



2022
Lleida

27·1
junio · juny
julio · juliol

Cataluña
Catalunya

8º CONGRESO FORESTAL ESPAÑOL

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

8CFE

Edita: Sociedad Española de Ciencias Forestales
Cataluña | Catalunya · 27 junio | juny - 1 julio | juliol 2022
ISBN 978-84-941695-6-4
© Sociedad Española de Ciencias Forestales

Organiza



Contribución potencial de las áreas desarboladas en Castilla y León a la mitigación del cambio climático

BEZARES SANFELIP, F.¹, SABÍN GALÁN, P.¹, GALLEGO CIPRÉS, F.¹, GÓMEZ CONEJO, R.

¹ Fundación Centro de Servicios y Promoción Forestal y de su Industria de Castilla y León.

² Sociedad Española de Ciencias Forestales.

Resumen

El objetivo es presentar y cuantificar de forma orientativa la oportunidad que supone la restauración de áreas desarboladas en Castilla y León como agente mitigador gracias al potencial de absorción de CO₂. En este estudio se concibe la restauración ecológica (mediante especies forestales arbóreas) como medio para la cuantificación de la fijación de CO₂.

Primero se propuso la identificación de áreas restaurables, considerándose las superficies forestales actualmente desarboladas, evitándose áreas medioambientalmente sensibles o descartadas por factores operativos. Para ello, se aplicó un análisis de decisión multi-criterio empleando cartografía temática (catastral, forestal, áreas protegidas). Después, se seleccionaron 10 especies forestales y se estimó su distribución potencial empleando MaxENT con datos climáticos y datos de presencia (IFN y GIBF). Posteriormente, se establecieron tipologías de módulos de restauración para sintetizar los principales tipos de formaciones vegetales a implantar. A continuación, se estimó la capacidad de fijación de CO₂ de los módulos empleando la calculadora de emisiones del MITECO. Como resultado, las áreas potencialmente restaurables comprenden el 37% de la superficie forestal y el 98% de la forestal desarbolada. Las absorciones de CO₂ al final del período (2050) supondrían el 1,7% del total de las emisiones a nivel nacional en 2019.

Palabras clave

Cambio climático, fijación de CO₂, mitigación, 2050, green deal, castilla y león, cyl, restauración ecológica.

1. Introducción

Castilla y León es una de las grandes regiones europeas. Se trata de región de carácter eminentemente forestal en la que 51. % de su superficie tiene esta consideración de acuerdo con el IFN3. Sin embargo, sólo el 31% de la superficie total está cubierta por bosques. Los pastizales naturales y matorrales ocupan casi 2 Mha. (JCYL, 2005)

Históricamente el territorio de Castilla y León ha sufrido una importante degradación ambiental, fruto del sistema agrario tradicional que, combinado con otros factores, llevó a una reducción constante de la superficie arbolada hasta los mínimos del primer tercio del siglo XX. A partir de ahí hemos asistido a una profunda recuperación de la vegetación basada en las actuaciones de repoblación forestal combinada con la expansión natural de los bosques. El aumento de superficie forestal se aceleró en el último tercio del siglo XX (JCYL, 2005) coincidiendo con el éxodo rural. Durante los últimos 20 años hemos asistido a una ralentización de esta recuperación, debida, por un lado, a la reducción de fondos, y por otro, a la disyuntiva en la toma de decisiones entre más bosques o bosques mejor gestionados. Debemos aspirar de forma indudable a las dos, más bosques y mejor gestionados.

En todo caso, el incremento de la superficie de los bosques supone un importante efecto en la mejora de la biodiversidad (BIODIVERSA, 2020), que aumenta a medida que los bosques, todavía jóvenes en términos de arbolado, vayan acercándose a épocas más maduras. Y menos todavía, cabe

duda de que los nuevos bosques han incrementado de forma notable la capacidad de absorción de CO₂ de la región.

En este contexto, nos enfrentamos a las dos grandes crisis: climática y de biodiversidad, ante las cuales el aumento de la cobertura arbolada puede contribuir a su lucha. Castilla y León cuenta con una amplia superficie desarbolada apta para contribuir, a través de su restauración, al cumplimiento de los compromisos europeos y a la ejecución de algunos de los planes y estrategias establecidos para tal fin a escala mundial, europea, nacional y regional.

Por consiguiente, la restauración de la vegetación se aborda en este estudio desde la óptica del incremento de la cobertura arbolada mediante especies autóctonas, siendo el objetivo de la misma la conversión de matorrales y pastizales en dehesas o bosques. El estudio pretende poner de manifiesto la capacidad real y los límites del sector LULUCF, y en particular de la conversión de no bosques en bosques y su contribución a través de las absorciones al cumplimiento de los compromisos que se establezcan en el sector LULUCF para el periodo 2021-30. En el ámbito europeo, la restauración de los terrenos desarbolados contribuye consecución de las estrategias iniciativas europeas: Pacto Verde, Estrategia Europea de biodiversidad, Estrategia de adaptación al cambio climático de la UE o Estrategia Europea de bioeconomía,

La restauración de la vegetación contribuye de forma directa al cumplimiento de Pacto Verde Europeo a través de la mejora de los sumideros de carbono para conseguir la neutralidad climática en 2050. Las actuaciones definidas están alineadas y contribuirán de forma positiva al cumplimiento de la Estrategia Europea de Biodiversidad, en particular al objetivo de aumentar la cantidad de sus bosques, a la par que mejorando de forma notable la conectividad ecológica. Además, la estrategia de adaptación al cambio climático de la UE se verá reforzada a través de las acciones de restauración que implican el incremento de la diversidad de especies y de la creación de paisajes más resilientes, si bien es cierto, que se requiere el desarrollo de acciones que minimicen el posible impacto de los incendios forestales asociados a los mayores riesgos derivados de la continuidad del combustible. También en línea con la Estrategia a largo plazo para 2050, la restauración de los terrenos desarbolados en Castilla y León contribuirá a crear sumideros esenciales de carbono. En el ámbito nacional, cabe destacar el impacto de este proyecto en el Plan Nacional de Energía y Clima, Plan Nacional de Adaptación, la Estrategia de descarbonización a largo plazo, la Lucha contra la despoblación, Plan estratégico del Patrimonio Natural y la Biodiversidad, Plan Forestal Español y la Estrategia nacional de infraestructura verde.

2. Objetivos

El objetivo de esta publicación se centra en presentar y cuantificar de forma orientativa la oportunidad que supone la restauración de áreas desarboladas en Castilla y León, en el marco actual de lucha contra el cambio climático, principalmente como agente mitigador gracias al potencial de absorción de CO₂. Se ha considerado la restauración como el aumento de la cobertura arbolada a través de la conversión de matorrales o pastizales en dehesas o bosques. Se pueden apuntar los siguientes objetivos específicos:

- La identificación de las superficies aptas de restauración desde un punto de vista ecológico y sin limitaciones de tipo legal.
- Los tipos de vegetación y especies más adecuadas para la realizar la restauración.
- La cuantificación simplificada del potencial de CO₂ absorbido en 2050.

3. Metodología

Para la consecución de los objetivos mencionados, se propusieron líneas de actuación: primero la identificación las zonas potencialmente restaurables en Castilla y León apoyada en cartografía temática y análisis multicriterio. Segundo, la selección de especies forestales, la estimación de su probabilidad de presencia y la representación de su distribución. Tercero, la definición de módulos de

restauración, el objetivo de la restauración ecológica y su zonificación. Cuarto, zonificación de las actuaciones, es decir, la combinación de las áreas de actuación con los módulos de restauración. Finalmente, el cálculo del carbono almacenado en 2050 por los módulos de restauración.

