



**GRADO EN INGENIERÍA DEL MEDIO
NATURAL**

PROYECTO FIN DE GRADO

**BASES PARA LA
CUANTIFICACIÓN DE LA HUELLA
DE CARBONO DE LAS
REPOBLACIONES FORESTALES
DESDE EL ENFOQUE DEL ANÁLISIS
DE CICLO DE VIDA**

Alejandro Alonso González

2020





UNIVERSIDAD
POLITÉCNICA
DE MADRID

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID
*ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA DE MONTES, FORESTAL
Y MEDIO NATURAL*

**BASES PARA LA CUANTIFICACIÓN DE LA
HUELLA DE CARBONO DE LAS REPOBLACIONES
FORESTALES DESDE EL ENFOQUE DEL ANÁLISIS
DE CICLO DE VIDA**

Autor: Alejandro Alonso González

Grado: Ingeniería del Medio Natural

Departamento: Sistemas y recursos naturales

Directores: Juan A. Oliet Palá

Agustín Rubio Sánchez

© Universidad Politécnica de Madrid, 2020.
Todos los derechos reservados.



HOJA DE CALIFICACIÓN DEL TRABAJO/PROYECTO FIN DE GRADO

TÍTULO
Bases para la cuantificación de la huella de carbono de las repoblaciones forestales desde el enfoque del análisis de ciclo de vida
AUTOR
Alejandro Alonso González
GRADO EN
Ingeniería del medio natural

MIEMBROS DEL TRIBUNAL

Presidente/a: _____

Vocal: _____

Secretario/a: _____

Reunido el Tribunal de calificación con fecha _____. Acuerda otorgar la CALIFICACIÓN GLOBAL de _____

Indicar, en su caso, si se propone la concesión de la mención Matrícula de Honor

PRESIDENTE	SECRETARIO	VOCAL
Fdo:	Fdo:	Fdo:

Informe explicativo de la calificación: _____



Título del TFG: Bases para la cuantificación de la huella de carbono de las repoblaciones forestales desde el enfoque del análisis de ciclo de vida.

Autor: Alejandro Alonso González

Directores: Juan A. Oliet Palá & Agustín Rubio Sánchez

Departamento: Sistemas y recursos naturales

RESUMEN

El cambio climático y el calentamiento global son los impactos ambientales más mediáticos hoy en día. Es tanta la preocupación por el futuro del planeta respecto a esta materia, que organizaciones internacionales de todo el mundo han acordado ciertas medidas y actuaciones para luchar contra el cambio climático. Los Estados han realizado legislación para regular el tipo de medidas y actuaciones, y hacer un seguimiento de la evolución del impacto que producen las organizaciones para poder determinar si se está actuando suficientemente rápido para cumplir las metas.

Una de las metas más ambiciosas es conseguir la neutralidad climática en la Unión Europea para 2050. Esto se consigue reduciendo las emisiones de gases de efecto invernadero el máximo posible, y compensando aquellas emisiones que no han podido ser mitigadas. Las repoblaciones forestales, que incluyen las forestaciones de terrenos previamente no forestales y las reforestaciones de terrenos forestales que han sido víctimas de incendios o plagas, por ejemplo, han sido consideradas como medidas compensatorias adecuadas tanto nacional como internacionalmente.

Esto se debe a que los bosques tienen la funcionalidad de intercambiar y acumular carbono atmosférico, fijándolo en su biomasa y en el suelo (otro gran reservorio de carbono). Existen numerosos estudios de cómo varían las absorciones según las características de la vegetación y del clima, así como de estudios de impacto de los aprovechamientos forestales. No obstante, no es así para el estudio de impacto de los procesos repobladores.

Consecuentemente, se ha decidido realizar este trabajo, donde se explica la metodología para poder realizar la cuantificación de la huella de carbono (TS/ISO 14067:20018), que se basa y concuerda con la normativa ISO sobre análisis de ciclo de vida (UNE 14040:2006 y 14044:2006). Además, se proporcionan los materiales para poder llevar a cabo la cuantificación de la huella de carbono de una hectárea de terreno repoblado de características seleccionables.

Para ello, en primer lugar se han establecido los límites del sistema, incluyendo las etapas de adquisición de la materia prima, proceso repoblador, uso y mantenimiento, y gestión de residuos. A continuación se han recopilado las fuentes de donde obtener los datos que se deberán utilizar en el método de cálculo diseñado considerando los límites del sistema y el tipo de datos necesarios.

Posteriormente, se ha elaborado un archivo Excel donde se ha programado el método de cálculo diseñado para poder cuantificar la huella de carbono de dos repoblaciones ejemplo: una repoblación productora de papel de *Eucalyptus globulus*, y una repoblación multiusos mediterránea de dos fagáceas y un pino.

De esta manera, se ha identificado una serie de limitaciones del sistema y método de cálculo propuesto. Además, las cuantificaciones realizadas han permitido localizar las actividades y procesos de una repoblación forestal que tienen mayor impacto sobre el cambio climático, y el impacto general de los procesos repobladores respecto a las absorciones potenciales de la masa forestal creada, calculando su rentabilidad temporal.

Se concluye que la actividad de mayor impacto es el uso de la maquinaria, seguida de la producción de tubos protectores. Por tanto, se indica que las actividades manuales serán preferibles en caso de que la intención sea realizar una repoblación forestal del menor impacto posible, y que se necesita realizar análisis de ciclo de vida de ciertos materiales o recursos para determinar si su uso es conveniente o no. Por último, la huella de carbono del proceso repoblador supone menos de un 1% de las absorciones potenciales de las masas forestales creadas, por lo que se establece que su rentabilidad es muy alta y se reasegura su conveniencia como medidas de compensación frente al cambio climático.

Palabras clave: repoblación forestal, cuantificación de huella de carbono, emisiones, gases de efecto invernadero, absorciones de carbono, sumideros de carbono, bosques, análisis de ciclo de vida.



Title of dissertation: basis for carbon footprint quantification of forestation processes from a life cycle analysis perspective.

Author: Alejandro Alonso González

Advisors: Juan A. Oliet Palá & Agustín Rubio Sánchez

Department: Natural resources and systems

ABSTRACT

Climate change and global warming are the most mediatic environmental impacts nowadays. The big concern about the future of the planet in this area has led international organizations around the world to agree on certain measures and actions to combat climate change. Governments have created legislation to regulate the type of measures and actions that can be undertaken, and to follow up the evolution of the impact produced by the organizations in order to determine if they are acting fast enough to meet the goals.

One of the most ambitious goals is to achieve climate neutrality in the European Union by 2050. This is achieved by reducing greenhouse gas emissions as much as possible, and by offsetting the emissions that could not be mitigated. Both forestation of previously non-forest land and reforestation of forest land that has been deteriorated by wildfires or plagues, for example, have been considered as appropriate compensatory measures both nationally and internationally.

This is due to forests having the functionality to exchange and accumulate atmospheric carbon, fixing it in their biomass and in the soil (another large carbon reservoir). There are numerous studies of how carbon removals vary according to the characteristics of the vegetation and the climate, as well as studies about the impact of forest management. However, there are not studies about the impact of reforestation processes.

Consequently, it has been decided to carry out this project, which explains the methodology for quantifying the carbon footprint (TS/ISO 14067:20018), which is based on and consistent with the ISO standard on life cycle analysis (UNE 14040:2006 and 14044:2006). In addition, the materials are provided to facilitate carrying out the quantification of the carbon footprint of a hectare of land repopulated with selectable characteristics.

In order to do so, firstly the limits of the system have been established, including the stages of acquisition of raw material, repopulation process, use and maintenance, and waste management. Next, the sources have been compiled from which to obtain the data to be used in the calculation method designed considering the limits of the system and the type of data required.

Subsequently, an Excel file has been developed where the designed calculation method has been programmed to quantify the carbon footprint of two reforestation examples: a paper producing reforestation of *Eucalyptus globulus*, and a multipurpose Mediterranean reforestation of two Fagaceae and a pine species.

This way, a series of limitations of the proposed system and calculation method have been identified. Moreover, the carried out quantifications have allowed to locate the activities and processes of a reforestation that have a greater impact on climate change, and the general impact of the reforestation processes in relation to the potential absorptions of the created forest mass, calculating its temporary profitability.

It is concluded that the activity with the greatest impact is the use of machinery, followed by the production of protective tubes. Therefore, it is indicated that manual activities will be desirable in case the intention is to execute a reforestation with the least possible impact, and that it is necessary to complete life cycle analyses of certain materials and resources to determine whether their use is convenient or not. In the end, the carbon footprint of the reforestation process represents less than 1% of the potential absorptions of the created forest masses, which is why it is established that its profitability is very high and its suitability as compensation measures against climate change is reassured.

Keywords: reforestation, carbon footprint quantification, emissions, greenhouse gases, carbon removals, carbon sinks, forests, life cycle analysis.



ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
1. CAMBIO CLIMÁTICO	1
2. HUELLA DE CARBONO	2
3. ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA	2
4. MARCO LEGISLATIVO	3
5. MARCO DE APLICACIÓN	4
6. REPOBLACIÓN FORESTAL PARA LA COMPENSACIÓN	5
7. POTENCIAL DE SECUESTRO DE CARBONO	8
8. OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE (ODS)	10
8.1 ODS 8: TRABAJO DECENTE Y CRECIMIENTO ECONÓMICO.	10
8.2 ODS 11: CIUDADES Y COMUNIDADES SOSTENIBLES	12
8.3 ODS 12: PRODUCCIÓN Y CONSUMO RESPONSABLE	12
8.4 ODS 13: ACCIÓN POR EL CLIMA.....	12
8.5 ODS 15: VIDA DE ECOSISTEMAS TERRESTRES.....	12
9. DESCRIPCIÓN Y JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO	13
10. OBJETIVOS	14
11. ANTECEDENTES	15
METODOLOGÍA Y MATERIALES	16
1. DEFINICIÓN DE OBJETIVO Y ALCANCE	18
1.1 DEFINICIÓN DEL OBJETIVO	18
1.2 DEFINICIÓN DEL ALCANCE	18
1.2.1 Sistema producto de estudio	18
1.2.2 Unidad funcional.....	18
1.2.3 Límites del sistema	18
1.2.4 Procedencia y calidad de datos	18
1.2.5 Límite de tiempo para datos.....	19
1.2.6 Etapa de uso	19
1.2.7 Etapa de término de vida.....	19
1.2.8 Procedimiento de asignación	19
1.2.9 Emisiones y eliminaciones GEI específicas.....	19
1.2.10 Limitaciones del estudio	20
2. ANÁLISIS DEL INVENTARIO DEL CICLO DE VIDA	21
2.1 VALIDACIÓN DE DATOS.....	21
2.2 RECOPIACIÓN DE DATOS	21
2.3 SELECCIÓN DEL MÉTODO DE CÁLCULO	21
3. EVALUACIÓN DEL IMPACTO DEL CICLO DE VIDA	21
4. INTERPRETACIÓN DEL CICLO DE VIDA	21



APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA	22
1. DEFINICIÓN DE OBJETIVOS Y ALCANCE DE ESTUDIO	22
1.1 DEFINICIÓN DEL OBJETIVO	22
1.2 DEFINICIÓN DEL ALCANCE	23
1.2.1 Sistema producto de estudio	23
1.2.2 Unidad funcional	23
1.2.3 Límites del sistema	23
1.2.4 Procedencia y calidad de datos	25
1.2.5 Límite de tiempo para datos	26
1.2.6 Etapa de uso	26
1.2.7 Etapa de término de vida	26
1.2.8 Emisiones y remociones de GEI específicas	27
1.2.9 Limitaciones del estudio	27
2. ELABORACIÓN DEL INVENTARIO DE DATOS MAESTROS	28
2.1 VALIDACIÓN DE DATOS	28
2.2 RECOPIACIÓN DE DATOS	28
2.2.1 Adquisición de materiales	28
2.2.2 Proceso de Repoblación	30
2.2.3 Uso y mantenimiento	38
2.2.4 Gestión de residuos	38
2.2.5 Resumen	39
RESULTADOS	41
1. MÉTODO DISEÑADO PARA EL CÁLCULO DE LA HUELLA DE CARBONO DE LAS REPOBLACIONES FORESTALES	41
1.1 ADQUISICIÓN DE MATERIALES	42
1.1.1 Plantas de vivero	42
1.1.2 Tubos protectores	42
1.2 PROCESO DE REPOBLACIÓN	43
1.2.1 Traslado de plantas	43
1.2.2 Traslado de tubo protector	44
1.2.3 Traslado de personal	45
1.2.4 Uso de maquinaria	46
1.2.5 Traslado de maquinaria	47
1.3 USO Y MANTENIMIENTO	47
1.4 GESTIÓN DE RESIDUOS	48
1.4.1 Traslado de residuos	48
1.4.2 Tratamiento de residuos	48
2. CÁLCULO DE EMISIONES DE REPOBLACIONES FORESTALES EJEMPLO	49
2.1 REPOBLACIÓN PRODUCTORA DE PASTA DE PAPEL EN LA CORNISA CANTÁBRICA	53
2.2 REPOBLACIÓN DE USO MÚLTIPLE EN LA ZONA MEDITERRÁNEA CON OMBROCLIMA SECO-SUBHÚMEDO CON 600 MM	56
3. CÁLCULO DE ABSORCIONES DE LAS REPOBLACIONES FORESTALES EJEMPLO (HERRAMIENTA DEL REGISTRO DE HUELLA DE CARBONO)	60
3.1 REPOBLACIÓN PRODUCTORA DE PASTA DE PAPEL EN LA CORNISA CANTÁBRICA	61
3.2 REPOBLACIÓN DE USO MÚLTIPLE EN LA ZONA MEDITERRÁNEA CON OMBROCLIMA SECO-SUBHÚMEDO CON 600 MM	62
DISCUSIÓN	63
1. IDENTIFICACIÓN DE IMPACTO POR ACTIVIDADES	63
1.1 ADQUISICIÓN DE MATERIALES	64
1.2 REPOBLACIÓN	64
1.2.1 Actividades de la repoblación	65
1.3 USO Y MANTENIMIENTO	66
1.4 GESTIÓN DE RESIDUOS	66
2. RENTABILIDAD DEL IMPACTO	67
3. LIMITACIONES Y PROPUESTAS DE MEJORA	68



CONCLUSIONES	70
BIBLIOGRAFÍA	73
1. PÁGINAS WEBS	73
2. RECURSOS LITERARIOS	75
3. NORMATIVA	78
ANEXO 1. DESCRIPCIÓN DE FUENTES	79
ANEXO 2. DESGLOSE DE FACTORES	84
ANEXO 3. TABLA DE VARIABLES	89
ANEXO 4. DESCRIPCIÓN ACTIVIDADES	92
1. REPOBLACIÓN FORESTAL	92
1.1 PREPARACIÓN DEL TERRENO.....	92
1.1.1 Eliminación de vegetación preexistente	92
1.1.2 Eliminación de vegetación preexistente y preparación de suelo (COMBINADO)	93
1.1.3 Preparación del suelo	93
1.2 PLANTACIÓN.....	97
1.2.1 Planta	97
1.2.2 Tubos protectores.....	98
2. USO Y MANTENIMIENTO.....	99
2.1 DESBROCES.....	99
2.2 REPOSICIÓN MARRAS	100
2.3 OTROS.....	100
ANEXO 5. MANUAL DE EASYCARGO	101
ANEXO 6. DOCUMENTOS EXTERNOS SOBRE EL MÉTODO DE CÁLCULO Y LOS RESULTADOS DE LAS CUANTIFICACIONES	105
ANEXO 7. INFORME EJECUTIVO	106
1. CONDICIONES TÉCNICAS ESPECÍFICAS DEL ESTUDIO	106
1.1 CONOCIMIENTOS PREVIOS:.....	106
1.2 CAPACIDADES TÉCNICAS	106
1.3 HERRAMIENTAS	106
2. FASES PARA ELABORACIÓN DEL ESTUDIO	106
3. DESCRIPCIÓN DE TAREAS	107
4. CRONOGRAMA	108
5. COSTE DEL ESTUDIO	109
ANEXO 8. PÓSTER	110
ANEXO 9. AGRADECIMIENTOS	111



ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1. DATOS DEL INVENTARIO NACIONAL FORESTAL DE EE. UU. COMPARANDO LA BIOMASA LEÑOSA AÉREA PARA DOS OPCIONES DE CADA UNA DE LAS TRES CONDICIONES DE BOSQUES. “N” SIGNIFICA NO. “Y” SIGNIFICA SÍ. POR EJEMPLO, REFORESTACIÓN N SIGNIFICA QUE LA MASA FORESTAL NO HA RESULTADO DE UNA REPOBLACIÓN SINO DE LA REGENERACIÓN NATURAL. LA TERCERA COLUMNA ES EL ALMACENAMIENTO DE BIOMASA LEÑOSA AÉREA. LA CUARTA COLUMNA ES LA TASA ANUAL DE PRODUCCIÓN DE BIOMASA LEÑOSA AÉREA. FUENTE: NAVE ET AL., 2018.	6
TABLA 2. ACUMULACIÓN DE CARBONO EN RESIDUOS DE MADERA MUERTA EN BOSQUES RESULTANTES DE REGENERACIÓN NATURAL Y POR REPOBLACIÓN, EXPRESADO EN MG C HA. FUENTE: NAVE ET AL., 2018.	7
TABLA 3. SUPERFICIE Y CONTENIDO EN CARBONO EN SUELO Y VEGETACIÓN DE DIFERENTES BIOMAS. FUENTE: PARDOS CARÓN, 2010.....	8
TABLA 4. FUENTES DE DATOS UTILIZADOS EN EL TRABAJO Y ANÁLISIS DE CALIDAD. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	25
TABLA 5. ANÁLISIS DE CALIDAD DE DATOS DE LAS FUENTES UTILIZADAS. MARCANDO CON X LAS QUE SE CUMPLEN, Y CON (X) LAS QUE SE CUMPLEN EN CIERTOS CASOS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	26
TABLA 6. RECURSOS NECESARIOS PARA LA EXTRUSIÓN Y EMPAQUETADO DE UNA TONELADA DE TUBOS PROTECTORES.	29
TABLA 7. RECOLECCIÓN DE LOS DATOS NECESARIOS PARA CALCULAR LAS EMISIONES TOTALES DEL PROCESO UNITARIO DE ADQUISICIÓN DE UNA TONELADA DE TUBOS PROTECTORES. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA CON DATOS DE ECOINVENT.....	29
TABLA 8. LISTA DE CARACTERÍSTICAS DE LOS TIPOS DE VEHÍCULOS DE TRANSPORTE DE MATERIALES. FUENTE: "REGLAMENTO ARMONIZADO CLASIFICACIÓN DE VEHÍCULOS", 2020; "FLOTA DE CAMIONES DE TRANSPORTE DE MERCANCÍAS", 2020.	31
TABLA 9. RELACIÓN ENTRE LA CLASIFICACIÓN DE VEHÍCULOS DE ECOINVENT Y LA TIPOLOGÍA DE VEHÍCULOS UTILIZADOS EN EL TRABAJO, JUNTO CON LOS FACTORES DE EMISIÓN DE ECOINVENT. FUENTE: "FLOTA DE CAMIONES DE TRANSPORTE DE MERCANCÍAS", 2020.....	31
TABLA 10. COMPARACIÓN DE CONSUMO TOTAL DE COMBUSTIBLE ENTRE UN VEHÍCULO LLENO Y DOS VEHÍCULOS DE MITAD DE TAMAÑO LLENOS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA A PARTIR DE DATOS DE EcoTRANSIT, 2011.	32
TABLA 11. LISTA DE CARACTERÍSTICAS DE LOS TIPOS DE BANDEJAS FORESTALES. FUENTE: "BANDEJAS FORESTALES DISEÑADOS A MEDIDA", 2020.....	33
TABLA 12. ESPECIES FORESTALES Y SU ALTURA SEGÚN LA EDAD DE LA PLÁNTULA. FUENTE: RD 289/2003, DEL 7 DE MARZO.	33
TABLA 16. COMPARACIÓN DEL NÚMERO MÁXIMO DE BANDEJAS DE 53x30x15 DE 45 ALVEOLOS CON PLÁNTULA DISTINTAS ALTURAS SEGÚN EASYCARGO Y LA ECUACIÓN PROPUESTA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	34
TABLA 18. MEDIDAS DE LOS DIFERENTES TUBOS PROTECTORES DISPONIBLES.	34
TABLA 19. CANTIDAD MÁXIMA DE TUBOS PROTECTORES DE DISTINTOS TAMAÑOS QUE SE PUEDEN TRASLADAR EN LÁMINA EN LOS DISTINTOS TIPOS DE VEHÍCULO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA CON PROGRAMA EASYCARGO.....	35
TABLA 20. LISTA DE MAQUINARIA UTILIZADA EN LAS ACTIVIDADES CONTEMPLADAS EN EL PROCESO DE REPOBLACIÓN Y DE USO Y MANTENIMIENTO. FUENTE: TRAGSA.....	36
TABLA 21. RELACIÓN DE TIPO DE MÁQUINAS DE TRAGSA CON LOS INVENTARIOS PARA ADJUDICAR LAS EMISIONES DE FABRICACIÓN. FUENTE: ECOINVENT Y ELABORACIÓN PROPIA.	37
TABLA 22. PESOS MEDIOS DE LA MAQUINARIA DE TRAGSA TENIENDO EN CUENTA EL FACTOR 40KG/CV PARA LOS TRACTORES AGRÍCOLAS. FUENTE: "¿QUÉ ES UN TRACTOR DE ALTA POTENCIA?", 2020.....	37
TABLA 19. CUPOS DE TUBOS PROTECTORES (RESIDUO) SEGÚN SU ALTURA EN UN COCHE GRANDE.	38
TABLA 20. FACTORES DE EMISIÓN DE LAS DISTINTAS OPCIONES DE TRATAMIENTO DEL PLÁSTICO COMO RESIDUO. FUENTE: UK GOVERNMENT GHG CONVERSION FACTORS FOR COMPANY REPORTING.	39
TABLA 21. RECOPIACIÓN DE FACTORES DE EMISIÓN NECESARIOS PARA EL MÉTODO DE CÁLCULO DISEÑADO PARA LA CUANTIFICACIÓN DE HC DE LAS REPOBLACIONES FORESTALES. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA A PARTIR DE DATOS DE TODAS LAS FUENTES DEL TRABAJO.	39
TABLA 22. RECOPIACIÓN DE LAS VARIABLES QUE RELACIONAN LA UNIDAD DE REFERENCIA DE LOS FACTORES DE EMISIÓN CON LA UNIDAD FUNCIONAL DE LA CUANTIFICACIÓN DE LA HC. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	40
TABLA 23. UNIDADES DE OBRA CORRESPONDIENTES A LAS ACTIVIDADES DESCRITAS PARA LA REPOBLACIÓN PRODUCTORA EJEMPLO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA A PARTIR DE LAS TARIFAS TRAGSA.	53



TABLA 24. UNIDADES DE OBRA CORRESPONDIENTES A LAS ACTIVIDADES DESCRITAS PARA LA REPOBLACIÓN MULTIUSOS EJEMPLO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA A PARTIR DE LAS TARIFAS TRAGSA.....	56
TABLA 25. PROPORCIÓN DE LA HC QUE PRODUCEN LAS ETAPAS DEL CICLO DE VIDA PARA CADA REPOBLACIÓN EJEMPLO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	63
TABLA 26. PROPORCIÓN DE LA HC QUE PRODUCEN LOS PROCESOS DE LA ETAPA DE ADQUISICIÓN DE MATERIALES PARA CADA REPOBLACIÓN EJEMPLO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	64
TABLA 27. PROPORCIÓN DE LA HC QUE PRODUCEN LOS PROCESOS DE LA ETAPA DE REPOBLACIÓN PARA CADA REPOBLACIÓN EJEMPLO HACIENDO REFERENCIA A SU CATEGORÍA INMEDIATAMENTE SUPERIOR. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	64
TABLA 28. COMPROBACIÓN DE LA VARIABLE QUE CAUSA LA VARIACIÓN DE LA HC DENTRO DE LAS EMISIONES POR LA ACTIVIDAD DE MAQUINARIA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA	66
TABLA 29. RENTABILIDAD DE LA HC DE LAS REPOBLACIONES EJEMPLO SEGÚN LAS TASAS DE CAPTURA DE LAS REPOBLACIONES DE REGISTRO DE HUELLA DE CARBONO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	67
TABLA 30. LISTA DE LAS LIMITACIONES DE ESTE TRABAJO Y LAS PROPUESTAS DE MEJORA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	68
TABLA 31. DESCRIPCIÓN DEL INVENTARIO UTILIZADO PARA LA CARACTERIZACIÓN DE LA ADQUISICIÓN DE MATERIA PRIMA CORRESPONDIENTE A LAS PLANTAS. FUENTE: ECOINVENT.	79
TABLA 32. DESCRIPCIÓN DEL INVENTARIO UTILIZADO PARA LA PRODUCCIÓN DEL POLIPROPILENO. FUENTE: ECOINVENT.....	79
TABLA 33. DESCRIPCIÓN DEL INVENTARIO UTILIZADO PARA LA PRODUCCIÓN DEL ACEITE LUBRICANTE. FUENTE: ECOINVENT.	79
TABLA 34. DESCRIPCIÓN DEL INVENTARIO UTILIZADO PARA LA PRODUCCIÓN DEL ACERO. FUENTE: ECOINVENT.....	80
TABLA 35. DESCRIPCIÓN DEL INVENTARIO UTILIZADO PARA LA PRODUCCIÓN DEL ACERO. FUENTE: UK GOVERNMENT GHG CONVERSION FACTORS FOR COMPANY REPORTING.	80
TABLA 36. DESCRIPCIÓN DEL INVENTARIO UTILIZADO PARA LA PRODUCCIÓN DEL POLIETILENO DE BAJA DENSIDAD PARA EL EMPAQUETADO. FUENTE: ECOINVENT.	80
TABLA 37. DESCRIPCIÓN DEL INVENTARIO UTILIZADO PARA EL FACTOR DE EMISIÓN DE TRANSPORTE EN VEHÍCULO COMERCIAL LIGERO. FUENTE: ECOINVENT.	80
TABLA 38. DESCRIPCIÓN DEL INVENTARIO UTILIZADO PARA EL FACTOR DE EMISIÓN DE TRANSPORTE EN CAMIONES DE 7.5-16 TONELADAS DE MMA. FUENTE: ECOINVENT.	81
TABLA 39. DESCRIPCIÓN DEL INVENTARIO UTILIZADO PARA EL FACTOR DE EMISIÓN DE TRANSPORTE EN CAMIONES DE 16-32 TONELADAS DE MMA. FUENTE: ECOINVENT.	81
TABLA 40. DESCRIPCIÓN DEL INVENTARIO UTILIZADO PARA EL FACTOR DE EMISIÓN DE TRANSPORTE DE UN COCHE DE PASAJEROS GENÉRICO. FUENTE: ECOINVENT.	81
TABLA 41. DESCRIPCIÓN DEL INVENTARIO DE LA PRODUCCIÓN DE 1 KG DE TRACTOR AGRÍCOLA. FUENTE: ECOINVENT.....	81
TABLA 42. DESCRIPCIÓN DEL INVENTARIO DE LA PRODUCCIÓN DE UNA RETROEXCAVADORA. FUENTE: ECOINVENT.....	82
TABLA 43. DESCRIPCIÓN DEL INVENTARIO DE LA PRODUCCIÓN DE UNA MÁQUINA DE OBRAS PÚBLICAS. FUENTE: ECOINVENT	82
TABLA 44. DESCRIPCIÓN DEL INVENTARIO UTILIZADO PARA EL FACTOR DE EMISIÓN DE TRANSPORTE DE UN TRACTOR AGRÍCOLA EN TRÁILER. FUENTE: ECOINVENT.	82
TABLA 45. DESCRIPCIÓN DEL INVENTARIO UTILIZADO PARA LA PRODUCCIÓN DEL ACERO. FUENTE: UK GOVERNMENT GHG CONVERSION FACTORS FOR COMPANY REPORTING.	83
TABLA 46. DESGLOSE DE LOS GEI POR LA PRODUCCIÓN DE 1 PLANTA. FUENTE: ECOINVENT.....	84
TABLA 47. DESGLOSE DE LOS GEI DE LA PRODUCCIÓN DE 1 KG DE POLIPROPILENO. FUENTE: ECOINVENT.....	84
TABLA 48. DESGLOSE DE LOS GEI DE LA PRODUCCIÓN DE 1 KG DE ACEITE LUBRICANTE. FUENTE: ECOINVENT	84
TABLA 49. DESGLOSE DE GEI DE LA PRODUCCIÓN DE 1 KG DE ACERO. FUENTE: ECOINVENT.	85
TABLA 50. DATOS DE EMISIONES DE LA ELECTRICIDAD EN REINO UNIDO EN 2018. FUENTE: UK GOVERNMENT GHG CONVERSION FACTORS FOR COMPANY REPORTING.	85
TABLA 51. DESGLOSE DE GEI DE LA PRODUCCIÓN DE 1 KG DE LDPE. FUENTE: ECOINVENT.....	85
TABLA 52. DESGLOSE DE GEI DEL MERCADO DE TRANSPORTE DE 1 TKM DE VEHÍCULO COMERCIAL LIGERO.	86
TABLA 53. DESGLOSE DE GEI DEL MERCADO DE TRANSPORTE DE 1 TKM DE CAMIÓN DE 7.5-16 T.....	86
TABLA 54. DESGLOSE DE GEI DEL MERCADO DE TRANSPORTE DE 1 TKM DE UN CAMIÓN DE 16-32 T.	86
TABLA 55. DESGLOSE DE GEI DEL MERCADO DE TRANSPORTE DE 1 KM EN COCHE DE PASAJEROS GENÉRICO.	86
TABLA 56. DESGLOSE DE GEI LA FABRICACIÓN DE 1 KG DE TRACTOR AGRÍCOLA. FUENTE: ECOINVENT....	87



