medidas para su promoción*. Gasteiz: Gobierno Vasco.
- Nunery, J. S. y Keeton, W. S. (2010). Forest carbon storage in the northeastern United States: Net effects of harvesting frequency, post-harvest retention, and wood products. *Forest Ecology and Management*, 259, 1363-1375.
- Odum, E.P. (1969). The Strategy of Ecosystem Development. *Science*, 164, 262-270.
- Olson, K. R., Al-Kaisi, M., Lal, R. y Cihacek, L. (2016). Impact of soil erosion on soil organic carbon stocks. *Journal of Soil and Water Conservation*, 71(3), 61A-67A.
- Pan, Y., Birdsey, R. A., Fang, J., Houghton, R., Kauppi, P. E., Kurz, W. A., Phillips, O. L., Shvidenko, A., Lewis, S. L., Canadell, J. G., Ciais, P., Jackson, R. B., Pacala, S. W., McGuire, A. D., Piao, S., Rautiainen, A., Sitch, S. y Hayes, D. (2011). A large and persistent carbon sink in the world's forests. *Science*, 333, 988-993.
- Panagos, P., Ballabio, C., Borrelli, P., Meusburger, K., Klikc, A., Rousseva, S., Perčec Tadić, M., Michaelides, S., Hrabalíková, M., Olsen, P., Aalto, J., Lakatos, M., Rymaszewicz, A., Dumitrescu, A., Beguería, S., y Alewell, C. (2015). *Rainfall erosivity in Europe*. *Science of the Total Environment*, 511, 801–814.

- Pausas, J. G. (2017). *j.g. pausas' blog: Notes on fire ecology, mediterranean ecology, and other things...*. Recuperado el 19 de mayo de 2019 de: <https://jgpausas.blogs.uv.es/2017/11/02/inflamabilidad-e-incendios-forestales/>
- Pérez, S., Jandl, R. y Rubio, A. (2007). Modelización del secuestro de carbono en sistemas forestales: efecto de la elección de especie. *Ecología*, 21, 341-352.
- Petrenko, C. L., y Friedland, A. J. (2014). Mineral soil carbon pool responses to forest clearing in Northeastern hardwood forests. *GCB Bioenergy*, 7, 1283–1293.
- Post, W. M. y Kwon, K. C. (2000). Soil carbon sequestration and land-use change: processes and potential. *Global Change Biology*, 6, 317-327.
- Prentice, I. C. (2001). The Carbon Cycle and Atmospheric Carbon Dioxide. *Climate Change 2001: The Scientific Basis IPCC* (pp. 183–237). Cambridge: Cambridge University Press.
- Propuesta de Reglamento del Parlamento Europeo y del Consejo, COM(2016) 479 final, del 20 de Julio del 2016, *sobre la inclusión de las emisiones y absorciones de gases de efecto invernadero resultantes del uso de la tierra, el cambio de uso de la tierra y la silvicultura en el marco de actuación en materia de clima y energía hasta 2030, y por el que se modifica el Reglamento n.º 525/2013 del Parlamento Europeo y el Consejo, relativo a un mecanismo para el seguimiento y la notificación de las emisiones de gases de efecto invernadero y de otra información relevante para el cambio climático*. Recuperado el 30 de abril de 2018 de: <http://ec.europa.eu/>
- Puhlick, J., Weiskittel, A., Fernandez, I., Fraver, S., Kenefic, L., Seymour, R., Kolka, R., Rustad, L. y Brissette, J. (2016). Long-term influence of alternative forest management treatments on total ecosystem and wood product carbon storage. *Canadian Journal of Forest Research*, 46(11), 1404-1412.
- Pukkala, T. (2016). Which type of forest management provides most ecosystem services? *Forest Ecosystems*, 3:9.
- Robertson, S. (2018). Portugal wildfires: flammable trees of Portugal. Recuperado el 19 de mayo de 2019 de: <http://www.portugalwildfires.com/flammable-trees-of-portugal/>
- Rodríguez-Loinaz, G., Amezaga, I. y Onaindia, M. (2013). Use of native species to improve carbon sequestration and contribute towards solving the environmental problems of the timberlands in Biscay, northern Spain. *Journal of Environmental Management*, 120, 18-26.