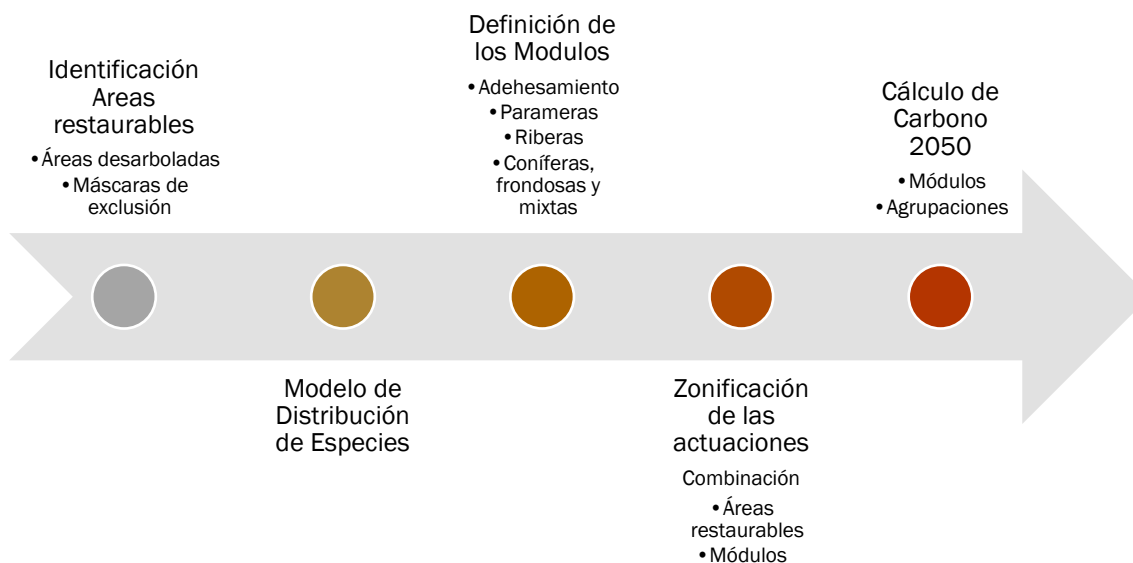


Figura 1 . Diagrama de flujo de la metodología general.

Identificación de áreas restaurables

La metodología se fundamenta en una serie de asunciones que son importantes destacar dada la escala de trabajo y la complejidad del estudio.

1. Se optó por delimitar el alcance a la superficie forestal, no interfiriendo con las actualmente dedicadas a cultivos agrícolas, evitando así posibles conflictos de intereses con la producción alimentaria.
2. El estudio se aborda desde una escala de trabajo estratégica, sin pretender acercarse a una toma de decisiones operativa. En consecuencia, no se hace referencia a cómo se tiene que efectuar la restauración para transformar los espacios desarbolados en bosques, pudiéndose combinar distintas técnicas que van desde el apoyo a la regeneración natural hasta la forestación.
3. En la definición de los modelos de bosques futuros se ha apostado por la simplificación manteniendo las tipologías ampliamente distribuidas en la región.
4. En todo caso, el criterio de elección de especies y de otros parámetros como la densidad de plantación, se deben considerar únicamente como aproximaciones necesarias que nos permiten cuantificar los resultados.
5. Se ha asumido la simplificación de que la totalidad de la superficie apta para restaurarse se interviene en el momento actual, no considerándose barreras de acceso a la propiedad. Sin embargo, sí se han considerado modelos de restauración compatibles con el uso ganadero del territorio.

Primero, la de identificación de áreas restaurables constó de dos fases, en primer lugar, la identificación de las áreas forestales desarboladas adecuadas para la restauración (pastizales, matorrales y Tierras Desnudas). Esta identificación se realizó empleando los Mapas Usos y Cubierta Naturales de Castilla y León 2019 con viales del ITACYL (MEDINA Y NAVAFRIA, 2014). En segundo lugar, la eliminación de áreas (máscaras de exclusión) que, a pesar de no presentar un estrato arbóreo, no se consideraron idóneas para la restauración. A saber:

1. áreas sensibles desde el punto de vista medioambiental: Zonas de Especial Protección para las Aves (ZEPAS)
2. bandas de protección de riberas de ríos
3. cultivos o zonas agrícolas productivas
4. limitaciones del terreno: elevaciones por encima de 1800m y terrenos escarpados (<35%).

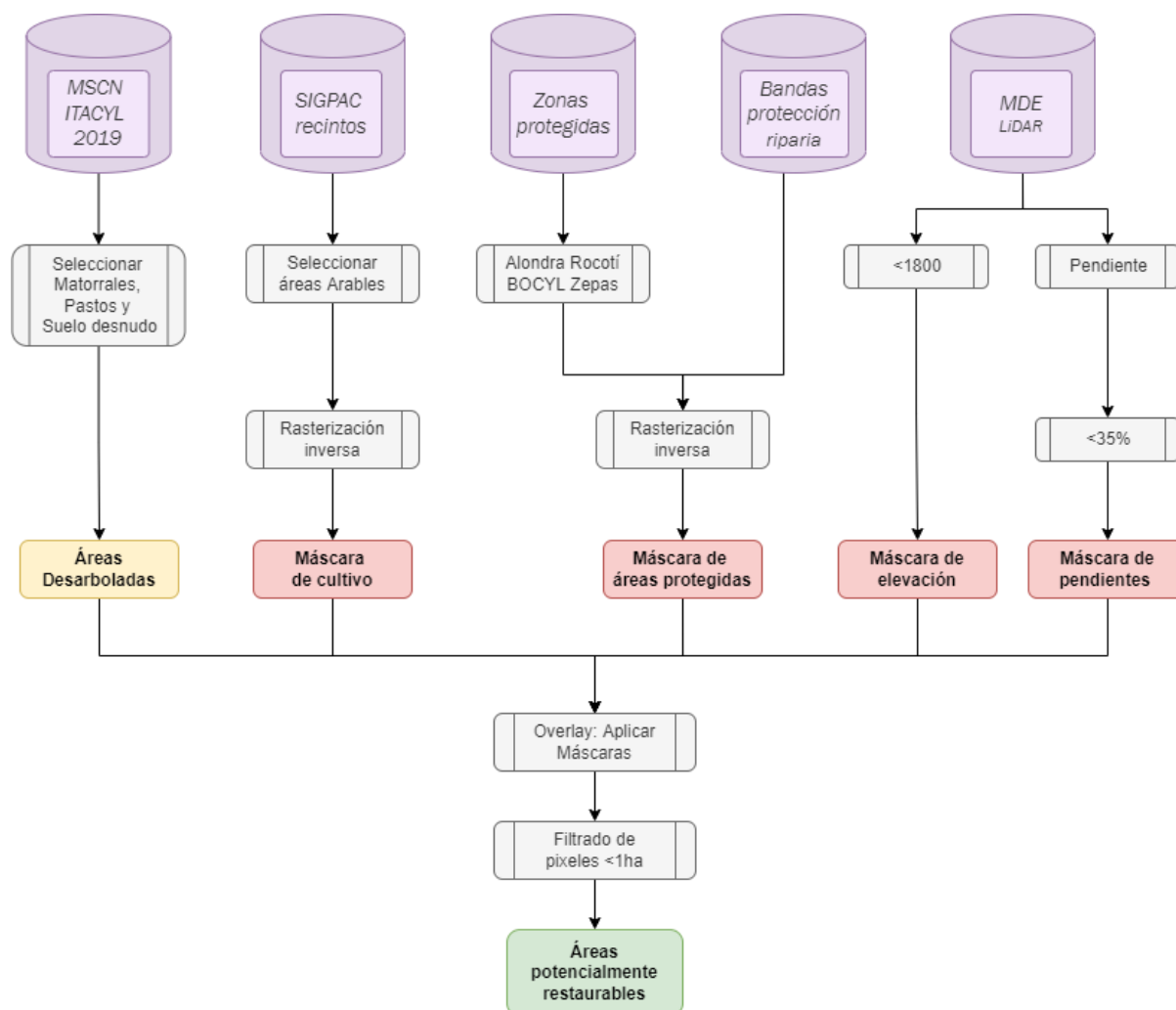


Figura 2. Metodología de identificación de áreas potencialmente restaurables.

Las zonas susceptibles de restauración ecológica se definieron como aquellas zonas sin cobertura arbolada, las cuales no cumplen con ninguno de los criterios de exclusión.

La zonificación de las superficies potencialmente restaurables se realizó aplicando las máscaras de exclusión sobre las zonas sin cobertura arbórea. Para ello, previamente todas las máscaras, es decir, las áreas protegidas, los cultivos y las limitaciones topográficas, se redimensionaron a 30 metros, a la escala máxima definida por las capas que las componen. Una vez redimensionada, el resultado se combinó y se aplicó a las áreas de sin cobertura arbórea, dando como resultado, las posibles áreas restaurables (ver Figura 2). Sin embargo, dependiendo de los

objetivos específicos de la restauración, no todas las áreas pueden ser susceptibles de actuación, especialmente si esta área está muy fragmentada y las teselas son pequeñas. Por lo tanto, se decidió definir un umbral mínimo de actuación, eligiéndose 1 ha como unidad de referencia.