TABLA 57. DESGLOSE DE GEI LA FABRICACIÓN DE UNA RETROEXCAVADORA. FUENTE: ECOINVENT.....	87
TABLA 58. DESGLOSE DE GEI LA FABRICACIÓN DE UNA MÁQUINA DE OBRAS PÚBLICAS. FUENTE: ECOINVENT	87
TABLA 59. DESGLOSE DE GEI DEL MERCADO DE TRANSPORTE DE 1 TKM DE TRANSPORTE DE UN TRACTOR AGRÍCOLA EN TRÁILER. FUENTE: ECOINVENT.....	88
TABLA 60. RESUMEN DE LAS ETAPAS Y PROCESOS QUE PRODUCEN EMISIONES GEI EN EL CICLO DE VIDA DE LA REPOBLACIÓN. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	89
TABLA 61. RECOPIACIÓN DE LAS VARIABLES UTILIZADAS EN EL MÉTODO DE CÁLCULO DISEÑADO PARA LA CUANTIFICACIÓN DE LA HC DE LA REPOBLACIÓN FORESTAL. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	90
TABLA 62. CARACTERIZACIÓN LAS MODALIDADES DE LA ACTIVIDAD DECAPADO, DEL PROCESO UNITARIO DE ELIMINACIÓN DE VEGETACIÓN PREEXISTENTE, DENTRO DEL PROCESO DE PREPARACIÓN DEL TERRENO. FUENTE: TARIFAS TRAGSA.....	92
TABLA 63. CARACTERIZACIÓN DE LAS MODALIDADES DE LA ROZA SIN MAQUINARIA EN EXTENSIÓN DEL PROCESO UNITARIO DE ELIMINACIÓN DE VEGETACIÓN DENTRO DEL PROCESO DE PREPARACIÓN DEL TERRENO. FUENTE: TARIFAS TRAGSA.....	92
TABLA 64. CARACTERIZACIÓN DE LAS MODALIDADES DE LA ROZA CON MAQUINARIA EN EXTENSIÓN DEL PROCESO UNITARIO DE ELIMINACIÓN DE VEGETACIÓN DENTRO DEL PROCESO DE PREPARACIÓN DEL TERRENO. FUENTE: TARIFAS TRAGSA.....	93
TABLA 65. CARACTERIZACIÓN LAS MODALIDADES DE LA ACTIVIDAD ACABALLONADO DEL PROCESO UNITARIO DE ELIMINACIÓN DE VEGETACIÓN PREEXISTENTE Y PREPARACIÓN DE SUELO, DENTRO DEL PROCESO DE PREPARACIÓN DEL TERRENO. FUENTE: TARIFAS TRAGSA.....	93
TABLA 66. CARACTERIZACIÓN LAS MODALIDADES DE LA ACTIVIDAD DESBROCE Y AHOYADO CON RETROARAÑA, DEL PROCESO UNITARIO DE ELIMINACIÓN DE VEGETACIÓN PREEXISTENTE Y PREPARACIÓN DE SUELO, DENTRO DEL PROCESO DE PREPARACIÓN DEL TERRENO. FUENTE: TARIFAS TRAGSA.....	93
TABLA 67. CARACTERIZACIÓN LAS MODALIDADES DE LA ACTIVIDAD APERTURA DE HOYO CON BARRENA, DEL PROCESO UNITARIO DE PREPARACIÓN DE SUELO, DENTRO DEL PROCESO DE PREPARACIÓN DEL TERRENO. FUENTE: TARIFAS TRAGSA.....	93
TABLA 68. CARACTERIZACIÓN LAS MODALIDADES DE LA ACTIVIDAD APERTURA DE HOYO MANUAL, DEL PROCESO UNITARIO DE PREPARACIÓN DE SUELO, DENTRO DEL PROCESO DE PREPARACIÓN DEL TERRENO. FUENTE: TARIFAS TRAGSA.....	94
TABLA 69. CARACTERIZACIÓN LAS MODALIDADES DE LA ACTIVIDAD APERTURA DE HOYO MECANIZADO, DEL PROCESO UNITARIO DE PREPARACIÓN DE SUELO, DENTRO DEL PROCESO DE PREPARACIÓN DEL TERRENO. FUENTE: TARIFAS TRAGSA.....	94
TABLA 70. CARACTERIZACIÓN LAS MODALIDADES DE LA ACTIVIDAD PREPARACIÓN DE HOYO, DEL PROCESO UNITARIO DE PREPARACIÓN DE SUELO, DENTRO DEL PROCESO DE PREPARACIÓN DEL TERRENO. FUENTE: TARIFAS TRAGSA.....	94
TABLA 71. CARACTERIZACIÓN LAS MODALIDADES DE LA ACTIVIDAD CASILLAS, DEL PROCESO UNITARIO DE PREPARACIÓN DE SUELO, DENTRO DEL PROCESO DE PREPARACIÓN DEL TERRENO. FUENTE: TARIFAS TRAGSA.....	94
TABLA 72. CARACTERIZACIÓN LAS MODALIDADES DE LA ACTIVIDAD AHOYADO CON REJÓN, DEL PROCESO UNITARIO DE PREPARACIÓN DE SUELO, DENTRO DEL PROCESO DE PREPARACIÓN DEL TERRENO. FUENTE: TARIFAS TRAGSA.....	95
TABLA 73. CARACTERIZACIÓN LAS MODALIDADES DE LA ACTIVIDAD TAPADO DE HOYOS, DEL PROCESO UNITARIO DE PREPARACIÓN DE SUELO, DENTRO DEL PROCESO DE PREPARACIÓN DEL TERRENO. FUENTE: TARIFAS TRAGSA.....	95
TABLA 74. CARACTERIZACIÓN LAS MODALIDADES DE LA ACTIVIDAD SUBSOLADO, DEL PROCESO UNITARIO DE PREPARACIÓN DE SUELO, DENTRO DEL PROCESO DE PREPARACIÓN DEL TERRENO. FUENTE: TARIFAS TRAGSA.....	95
TABLA 75. CARACTERIZACIÓN LAS MODALIDADES DE LA ACTIVIDAD CONSTRUCCIÓN DE FAJA, DEL PROCESO UNITARIO DE PREPARACIÓN DE SUELO, DENTRO DEL PROCESO DE PREPARACIÓN DEL TERRENO. FUENTE: TARIFAS TRAGSA.....	95
TABLA 76. CARACTERIZACIÓN LAS MODALIDADES DE LA ACTIVIDAD SUBSOLADO, DEL PROCESO UNITARIO DE PREPARACIÓN DE SUELO, DENTRO DEL PROCESO DE PREPARACIÓN DEL TERRENO. FUENTE: TARIFAS TRAGSA.....	95
TABLA 77. CARACTERIZACIÓN LAS MODALIDADES DE LA ACTIVIDAD BANQUETA MANUAL, DEL PROCESO UNITARIO DE PREPARACIÓN DE SUELO, DENTRO DEL PROCESO DE PREPARACIÓN DEL TERRENO. FUENTE: TARIFAS TRAGSA.....	96



TABLA 78. CARACTERIZACIÓN LAS MODALIDADES DE LA ACTIVIDAD BANQUETA MECANIZADA, DEL PROCESO UNITARIO DE PREPARACIÓN DE SUELO, DENTRO DEL PROCESO DE PREPARACIÓN DEL TERRENO. FUENTE: TARIFAS TRAGSA.....	96
TABLA 79. CARACTERIZACIÓN LAS MODALIDADES DE LA ACTIVIDAD DISTRIBUCIÓN DE BANDEJA, DEL PROCESO DE PLANTACIÓN. FUENTE: TARIFAS TRAGSA.....	97
TABLA 80. CARACTERIZACIÓN LAS MODALIDADES DE LA ACTIVIDAD PLANTACIÓN MANUAL, DEL PROCESO DE PLANTACIÓN. FUENTE: TARIFAS TRAGSA.....	97
TABLA 81. CARACTERIZACIÓN LAS MODALIDADES DE LA ACTIVIDAD PLANTACIÓN EN HOYO PREPARADO CON BARRENA, DEL PROCESO DE PLANTACIÓN. FUENTE: TARIFAS TRAGSA.....	97
TABLA 82. CARACTERIZACIÓN LAS MODALIDADES DE LA ACTIVIDAD PLANTACIÓN EN SUELO MECANIZADO, DEL PROCESO DE PLANTACIÓN. FUENTE: TARIFAS TRAGSA.....	97
TABLA 83. CARACTERIZACIÓN LAS MODALIDADES DE LA ACTIVIDAD DISTRIBUCIÓN DEL TUBO PROTECTOR, DEL PROCESO DE PLANTACIÓN. FUENTE: TARIFAS TRAGSA.....	98
TABLA 84. CARACTERIZACIÓN LAS MODALIDADES DE LA ACTIVIDAD COLOCACIÓN DEL TUBO PROTECTOR, DEL PROCESO DE PLANTACIÓN. FUENTE: TARIFAS TRAGSA.....	98
TABLA 85. CARACTERIZACIÓN LAS MODALIDADES DE LA ACTIVIDAD RETIRADA DEL TUBO PROTECTOR, DEL PROCESO DE PLANTACIÓN. FUENTE: TARIFAS TRAGSA.....	98
TABLA 86. CARACTERIZACIÓN LAS MODALIDADES DE LA ACTIVIDAD ROZA SIN MAQUINARIA, DEL PROCESO DE USO Y MANTENIMIENTO. FUENTE: TARIFAS TRAGSA.....	99
TABLA 87. CARACTERIZACIÓN LAS MODALIDADES DE LA ACTIVIDAD ROZA CON MAQUINARIA, DEL PROCESO DE USO Y MANTENIMIENTO. FUENTE: TARIFAS TRAGSA.....	99
TABLA 88. CARACTERIZACIÓN LAS MODALIDADES DE LA ACTIVIDAD REPOSICIÓN DE MARRAS MANUAL, DEL PROCESO DE USO Y MANTENIMIENTO. FUENTE: TARIFAS TRAGSA.....	100
TABLA 89. CARACTERIZACIÓN LAS MODALIDADES DE LA ACTIVIDAD REPOSICIÓN DE MARRAS EN HOYOS CON BARRENA, DEL PROCESO DE USO Y MANTENIMIENTO. FUENTE: TARIFAS TRAGSA.....	100



ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

ILUSTRACIÓN 1. MARCO DE REFERENCIA DE UN ACV. FUENTE: ISO, 2006.	17
ILUSTRACIÓN 2. MAPA DE PROCESOS INCLUIDOS EN EL SISTEMA PARA EL CUAL SE CUANTIFICA LA HUELLA DE CARBONO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	23
ILUSTRACIÓN 3. ACTIVIDADES INCLUIDAS EN EL INVENTARIO DE LA PRODUCCIÓN DE PLANTA EN VIVERO DE ECOINVENT. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	28
ILUSTRACIÓN 4. ACTIVIDADES INCLUIDAS EN LA ADQUISICIÓN DE MATERIALES DE LOS TUBOS PROTECTORES. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	29
ILUSTRACIÓN 5. ORIGEN DE LAS EMISIONES GEI SEGÚN LA MODALIDAD DE LAS ACTIVIDADES DE LA REPOBLACIÓN FORESTAL. EN LAS FLECHAS ROJAS, ACTIVIDADES CUYAS EMISIONES GEI SE CONTABILIZAN EN LA ACTIVIDAD DESTINO. ESTAS EMISIONES INCLUYEN LAS EMITIDAS POR EL CONSUMO DE COMBUSTIBLE DE LOS VEHÍCULOS, Y LA PARTE ALÍCUOTA DE LAS EMISIONES POR PRODUCCIÓN Y TÉRMINO DE VIDA DEL VEHÍCULO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	30
ILUSTRACIÓN 6. CONSUMO ENERGÉTICO EXPRESADO EN GRAMOS POR KM O POR TONELADA KILOMÉTRICA PARA UN CAMIÓN CUYO CONTENEDOR ES DE 6 METROS DE LARGO DEPENDIENDO DE SU CARGA. EN VERDE SE INDICA CUANDO SE CONSIDERA QUE VA CON CARGA VACÍA (VOLUME), LLENA (BULK) Y MEDIA (AVERAGE). FUENTE: "ECOLOGICAL TRANSPORT INFORMATION TOOL FOR WORLDWIDE TRANSPORTS", 2020.	31
ILUSTRACIÓN 7. ORIGEN DE LAS EMISIONES GEI DE LA ETAPA DE GESTIÓN DE RESIDUOS. EN LAS FLECHAS ROJAS, ACTIVIDADES CUYAS EMISIONES GEI SE CONTABILIZAN EN LA ACTIVIDAD DESTINO. ESTAS EMISIONES INCLUYEN LAS EMITIDAS POR EL CONSUMO DE COMBUSTIBLE DE LOS VEHÍCULOS, Y LA PARTE ALÍCUOTA DE LAS EMISIONES POR PRODUCCIÓN Y TÉRMINO DE VIDA DEL VEHÍCULO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	38
ILUSTRACIÓN 8. LEYENDA DEL TIPO DE CELDAS QUE SE PUEDEN RELLENAR O SE RELLENAN AUTOMÁTICAMENTE EN EL EXCEL. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	49
ILUSTRACIÓN 10. IMAGEN SACADA DE LA HOJA ENTRADAS DEL EXCEL REALIZADO QUE INCLUYE LAS TABLAS DONDE SE DEBEN INTRODUCIR LOS DATOS GENERALES. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	50
ILUSTRACIÓN 10. IMAGEN SACADA DE LA HOJA ENTRADAS DEL EXCEL REALIZADO QUE INCLUYE LA TABLA PARA INTRODUCIR LOS RESULTADOS OBTENIDOS EN EASYCARGO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	50
ILUSTRACIÓN 11. IMAGEN SACADA DE LA HOJA ENTRADAS DEL EXCEL REALIZADO QUE INCLUYE LAS SECCIONES DONDE SE CARACTERIZAN LAS ACTIVIDADES DE LA ETAPA DE REPOBLACIÓN Y DE USO Y MANTENIMIENTO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	51
ILUSTRACIÓN 12. RESULTADOS OBTENIDOS EN EL EXCEL PARA LA REPOBLACIÓN PRODUCTORA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	54
ILUSTRACIÓN 13. REPRESENTACIÓN DEL REPARTO DE EMISIONES POR ETAPAS DEL CICLO DE VIDA Y PROCESOS UNITARIOS DE LA REPOBLACIÓN PRODUCTORA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	55
ILUSTRACIÓN 14. REPRESENTACIÓN DEL REPARTO DE EMISIONES DE TRASLADO DE PERSONAL POR ACTIVIDADES DE LA REPOBLACIÓN PRODUCTORA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	55
ILUSTRACIÓN 15. RESULTADOS OBTENIDOS EN EL EXCEL PARA LA REPOBLACIÓN MULTIUSOS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	57
ILUSTRACIÓN 16. REPRESENTACIÓN DEL REPARTO DE EMISIONES POR ETAPAS DEL CICLO DE VIDA Y PROCESOS UNITARIOS DE LA REPOBLACIÓN PRODUCTORA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	58
ILUSTRACIÓN 17. REPRESENTACIÓN DEL REPARTO DE EMISIONES DE TRASLADO DE PERSONAL POR ACTIVIDADES EN LA ETAPA DEL USO Y MANTENIMIENTO DE LA REPOBLACIÓN MULTIUSOS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	58
ILUSTRACIÓN 18. REPRESENTACIÓN DEL REPARTO DE EMISIONES DE TRASLADO DE PERSONAL POR ACTIVIDADES LA ETAPA DE REPOBLACIÓN DE LA REPOBLACIÓN MULTIUSOS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	59
ILUSTRACIÓN 19. CAPTURA DE PANTALLA DE LA CALCULADORA DE ABSORCIONES DEL REGISTRO DE HUELLA DE CARBONO PARA LA REPOBLACIÓN PRODUCTORA DE EUCALYPTUS GLOBULUS EJEMPLO UTILIZADA EN EL TRABAJO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	61
ILUSTRACIÓN 20. CAPTURA DE PANTALLA DE LA CALCULADORA DE ABSORCIONES DEL REGISTRO DE HUELLA DE CARBONO PARA LA REPOBLACIÓN PRODUCTORA DE EUCALYPTUS GLOBULUS EJEMPLO UTILIZADA EN EL TRABAJO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	62
ILUSTRACIÓN 21. CAPTURA DE PANTALLA DONDE INTRODUCIR LOS VEHÍCULOS A UTILIZAR.	101
ILUSTRACIÓN 22. CAPTURA DE PANTALLA DONDE INTRODUCIR LOS DATOS DE LOS VEHÍCULOS A UTILIZAR AL CLICAR EN EL BOTÓN CREAR PROPIO ESPACIO DE CARGA.	101