- Rodríguez-Murillo, J.C. (2001) Organic carbon content under different types of land use and soil in peninsular Spain. *Biology and Fertility of Soils*, 33, 53–61.
- Rozas, V., Zas, R. y Solla, A. (2012). Spatial structure of deciduous forest stands with contrasting human influence in northwest Spain. *European Journal of Forest Research*, 128(3), 273-285.
- Ruiz-Peinado, R., Bravo-Oviedo, A., López-Senespleda, E., Bravo, F. y del Río, M. (2017). Forest management and carbon sequestration in the Mediterranean region: A review. *Forest Systems*, 26(2).
- Schlesinger, W. H. (1977). Carbon balance in terrestrial detritus. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 8, 51–81.
- Schulze, E. D., Wirth, C. y Heimann, M. (2000). Managing forests after Kyoto. *Science*, 289, 2058-2059.
- Stern, N. (2007): *El informe Stern. La verdad sobre el cambio Climático*. Paidós Ibérica. Barcelona.
- Thomas, S. C., Malczewski, G. y Sapruff, M. (2007). Assessing the potential of native tree species for carbon sequestration forestry in Northeast China. *Journal of Environmental Management*, 85, 663-671.
- United Nations Framework Convention on Climate Change, UNFCCC (data gabe). *Climate Action*. Recuperado el 30 de abril de 2018 de: <https://unfccc.int/>
- Universidad Politécnica de Valencia (s.f.). *Parte III. Tema 12: El Agua en las Plantas. Nutrición y Transporte de Elementos Minerales. Nutrición Mineral*. Recuperado el 14 de junio de 2019 de: http://www.euita.upv.es/varios/biologia/temas/tema_12.htm#cavitaci%C3%B3n%20y%20embolia
- UZEI (1987). *Biología 3 Ekología hiztegia*. Donostia: Elkar, S. A.
- Zald, H. S. J. y Dunn, C. J. (2018). *Severe fire weather and intensive forest management increase fire severity in a multi-ownership landscape*. *Ecological Applications*, 28 (3).

ANEXOS

I. PRIMER ANEXO

ABREVIATURAS, UNIDADES Y GLOSARIO

Abreviaturas

AFOLU	Agricultura, Silvicultura y Otros Usos de la Tierra (<i>Agriculture, Forestry and Other Land Use</i>)
C	Carbono
COS	Carbono orgánico del suelo
CIS	Carbono inorgánico del suelo
CAPV	Comunidad Autónoma del País Vasco
CCPCC	Comisión de Coordinación de Políticas de Cambio Climático
CO ₂	Dióxido de carbono
D	Densidad
DOC	Carbono orgánico disuelto (<i>Dissolved Organic Carbon</i>)
EEA	Agencia Europea de Medio Ambiente (<i>European Environment Agency</i>)
ESDAC	Centro de Datos Europeo del Suelo (<i>European Soil Data Centre</i>)
FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (<i>Food and Agriculture Organization</i>)
GPP	Producción primaria bruta (<i>Gross Primary Production</i>)
IF	Inventario forestal
IFN	Inventario forestal nacional
IPBES	Plataforma Intergubernamental sobre Biodiversidad y Servicios de los Ecosistemas (<i>Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services</i>)
IPCC	Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>)
LUCAS	Análisis Estadístico de la Superficie de Uso/Cobertura de la Tierra (<i>Land Use/Cover Area frame statistical Survey</i>)
LULUCF	Uso de la Tierra, Cambio de Uso de la Tierra y Silvicultura (<i>Land Use, Land-Use Change and Forestry</i>)
MCPFE	Conferencia Ministerial sobre la Protección de Bosques en Europa (<i>Ministerial Conference on the Protection of Forests in Europe</i>)
MO	Materia orgánica
MOS	Materia orgánica del suelo
MS	Materia seca
NBP	Producción neta del bioma (<i>Net Biome Production</i>)
NEP	Producción neta del ecosistema (<i>Net Ecosystem Production</i>)
NPP	Producción primaria neta (<i>Net Primary Production</i>)
PIB	Producto interior bruto