Modelo de distribución de Especies

Con el objetivo de poder realizar un cálculo de fijación de CO₂ en las áreas restaurables de Castilla y León, se realizó una selección de las principales especies y su área de distribución potencial. Se optó por elegir las especies tomando como premisas que: (i) fueran autóctonas y (ii) se tomó como base su distribución actual. No se tuvieron en cuenta criterios como la viabilidad de su implantación o su capacidad de crecer en terrenos desarbolados o suelos degradados. Tampoco se han considerado criterios de interés socioeconómico (ya sea para la producción de madera, resina, forraje u otros). Por último, es necesario tener en cuenta que la distribución se ha basado en la presencia actual, sin considerar los efectos derivados del cambio climático. Como resultado se seleccionaron las ocho especies arbóreas más representativas de Castilla y León (*Pinus sylvestris*, *Pinus pinea*, *Pinus halepensis*, *Pinus nigra*, *Pinus pinaster*, *Juniperus thurifera*, *Quercus pyrenaica*, *Quercus faginea*, *Quercus ilex*, *Quercus suber* y *Fagus sylvatica*).

Los modelos de distribución de especies se implementaron en el software maxEnt (PHILLIPS et al., 2017). Se modelizó la probabilidad de ocurrencia individual de cada una de las especies en un determinado pixel. No obstante, es necesario indicar que estas modelizaciones no consideran la interacción entre las 11 especies. Los tipos de datos empleados para realizar la modelización son:

1. Datos de presencia de las especies: estos datos se obtuvieron del Inventario Forestal Nacional (IFN) y del Global Biodiversity Information Facility (GBIF.).
2. Variables ambientales: bioclimáticas WorldClim v2.(FICK AND HIJMANS, 2017),forestales, edafológicas , topográficas.

Los resultados de los modelos se agruparon en una colección o raster multibanda hallando el pixel de mayor y segunda mayor probabilidad para obtener la especie “principal” y la “secundaria”. Después, los mapas de especie principal y secundaria se combinaron espacialmente, para obtener una cartografía de mezcla potencial de especies (Ver Figura 3). Finalmente, para mejorar la legibilidad del mapa y eliminar valores aislados, todas aquellas extensiones inferiores a tres pixeles se agruparon al conjunto vecino superior más cercano adquiriendo su categoría.

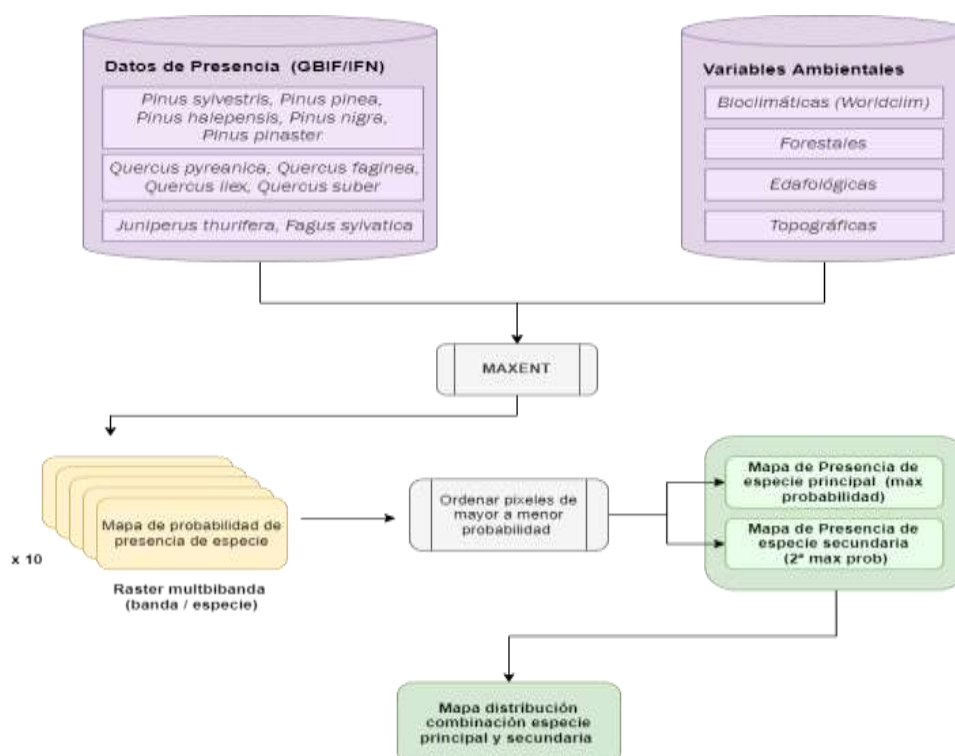


Figura 3. Metodología para la modelización de la distribución de las especies que componen los módulos de restauración.

Definición de los módulos de restauración

Para la restauración de las áreas identificadas como potencialmente aptas para la restauración en Castilla y León, se plantearon unas tipologías de módulos de restauración, que buscan sintetizar los principales tipos de formaciones vegetales derivados de la distribución potencial de especies y combinarlos con los tipos de formaciones que pueden dar lugar. Para cada una de estas categorías se desarrolló una metodología propia de identificación, empleando diferentes fuentes cartográficas que ayudaron a definir y representar espacialmente las características de cada módulo. El propósito de esta zonificación es poder representar espacialmente un tipo de estructura forestal objetivo en todo el territorio y luego aplicarlas en las zonas de interés.

Se definieron 4 módulos de restauración:

1. Adehesamiento: Para la identificación de las potenciales dehesas, se seleccionaron la combinación de cubiertas complejas de tipo dehesas del SIOSE (IGN, 2018). A esta selección, además se incluyeron los pastizales identificados en el SIGPAC como PS (Pastizal). La unión espacial de ambos territorios es lo que finalmente conforma el módulo de adehesamiento.
2. Páramos: Se definieron intersecando las unidades paisajísticas tipo paramo por el Atlas Nacional De Paisaje (SANCHO COMÍNS, 2018) con los suelos identificados como leptosoles. De esta forma se asegura que para las unidades paisajísticas de tipo páramo se cumple la condición de baja productividad asociada a los suelos lépticos. (MACÍAS et al., 2005)
3. Riberas. Para la zonificación de ecosistemas riparios se combinaron las áreas las zonas de inundación con alta probabilidad correspondiente con un periodo de retorno de 10 años, suministrada por el Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables. (MITECO, 2011) con las áreas la capa de "Delineación de Zonas Riparias de Copernicus" de 2012 Joint Research Center (JRC)., concretamente las "Áreas riparias Actuales" de probabilidad >30%

4. Bosques de coníferas, bosques de frondosas y mixtas: Se pretende delimitar aquellas zonas susceptibles de ser restauradas mediante establecimiento de coníferas y frondosas. Para ello, se emplearon los resultados del modelo de distribución de especies y sus combinaciones, de tal forma que se dividió el módulo en tres grupos: “Coníferas” (código 1), si las especies de la combinación de especie principal y secundaria eran exclusivamente coníferas, “Frondosas” (código 2) si las especies asociadas eran frondosas y, finalmente “Mixtas” (código 3) si la combinación de especies estaba formada por coníferas y frondosas

Las distribuciones de los módulos de restauración se combinaron espacialmente siguiendo un grado de preferencia en caso de solapes: siendo las riberas el módulo preferente, después las dehesas, seguido del módulo de páramos y finalmente los bosques de conífera, frondosas y mixtos, tal y como se ve en la Figura 4. Figura 5