ILUSTRACIÓN 23. CAPTURA DE PANTALLA DEL V7 CARGADO CON EL MÁXIMO DE BANDEJAS FORESTALES DE EUCALYPTUS GLOBULUS.	102
ILUSTRACIÓN 24. CAPTURA DE PANTALLA DEL V4 CARGADO CON LA PARTE DE BANDEJAS FORESTALES DE EUCALYPTUS GLOBULUS QUE NO SE PODÍAN CARGAR EN EL VEHÍCULO V7.	102
ILUSTRACIÓN 25. CAPTURA DE PANTALLA DEL V6 DONDE SE INDICA QUE EL VOLUMEN DE LOS TUBOS PROTECTORES ES MAYOR QUE EL VOLUMEN DEL VEHÍCULO.	103
ILUSTRACIÓN 26. CAPTURA DE PANTALLA DEL V7 DONDE SE INDICA QUE EL VOLUMEN DE LOS TUBOS PROTECTORES SE PUEDE CARGAR.	103
ILUSTRACIÓN 27. CAPTURA DE PANTALLA DEL V7 CARGADO EN SU MÁXIMA CAPACIDAD CON BANDEJAS DE FRONDOSAS Y PINO.	103
ILUSTRACIÓN 28. CAPTURA DE PANTALLA DEL V2 DONDE SE HAN CARGADO LAS BANDEJAS FORESTALES DE PINO RESTANTES.	104



ÍNDICE DE ECUACIONES

ECUACIÓN 1. CONSUMO TOTAL DE DIÉSEL POR UN CAMIÓN PARA COMPARACIÓN ENTRE TIPOS DE VEHÍCULOS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	32
ECUACIÓN 2, 3, 4, 5, 6, 7. CONJUNTO DE ECUACIONES QUE RECOPILAN LOS PROCESOS QUE PRODUCEN EMISIONES EN EL CICLO DE VIDA DE LA REPOBLACIÓN FORESTAL. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. .	41
ECUACIÓN 8. FÓRMULA PARA OBTENER LAS EMISIONES CORRESPONDIENTES A LA ADQUISICIÓN DEL TOTAL DE PLANTAS NECESARIAS PARA LA UNIDAD FUNCIONAL. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	42
ECUACIÓN 9. FÓRMULA PARA OBTENER LAS EMISIONES CORRESPONDIENTES A LA ADQUISICIÓN DEL TOTAL DE TUBOS PROTECTORES NECESARIOS PARA LA UNIDAD FUNCIONAL. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	42
ECUACIÓN 10, 11. FÓRMULAS PARA OBTENER LAS EMISIONES POR EL TRASLADO DE LAS PLANTAS AL LUGAR DE PLANTACIÓN. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	43
ECUACIÓN 12, 13. FÓRMULAS PARA OBTENER LAS EMISIONES POR EL TRASLADO DE LOS TUBOS PROTECTORES AL LUGAR DE PLANTACIÓN. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	44
ECUACIÓN 14, 15, 16, 17. FÓRMULAS PARA OBTENER LAS EMISIONES POR EL TRASLADO DEL PERSONAL AL LUGAR DE PLANTACIÓN. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	45
ECUACIÓN 18, 19, 20, 21. FÓRMULAS PARA OBTENER LAS EMISIONES POR EL TRASLADO DEL PERSONAL AL LUGAR DE PLANTACIÓN. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	46
ECUACIÓN 22, 23. FÓRMULAS PARA EL CÁLCULO DE LAS EMISIONES PRODUCIDAS POR EL TRASLADO DE LA MAQUINARIA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	47
ECUACIÓN 24, 25. FÓRMULAS PARA EL CÁLCULO DE EMISIONES POR EL TRASLADO DE RESIDUOS.....	48
ECUACIÓN 26. FÓRMULA PARA EL CÁLCULO DE EMISIONES POR EL TRATAMIENTO DE RESIDUOS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	48

ABREVIATURAS

ACV	Análisis de Ciclo de Vida
GEI	Gases de efecto invernadero
HC	Huella de carbono
IPCC	Panel Intergubernamental del Cambio Climático
MITECO	Ministerio de Transición Ecológica
ONU	Organización de las Naciones Unidas
PCG	Potencial de Calentamiento Global
UE	Unión Europea



INTRODUCCIÓN

1. CAMBIO CLIMÁTICO

El problema ambiental que mayor preocupación supone a la sociedad es el cambio climático, provocado por el calentamiento global de origen antrópico. Este calentamiento de la atmósfera sucede por las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) a una velocidad y cantidad no naturales, aumentando la temperatura media de la atmósfera. Este efecto se regula de cierta manera gracias a los sumideros de carbono, constituidos por los océanos, bosques y suelos. Por tanto, el aumento de la superficie de bosques es una manera de compensar las emisiones que producen el calentamiento global (UNFCCC, 1997).

El cambio climático ha llegado a ser una preocupación global, lo que ha llevado a la creación de la Agenda 2030 de Desarrollo Sostenible de la Organización de las Naciones Unidas (ONU). Este documento incluye como objetivo (nº 13) la *Acción por el Clima*, para combatir el cambio climático y sus efectos (ONU, 2019).

El objetivo 13 de la Agenda 2030 establece unas metas para la acción por el clima de las cuales son relevantes para este trabajo las siguientes (ONU, 2019):

- Fortalecer la resiliencia y la capacidad de adaptación a los riesgos relacionados con el clima y los desastres naturales en todos los países.
- Incorporar medidas relativas al cambio climático en las políticas, estrategias y planes nacionales.
- Mejorar la educación, la sensibilización y la capacidad humana e institucional respecto de la mitigación del cambio climático, la adaptación a él, la reducción de sus efectos y la alerta temprana.

Durante la COP21 celebrada en París en 2015, se establecieron unas medidas para cumplir los objetivos necesarios para llevar a cabo las metas mencionadas, siendo uno de los focos principales la reducción de emisiones de GEI. Tales gases son los siguientes (MITECO, 2020):

- CO₂: dióxido de carbono
- CH₄: metano
- N₂O: óxido nitroso
- HFC: hidrofluorocarbonos
- PFC: perfluorocarbonos
- SF₆: hexafluoruro de azufre.

El seguimiento de las emisiones de estos GEI es un factor importante para poder tomar decisiones y establecer medidas enfocadas en conseguir los objetivos. Por tanto, es necesario utilizar indicadores ambientales para medir los aspectos que se quieren mejorar. En el caso del calentamiento global se utiliza la *huella de carbono*, que cuantifica las emisiones de dichos GEI. Tanto los estados, como las entidades locales y empresas la deben utilizar para declarar el impacto de sus actividades y que puedan ser regulados a razón de cumplir los objetivos de la Agenda 2030.

Este seguimiento de los indicadores lo realiza el Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC), institución que hace una evaluación de forma regular sobre las bases científicas del cambio climático, prediciendo los impactos y riesgos futuros para poder proponer medidas de adaptación y mitigación.



2. HUELLA DE CARBONO

Uno de los indicadores de impacto ambiental más recurrentes es la huella de carbono (HC). Se trata de un indicador que estima el impacto que produce un proceso, producto, individuo u organización respecto al cambio climático cuantificando las emisiones de GEI expresadas en CO₂ equivalente (CO₂ eq). La huella de carbono se calcula de diferente manera según el sujeto analizado. Los dos tipos principales son (Moreira Muzio, 2020):

- *Huella de carbono de las organizaciones*; la huella de carbono supone un inventario de las emisiones de GEI que produce una empresa, o equivalente, a lo largo de un periodo determinado.
- *Huella de carbono de los productos*; la huella de carbono tiene en cuenta las emisiones de GEI producidas y eliminadas durante todo el ciclo de vida de un producto o servicio.

La huella de carbono se deberá reducir a través de medidas mitigadoras. No obstante, a pesar del esfuerzo de las organizaciones de reducir sus HC o la de sus productos, no siempre consiguen alcanzar los objetivos establecidos. Por tanto, deberán realizar medidas compensatorias para amortiguar el impacto que tiene su HC. Una herramienta aceptada para ello son las repoblaciones forestales. En línea con el marco de aplicación y los objetivos del trabajo, se tratará la repoblación forestal como un producto, por lo que se recurrirá a la metodología de huella de carbono de productos como guía para el trabajo.

3. ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA

La huella de carbono de los productos requiere conocer las emisiones de GEI producidas y eliminadas durante su ciclo de vida. Por tanto, el análisis debe ser holístico, incluyendo todas las fases por las que pasa el producto desde su cuna hasta su tumba; es decir, desde su producción hasta el tratamiento de los residuos al finalizar su vida útil. De esta manera, se puede determinar las actividades que necesitan medidas para la reducción de sus emisiones de GEI a lo largo de su vida. Al tratarse de un indicador, debe ser reproducible para que sea consistente. Para cuantificarlo, existen metodologías que establecen la forma de realizar los análisis de ciclo de vida (ACV).

Una de las metodologías más utilizadas es el ACV cuyos estándares vienen definidos en las Normas ISO 14040:2006 e ISO 14044:2006. La metodología del análisis de ciclo de vida tiene en cuenta varias categorías de impacto ambiental: cambio climático, destrucción de capa de ozono, toxicidad a humanos cancerígena, toxicidad a humanos no cancerígena, material particulado, radiación ionizante HH, radiación ionizante E, formación de ozono fotoquímico, acidificación, eutrofización terrestre, eutrofización de agua continental, eutrofización marina, eco-toxicidad de aguas continentales, uso de suelo, agotamiento de recursos hídricos y agotamiento de recursos minerales y fósiles.

El impacto ambiental en el que está centrado este trabajo es el cambio climático, como se ha determinado desde el principio. Para esta categoría en particular existe una metodología específica cuyo estándar viene definido en la especificación técnica ISO/TS 14067:2018 “Gases de efecto invernadero -Huella de carbono de productos-Requisitos y directrices para cuantificación”.

Esta especificación técnica se basa en las metodologías de ACV mencionadas, siendo concorde en todo momento. Por tanto, este estándar se ajusta mejor a la naturaleza de este trabajo de fin de grado, cuya razón de ser es establecer unas bases para proyectos de compensación basados en el ámbito forestal cuya motivación será cumplir los objetivos de neutralidad de carbono para mitigar su impacto respecto al cambio climático.



4. MARCO LEGISLATIVO

La legislación sobre el cambio climático se deriva de normativa del marco internacional. La ONU realiza conferencias anuales sobre el cambio climático, de las cuales merecen destacarse dos de ellas, dado que han generado unos documentos de trascendencia que han sido ratificados de forma global por gran parte de la comunidad internacional:

- *Protocolo de Kioto*: se establecen en 2005 las primeras metas de reducción de emisiones con fecha límite ("Kyoto 1st commitment period (2008–12) - Acción por el Clima - European Commission", 2020).
- *Acuerdo de París*: se establece en 2016 con el fin de cumplir las metas de la Agenda 2030 de Desarrollo Sostenible respecto al calentamiento global, proporcionando un conjunto de actividades que se deben llevar a cabo para conseguirlo ("Acuerdo de París - Acción por el Clima - European Commission", 2020).

La Unión Europea, al haber ratificado el Acuerdo de París y haberse convertido en parte participante, ha desarrollado una hoja de ruta para dotarse de una economía sostenible llamada *Pacto Verde* ("Un Pacto Verde Europeo", 2020). Este documento tiene como objetivo dejar de producir GEI para 2050, disociar el uso de recursos del crecimiento económico, y lograr una transición justa, equitativa e integradora. Consecuentemente, se ha desarrollado una propuesta de *Ley del Clima*, un *Plan de Inversiones*, *Plan de Acción de la Economía Circular*, y *Estrategias Industrial, sobre la Biodiversidad y para la Integración del Sistema Energético*.

La *Ley del Clima* (Reglamento (UE) nº 0036/2020) se desarrolló teniendo en cuenta las metas y estrategias climáticas consideradas en el Pacto Verde para el año 2030, que incluyen:

- Reducir al menos un 40% las emisiones de GEI.
- Producir al menos un 32% de energía por fuentes renovables.
- Mejorar un 32% la eficiencia energética.

Uno de los documentos que implementa el primer objetivo es la *Regulación de uso de suelo, cambio de uso de suelo y silvicultura 2021-2030*. Pretende que se impliquen todos los sectores en conseguir las metas al establecer criterios sobre la compensación y eliminación de emisiones de GEI. En esta línea, la UE acepta la ejecución de medidas compensatorias en caso de no alcanzar los objetivos de reducción de emisiones de GEI a través de ciertos métodos de mitigación establecidos ("Land use and forestry regulation for 2021-2030 - Climate Action - European Commission", 2020).

No obstante, tanto la *Ley del Clima* como esta *Regulación* se basa en el principio de subsidiariedad, por lo que los Estados miembros deben trasladar todo ello a su legislación nacional. En España se ha desarrollado el Proyecto de Ley del Cambio Climático (Proyecto de Ley 121/00019, 2020) donde también se establecen la creación y mejora de los sumideros de carbono como medida mitigadora para disminuir las emisiones de GEI (artículo 4).

Esto hace que las organizaciones puedan plantearse realizar repoblaciones forestales para compensar sus emisiones, incluidas las públicas como pueden ser las universidades. Por ello, se justifica el trabajo que a continuación desarrolla este trabajo de fin de grado.



5. MARCO DE APLICACIÓN

La Universidad Politécnica de Madrid (UPM) tiene como compromiso conseguir un carácter neutral en cuanto al cambio climático para 2050. Se dice que una organización o actividad es climáticamente neutra cuando es capaz de compensar las emisiones de GEI que ha producido y que no ha conseguido evitar a través de medidas de reducción. En otras palabras, la organización ha de realizar el máximo esfuerzo posible para reducir sus emisiones y, aquellas que hayan sido inevitables, son susceptibles de ser compensadas.

En este sentido, la UPM ya ha comenzado a actuar para conseguir su objetivo: desde 2013 se cuantifican las emisiones GEI anualmente; además, se ha estudiado detalladamente la capacidad de absorción de GEI del Arboreto de la Escuela de Montes; también se ha llevado a cabo la campaña de Concienciación de Ahorro Energético; se ha realizado el planteamiento de desarrollar un Manual de Buenas Prácticas Energéticas y Ambientales y un Manual de Acciones de Coste Cero. Por otro lado se debe mencionar la realización de un Estudio de Eficiencia Energética; y no se puede dejar de señalar que el cálculo de la huella de carbono ha conducido al registro de esta ante la Oficina Española de Cambio Climático y al desarrollo de planes de reducción (Huella de carbono UPM, 2014).

Las actuaciones que se propongan en los planes de reducción y compensación de emisiones deben ser acordes con el Registro de Huella de Carbono del Ministerio de Transición Ecológica y Reto Demográfico (MITECO). Este establece las repoblaciones forestales como una de las actividades posibles de compensación de emisiones GEI.

Por ello, a través de este trabajo, se pretende sentar unas bases para cuantificar las emisiones de GEI producidas durante una repoblación forestal con el objetivo de motivar su realización como elemento principal en las acciones compensatorias de las emisiones, tanto para la UPM, como para cualquier empresa, al proporcionar una mayor sensibilidad en los balances de carbono en los que se tengan en cuenta dichas actuaciones. Es especialmente interesante para la UPM ya que tiene a su disposición el conocimiento y profesionalidad de los docentes e investigadores de la ETSI Montes, Forestal y del Medio Natural y la posibilidad de trascender con los profesionales que forma y que serán los gestores del medio ambiente en las próximas décadas.



6. REPOBLACIÓN FORESTAL PARA LA COMPENSACIÓN

Las repoblaciones forestales, que se definen como el establecimiento de especies forestales en un terreno mediante siembra o plantación, pueden ser forestaciones o reforestaciones. Por definición, una forestación es una repoblación de un terreno que era agrícola o estaba dedicado a otros usos no forestales. En cambio, una reforestación consiste en una reintroducción de especies forestales en terrenos que estuvieron poblados forestalmente hasta épocas recientes, pero que quedaron rasos a causa de talas, incendios, vendavales, plagas, enfermedades u otros motivos (Ley de Montes 43/2003, de 21 de noviembre).