PMS	Producción de materia seca
Ra	Respiración autótrofa
Rh	Respiración heterótrofa
SSR	Nivel de severidad estacional (<i>Seasonal Severity Rating</i>)
T	Turno de corta
UNEP	Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (<i>United Nations Environment Programme</i>)
UNFCCC	Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (<i>United Nations Framework Convention on Climate Change</i>)
V	Volumen
VMM	Volumen de madera muerta (<i>Volumen de madera muerta</i>)
VMT	Volumen de madera total (<i>Volumen de madera total</i>)
WMO	Organización Meteorológica Mundial (<i>World Meteorological Organization</i>)

Unidades

Superficie:

Hectárea (ha) = 10.000 m² = 0,01 km²

Mega hectárea (Mha) = 10⁶ ha

Volumen:

Metro cúbico (m³)

Masa:

Gramo (g)

Kilogramo (kg) = 10³ g

Tonelada (t) = Megagramo (Mg) = 10³ kg = 10⁶ g

Gigagramo (Gg) = 10⁹ g

Petagramo (Pg) = 10¹⁵ g

Densidad:

Tonelada por hectárea (t/ha) = = 10³ kg/ha = 10⁶ g/ha

Kilogramo por metro cúbico (kg/m³)

Metro cúbico por hectárea (m³/ha)

Glosario

- Adaptación** El proceso de adaptación y ajuste al clima real o esperado y sus efectos. Este proceso puede referirse al sistema social o natural y se entiende que el objetivo de la adaptación es el de evitar o reducir los daños (IPCC, 2014a). A pesar de que en el presente trabajo sobre todo se hablará de la adaptación de los bosques, en algunos casos se hará referencia a otros sistemas (territorio, sociedad, etc.).
- Bioma** Se dice de cada gran comunidad ecológica donde prevalece un tipo de vegetación.
- Biomasa** Es el peso seco de toda la materia viva que se encuentra en cierta superficie o volumen de un hábitat (UZEI, 1987). En este estudio, en lo que respecta a los árboles se hace la siguiente división: biomasa aérea (tronco, ramas, hojas, etc.) y biomasa subterránea (raíces).
- Biota** Conjunto total de fauna y flora de una región (UZEI, 1987).
- Bosque** Ecosistema con predominancia de especies arbóreas autóctonas que se ha creado o desarrollado de forma natural, integrado por árboles de especies diferentes, arbustos y herbáceos, fauna que vive en ella, hongos y microorganismos. Por una parte, se deben diferenciar los bosques naturales (autóctonos, robledales del lugar, hayedos, alisares, etc.) y, por otro lado, las explotaciones madereras comerciales formadas por árboles exóticos (pinares, robledales americanos, alerzales, eucaliptales, etc.). Las características de los bosques naturales son: la complejidad estructural, árboles de distintas edades, heterogeneidad, presencia de madera muerta y garantía de procesos ecológicos completos.
- De todas formas, en este estudio se emplean expresiones como “bosques de Gipuzkoa” o “biomasa forestal” para hacer referencia a toda la cobertura arbórea del territorio.
- Bosque maduro** Ecosistema forestal que ha llegado al último estadio de sucesión (UZEI, 1987). A excepción de los bosques primitivos, estos pueden haber sido intervenidos por el ser humano en el pasado, pero posteriormente se han desarrollado de forma natural. Estos suelen estar formados por árboles de diferentes edades, con presencia de

árboles que están envejeciendo y otros que han muerto. Además, habrá presencia de todas las fases de decadencia de madera muerta, pudiendo encontrarse en troncos muertos aún en pie o en troncos o ramas caídos (Commarmot et al., 2013).

Bosque primitivo Son los bosques que no han sido modificados por el ser humano; esto es, que no han sufrido alteraciones perceptibles o, siendo estos tan antiguos, han recuperado la composición y los procesos de las especies naturales (Commarmot et al., 2013).

Carbono orgánico del suelo Es el carbono que se mantiene en el suelo como consecuencia de la descomposición parcial de los materiales creados por los seres vivos; es el principal componente de la materia orgánica del suelo y es clave en el ciclo global del carbono (FAO, 2018).