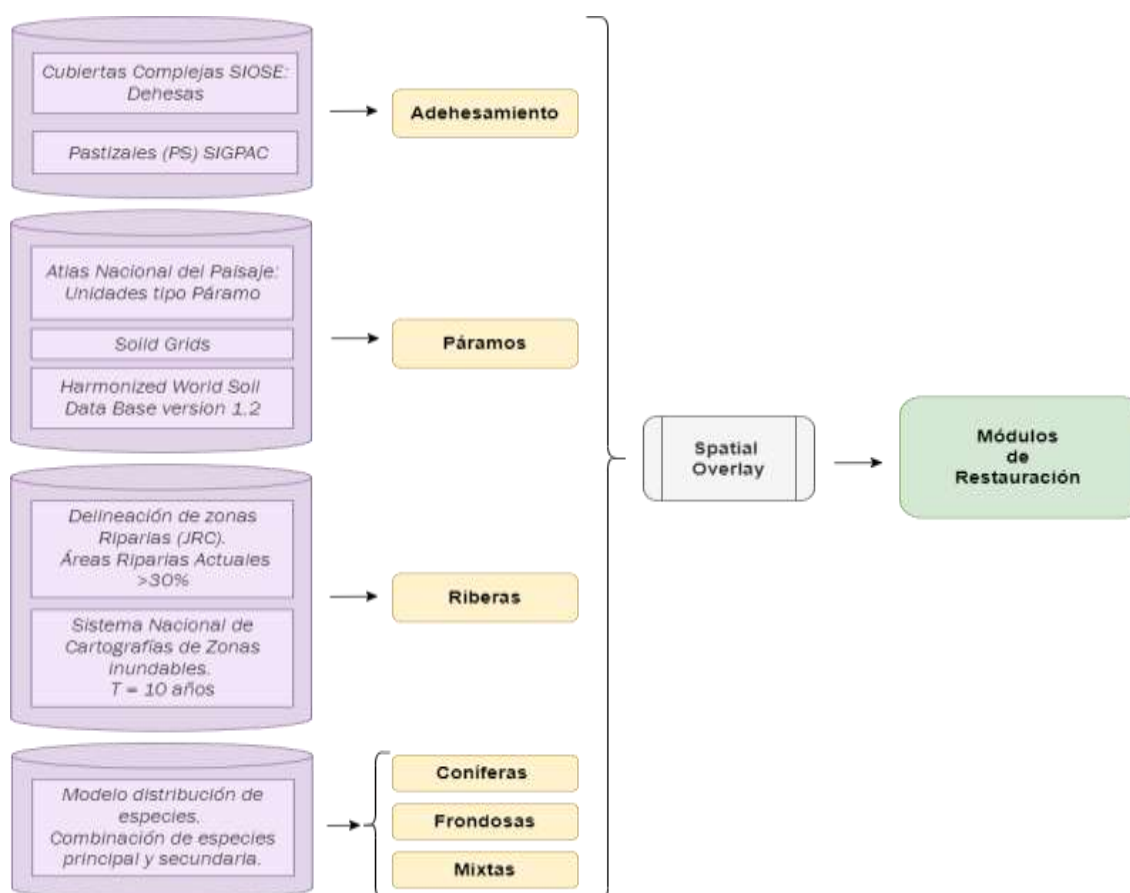


Figura 4. Metodología de identificación de los módulos de restauración.

Zonificación de las actuaciones

Para poder zonificar que actuaciones se deben ejecutar en las zonas potencialmente restaurables, la combinación de los módulos se enmascaró usando la cartografía de áreas potencialmente restaurables. Este proceso se ilustra en la Figura 5.

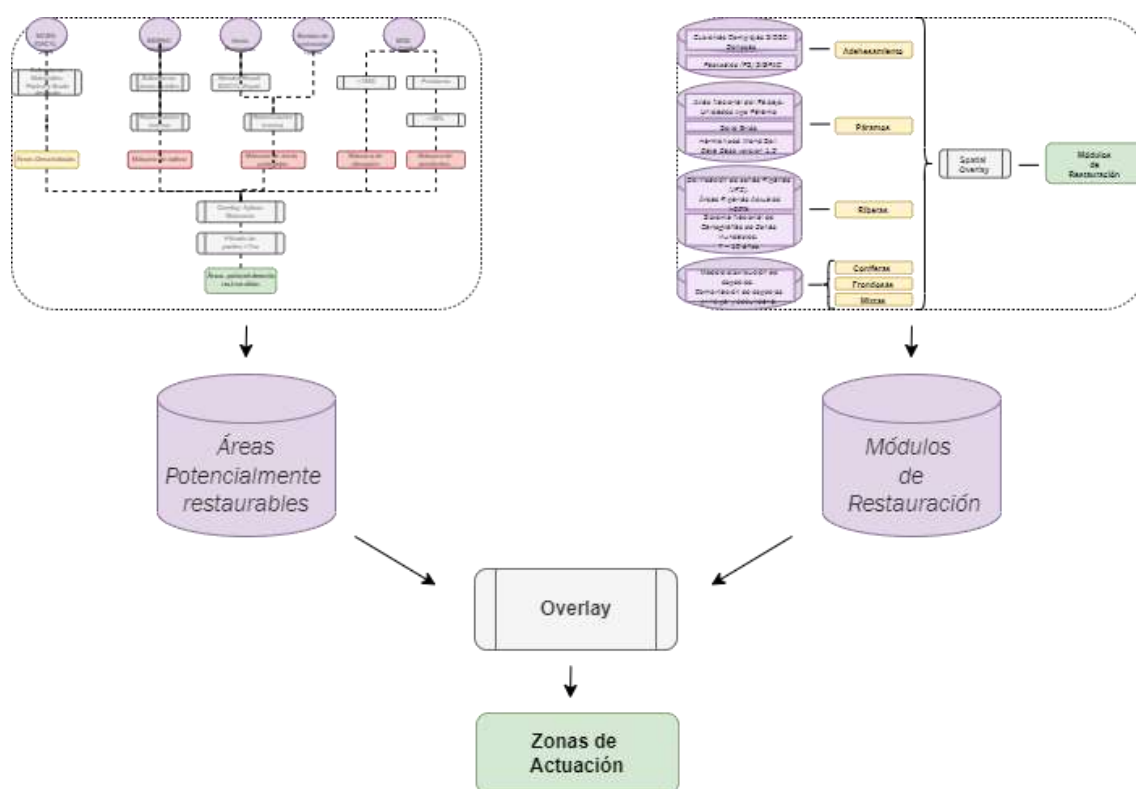


Figura 5. Metodología para la asignación de los módulos de restauración a las áreas potencialmente restaurables.

Metodología de estimación de CO₂

Se pretende estimar la cuantificación del aumento de la capacidad de fijación de CO₂ en Castilla y León a través de la restauración de las zonas potencialmente restaurables, empleando los módulos y los modelos de distribución para las especies seleccionadas. Se plantea un horizonte de temporal de 30 años asumiendo una serie de simplificaciones:

1. Se asume que toda la superficie está restaurada en el año 0 y que, a partir de este momento, comienza la absorción de carbono.
2. No se consideran pérdidas de superficie restaurada fruto de incendios forestales u otros desastres naturales.
3. No se consideran pérdidas por mortalidad natural
4. No se considera que se realicen tratamientos selvícolas que reduzcan la densidad
5. En el módulo de riberas se considera la plantación de chopo con finalidad productiva en cuyo caso cabrían 2 turnos. En ese contabiliza el segundo de ellos.
6. No se considera el CO₂ almacenado en productos.

En ningún caso se establecen las guías metodológicas para realizar una restauración ambiental a nivel regional, sino que la restauración se plantea como el instrumento a través del cual conseguir cuantificar la fijación potencial de CO₂.

La cantidad de CO₂ que cada módulo fijará está intrínsecamente relacionada con las especies las componen. La simulación de la fijación de carbono se realizó empleando la metodología de absorciones que ofrece el Ministerio de Transición Ecológica y Reto Demográfico (MITECO) para las especies propuestas en los módulos de restauración, esto es, *Pinus nigra*, *Fagus sylvatica*, *Juniperus thurifera*, *Pinus halepensis*, *Pinus pinaster ssp. mesogeensis* Sistema Central, *Pinus pinea*, *Quercus*

fagínea, Quercus ilex, Quercus pyrenaica, Pinus sylvestris Sistema Central, *Quercus suber* y *Populus sp.*

Se definieron las **densidades objetivo** que conformarían los módulos de plantación (ver Tabla 1), se indicó un área de actuación de 1 ha. para obtener los valores unitarios, y un horizonte de finalización del proyecto de 30 años.

Tabla 1. Densidades propuestas por módulo.