El Registro de Huella de Carbono, creado por el Real Decreto 163/2014, de 14 de marzo, tiene varias funciones. Por un lado, recoge los esfuerzos de las organizaciones españolas en el cálculo y reducción de las emisiones de GEI que genera su actividad teniendo un conjunto de actuaciones registradas. Por otro lado, establece los requisitos y características de las actividades aceptadas como medidas de compensación de la HC. Posibilita hacerlo mediante una serie de proyectos forestales ubicados en territorio nacional ("Mitigación: políticas y medidas", 2020).

La tipología de proyectos forestales de absorción de carbono aceptados para la compensación de las emisiones GEI vienen establecidos en los informes anuales. Son las siguientes: repoblaciones forestales con cambio de uso del suelo y actuaciones en zonas forestales incendiadas para el restablecimiento de la masa ("Información general sobre el Registro de huella, compensación y proyectos de absorción de CO₂", 2020). Por lo tanto, dado que unas son forestaciones y otras reforestaciones, se va a utilizar el término de repoblación forestal, que incluye a ambas, a lo largo del trabajo de fin de grado.

Como se ha mencionado anteriormente, el Artículo 5 del Acuerdo de París contempla las repoblaciones forestales como medidas de compensación de HC, dando importancia a la protección de los bosques por formar parte de una gran red de sumideros de carbono, esenciales en el balance de GEI. Esta protección incluye su mantenimiento a largo plazo a pesar de los cambios que sufran por el acontecimiento de catástrofes, como plagas o incendios.

La repoblación es muy importante para mantener esta red de sumideros, dado que contribuyen a mejorar la tasa de captura de carbono de una forma más acentuada que la opción de gestión pasiva (regeneración natural). Esto se debe a que, al acelerar la densificación del dosel forestal, se reduce la duración del periodo durante el cual el balance de carbono de la vegetación es ligeramente positivo (los pies plantados producen levemente más GEI de los que fijan), promoviendo un mayor almacenamiento de carbono (Nave et al., 2018).

Dentro de un bosque, hay tres partes que se pueden considerar sumideros de carbono: los suelos, la biomasa de superficial y subterránea, y los despojos orgánicos que no se hayan incorporado a la materia orgánica del suelo. Dependiendo de si la repoblación forestal consiste en una forestación de un terreno previamente agrícola, una forestación de un terreno previamente no forestal, o una reforestación, la capacidad de cada parte de acumular carbono varía (Nave et al., 2018).

En primer lugar, la capacidad de acumulación de carbono de los horizontes A es claramente mayor en los bosques naturales que en los cultivos. Asimismo, aumenta la acumulación de carbono al realizar una repoblación forestal en terrenos previamente cultivados. (Nave et al., 2018). Las forestaciones incrementan el carbono orgánico del suelo aproximadamente en un 131% en las zonas semiáridas (Liu et al., 2018). Este valor depende tanto del bioclima como del uso de suelo previo; el incremento es mayor cuando el terreno previo no tenía vegetación y pasa a ser vegetado por una masa de frondosas,



frente a una transición desde un terreno previo agrícola o una vegetación final de coníferas (Liu et al., 2018). No obstante, este incremento del carbono orgánico del suelo no sucede de la misma forma en los trópicos. La principal acumulación de carbono que sucede en ellos se produce en la materia viva superficial, subterránea y en los restos de madera muerta. Normalmente esto sucede en las proporciones aproximadas de 60, 30 y 15% respectivamente (Lewis et al., 2019).

En segundo lugar, la razón principal por la que se decide repoblar en vez de optar por la gestión pasiva (regeneración natural) se contempla al analizar la acumulación de carbono en la biomasa leñosa aérea. Como se puede ver en la Tabla 1, la tasa anual de captura de carbono es mayor para los casos de gestión activa (marcados como “Y”), excepto en el caso de forestación de terrenos agrícolas. Las repoblaciones tienen la ventaja de que, durante las primeras décadas, el secuestro de carbono es dos o tres veces mayor que aquel de los bosques naturales (Nave et al., 2018).

Tabla 1. Datos del Inventario Nacional Forestal de EE. UU. comparando la biomasa leñosa aérea para dos opciones de cada una de las tres condiciones de bosques. “N” significa no. “Y” significa sí. Por ejemplo, reforestación N significa que la masa forestal no ha resultado de una repoblación sino de la regeneración natural. La tercera columna es el almacenamiento de biomasa leñosa aérea. La cuarta columna es la tasa anual de producción de biomasa leñosa aérea. **Fuente:** Nave et al., 2018.

	<i>N</i>	Age	Mg C ha ⁻¹	Mg C ha ⁻¹ year ⁻¹
Afforested				
N	23,163	65 (33–86)	43 (20–69)	0.8 (0.4–1.3)
Y	135	16 (7–35)	21 (5–63)	1.4 (0.8–2.1)
Reforested				
N	74,726	70 (43–98)	37 (13–69)	0.6 (0.2–1.1)
Y	7396	20 (10–30)	32 (10–55)	1.6 (0.9–2.5)
Prev. nonforest				
N	43,529	61 (31–83)	46 (22–71)	0.9 (0.5–1.3)
Y	1648	37 (10–71)	14 (2–43)	0.5 (0.2–1.1)

En tercer lugar, los residuos de madera muerta, que son una parte importante en el secuestro de carbono, también varían en relación con la edad de las masas forestales (Nave et al., 2018). Comparando la gestión activa con la pasiva, el bosque natural acumula mayor cantidad de madera muerta en edades tardías, mientras que la gestión activa produce mayor cantidad de madera muerta en edades tempranas (véase Tabla 2), coincidiendo con el intervalo de tiempo durante el cual la tasa de acumulación de carbono por la biomasa leñosa aérea es también mayor (Nave et al., 2018).



Tabla 2. Acumulación de carbono en residuos de madera muerta en bosques resultantes de regeneración natural y por repoblación, expresado en Mg C ha. **Fuente:** Nave et al., 2018.

Age class	Natural	Planted
< 10	0 (0–4)	5 (1–14)
10–25	0 (0–1)	6 (1–14)
25–50	0 (0–3)	7 (2–18)
50–100	3 (1–9)	7 (3–17)
> 100	10 (3–21)	6 (3–16)

Values are medians, which differ significantly between reforestation versus natural regeneration in all time categories ($P < 0.001$), with 25th and 75th percentiles in parentheses

Teniendo en cuenta todo lo anterior, se puede concluir que una repoblación puede mejorar el secuestro de carbono tanto si es reforestando una superficie degradada por incendios u otros impactos, como si es forestando terrenos previamente agrícolas o no forestales. No obstante, la tasa de captura de carbono varía con ciertos factores, como se explica en el siguiente apartado.

7. POTENCIAL DE SECUESTRO DE CARBONO

Tanto la litosfera como la hidrosfera son grandes reservorios donde se almacena el carbono, llegando a más de 75 millones de Gt de C en la primera, y 38 400 Gt de C en los océanos. Por otro lado, la biosfera es también un sumidero importante (2 000 Gt de C) (Falkowski et al., 2000). Existe un flujo de carbono entre la biosfera y la atmósfera, que sucede de forma diferente para cada elemento: los océanos intercambian CO₂ por diferencias de concentración, mientras que las plantas lo producen por respiración, aunque al ser organismos fotosintéticos, también lo fijan.

De hecho, los bosques son un gran sumidero de carbono, fijando 1.60-4.80 Gt C al año. No obstante, está lejos de la cantidad emitida por la quema de combustibles fósiles, que llega a 6.30 Gt C al año (Pardos Carrión, 2010).

La capacidad de los bosques de acumular carbono depende de sus características. La tasa de captura varía según la edad de la masa, la fracción de cabida cubierta y las especies que forman la masa forestal (Pardos Carrión, 2010; Taylor & Marconi, 2019; Pan et al., 2004). En primer lugar, la característica más importante que condiciona la tasa de captura es el tipo de formación vegetal de la masa. Se muestran en la Tabla 3 las diferencias de contenido de carbono de diferentes biomas, cuyas formaciones vegetales típicas difieren de las de otros biomas.

Tabla 3. Superficie y contenido en carbono en suelo y vegetación de diferentes biomas. **Fuente:** Pardos Carrión, 2010.

Biomas	Superficie (10 ⁶ km ²)	Vegetación (Gt C)	Suelo (Gt C)	Total (Gt C)	Densidad Total (t C ha ⁻¹)
Bosques templados (EEUU, Europa, China, Australia)	10,38	59,00	100,00	159,00	153,00
Bosques boreales (Rusia, Canadá, Alaska)	13,72	88,00	471,00	559,00	407,00
Bosques tropicales (Asia sin China, África, Sudamérica)	17,55	212,00	216,00	428,00	275,00
Sabanas tropicales	22,50	66,00	264,00	330,00	146,00
Pastizales templados	12,50	9,00	295,00	304,00	243,00
Tundra, pastos alpinos	9,50	6,00	121,00	127,00	134,00
Desiertos/semidesiertos	45,50	8,00	191,00	199,00	164,00
Ciénagas/z.pantanosas	3,50	15,00	225,00	240,00	686,00
Cultivos	16,00	3,00	128,00	131,00	82,00
Total	151,15	466,00	2.011,00	2.477,00	164,00

La tasa de captura en los trópicos es de 7 toneladas de C ha⁻¹ año⁻¹ en los humedales australianos, donde el árbol principal es el eucalipto, mientras que, en ámbitos más secos, esta tasa baja hasta 1 toneladas de C ha⁻¹ año⁻¹. Las formaciones vegetales de especies no nativas suelen tener una tasa mayor ya que se introducen con un propósito normalmente productivo. Teniendo en cuenta que la tasa de captura de los cultivos es de 0.5 toneladas de C ha⁻¹ año⁻¹, la repoblación es una gran oportunidad para mitigar el cambio climático (Voicu et al., 2017; Lewis et al. 2019; Cunningham et al., 2015).



En segundo lugar, se podría esperar que a mayor fracción de cabida cubierta la captura de carbono fuese mayor al haber más tejido fotosintético (follaje y tallos). No obstante, según el estudio de Taylor & Marconi (2019), que estudiaron la relación entre la cantidad de carbono capturado por catorce biomas y su fracción de cabida cubierta, esa predicción no se cumple en todos los casos. La captura de carbono por parte de los árboles no es un proceso sencillo, sino que forma parte de un conjunto de procesos complejos.

Uno de los ejemplos más interesantes son los biomas boreales, cuya relación entre fracción de cabida cubierta y carbono capturado es negativa (Taylor & Marconi, 2019), posiblemente porque la forestación de estas zonas provoque una aceleración de la mineralización del carbono orgánico del sustrato por el aumento de despojos orgánicos en las fases iniciales, que aumenta las emisiones de GEI (Karhu et al., 2011). Los biomas donde la relación entre fracción de cabida cubierta y carbono capturado es positiva son los tropicales, los mediterráneos y los típicos de montaña. En cambio, en la tundra y en los bosques templados se contempla una relación muy débil.

En tercer lugar, como se ha mencionado anteriormente, la edad de la formación vegetal tiene relación con el potencial de captura de carbono. Esto se ha demostrado en el estudio de Pan et al. (2004), que estimó los bosques más viejos, plantados entre los años 1973-1981 tenían una tasa de captura de $0.02 \text{ Pg C año}^{-1}$ mientras que en bosques más jóvenes, originados en 1984-1993, esta tasa es de $0.066 \text{ Pg C año}^{-1}$. Por tanto, se puede decir que los estadios más productivos son los jóvenes, capturando una mayor cantidad de carbono (Pan et al., 2004).

A pesar de que algunos científicos consideren que las forestaciones y reforestaciones pueden ser una solución de mitigación efectiva en los trópicos, pero no en las zonas boreales, y a pesar de la problemática socioeconómica que puede traer a ciertas áreas del mundo el ocupar espacio que tenga potencial agrícola (Fuss et al., 2018), la creación de masas forestales ha sido la medida compensatoria con mayor proyección dado que es recomendado a nivel internacional y nacional. De hecho, la superficie forestal en España está en aumento debido a una disminución de los cultivos por abandono del medio rural, siendo estas zonas lugares donde se pueden llevar a cabo repoblaciones forestales ("Bosques españoles y su evolución", 2020).

Teniendo en cuenta todo lo anterior, se puede concluir que una repoblación puede mejorar el secuestro de carbono tanto si es reforestando una superficie degradada por incendios u otros impactos, como si es forestando terrenos previamente agrícolas o no forestales. No obstante, dado que la tasa de captura de carbono varía según las zonas climáticas y los tipos de formaciones vegetales, se debe tener en cuenta a la hora de elegir el lugar y la forma de repoblar para que su efecto mitigador sea el máximo posible (Cunningham et al., 2015).

En el caso de tener el objetivo de capturar carbono para compensación de emisiones de GEI, se deberá anteponer la gestión activa (repoblación) a la pasiva (regeneración natural). Asimismo, las transiciones de terrenos no forestales a forestales serán priorizadas ante las transiciones de terrenos agrícolas por la diferencia del aumento del potencial de captura (Nave et al., 2018).

Se ha observado que existen estudios de sostenibilidad de las actividades forestales necesarias para la optimización de la producción de masas destinadas al aprovechamiento forestal (Lippke et al., 2011).. No obstante, las emisiones producidas durante el propio proceso de repoblación no se incluyen, tanto en los casos con objetivos de aprovechamiento, como en los casos de repoblaciones destinadas a la compensación de emisiones. De ahí surge la justificación y el interés de este trabajo fin de grado.



8. OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE (ODS)

Como se ha mencionado con anterioridad, la preocupación por el cambio climático ha dado lugar a diferentes acuerdos internacionales para proponer y comprometerse a cumplir objetivos y metas con respecto a este impacto ambiental. El último evento significativo teniendo en cuenta la cantidad de estados participantes y la ambición de sus metas es el Acuerdo de París, aprobado en 2015, que pretende reforzar la respuesta mundial hacia el inminente cambio climático de tal forma que se evite superar un incremento de 2 °C en la temperatura media del planeta con respecto a la temperatura media preindustrial.

La ONU materializó el Acuerdo de París en la Agenda 2030 de Objetivos de Desarrollo Sostenible, adoptada por los líderes mundiales en el año 2015 (ONU, 2019). En dicha agenda se marcan diferentes objetivos globales para erradicar la pobreza, proteger el planeta y asegurar la prosperidad para todos. Uno de dichos objetivos, el número 13, llamado *acción por el clima*, incluye metas para luchar y adaptarse al cambio climático. La Unión Europea ha creado el Pacto Verde Europeo ("Un Pacto Verde Europeo", 2020) entorno a esta acción por el clima, que incluye medidas que pretenden desde disminuir de forma drástica las emisiones de GEI, hasta la conservación del entorno natural.

Como se indica en el epígrafe 4, este Pacto Verde Europeo ("Un Pacto Verde Europeo", 2020) tiene la iniciativa de crear la Ley Europea del Clima (Reglamento (UE) n° 0036/2020), la cual consagra el objetivo de la neutralidad climática para 2050. Para ello, en 2050 las emisiones de GEI deben ser iguales cero o iguales a las remociones de GEI de la atmósfera.

Dada la poca viabilidad de la mitigación de todas las emisiones de GEI, es decir, evitar cualquier emisión de GEI, la posibilidad de cumplir el objetivo de conseguir la neutralidad climática yace principalmente en la aplicación de medidas compensatorias, aquellas que eliminan las emisiones producidas de la atmósfera, para evitar el calentamiento global producido por las emisiones de GEI.