Detritos Fragmentos muertos de plantas que se están descomponiendo (UZEI, 1987).

Ecosistema Sistema ecológico: sistema funcional formado por los organismos de una comunidad natural y su entorno (UZEI, 1987).

Embolia por cavitación A pesar de existir fuerzas de cohesión entre las moléculas de agua, en situaciones de tensión extrema, los gases disueltos en el agua tienden a formar gases y esto puede causar la ruptura de las columnas de agua (cavitación). Como consecuencia, puede ocurrir que estas burbujas interrumpen la columna líquida e impidan el transporte de agua (embolia) (Universidad Politécnica de Valencia, s.f.).

Forestación Se emplea para hacer referencia a la zona donde se han realizado plantaciones para recuperar la cobertura arbórea; concretamente, hasta que los árboles tengan una altura normal de 1,3 metros.

Fustal Se dice de la fase donde los árboles tienen una altura superior a 3 metros y un diámetro mayor que 20 centímetros.

Latizal Se dice de la fase donde los árboles tienen una altura superior a 3 metros y un diámetro menor que 20 centímetros

Materia seca Se constituye de los componentes y los elementos que forman los árboles, exceptuando el agua. En este estudio se considerará la masa de la materia seca.

Monte bravo	Se dice de la fase donde los árboles tienen una altura de entre 1,3 y 3 metros.
Plantación de árboles	Cobertura arbórea creada a partir de plantaciones o siembras con objetivos económicos. En el caso de Gipuzkoa, en general formados por árboles de edades y especies similares, que en la gran mayoría de los casos serán especies exóticas.
Producción neta del bioma	La producción primaria que queda si se le restan a la producción primaria bruta las pérdidas de carbono causadas por la respiración autótrofa de las plantas, la descomposición heterótrofa de la materia orgánica del suelo, las extracciones antropogénicas u otras perturbaciones (Copernicus, 2019).
Producción neta del ecosistema	La producción primaria que queda si se le restan la respiración autótrofa de las plantas y la descomposición heterótrofa de la materia orgánica del suelo a la producción primaria bruta (Copernicus, 2019).
Producción primaria	La producción que hacen las plantas (UZEI, 1987).
Producción primaria bruta	Toda la materia orgánica que asimilan las plantas mediante su producción (UZEI, 1987).
Producción primaria neta	La producción que queda si se le resta lo que gastan las plantas en la respiración autótrofa a la materia orgánica que han asimilado las mismas (producción bruta) (UZEI, 1987).
Productividad de materia seca	La cantidad de materia seca que produce una masa arbórea por unidad de tiempo y superficie (t MS/ha·año).
Resiliencia	La capacidad de un organismo o sistema de recuperar su función y estructura después de una perturbación o cambio exógeno (Herrero, 2017). A pesar de que en el presente trabajo sobre todo se hablará de la resiliencia de los bosques, en algunos casos se hará referencia a otros sistemas (territorio, sociedad, etc.).
Respiración autótrofa	Respiración de la vegetación (en este caso de los árboles).
Respiración heterótrofa	Respiración de los seres heterótrofos del suelo.

- Servicios ecosistémicos** Son los servicios beneficiosos para la sociedad que ofrecen los ecosistemas naturales mediante sus recursos y procesos (abastecimiento de agua de calidad, aire limpio, protección del suelo, control de los caudales de agua, oportunidades para el ocio, sumideros de carbono, etc.).
- sp.** Se emplea en los nombres científicos cuando no se define la especie de un género. Por ejemplo, *Quercus sp.*, es una especie del género *Quercus*.
- spp.** Se emplea en los nombres científicos cuando se quiere hacer referencia a más de una especie de un mismo género. Por ejemplo, *Quercus spp.*, son especies del género *Quercus*.
- Suelo** Es la capa superior de la corteza terrestre, mezcla de minerales y materia orgánica en decadencia. Este, situado en la interfase litosfera-hidrosfera-atmósfera, tiene un carácter natural vivo, dinámico y no renovable a corto-medio plazo y cumple funciones ecológicas importantes (Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya, s.f.). Se empleará como término equivalente a “soil” en inglés.
- Tasa de crecimiento** Es el nivel de crecimiento esperado para cada especie arbórea; en este estudio se empleará para hacer referencia a la ganancia de biomasa que tienen los árboles en el tiempo.
- Turno de corta** Es el intervalo de tiempo estimado para realizar la última tala de árboles en una cobertura forestal; esta variable es fijada por el sector forestal en función de las tasas de crecimiento y la rentabilidad económica de las explotaciones madereras; puede variar dependiendo de la especie arbórea.
- Xerófilo** Adaptado a los sitios con recursos hídricos limitados (UZEI, 1987).