Módulo	Densidad (pies/ha)
Parameras	800
Coníferas y frondosas (coníferas)	1600
Coníferas y frondosas (frondosas)	1200
Riberas	276
Dehesas	100

Los módulos se definieron por dos especies (principal y secundaria). Para cada combinación se calculó la fijación de CO₂ considerando un **75 % de la fijación de CO₂/ha de la especie principal y un 25 % de la fijación (CO₂/ha) por parte de la especie secundaria**. A pesar de que la tasa de fijación de carbono por especie es diferente, la mayor diferencia apreciable en la fijación de los módulos está determinada por su densidad final. La variación de la absorción en función de la densidad se recoge en la Tabla 2.

Tabla 2. Valores de fijación de CO₂ t/ha y por especie y árbol, para cada densidad considerada en los módulos de restauración.

Módulo	Especie	Densidad de plantación (pies/ha)	Absorciones Unitarias por sp. (t CO ₂)	Absorciones Total t CO ₂ /ha
Coníferas y Frondosas	<i>Pinus halepensis</i>	1600	0,082	131,503
	<i>Pinus nigra</i> (Resto)		0,079	126,717
	<i>Pinus pinea</i>		0,168	268,171
	<i>Pinus pinaster ssp. mesogeensis</i>		0,180	287,588
	<i>Pinus sylvestris</i> Sistema Central		0,061	97,639
	<i>Quercus fagínea</i>		0,098	117,068
	<i>Quercus ilex</i>	1200	0,072	86,563
	<i>Quercus pyrenaica</i>		0,148	177,518
	<i>Quercus suber</i>		0,111	133,400
	<i>Fagus sylvatica</i>		0,027	32,651
	<i>Juniperus thurifera</i>		0,021	33,462
	Dehesas		<i>Pinus halepensis</i>	100
<i>Pinus nigra</i> (Resto)		0,079	7,920	
<i>Pinus pinea</i>		0,168	16,761	
<i>Pinus pinaster ssp. mesogeensis</i>		0,180	17,974	
<i>Pinus sylvestris</i> Sistema Central		0,061	6,102	
<i>Quercus fagínea</i>		0,098	9,756	
<i>Quercus ilex</i>		0,072	7,214	
<i>Quercus pyrenaica</i>		0,148	14,793	
<i>Quercus suber</i>		0,111	11,117	
<i>Fagus sylvatica</i>		0,027	2,721	

	<i>Juniperus thurifera</i>		0,021	2,091
	<i>Pinus halepensis</i>		0,082	65,751
	<i>Pinus nigra (Resto)</i>		0,079	63,358
	<i>Pinus pinea</i>		0,168	134,086
	<i>Pinus pinaster ssp. mesogeensis</i>			
	Sistema Central		0,180	143,794
Parameras	<i>Pinus sylvestris</i> Sistema Central	800	0,061	48,820
	<i>Quercus faginea</i>		0,098	78,045
	<i>Quercus ilex</i>		0,072	57,708
	<i>Quercus pyrenaica</i>		0,148	118,346
	<i>Quercus suber</i>		0,111	88,933
	<i>Fagus sylvatica</i>		0,027	21,767
	<i>Juniperus thurifera</i>		0,021	16,731
Riberas	<i>Populus sp</i>	276	1.117-	324.96

4. Resultados

Identificación de áreas restaurables

Como resultado del análisis, la superficie total zonas sin cobertura arbórea potencialmente restaurables (ver Figura 6) equivale a 1.779.835,5 hectáreas.

- Ésta superficie representa casi el 19% de todo el territorio de Castilla y León
- La superficie restaurable representa un 37% respecto a la superficie total forestal reportada por el IFN 3 para Castilla y León en 2002
- La superficie de restauración supone el 98% de la superficie forestal desarbolada reportada en IFN 3 2002.

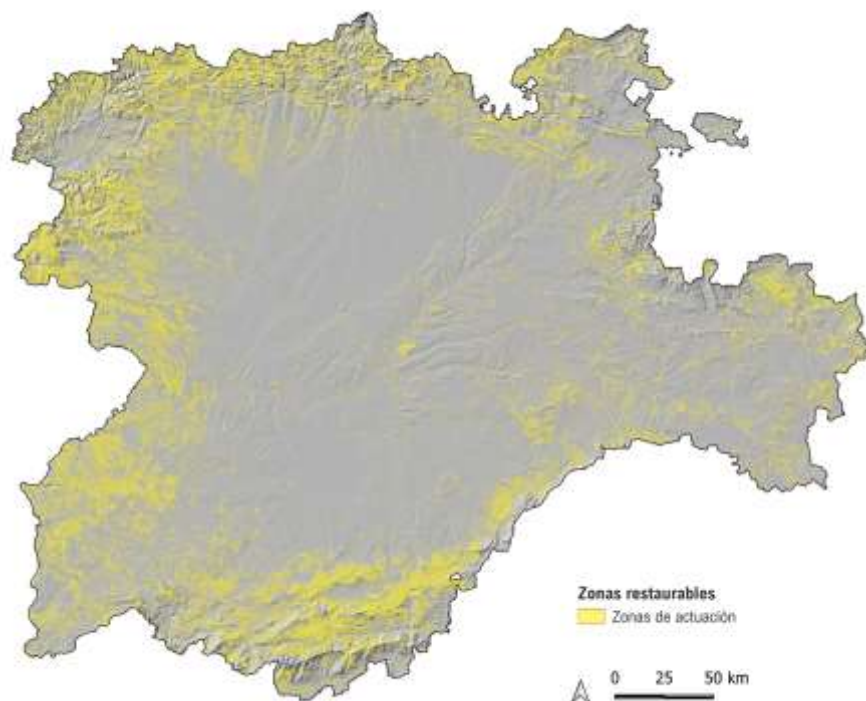


Figura 6. Zonas potencialmente restaurables en Castilla y León.

Modelo de distribución de especies

Los mapas de distribución potencial de especies se combinaron para proporcionar una simulación de la mezcla de especies. En total se aparecieron 77 combinaciones, conteniendo cada una, un par de especies de las cuales la primera se considera la especie principal o la más probable, y la segunda se muestra como la siguiente en probabilidad. Se calculó el área de las combinaciones y se observó que de las 77, sólo 10 representan aproximadamente el 70% del área de Castilla y León (67,49%). Estas combinaciones quedan reflejadas en la Tabla 3, donde se observa que la combinación teórica de especies más abundante sería la del rebollo con el pino albar (15%) y la encina con el rebollo (11%)

Tabla 3. Superficie para las 10 combinaciones de especies con mayor representación en Castilla y León. La primera especie de la agrupación se encuentra al 75% de abundancia mientras que la segunda se encuentra al 25%.

Combinaciones de especies	Superficie sobre áreas de actuación (%)	Superficie sobre áreas de actuación (ha)
<i>Quercus pyrenaica</i> y <i>Pinus sylvestris</i>	15	264.856
<i>Quercus ilex</i> y <i>Quercus pyrenaica</i>	11	187.140
<i>Quercus pyrenaica</i> y <i>Quercus ilex</i>	9	158.323
<i>Quercus fagínea</i> y <i>Quercus ilex</i>	7	135.435
<i>Quercus suber</i> y <i>Quercus ilex</i>	6	106.989
<i>Pinus sylvestris</i> y <i>Quercus pyrenaica</i>	5	81.942
<i>Quercus pyrenaica</i> y <i>Pinus nigra</i>	4	77.751
<i>Fagus sylvatica</i> y <i>Pinus sylvestris</i>	4	67.488
<i>Quercus ilex</i> y <i>Quercus suber</i>	3	61.860
<i>Quercus ilex</i> y <i>Pinus pinaster</i>	3	59.439
Total	67	1.201.220

Módulos de restauración

La combinación de los módulos de restauración de acuerdo a los criterios de priorización dio lugar a la distribución de los módulos que se observa en la Figura 7. Se observa que el módulo de dehesas, es dominante en la región sudoeste y oeste (Zamora y Salamanca) además de algunas regiones de pastos en zonas montañosas, el módulo de páramos se distribuye principalmente en las regiones de suelos lépticos calizos, correspondiendo con parte del centro y este de Castilla y León (sur de Soria, sur de Burgos y Valladolid). Las coníferas dominan en el centro de la Comunidad mientras que las frondosas se distribuyen principalmente al este (Zamora y Salamanca), el norte de burgos y este de la provincia de Soria