Tal y como se ha indicado en los epígrafes anteriores, la repoblación forestal es una medida compensatoria de gran potencial, dado que crea o mantiene redes de sumideros (masas forestales) que eliminan las emisiones de la atmósfera. Incide pues de manera directa sobre el ya mencionado ODS 13. Pero, no solo son una herramienta para alcanzar la neutralidad climática, sino que también facilitan el cumplimiento de otras metas de diferentes ODS, de manera directa o indirecta, tal y como se indica en la a continuación:

8.1 ODS 8: TRABAJO DECENTE Y CRECIMIENTO ECONÓMICO.

Según el Informe Anual de Indicadores: Agricultura, Pesca, Alimentación y Medio Ambiente (MAPA, 2017), en tal año existían 13 398 hectáreas sin utilizar para uso agrícola, forestal, pesca, servicios, residencial, producción primaria o usos de impacto ambiental.

Así pues, la forestación de este territorio supondría un aprovechamiento eficiente de los recursos, y proporcionaría un crecimiento en la economía al crear puestos de trabajo (tanto joven como más experimentado) para su realización, la cual no produce degradación del medio ambiente, sino al contrario, contribuye a su mantenimiento.

Por tanto, las repoblaciones forestales de manera concreta tienen el potencial de facilitar alcanzar la **meta 8.4** "mejorar progresivamente, hasta 2030, la producción y el consumo eficientes de los recursos mundiales y procurar desvincular el crecimiento económico de la degradación del medio ambiente".



UNIVERSIDAD
POLITÉCNICA
DE MADRID



8.2 ODS 11: CIUDADES Y COMUNIDADES SOSTENIBLES

Las absorciones potenciales de las masas forestales creadas por las repoblaciones, ya sea por entidades privadas como públicas, hace que el impacto negativo ambiental respecto al cambio climático atribuible al consumo y las actividades de la población se disminuya al poder compensar los GEI emitidos por la producción de los productos consumidos o las actividades realizadas. De esta manera, los ayuntamientos y otras instituciones públicas de las ciudades estarían compensando su impacto respecto al cambio climático.

Por tanto, las repoblaciones forestales también facilitarían el cumplimiento de la **meta 11.6** “hasta 2030, reducir el impacto ambiental negativo per cápita de las ciudades” y la **meta 11.b** “aumentar considerablemente el número de ciudades y asentamientos humanos que adoptan e implementan políticas y planes integrados para promover la inclusión, el uso eficiente de los recursos, la mitigación del cambio climático y la adaptación a él”.

8.3 ODS 12: PRODUCCIÓN Y CONSUMO RESPONSABLE

Asimismo, las repoblaciones forestales suponen un uso eficiente de los recursos naturales, al establecer un uso productivo o recreativo en terreno no utilizado.

De forma añadida, realizar repoblaciones forestales es una práctica sostenible que se puede integrar en los informes de sostenibilidad de las empresas.

Por tanto, las repoblaciones forestales facilitarían el cumplimiento de la **meta 12.2** “hasta 2030, lograr la gestión sostenible y el uso eficiente de los recursos naturales” y la **meta 12.6** “alentar a las empresas a que adopten prácticas sostenibles e incorporen información sobre la sostenibilidad en su ciclo de presentación de informes”.

8.4 ODS 13: ACCIÓN POR EL CLIMA

Las repoblaciones forestales amortiguan el impacto del calentamiento global, dando la oportunidad a que el desarrollo de medidas de mitigación efectivas se alargue en el tiempo.

La Ley Europea del Clima tiene como prioridad la aplicación local de las medidas, por lo que España ha trasladado a su propia legislación que incluye las repoblaciones forestales como medidas compensatorias.

Por tanto, las repoblaciones forestales facilitarían de manera directa el cumplimiento de la **meta 13.1** “fortalecer la resiliencia y la capacidad de adaptación a los riesgos relacionados con el clima y los desastres naturales en todos los países” y la **meta 13.2** “incorporar medidas relativas al cambio climático en las políticas, estrategias y planes nacionales”.

8.5 ODS 15: VIDA DE ECOSISTEMAS TERRESTRES

Las reforestaciones también cumplen un papel en la conservación de los ecosistemas dado que recuperan masas forestales degradadas o destruidas. Asimismo, son una herramienta para luchar contra la deforestación y desertificación.

Por tanto, las repoblaciones forestales también facilitarían de manera directa el cumplimiento de la **meta 15.1** “velar por la conservación, el restablecimiento y el uso sostenible de los ecosistemas terrestres”, la **meta 15.2** “poner fin a la deforestación y recuperar los bosques degradados” y la **meta 15.3** “luchar contra la desertificación, rehabilitar las tierras y los suelos degradados”.



9. DESCRIPCIÓN Y JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO

Partiendo del Acuerdo de París, que expresa de forma específica el tipo de actuaciones que se deben hacer para luchar contra el cambio climático y alcanzar las metas de la Agenda 2030, y coincidiendo con el MITECO ("Mitigación: políticas y medidas", 2020), las repoblaciones forestales son una herramienta recomendada y aceptada para la compensación de la HC.

No obstante, se ha comprobado que las emisiones de GEI producidas por el propio proceso repoblador no son tenidas en cuenta a la hora de incluir la creación o recuperación de masas forestales en los balances de carbono. Por tanto, este trabajo se justifica en la ausencia de un ACV del proceso repoblador y la necesidad de incluir las emisiones del proceso en los balances de carbono. De esta forma, se aportará conocimiento para aproximar de una forma más adecuada las absorciones disponibles de una masa forestal creada por repoblación con el objetivo de compensar emisiones de GEI. Para ello, se proporciona una herramienta que permite realizar esta mejora de la exactitud de los cálculos de absorciones disponibles de los proyectos de repoblaciones forestales.

Este trabajo se realiza en el ámbito de la Convocatoria de Campus Sostenible UPM 2020, dentro del programa de sostenibilidad RES2+U. No obstante, su objetivo es más amplio, al poder aplicarse esta herramienta a cualquier repoblación. Sus resultados podrían incluirse en herramientas oficiales para el cálculo de las absorciones de los proyectos como en nuestro país es el Registro de Huella de Carbono, o para proyectos no registrados. El trabajo se ha dividido en los siguientes capítulos, que incluyen la siguiente información:

- *Metodología*: se proporciona de forma resumida los pasos a seguir para realizar la cuantificación de HC de acuerdo con la metodología establecida en la normativa ISO mencionadas, en base al análisis de ciclo de vida, de tal forma que se facilite cumplir el procedimiento a seguir.
- *Materiales*: incluye la primera fase del análisis de ciclo de vida, la definición del alcance y el sistema, y una parte de la segunda fase del ACV, el inventario de los datos. En la primera fase se identifican las actividades que se deben incluir en la cuantificación de la HC y en la segunda fase se recogen los datos necesarios para calcular la cuantificación.
- *Resultados*: consta de dos partes, el diseño del método de cálculo y la aplicación de este. La primera parte se corresponde con los resultados según los objetivos del trabajo, pero constituyen una parte de la fase del inventario del ACV. Este diseño de método de cálculo se trata de la creación de un conjunto de fórmulas para definir el método de cálculo. La aplicación del método de cálculo se ha realizado para demostrar su funcionamiento y proporcionar cuantificaciones ejemplo, que se utilizarán para realizar la fase del ACV correspondiente a la evaluación de impacto.
- *Discusión*: correspondiente a la fase de interpretación del ACV. Consta de varias tareas: análisis de los resultados de las cuantificaciones ejemplo; evaluación de la rentabilidad del proceso repoblador respecto a las absorciones de las repoblaciones; identificación de limitaciones y propuesta de mejoras.
- *Conclusión*: se indican los aspectos más importantes observados durante la realización del trabajo respecto a los objetivos, que se recogen en el apartado siguiente.



Asimismo, se han elaborado una serie de anexos, que son los siguientes:

- *Anexo 1:* conjunto de tablas que describen las características de los inventarios o fuentes utilizadas para la elección de los factores de emisiones.
- *Anexo 2:* conjunto de tablas que desglosan las emisiones GEI de los factores de emisiones seleccionados.
- *Anexo 3:* tablas que recogen las variables utilizadas en el método de cálculo diseñado, especificando las unidades y el origen.
- *Anexo 4:* conjunto de tablas que caracterizan las actividades forestales recogidas en las tarifas TRAGSA que se utilizan para elaborar parte del Excel de cuantificación de HC.
- *Anexo 5:* manual y explicación del funcionamiento del programa Easycargo ejemplificado con los casos concretos de las simulaciones realizadas para la aplicación de resultados.
- *Anexo 6:* vínculos del Excel de cuantificación de HC modelo y con los resultados para cada repoblación ejemplo.
- *Otros anexos:* por cuestiones de requisitos del TFG, se incluye el informe ejecutivo y el póster. También se ha dedicado un anexo especial de agradecimientos.

10. OBJETIVOS

De acuerdo con los apartados anteriores, el objetivo principal de este trabajo es facilitar la cuantificación de la huella de carbono de las repoblaciones basándose en la metodología de ACV para mejorar la exactitud de los balances de carbono de esta actividad. Para ello, se deben alcanzar los siguientes objetivos secundarios:

- Definir el ciclo de vida de la repoblación.
- Identificar actividades emisoras de GEI.
- Identificar las fuentes para la recopilación de datos sobre emisiones de GEI.

Para cumplir el objetivo principal se deberá diseñar un método de cálculo detallado que se pueda aplicar a cualquier tipo de repoblación forestal y evaluar así el impacto que supone el proceso repoblador y su rentabilidad respecto a las absorciones estimadas de la masa forestal creada.



11. ANTECEDENTES

Los estudios relacionados con el ACV de las repoblaciones forestales son escasos. Por ello ha sido necesario identificar y delimitar cada uno de los procesos que intervienen en las repoblaciones forestales.

En relación con los materiales que se utilizan en las repoblaciones, existe un estudio específico de ACV de los tubos protectores realizado por Arnold & Alston (2012) en el cual determinan los materiales necesarios para producirlos, los efectos de su utilización en la supervivencia de la plántula, y las diferencias de los impactos que se tienen en cuenta en el ACV entre distintos tipos de gestión forestal.

Por otro lado, en Muñoz Rubio (2018) se cuantifica la huella de carbono de la producción de planta en vivero con calefactor, y cuantifica las emisiones de limitados escenarios de trabajos forestales de forma empírica, es decir, realizando mediciones en el sitio y utilizando los datos proporcionados por los técnicos que realizaron los trabajos forestales.

En cambio, apenas se han encontrado referencias sobre las emisiones del proceso repoblador, los materiales utilizados en ellos, y la maquinaria forestal, lo cual contrasta con la abundante disponibilidad de información sobre la capacidad de los ecosistemas forestales de secuestrar carbono y su relación con el cambio climático (Pardos Carrión, 2010; Liu et al., 2018; y otros)

Esta ausencia de antecedentes en las actividades repobladoras ha hecho de este trabajo fin de grado una tarea innovadora y de alto interés para el sector forestal.



METODOLOGÍA Y MATERIALES

En este capítulo se procede a la explicación de la metodología seguida en el desarrollo de este proyecto, correspondiente a la propuesta por las normas ISO 14040:2006 y ISO 14044:2006 de análisis de ciclo de vida. No obstante, dado que el enfoque del trabajo es el impacto sobre el cambio climático, se propone utilizar la Especificación Técnica ISO/TS 14067:2018 “Gases de efecto invernadero -Huella de carbono de productos-Requisitos y directrices para cuantificación”, que sigue los mismos principios que las normas mencionadas.

El ACV se trata de una recopilación y evaluación de las entradas, salidas e impactos ambientales potenciales de un sistema del producto a través de todas las etapas de su vida, permitiendo identificar las oportunidades para mejorar el impacto ambiental de los productos con una sensibilidad correspondiente a las actividades (ISO, 2006). Las etapas del ACV se corresponden con las siguientes: definición del objetivo y el alcance; análisis del inventario; evaluación del impacto; y la interpretación.

Para construir el discurso del análisis, se deben cumplir los siguientes principios (ISO, 2006):

- I. *Perspectiva del ciclo de vida:* se deben tener en cuenta todas las etapas del ciclo de vida de un producto, que incluyen la adquisición de materia prima, producción, uso y tratamiento de residuos al final de la vida útil.
- II. *Enfoque relativo:* se debe estructurar la cuantificación en torno a una unidad funcional para calcular los resultados de forma relativa a esta.
- III. *Enfoque iterativo:* una vez finalizadas las cuatro fases del análisis de ciclo de vida (definición de objetivo y alcance, análisis de inventario de ciclo de vida, evaluación del impacto de ciclo de vida e interpretación), se deben reevaluar continuamente los resultados para perfeccionar el estudio.
- IV. *Enfoque científico:* basar las decisiones en ciencias naturales prioritariamente. Se pueden guiar las decisiones por ciencias económicas y sociales, o convenciones válidas en el alcance geográfico del estudio. Los juicios de valor son aceptados para tomar decisiones en caso de que no haya una justificación con base en los enfoques mencionados.
- V. *Relevancia:* los datos y metodologías deben ser apropiados para la evaluación de las emisiones GEI.
- VI. *Integridad:* se deben incluir todas las emisiones y remociones de GEI del sistema del producto de estudio.
- VII. *Consistencia:* aplicar las mismas suposiciones y datos a través de todo el estudio.
- VIII. *Coherencia:* se deben seleccionar metodologías, normas y documentos previamente reconocidos y adoptados para las categorías del producto.
- IX. *Precisión:* la cuantificación debe ser exacta y verificable, evitando el engaño y el sesgo y reducir las incertidumbres.
- X. *Transparencia:* los temas pertinentes se deben tratar de forma abierta, exhaustiva y entendibles. Además, se debe revelar las suposiciones, explicando cada estimación y su significado, e indicar los métodos de cálculo.
- XI. *Evitar doble contabilidad:* se deben evitar la asignación de emisiones y remociones de GEI que ya hayan sido tomadas en cuenta dentro del sistema.
- XII. *Participación:* aplicar proceso abierto y participativo con partes interesadas.
- XIII. *Equidad:* esclarecer en la comunicación de la huella de carbono que sólo se evalúa el impacto del cambio climático y no implica superioridad ambiental global.

Debido al principio del enfoque iterativo de la metodología, las fases no tienen una relación secuencial lineal, sino que la interpretación se realiza paralelamente a las otras tres fases para asegurar unos resultados óptimos y más representativos de la realidad del momento en el que se aplique. La relación entre las fases se muestra en la Ilustración 1.

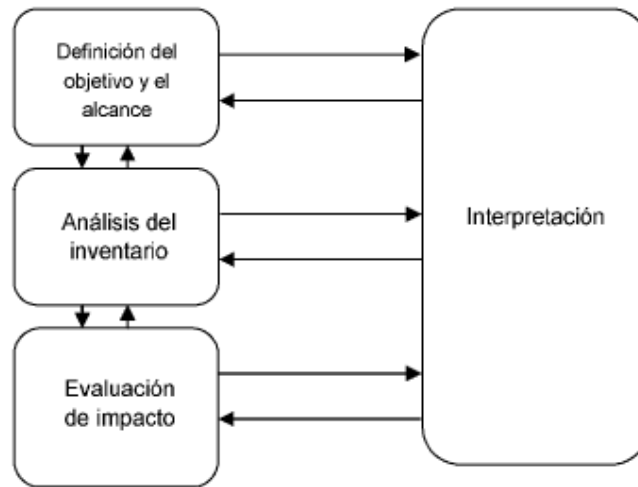


Ilustración 1. Marco de referencia de un ACV. **Fuente:** ISO, 2006.