II. SEGUNDO ANEXO

DENSIDAD DE LOS FRAGMENTOS DE ROCA

La densidad de los fragmentos de roca (2.650 kg/m³) se ha deducido de la Tabla 29 y la Figura 48 recuperados del libro "Handbook of Physical Properties of Rocks, vol III" editado por Carmichael (1984).

Tabla 29: Densidades de distintos tipos de rocas. Fuente: Carmichael (1984).

Tipo de roca	Nº de muestras	Media (g/cm ³)	Desviación estándar	Moda (g/cm ³)	Mediana (g/cm ³)
Andesita	197	2,65	0,13	2,58	2,66
Basato	323	2,74	0,47	2,88	2,87
Diorita	68	2,86	0,12	2,89	2,87
Dolerita (diabasa)	224	2,89	0,13	2,96	2,9
Gabro	98	2,95	0,14	2,99	2,97
Granito	334	2,66	0,06	2,66	2,66
Cuarzo pórfido	76	2,62	0,06	2,6	2,62
Riolita	94	2,51	0,13	2,6	2,49
Sienita	93	2,7	0,1	2,67	2,68
Traquita	71	2,57	0,1	2,62	2,57
Arenisca	107	2,22	0,23	2,22	2,22
Todas las rocas:	1.647	2,73	0,26	2,65	2,86

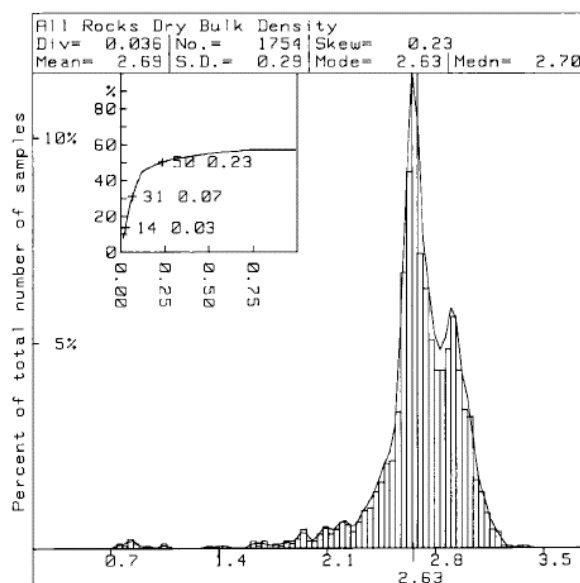


Figura 48: Histograma creado a partir de los datos de la Tabla 29. Fuente: Carmichael (1984).

La densidad de los fragmentos de rocas se ha derivado a partir de los valores de la moda del las distintas muestras (2,65 g/cm³, o su equivalente, 2.650 kg/m³).

III. TERCER ANEXO

CRITERIOS DE ANÁLISIS LITOLÓGICO

A la hora de calcular el potencial que tiene el suelo forestal de los bosques de Gipuzkoa para absorber carbono, se la clasificado el mapa litológico de Gipuzkoa (M24) en 10 clústeres (M10) siguiendo el procedimiento definido en el trabajo de Neiker-Tecnalia (2014), hasta conseguir el mapa M10.