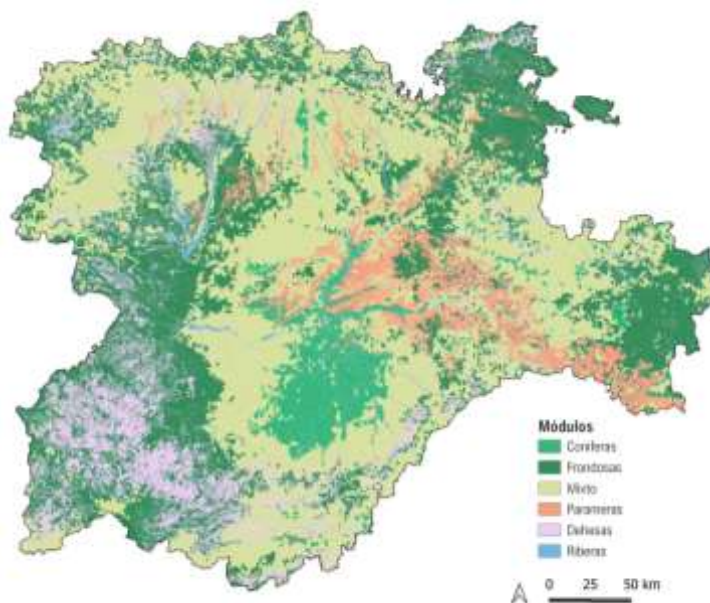


Figura 7. Distribución de los módulos de restauración en Castilla y León

Zonas de actuación

La intersección espacial entre los módulos de restauración y las áreas potencialmente restaurables muestra el tipo de actuación (orientativa) a desarrollar para cada área. Esta distribución queda reflejada en la Figura 8

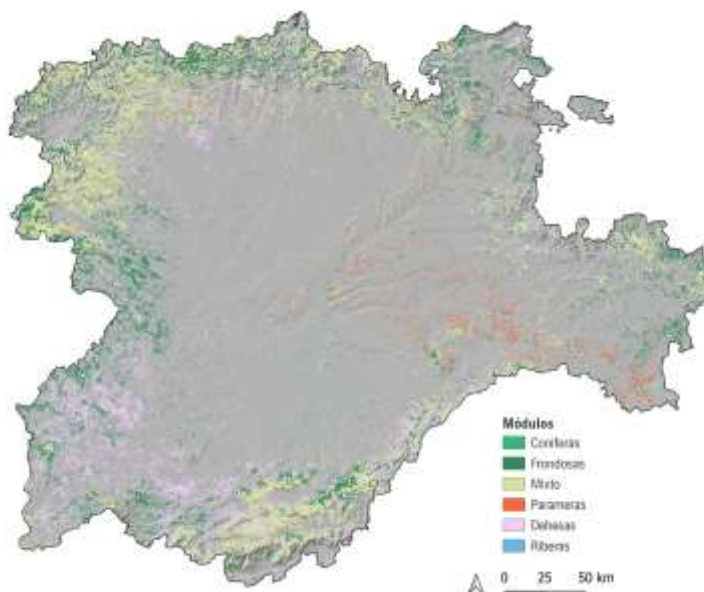


Figura 8. Distribución de los módulos de restauración en las áreas potencialmente restaurables de Castilla y León

El 65% de la superficie potencialmente restaurable se corresponde con el módulo de bosques densos, (35% pertenece al módulo mixto, el 29 % al de frondosas y un 1% al de coníferas). Por otro lado, las dehesas representan un 30% de la superficie restaurable, mientras que las parameras y las riberas ocupan un 4% y 1% respectivamente.

Tabla 4. Superficie de los módulos en las zonas potencialmente restaurables.

Módulo	Área (ha)	Área (%)
Adehesamiento	525.945,87	30
Coníferas	26.305,56	1
Frondosas	515.715,84	29
Mixtas	627.338,97	35
Parameras	67.427,01	4
Riberas	17.102,25	1
Total general	1779835,5	100

Calculo de Fijación de CO2

Como resultado de la metodología de cálculo de CO2 a un horizonte de 30 años, se obtuvieron estimaciones de absorciones a nivel de módulo, que muestran que la mayor captura es realizada por el módulo mixto de coníferas y frondosas (52%) mientras que las mayores capturas por hectárea se realizan por parte de los módulos de coníferas y frondosas.

Tabla 5. Superficie y CO2 fijado por módulo en 30 años para los módulos de restauración.

Módulo	CO2 (t/ha año)	CO2 (t/ha)	CO2 (t)	CO2 (t/año)	CO2 total %
Adehesamiento	0,3	10,0	5611367,5	187045,6	3,4
Coníferas	5,5	163,8	5392109,4	179737,0	3,3
Frondosas	3,8	114,7	61674688,5	2055823,0	37,7
Mixtas	4,7	140,9	83591721,3	2786390,7	51,1
Parameras	2,6	78,9	4593161,3	153105,4	2,8
Riberas	5,4	162,5	2778773,58	92625,8	1,7
Total general	22,3	76,8	163641822	5454727,4	100

La Figura 9 muestra la distribución de la fijación del carbono acumulado en Castilla y León en 2050. Se aplicaron los valores de fijación de CO2 por hectárea especies con un ratio de 75% de fijación de la especie principal y 25% de la especie secundaria, resultado de los módulos de distribución de especies. De acuerdo a este análisis las mayores áreas de fijación corresponderían con el sur de la comunidad y el oeste.

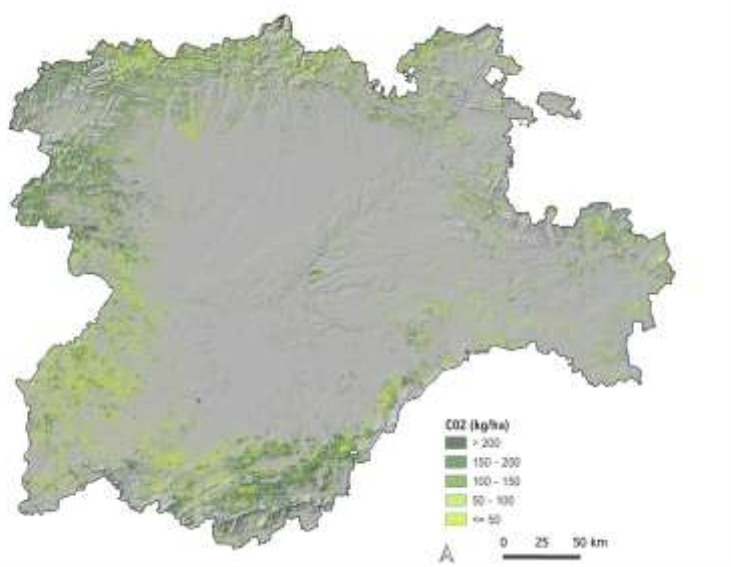


Figura 9. Distribución de la fijación de carbono acumulado en Castilla y León para 2050.

5. Discusión

Los resultados obtenidos ofrecen información analítica y espacial de las superficies potencialmente restaurables y de la cantidad de carbono que podrían fijar. Para poder entender el impacto de la restauración ecológica, es importante analizar los resultados, contextualizarlos y compararlos, tanto en términos de superficie como con valores actuales de emisión y fijación de CO₂.

La primera observación acerca de los resultados son los valores de fijación de CO₂ por los módulos. Cabe destacar que, si bien la especie a implantar es importante para la absorción total, en el cálculo se ha mostrado determinante la influencia de la densidad de plantación en el secuestro de carbono por hectárea. Un ejemplo de ello es el módulo de riberas. En comparación con el módulo de coníferas, se observa que el chopo es una especie más eficiente en la absorción de CO₂, sin embargo, la densidad de plantación del módulo de riberas hace que el carbono fijado sea ligeramente menor en comparación con el de coníferas, tal y como se refleja en Tabla 6.

Tabla 6. Comparativa entre el módulo de coníferas y el de riberas.