Antes de proceder a la explicación de cada uno de los puntos de la norma, se considera conveniente aclarar que, debido a los objetivos y características del TFG, la metodología descrita a continuación no se va a aplicar fielmente, sino que servirá como guía para proporcionar los materiales suficientes para realizar una cuantificación de HC de acuerdo con la Especificación Técnica ISO/TS 14067:2018 conforme a los principios de las normas ISO 14040:2006 y ISO 14044:2006



1. DEFINICIÓN DE OBJETIVO Y ALCANCE

A la hora de realizar la cuantificación de HC, se debe evitar la ambigüedad. Esto se hace definiendo el objetivo de la cuantificación y el alcance de esta.

1.1 DEFINICIÓN DEL OBJETIVO

El objetivo de una cuantificación de HC es calcular el impacto total de un producto o servicio contabilizando las emisiones y eliminaciones de GEI que tienen lugar durante su ciclo de vida, para poder tanto identificar las actividades a mejorar como categorizar el producto o servicio en un contexto de impacto ambiental.

1.2 DEFINICIÓN DEL ALCANCE

La definición del alcance de una cuantificación de HC es un proceso complejo que consiste en esclarecer los siguientes apartados.

1.2.1 SISTEMA PRODUCTO DE ESTUDIO

Se establecen las funciones del sistema producto tras haberlo definido.

1.2.2 UNIDAD FUNCIONAL

Se trata de una expresión medible de producto para la cual se vaya a calcular la HC; por ejemplo, una unidad, una tonelada del producto o una hectárea. Es importante dado que es la referencia que relaciona todas las entradas y salidas de los procesos unitarios.

1.2.3 LÍMITES DEL SISTEMA

Establecer los límites de este sistema para determinar qué procesos unitarios y actividades incluye cada etapa del ciclo de vida, la relación entre ellas y el nivel de detalle con el que se analizarán los procesos unitarios. Todo ello se representará en un mapa de procesos y distintas ilustraciones para cada proceso unitario. Asimismo, se establecerá el contexto geográfico en el que suceda el ciclo de vida del producto o servicio.

1.2.4 PROCEDENCIA Y CALIDAD DE DATOS

En tercer lugar, es necesario determinar las exigencias respecto a los datos, teniendo en cuenta sus características y su tipo. Se recogen a continuación las características que se deben tener en cuenta y la situación de mayor calidad de cada una:

- *Cobertura temporal*: se prefiere una antigüedad mínima posible.
- *Cobertura geográfica*: se prefieren datos originarios del área territorial donde suceden los procesos unitarios.
- *Cobertura tecnológica*: el uso de tecnología única tiene mejor calidad que la mezcla de varias.
- *Precisión*: la varianza de los valores debe ser mínima.
- *Integridad*: la proporción de flujo medido debe ser la máxima posible.
- *Representatividad*: debe conseguirse el mayor reflejo de la realidad posible (incluyendo cobertura geográfica, temporal y tecnológica).
- *Coherencia*: se debe asegurar la aplicación de la metodología lo más uniformemente posible.
- *Reproducibilidad*: cualquier persona debe poder obtener los mismos resultados.



- *Incertidumbre*: debe ser la menor posible.

Los tipos de datos se pueden clasificar como se han listado a continuación, ordenados de mayor calidad a menor calidad:

- *Datos específicos del sitio*: recopilados bajo el control de quien lleva a cabo la cuantificación de huella de carbono.
- *Datos primarios*: aquellos con base en promedios globales o regionales recolectados por organizaciones regionales o internacionales, verificados por terceras partes.
- *Datos secundarios*: obtenidos de fuentes distintas a las anteriores.

1.2.5 LÍMITE DE TIEMPO PARA DATOS

Asimismo, se necesita establecer el límite de tiempo para el cual la cuantificación es representativa. Esto lo determina la naturaleza de los datos utilizados. Los datos primarios suelen tener una validez de un año, a menos que se indique lo contrario. Los datos secundarios tienen un límite de tiempo que depende del producto al que se refiera el dato y el tiempo que tarda la industria en mejorar el producto ambientalmente. Siempre es preferible utilizar datos válidos en el momento de la cuantificación, pero se permite utilizar datos fuera de su periodo de validez si son los de mejor calidad general o no existen otros más modernos.

1.2.6 ETAPA DE USO

Se debe indicar específicamente las condiciones del uso del producto que se incluyen en el sistema.

1.2.7 ETAPA DE TÉRMINO DE VIDA

Se debe indicar específicamente las condiciones del término de vida del producto que se incluyen en el sistema.

1.2.8 PROCEDIMIENTO DE ASIGNACIÓN

En caso de que alguna actividad o proceso unitario sea compartido por varios sistemas o varias etapas, se debe aclarar en cuál de ellas se van a contabilizar. Esta asignación se puede hacer dividiendo el proceso unitario o ampliando el alcance de una etapa o sistema para englobarlo completamente.

1.2.9 EMISIONES Y ELIMINACIONES GEI ESPECÍFICAS

En esta categoría se incluyen aquellas producidas por lo siguiente:

- Tratamiento de carbón fósil y biogénico.
- Tratamiento de electricidad.
- Cambio de uso de suelo.
- Cambio de carbono contenido en el suelo.
- Almacenamiento de carbono en productos.
- Ganado y fertilizantes.
- Aeronaves de transporte.

Se deben establecer requisitos específicos para aquellas que estén incluidas en el sistema de tal forma que se asegure la coherencia y reproducibilidad evitando que se utilicen distintos enfoques a la hora de comparar resultados.



1.2.10 LIMITACIONES DEL ESTUDIO

Según los datos utilizados y los límites del sistema, pueden producirse limitaciones respecto la realidad del sistema producto definido, que deben señalarse para tenerlas en cuenta a la hora de utilizar los resultados obtenidos. Asimismo, la propia metodología tiene unas limitaciones que se deben tener en cuenta para la interpretación de la cuantificación de la HC. Estas limitaciones son las siguientes:

- *Enfoque en un solo tema ambiental;* el hecho de que el cambio climático sea el único impacto ambiental que se analiza, impide que se pueda utilizar como justificante de superioridad ambiental de un producto, ya que para ello se deben analizar muchos más aspectos.
- *Dificultad de selección de datos;* el establecimiento de unos mínimos de calidad en el enfoque temporal y geográfico hace que la cuantificación no sea exacta en muchas situaciones, por lo que hay que saber utilizarlas con cautela.



2. ANÁLISIS DEL INVENTARIO DEL CICLO DE VIDA

Esta fase de la cuantificación implica identificar los datos necesarios que se deben recopilar para poder establecer procedimientos de cálculo de tal manera que se definan cualitativa y cuantitativamente las entradas y salidas de cada proceso unitario del ciclo de vida. Tiene tres apartados.

2.1 VALIDACIÓN DE DATOS

En este apartado se debe incluir una descripción detallada de los datos para ver que cumplen con los requisitos de calidad y que se asegure una coherencia y uniformidad en todos los cálculos.

2.2 RECOPIACIÓN DE DATOS

A continuación, en este apartado se deben identificar las entradas y salidas cada proceso unitario y sus actividades, incluyendo energía, materia prima, productos, residuos y emisiones. Esto se hace a partir de los datos recopilados, que cuantifican las entradas de cada proceso unitario.

2.3 SELECCIÓN DEL MÉTODO DE CÁLCULO

Por último, se debe establecer el flujo unitario de cada proceso y la forma en la que se relacionan con la unidad funcional.

3. EVALUACIÓN DEL IMPACTO DEL CICLO DE VIDA

El impacto potencial al cambio climático de cada GEI lo cuantifica el Potencial de Calentamiento Global (PCG) de 100 años proporcionado por el IPCC, expresado en kilogramos de CO₂ equivalente por kg del GEI correspondiente. Se deben usar los valores más actuales del PCG (ISO, 2013).

4. INTERPRETACIÓN DEL CICLO DE VIDA

Esta última fase del ACV comprende: la identificación de los procesos con mayor aporte al impacto del cambio climático debido a sus emisiones GEI; evaluar la integridad, sensibilidad y coherencia del estudio; y unas conclusiones, limitaciones y recomendaciones respecto a este. Las conclusiones, limitaciones y recomendaciones deben realizarse acorde al objetivo y alcance de la cuantificación de HC ejecutada.



APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA

En este capítulo se procede a la aplicación de la metodología, descrita en el capítulo anterior, para la cuantificación de HC de las repoblaciones forestales de acuerdo con la perspectiva de ACV. La definición de objetivos y alcance de estudio se lleva a cabo siguiendo los apartados establecidos en la metodología, ya que son necesarios para obtener los resultados buscados en este TFG. No obstante, es necesario realizar modificaciones de la estructura de la metodología para cumplir con los objetivos del trabajo de fin de grado. En el análisis de inventario del ciclo de vida, al que se ha denominado “elaboración del inventario de datos maestros”, se ha adaptado para explicar cómo se ha realizado la recopilación y validación de los datos necesarios para elaborar el método de cálculo que se explica en capítulo 4.

1. DEFINICIÓN DE OBJETIVOS Y ALCANCE DE ESTUDIO

1.1 DEFINICIÓN DEL OBJETIVO

El objetivo es realizar un desarrollo matemático que permita la cuantificación de HC de la repoblación forestal, de acuerdo con los principios del ACV. Para ello, será necesaria la descripción de procesos unitarios y las actividades para llevar a cabo cualquier repoblación forestal. De esta forma, se consiguen dos metas concretas e importantes. La primera es el desarrollo de un inventario de todas las fuentes de datos necesarios para la cuantificación de las emisiones de GEI generadas en el proceso de repoblación forestal y, la segunda es la incorporación de las emisiones de la repoblación en los balances de carbono, como un mecanismo de motivación en la compensación de emisiones a través del incremento de las masas forestales por repoblación.

1.2 DEFINICIÓN DEL ALCANCE

1.2.1 SISTEMA PRODUCTO DE ESTUDIO

La perspectiva de ACV para un producto tiene en cuenta cinco etapas: adquisición de materia prima, producción, distribución y transporte, uso y mantenimiento, y tratamiento de residuos al final de la vida útil. Tal y como se muestra definido el sistema de producción en la Ilustración 2, al tratarse de un servicio, la etapa de producción consiste en el proceso de la repoblación forestal, y la etapa de distribución es inexistente.

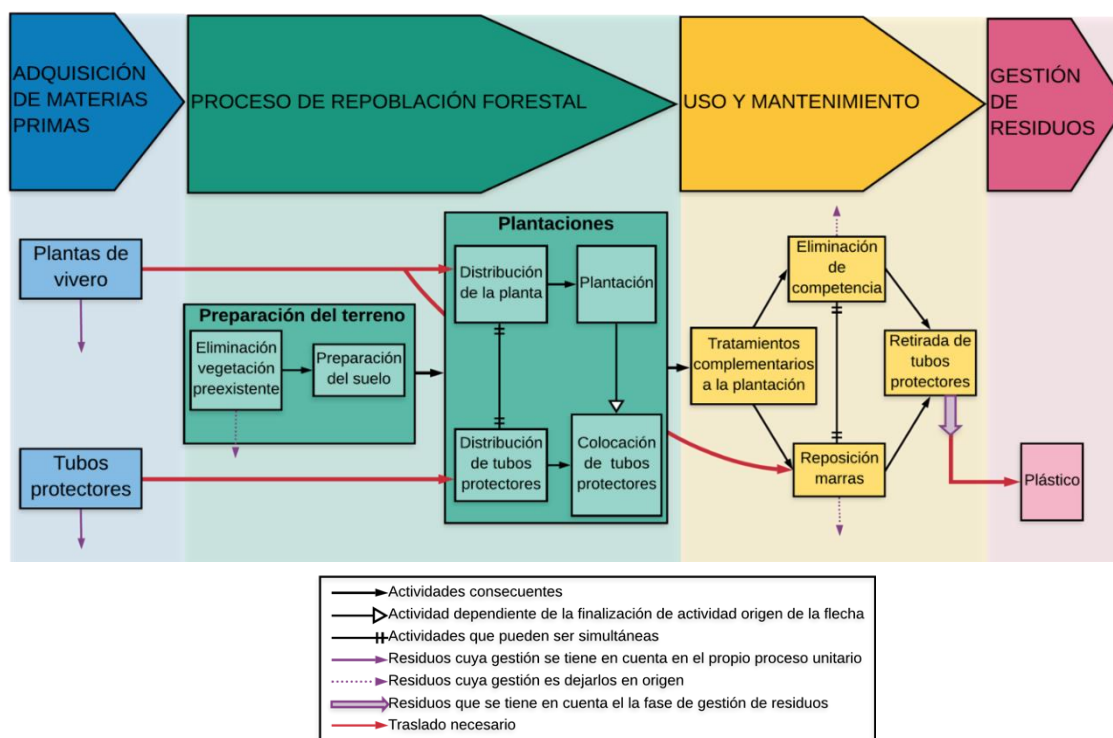


Ilustración 2. Mapa de procesos incluidos en el sistema para el cual se cuantifica la huella de carbono. Fuente: elaboración propia.

1.2.2 UNIDAD FUNCIONAL

La unidad funcional es una hectárea de rodal (ha) en la que se realiza una repoblación forestal de características variables y seleccionables por el repoblador.

1.2.3 LÍMITES DEL SISTEMA

Las fases típicas de un análisis de ciclo de vida son la adquisición de materiales, la fabricación del producto, la distribución, el uso y mantenimiento, y la gestión de residuos. En este caso, la fabricación del producto sería el proceso de repoblación, y por tanto no se tiene en cuenta la etapa de transporte y distribución. En cuanto a los límites de cada etapa:



1.2.3.1 Adquisición de materia prima

Esta etapa tiene en cuenta que la materia prima necesaria para la repoblación son las plantas de vivero y los tubos protectores. De forma general, los límites deberían incluir en el sistema lo siguiente:

- Obtención de recursos para la producción y empaquetado de la materia prima.
- Transporte de los recursos al lugar de producción y empaquetado.
- Producción de la materia prima para la repoblación.
- Empaquetado de la materia prima para su transporte.

Las plantas de vivero que se tienen en cuenta en el sistema son producidas en bandeja forestal, dejando fuera del sistema las producidas a raíz desnuda.

Los tubos protectores no solo evitan que las plantas de una repoblación forestal sean comidas o destruidas por animales o humanos descuidados en el tiempo más cercano a su plantación, sino que también producen un microclima favorable, protegen contra el viento, pesticidas, hierbas y reduce el uso de agua gracias al microclima creado. Todo ello hace que la supervivencia de la planta joven y la producción de madera se incrementen. Esto está comprobado por Arnold & Alston (2012) para distintas especies de *Quercus* y un tipo de abeto. La reducción del uso de agua es significativa, especialmente para el abeto, que pasa de 592 a 136 m³. En cambio, los juníperos no requieren de los tubos protectores para asegurar su supervivencia, que es siempre máxima.

Este aumento en la tasa de supervivencia hace posible reducir el número de plántulas necesarias para conseguir la densidad deseada. Debido a la disminución del número de plántulas necesarias para alcanzar la densidad objetivo al utilizar los tubos protectores, su uso es interesante para el cálculo de la huella de carbono. A pesar de añadir las emisiones por la producción de los tubos protectores, las emisiones por la producción de plantas van a ser menores al reducir el número de plantas necesarias y con ello el uso de agua, que también tiene impacto (Arnold & Alston, 2012).

A razón de la tendencia actual de implementar su uso por su comprobado efecto positivo en la tasa de supervivencia de las plántulas, se tendrán en cuenta en el sistema para el cálculo de la huella de carbono. Otros elementos como mallas y tutores no se tienen en cuenta en el sistema por la ausencia de datos sobre su producción y emisiones GEI relacionadas, pero en el caso de utilizarse deberían ser consideradas.

1.2.3.2 Repoblación forestal

Esta etapa tiene en cuenta los siguientes procesos:

- Traslado de la materia prima al lugar que se va a repoblar.
- Traslado de personal y maquinaria al lugar que se va a repoblar.
- Preparación del terreno, que incluye la eliminación de vegetación preexistente y el tratamiento del suelo.
- Plantación, que incluye la distribución e instalación de la planta y el tubo protector.