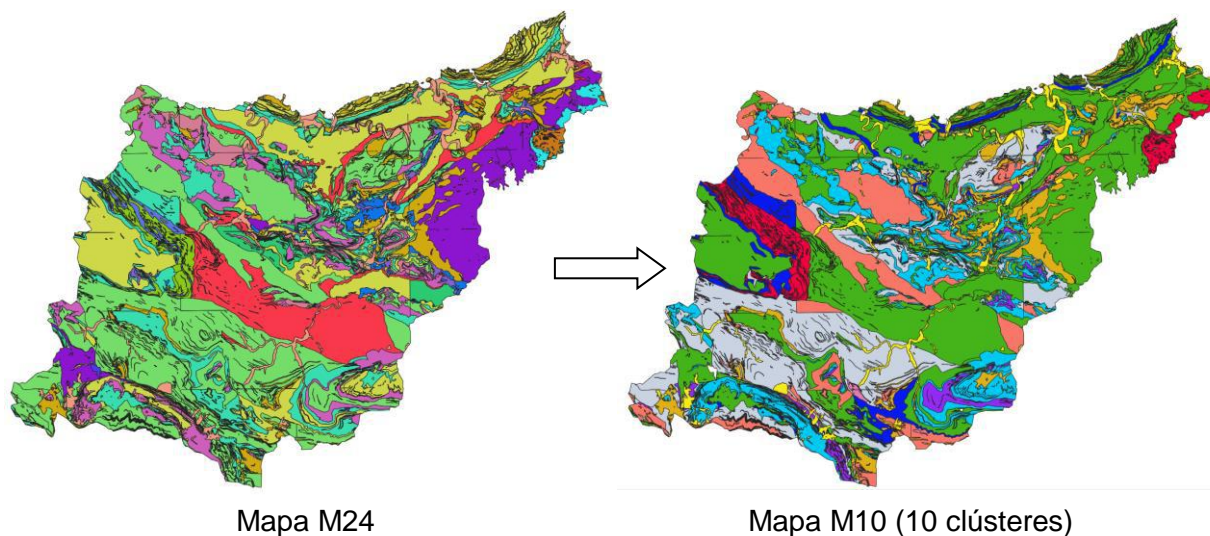


Figura 49: El mapa litológico de Gipuzkoa (M24) clasificado en 10 clústeres (M10).

Para realizar esta clasificación se han empleado las características “LITOLOGIA” y “DESCRIP” de la base de datos GeoEuskadi (2019). Teniendo esto en cuenta, el mapa dividido en 10 clústeres se ha creado a partir de los criterios listados a continuación:

- 1) El grupo “01 Depósitos superficiales” de M24 se ha asociado al grupo “05 Coluviales. Aluviales” de M10.
- 2) El grupo “02 Rocas detríticas de grano grueso (Areniscas). Dominante” de M24 se ha ubicado dentro de “01 Arenas de grano medio y grueso” del mapa M10. Este criterio se ha basado en el mapa de 10 clústeres del estudio Neiker-Tecnalia (2014) donde se muestra el territorio de Bizkaia y el norte de Araba, en el cual las areniscas del monte Oiz se agrupan dentro de “01 Arenas de grano medio y grueso”.
- 3) Las “03 Rocas detríticas de grano medio (Limolitas). Dominante” y las “04 Rocas detríticas de grano fino (Lutitas). Dominante” de M24, por el contrario, se han ubicado en el grupo “06 Alternancia de lutitas y areniscas con dominancia de lutitas” de M10.
- 4) En el caso del grupo “08 Detríticos alternantes” de M24, esta superficie se ha dividido en diferentes clústeres de M10, de forma que se han realizado asignaciones en función de las descripciones adicionales del mapa litológico de GeoEuskadi (2019):