Módulo	CO ₂ (t/ha año)	CO ₂ (t/ha)	Densidad (pies/ha)
Coníferas	5,5	163,8	1600
Riberas	5,4	162,5	256

La Figura 10 muestra las absorciones potenciales anuales de Castilla y León en comparación con las emisiones de gases de efecto invernadero a nivel nacional para las últimas reportadas de 2019, se puede observar que considerando una distribución anual (5.454,7 kt CO₂) de las absorciones totales de la restauración a 30 años (163.641,8 ktCO₂) se compensarían:

- el 1.73% de las emisiones brutas globales de CO₂ equivalente de España
- el 2.3% de las emisiones del sector energético,
- el 20.9% de las emisiones asociadas a procesos industriales,
- el 14,4 % de las emisiones asociadas a la agricultura,
- y finalmente un 39,3% de los residuos.

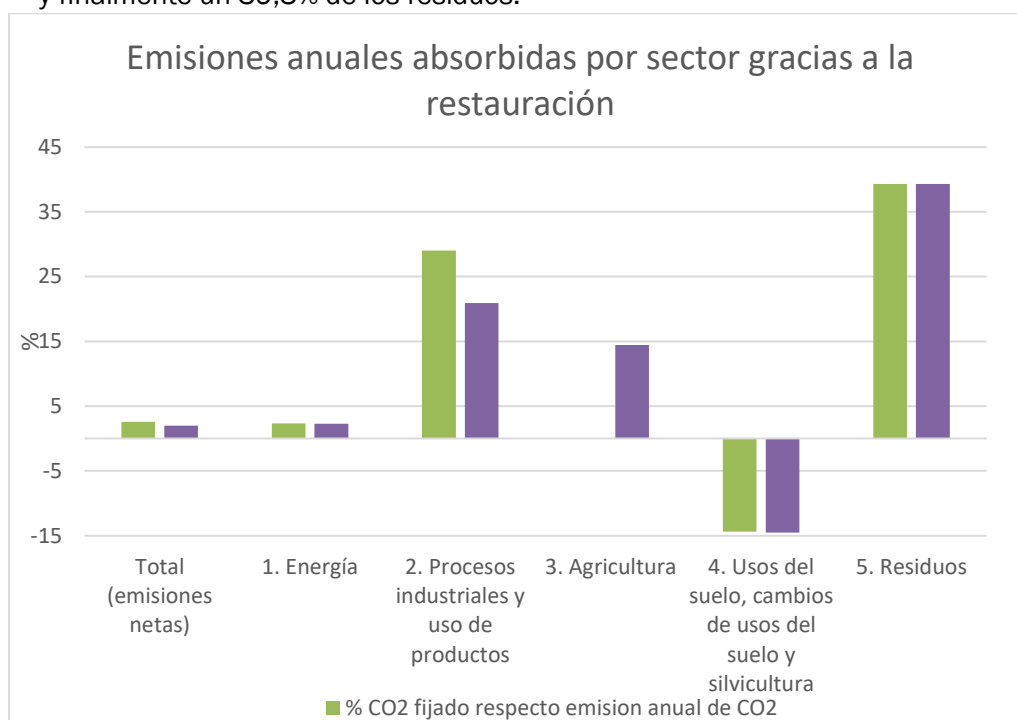


Figura 10. Emisiones anuales absorbidas por el sector gracias a la restauración ambiental de Castilla y León.

De acuerdo con el informe resumen del inventario de emisiones de efecto invernadero (MITECO, 2021), el sector de usos de suelo, cambios de uso y silvicultura en 2019 absorbió un 11.9% de las emisiones. Este ratio, se asume como el punto de referencia de absorciones en caso no ejecutar la restauración ecológica. Comparando este valor con nuestros resultados, las absorciones anuales del proyecto de restauración supondrían el 14,5% de las absorciones totales en España.

El impacto de la restauración ecológica no sólo se percibiría en el balance de CO2 nacional, sino que además repercutiría en la expansión de las masas forestales, siendo consecuente con el objetivo de sostenibilidad de Naciones Unidas número 15, que puja por fomentar la restauración de los ecosistemas terrestres, su gestión y frenar la desertificación. Para el final del periodo de restauración en Castilla y León la superficie forestal arbolada habría aumentado en 1,7 millones de ha, lo cual supone actuar en un 98% de la superficie actualmente desarbolada (1,8 millones de ha) y en un 37% de la superficie forestal total de CyL (4,8 millones ha) de acuerdo con el Mapa Forestal de España (MFE) (VALLEJO BOMBÍN, 2005)

Consultando el MFE (máxima actualidad) y relacionando tipos de cubiertas con los módulos de restauración propuestos, podemos ver el impacto de la restauración sobre el paisaje forestal de Castilla y León para 2050 (ver Figura 11):

- Los bosques de coníferas aumentarían su superficie un 3%.
- Los bosques de frondosas ampliarían su superficie un 38%.
- La combinación entre las especies de coníferas y frondosas cobraría un mayor protagonismo en los bosques futuros, cuadruplicando su superficie (420%).
- Por otro lado, se fomentaría la protección de los ecosistemas riparios y su expansión territorial en un 15%.
- Además, los páramos, entendidos en la clasificación del MFE como los ecosistemas asociados a sabinares, se expandirían un 80%, poblando las zonas de suelos esqueléticos calcáreos y de baja productividad.
- La superficie destinada a sistemas agro-silvo-pastorales, las dehesas, se ampliaría un 135%, es decir 520 000 hectáreas, promoviendo así la gestión forestal sostenible, integrada de los pastizales.

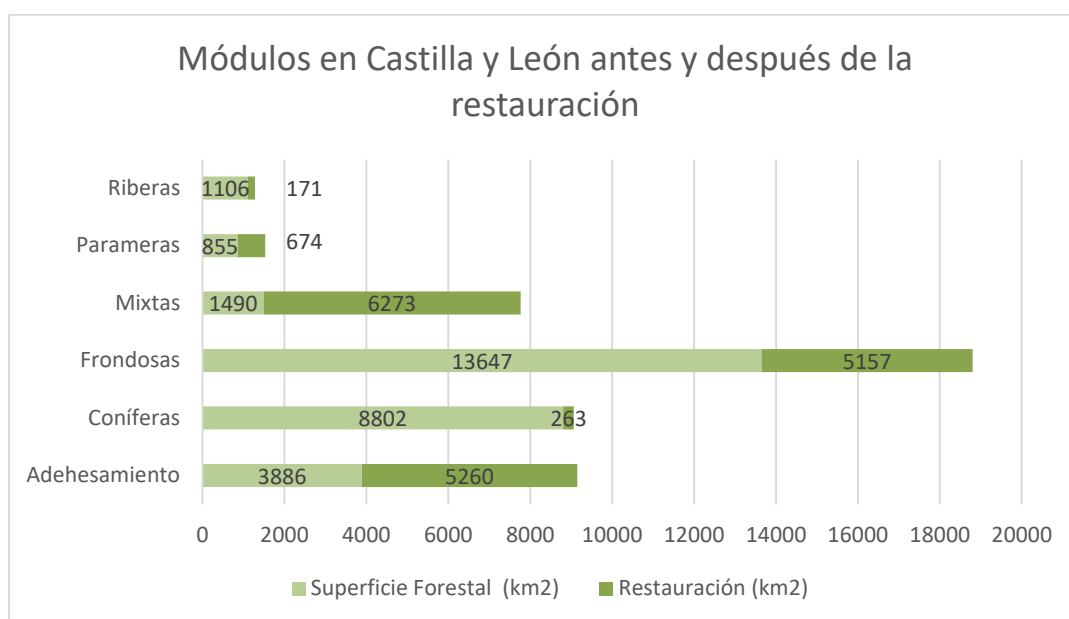


Figura 11. Incremento de las cubiertas forestales asociadas a los módulos de restauración.

Para poder conseguir las densidades objetivo propuestas en los módulos de restauración para 2050, el proyecto de restauración requeriría la plantación de 2.312.793.836 árboles asumiendo una tasa de mortalidad del 30%. Si esta propuesta se ejecutase en 10 años, restaurando 179 mil hectáreas/ año, dentro del periodo de vigencia de la estrategia europea de biodiversidad 2030, se cumpliría con el 77% del objetivo de plantación, siendo ésta un pilar fundamental del pacto verde europeo (Green Deal), que se cifra en 3. 000 millones de árboles (EUROPEAN COMMISSION, 2019).