- 4a. Las tipologías con las descripciones 034, 048, 089, 090, 127 y 131 se han asignado al grupo “04 Alternancia de areniscas y lutitas con dominancia de arenas” de M10.
- 4b. Las tipologías con las descripciones 056 y 093 se han relacionado con el grupo “06 Alternancia de lutitas y areniscas con dominancia de lutitas” de M10.
- 4c. La descripción “051 Brechas, slumps, lutitas negras. Localmente megaturbidityas” que tiene una superficie de 279 hectáreas, se ha agrupado dentro de “02 Areniscas calcáreas y calcarenitas” de M10, siguiendo los criterios del mapa de 10 clústeres del estudio Neiker-Tecnalia (2014) donde se muestra el territorio de Bizkaia y el norte de Araba.
- 4d. El clúster denominado “03 Calizas dolomíticas. Margas y Limolitas Amarillentas” por Neiker-Tecnalia (2014) no es relevante, ya que no resulta útil para describir la litología de Gipuzkoa. Por eso, se ha renombrado este clúster.
- 4e. Con las descripciones 046, 050, 106 y 125 se ha redefinido el tercer clúster del trabajo Neiker-Tecnalia (2014), quedando así: “03 Alternancia de areniscas y lutitas sin predominio de areniscas o lutitas”. Se ha tomado esta decisión porque en las tipologías mencionadas no existía una dominancia clara de areniscas o lutitas y estos no se adaptaban bien a los clústeres definidos por Neiker-Tecnalia (2014). De esta forma, la capacidad predeterminada de este clúster se calculará mediante la media aritmética de la capacidad de los clústeres 04 y 06.
- 5) Los grupos “09 Margas descarbonatadas” y “10 Margas” de M24 se han agrupado en el clúster “09 Margas grises. Ofitas. Alternancia de margas y calizas. Pizarras y grauvacas” de M10.
- 6) El grupo “11 Calizas impuras y calcarenitas” de M24 se ha asignado al clúster “10 Calizas bioclásticas. Calizas urgonianas. Dolomías” de M10, salvo en las siguientes excepciones: los que tienen la descripción 075 se han clasificado en el clúster “02 Areniscas calcáreas y calcarenitas”; las tipologías 062 y 077 en el grupo “09 Margas grises. Ofitas. Alternancia de margas y calizas. Pizarras y grauvacas”; 094 y 103 por el contrario, se han agrupado en el clúster “08 Alternancia de calizas y margas”.
- 7) El grupo “12 Calizas” de M24 se ha relacionado con el clúster “10 Calizas bioclásticas. Calizas urgonianas. Dolomías” de M10, excepto los de la descripción 107 (“Margas, limolitas calcáreas negras. Intercalaciones de calizas”) los cuales se han asociado al clúster “09 Margas grises. Ofitas. Alternancia de margas y calizas. Pizarras y grauvacas” de M10.
- 8) Los grupos “13 Rocas volcánicas piroclásticas” y “14 Rocas volcánicas en coladas” de M24 se han agrupado en el clúster “07 Rocas volcánicas e ígneas” de M10.

- 9) El grupo “15 Ofitas” de M24 se ha considerado dentro del clúster “09 Margas grises. Ofitas. Alternancia de margas y calizas. Pizarras y grauvacas”.
- 10) El grupo “16 Arcillas con yesos y otras sales” se ha unido al clúster “06 Alternancia de lutitas y areniscas con dominancia de lutitas” de M10.
- 11) En lo que respecta al grupo “17 Alternancia de margocalizas, margas calizas y calcarenitas” de M24, en función de la descripción este grupo se ha dividido en dos clústeres diferentes: las superficies con descripciones 031, 058, 059, 072 y 076 se han agrupado dentro del clúster “08 Alternancia de calizas y margas” de M10; los de descripción 067, 068, 070, 047, 055, 030 y 091 se han asignado al clúster “09 Margas grises. Ofitas. Alternancia de margas y calizas. Pizarras y grauvacas”.
- 12) El grupo “18 Dolomías” de M24 se ha relacionado con el clúster “10 Calizas bioclásticas. Calizas urgonianas. Dolomías” de M10.
- 13) El grupo “19 Pizarras” de M24 se ha clasificado dentro del clúster “09 Margas grises. Ofitas. Alternancia de margas y calizas. Pizarras y grauvacas”.
- 14) Los grupos “20 Rocas ígneas”, “22 Granitos de grano grueso”, “23 Granodioritas” y “24 Rocas filonianas” se han asignado al clúster “07 Rocas volcánicas e ígneas” de M10, excepto los “Filones de calcita de origen hidrotermal” de descripción 007 que se han clasificado dentro del clúster “10 Calizas bioclásticas. Calizas urgonianas. Dolomías”.