Estas cifras reflejan la gran potencialidad de restauración de los ecosistemas de Castilla y León, y cómo sería consecuente con los objetivos de conservación de biodiversidad de la Unión Europea, los objetivos de desarrollo de Naciones Unidas (15)(UN, 2015) y la lucha contra el calentamiento global mediante el aumento de la fijación de gases de efecto invernadero.

Como es evidente, la implantación de una nueva cubierta arbolada, requeriría de un plan de gestión y una silvicultura asociada. En este estudio este punto no se aborda, pues el horizonte de temporal no es suficiente para hacer una planificación selvícola más allá de una clara (25-30 años). Sin embargo, la ordenación de las nuevas masas deberá ajustarse a las directrices y principales líneas de acción de la nueva estrategia forestal europea (EUROPEAN COMMISSION, 2021a), que aboga por unas masas heterogéneas en estructura y composición específica, aportando mayor resiliencia al cambio climático siguiendo con los principios del Climate-Smart Forestry (NABUURS, et al. 2018).

En este sentido aquellas nuevas masas que se asienten sobre terrenos poblados por especies arbustivas buscarán una integración con la masa existente. En estos casos deberá particularizarse la ordenación buscando un equilibrio entre el mantenimiento de la masa existente (criterio de biodiversidad), la prevención frente a los incendios forestales, evitando modelos de combustibles asociados a estructuras forestales de continuidad vertical y compatibilidad de usos existentes. En resumen, seguir la filosofía de la estrategia forestal europea en su documento de “El compromiso de plantar 3.000 millones de árboles para 2030” (EUROPEAN COMMISSION, 2021b): “Plantar y cultivar el árbol adecuado en el lugar en el lugar correcto, para el propósito correcto”.

En términos de fijación de carbono la implantación de nuevas masas forestales no sólo constituye la mejor forma de alinearse con la nueva legislación en materia forestal y de biodiversidad, sino que se trata de la solución más completa desde una perspectiva holística, mejorando la calidad del aire, regenerando hábitats para la fauna salvaje, proveyendo beneficios recreacionales y control sobre los procesos erosivos y calidad del agua. Existen alternativas a la fijación de carbono mediante la restauración ecológica, como la implantación de estaciones de filtrado de aire (MARSHALL, 2017), el establecimiento biorreactores con algas fotosintéticas (DĘBOWSKI, et al. 2021). Sin embargo, estas soluciones no parecen razonables dada la escala de trabajo de este estudio además bien por no ser todavía eficiente desde el punto de vista económico y no ser una solución integrada como la restauración ecológica.

6. Conclusiones

La metodología presentada pretende poner en valor la oportunidad que las áreas forestales desarboladas ofrecen para aumentar la fijación de carbono mediante la restauración ecológica. La restauración propuesta no debe interpretarse como una guía para la transformación del territorio, sino como una premisa teórica para poder estimar el secuestro de carbono. Tanto la escala de trabajo como la complejidad de la tarea dificulta el análisis pormenorizado de la restauración y son los gestores y expertos locales los que deberán definirlos de acuerdo a las particularidades territoriales. Se deberán realizar más esfuerzos de investigación para desarrollar modelos de crecimiento forestales a nivel regional para mejorar las predicciones de fijación de carbono futuras. No obstante, parece patente que a través de la restauración ecológica Castilla y León aumentaría su proceso de descarbonización cumpliendo con las políticas y objetivos territoriales y ambientales, tanto de ámbito regional como nacional y europeo.

7. Bibliografía

BIODIVERSA; 2020. Policy brief: How natural forest expansion in Europe can offer cost-effective benefits to people. *European Union Horizon 2020 BiodivERSA project*. 1-4

EUROPEAN COMMISSION; 2019. COMMUNICATION FROM THE COMMISSION TO THE EUROPEAN PARLIAMENT, THE EUROPEAN COUNCIL, THE COUNCIL, THE EUROPEAN ECONOMIC AND SOCIAL COMMITTEE AND THE COMMITTEE OF THE REGIONS. The European Green Deal.

EUROPEAN COMMISSION; 2021a. COMMUNICATION FROM THE COMMISSION TO THE EUROPEAN PARLIAMENT, THE COUNCIL, THE EUROPEAN ECONOMIC AND SOCIAL COMMITTEE AND THE COMMITTEE OF THE REGIONS. New EU Forest Strategy for 2030

EUROPEAN COMMISSION; 2021b. COMMUNICATION FROM THE COMMISSION TO THE EUROPEAN PARLIAMENT, THE COUNCIL, THE EUROPEAN ECONOMIC AND SOCIAL COMMITTEE AND THE COMMITTEE OF THE REGIONS. New EU Forest Strategy for 2030. The 3 Billion Tree Planting Pledge For 2030 Accompanying the document

DEBOWSKI, M.; KRZEMIENIEWSKI, M.; ZIELIŃSKI, M.; KAZIMIEROWICZ, J. IMMOBILIZED; 2021. Microalgae-Based Photobioreactor for CO₂ Capture (IMC-CO₂PBR): Efficiency Estimation, Technological Parameters, and Prototype Concept. *Atmosphere* **2021**. <https://doi.org/10.3390/atmos12081031>

FICK, S. E., & HIJMANS, R.; 2017. WorldClim 2: new 1km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology* **37** 12 4302–4315.

INSTITUTO GEOGRÁFICO NACIONAL (IGN); 2018. Estructura y consulta de la base de datos SIOSE. Versión 3.

JUNTA DE CASTLLA Y LEÓN (JCYL); 2005. Serie divulgativa: Castilla y León crece con el bosque. Consejería de medio ambiente Junta de Castilla y León.1 4-5

MARSHALL, C.; 2017. In Switzerland, a giant new machine is sucking carbon directly from the air. *Science.org*.doi: 10.1126/science.aan6915

MACÍAS, F.; BAO, M.; RODRIGUEZ, L.; CASTRESANA, J.; ALLUÉ, C.; GARCÍA-LÓPEZ, J.; 2005. Procesos de regeneración de suelos y sistemas forestales en parameras calizas. Ensayos en el páramo de masa (Burgos). *IV Congreso Forestal Español*, January, 3–7. http://secforestales.org/publicaciones/index.php/congresos_forestales/article/download/16332/16175

MEDINA, B. Y NAVAFRÍA, D. A; 2014. Mapa de cultivos y superficies naturales de Castilla y León. *XVI Congreso de la Asociación Española de Teledetección de 2015*.1.

MINISTERIO DE TRANSMISIÓN ECOLÓGICA Y RETO DEMOGRÁFICO (MITECO); 2011. Guía metodológica para el desarrollo del sistema nacional de cartografía de zonas inundables.

MINISTERIO DE TRANSMISIÓN ECOLÓGICA Y RETO DEMOGRÁFICO (MITECO); 2021. Gases de efecto invernadero. Serie 1990-2019. Informe resumen.

NABUURS, G.; VERKERK, P.; SCHELHAAS, MJ.; GONZÁLEZ OLABARRIA, J.S.; TRASOBARES, A.; CIENCIALA, A; 2018. Climate-Smart Forestry: mitigation impacts in three European regions. From Science to Policy 6. European Forest Institute.

PHILLIPS, S. J.; ANDERSON, R. P.; DUDÍK, M.; SCHAPIRE, R. E.; BLAIR, M. E; 2017. Opening the black box: an open-source release of Maxent. *Ecography*, 887–893. <https://doi.org/doi:10.1111/ecog.03049>

SANCHO COMÍNS, J.; 2018. España en mapas. Una síntesis geográfica. In Serie Compendios del Atlas Nacional de España (ANE). *Centro Nacional de Información Geográfica*. <http://www.ign.es/web/ign/portal/espana-en-mapas>

UNITED NATIONS (UN); 2015. Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development. In A/RES/70/1. <https://doi.org/10.2307/20479128>

VALLEJO BOMBÍN, R.; 2005. El Mapa Forestal de España Escala 1:50.000 (MFE50) como base del Tercer Inventario Forestal Nacional. *Cuad. Soc. Esp. Cienc. For.* 19 205-215.

NABUURS, G.; VERKERK, P.; SCHELHAAS, MJ.; GONZÁLEZ OLABARRIA, J.S.; TRASOBARES, A.; CIENCIALA, A; 2018. Climate-Smart Forestry: mitigation impacts in three European regions. From *Science to Policy* 6. European Forest Institute.