Los límites del sistema deben englobar en los procesos de traslado la producción y término de vida de los vehículos como parte alícuotas a la vida útil utilizada, además de su uso. Asimismo, en caso de que para la realización de la preparación del terreno o la plantación se requiera usar maquinaria, se incluyen la producción y término de vida de las máquinas como parte alícuota a la vida útil utilizada, además de su uso.



Por último, ante la infinidad de casuística y posibles actuaciones dentro de una repoblación forestal, las actividades incluidas en el sistema vienen definidas por las tarifas de TRAGSA (2020).

1.2.3.3 *Uso y mantenimiento*

Esta etapa tiene en cuenta los siguientes procesos:

- Traslado de materia prima al lugar repoblado.
- Traslado de personal y maquinaria al lugar repoblado.
- Cuidados culturales a la plantación, incluyendo alcorque, castilletes y aporte de abono, eliminación de la competencia por desbroces selectivos, reposición de marras y retirada de tubos protectores.

Al igual que el proceso de repoblación, se van a aplicar los mismos límites del sistema respecto a la producción, uso y término de vida de los vehículos y la maquinaria, y los procesos están definidos por las tarifas de TRAGSA (2020).

Los cuidados culturales se deben realizar inmediatamente después de la repoblación. Para el resto de los tratamientos de mantenimiento, se establece un límite de 5 años, que es cuando se retiran los tubos protectores. La reposición de marras se puede realizar una vez al año con eliminación de competencia siendo simultánea o no, pero con frecuencia similar.

1.2.3.4 *Gestión de residuos*

Esta etapa incluye el traslado de los residuos de tubo protector recogidos en la etapa de uso y mantenimiento al centro de tratamiento de residuos. Asimismo, incluye las emisiones del tratamiento de estos residuos.

Los límites del traslado son los mismos establecidos para la repoblación y uso y mantenimiento respecto a la producción, uso y término de vida de los vehículos.

1.2.4 PROCEDENCIA Y CALIDAD DE DATOS

Para este trabajo se han utilizado varias fuentes de datos, las cuales se recogen en la Tabla 4, junto con una descripción de la fuente, el tipo de dato que proporcionan y los datos obtenidos en cada una de ellas.

Tabla 4. Fuentes de datos utilizados en el trabajo y análisis de calidad. **Fuente:** elaboración propia.

Fuente	Descripción de fuente	Tipo de dato	Datos obtenidos
Ecoinvent	Base de datos suiza que proporciona análisis de ciclo de vida consistentes y transparentes, bien documentados, para miles de productos.	Primario	Emisiones de procesos de fabricación y factores de emisión de traslados
MITECO/ UK Government	Emisores de documentación para regular el cómputo de emisiones y huella de carbono.	Primario	Factores de emisiones de combustibles y de mix de electricidad
TRAGSA (público)	Empresa pública técnica de referencia de España.	Secundario	Rendimientos de maquinaria y personal para actividades de repoblación y uso y mantenimiento
TRAGSA (comunicación personal)		Secundario	Consumos horarios de maquinaria utilizada en actividades

En la Tabla 5 se marcan con una equis cuando se cumplen las condiciones óptimas de las características descritas en el apartado 1.2.4 de la metodología. Dado que algunas fuentes proporcionan varios datos, unos pueden cumplir con las características y otras no. Esta situación se expresará con una equis entre paréntesis y se explicará en el inventario.

Tabla 5. Análisis de calidad de datos de las fuentes utilizadas. Marcando con X las que se cumplen, y con (X) las que se cumplen en ciertos casos. **Fuente:** elaboración propia.

Fuente	Ecoinvent	MITECO/UK	TRAGSA (público)	TRAGSA (contacto directo)
Cobertura temporal	(X)	X	X	X
Cobertura geográfica	(X)	X	X	X
Cobertura tecnológica	X	X	X	X
Precisión	X	X	X	
Integridad	X	X	X	
Representatividad	(X)	X	X	X
Coherencia	X	X	X	X
Reproducibilidad	X			
Incertidumbre	X	X		

1.2.5 LÍMITE DE TIEMPO PARA DATOS

El límite temporal de los datos es distinto para cada uno de ellos:

- Ecoinvent: periodo de validez especificado.
- MITECO/UK: validez anual.
- TRAGSA: validez hasta la renovación de las tarifas de trabajos forestales, que suelen mejorar los cálculos de rendimiento e incorporar avances en maquinaria y otros elementos.

1.2.6 ETAPA DE USO

Tras delimitar la etapa dentro del sistema, es necesario aclarar que se ha decidido incluir los procesos mencionados como uso y mantenimiento, dado que el objetivo es obtener la unidad referencial, la cual requiere estas tareas de mantenimiento para asegurar un resultado exitoso.

Los tratamientos complementarios a la plantación (aporte de abono, castilletes, alcorques) deben llevarse a cabo inmediatamente después de la repoblación. Por otro lado, la reposición de marras y el desbroce de competencia se realizan pasado un tiempo (normalmente un año) para que su efecto tenga resultados relevantes. Estas actividades pueden realizarse varias veces dado que el límite temporal del sistema es de cinco años, que es el momento en el que se retiran los tubos protectores para permitir a la planta crecer libremente y no contaminar el bosque.

1.2.7 ETAPA DE TÉRMINO DE VIDA

Esta etapa empieza cuando el producto usado está listo para su desecho. Al tratarse de un servicio, que además se pretende mantener a largo plazo y no es desechable, no se puede considerar que tenga una etapa de término de vida. No obstante, existen subproductos que sí que tienen etapa de término de vida, por lo que se han considerado como residuos en la Ilustración 2.

Hay tres tipos de residuos que se consideran en este trabajo:

- Material de empaquetado para el transporte de la materia prima.



- Restos orgánicos de desbroces y reposición de marras.
- Tubos protectores retirados en la etapa de uso y mantenimiento.

El tratamiento de los primeros se tiene en cuenta dentro del proceso unitario de adquisición de materia prima correspondiente, ya que vienen integrados en los datos de emisiones de los inventarios.

El tratamiento de los restos orgánicos considerado es dejarlos en origen para que aporten materia orgánica y favorezcan el establecimiento de la masa forestal. Por tanto, no produce emisiones GEI al no necesitar trasladarlos.

El tercer caso es el que sí requiere un tratamiento en la etapa de término de vida, que puede ser reciclaje (abierto o cerrado), deposición en vertedero, o conversión energética (incineración) de los tubos, para el material por el que están constituidos, que es el plástico (polipropileno).

Por otro lado, no se incluyen en esta etapa las emisiones de término de vida de los vehículos y maquinaria dado que no son usados exclusivamente en la repoblación forestal para la cual se cuantifica la HC, sino que son subcontratados a otras empresas que los seguirán utilizándose en otras obras, por lo que únicamente se considera como una parte alícuota del uso de estas.

1.2.8 EMISIONES Y REMOCIONES DE GEI ESPECÍFICAS

En los datos de emisiones de los inventarios de los procesos unitarios se incluyen las siguientes emisiones específicas: surgidas de carbón fósil y biogénico; surgidas por el uso de electricidad; surgidas por el cambio de uso de suelo; y surgidas por el almacenamiento de carbono en productos.

Es importante diferenciar estas emisiones y remociones de GEI específicas frente a los efectos de la repoblación forestal, que provoca un cambio en el uso de suelo, en el contenido de carbono del suelo, y almacenan carbono a lo largo del tiempo. Estos flujos de carbono son sujeto de otro tipo de estudio que no se recoge en este trabajo, pero que es necesario para realizar las medidas de compensación.

Por otro lado, en los procesos unitarios también se excluirán las emisiones por construcción de las infraestructuras y las emisiones a largo plazo.

1.2.9 LIMITACIONES DEL ESTUDIO

Las limitaciones del estudio tienen raíz en varios aspectos:

- Las actividades forestales para la repoblación y el uso y mantenimiento están limitadas por las tarifas de TRAGSA.
- Las diferencias de los límites del sistema de los inventarios utilizados como datos provocan cierta inconsistencia. Estas diferencias se pueden apreciar en el Anexo 1.

2. ELABORACIÓN DEL INVENTARIO DE DATOS MAESTROS

En este punto, se procede a la explicación de la recopilación y validación de datos maestros, es decir, los datos necesarios para el desarrollo del modelo matemático explicado detalladamente en el capítulo siguiente de este documento.

2.1 VALIDACIÓN DE DATOS

Las fuentes de los datos se han reflejado en la Tabla 4 junto con el tipo de datos que se han obtenido de cada una. Dado que existen distintos tipos de datos proporcionados por cada fuente, es necesario validar la calidad de cada uno. Esto se hace a través de una descripción y una calificación de la calidad para cada inventario, factor de emisión o conjunto de datos en formato de tablas, recogidas en el Anexo 1.

2.2 RECOPIACIÓN DE DATOS

Para todos los datos obtenidos de Ecoinvent se aplican los criterios de no incluir las emisiones por las infraestructuras, las emisiones a largo plazo, ni las emisiones de las actividades que representan menos de un 0.1% de las emisiones totales del proceso. Al final del epígrafe se recogerán los factores de emisiones listos para su aplicación directa.

2.2.1 ADQUISICIÓN DE MATERIALES

2.2.1.1 Plantas de vivero

La adquisición de plantas incluye la adquisición de los recursos necesarios para la producción de las plantas y su traslado al lugar de producción de planta, y el empaquetado de la planta para su transporte al lugar de obra. En este caso, el inventario de la producción de planta de Ecoinvent también incluye el desecho de los materiales de empaquetado, por lo que no se contabilizará en la fase de residuos para evitar la doble computación, como se ha aclarado en los límites del sistema.

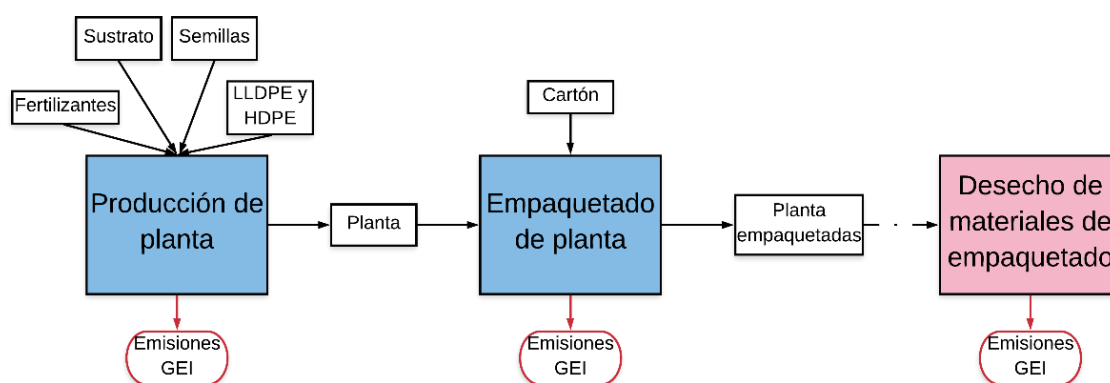


Ilustración 3. Actividades incluidas en el inventario de la producción de planta en vivero de Ecoinvent.

Fuente: elaboración propia.

Las emisiones de GEI producidas por este proceso unitario se recogen en la Tabla 46 en el Anexo 1 expresados en kg CO₂ equivalentes.

2.2.1.2 Tubos protectores

La adquisición de tubos protectores no es un proceso inventariado en la base de datos de Ecoinvent. Para asegurar la coherencia a lo largo del trabajo, se considera que el proceso unitario tiene una estructura similar al inventario de la producción de planta, como se puede ver en la Ilustración 4.

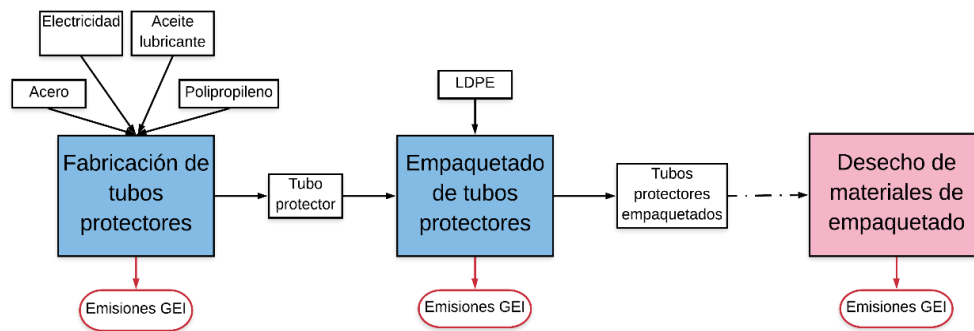


Ilustración 4. Actividades incluidas en la adquisición de materiales de los tubos protectores. **Fuente:** elaboración propia.

Consecuentemente, las emisiones dependerán en este caso de la suma de los inventarios de cada material necesario para fabricar los tubos y empaquetarlos, además de la energía utilizada para ello y las emisiones por el tratamiento de residuos del empaquetado. Gracias al artículo de Arnold & Alston (2012), se conoce la cantidad de los recursos necesarios para la extrusión de los tubos protectores de 60 cm de altura y el material de empaquetado para su transporte, recogido en la Tabla 6. Para el resto de los tamaños, las cantidades de material y, por tanto, el factor de emisión, serán proporcionales a la diferencia de tamaño respecto al tubo de 60 cm de altura.

Tabla 6. Recursos necesarios para la extrusión y empaquetado de una tonelada de tubos protectores. **Fuente:** Arnold & Alston, 2012.

Material	Cantidad	Unidad
Polipropileno	1.00	t
Aceite lubricante	0.15	g
Acero	1.80	g
Electricidad	950.00	kWh
Polietileno de baja densidad	19.5	g

Los desgloses de las emisiones de GEI de cada inventario se recogen en el Anexo 2. Utilizando como referencia las cantidades establecidas en la Tabla 6, se obtiene el factor de emisiones que le corresponde al proceso de la adquisición de tubos protectores. Un resumen de todos los datos necesarios para obtener el factor, y el factor resultante se recogen en la Tabla 7.

Tabla 7. Recolección de los datos necesarios para calcular las emisiones totales del proceso unitario de adquisición de una tonelada de tubos protectores. **Fuente:** elaboración propia con datos de Ecoinvent.

Inventario	Ud	Cantidad	Emisiones unitarias (kg CO ₂ eq/ud)	Emisiones totales (kg CO ₂ eq)
Polipropileno	kg	1 000	1.7858719	1 785.87190000
Aceite lubricante	kg	0.00015	1.0458843	0.00015688
Acero	kg	0.0018	0.4307997	0.00077544
Energía	kWh	950	0.3072000	291.84000000
Producción LDPE	kg	0.0195	1.8637658	0.03634343
Residuos LDPE	t	0.0000195	21.3842000	0.00041699
TOTAL (por t de tubo protector)				2 077.75

2.2.2 PROCESO DE REPOBLACIÓN

Como se ha mostrado en la Ilustración 2, la repoblación forestal está formada por dos procesos: preparación del terreno y plantación. La preparación del terreno consta de dos procesos unitarios que son la eliminación de la vegetación preexistente y el tratamiento de suelo. La plantación se constituye de los procesos unitarios de distribución de la planta, distribución de los tubos protectores, la plantación en sí y la colocación de los tubos. Cada proceso unitario puede tener una o dos actividades consecutivas. Estas actividades se basan en las unidades de obra de las tarifas públicas de TRAGSA. Se considera que la actividad viene definida por variables, cuyas distintas combinaciones producen las modalidades de la actividad. Las variables que definen las modalidades de las actividades se recogen en las tablas de caracterización de las actividades en el Anexo 4.

Las emisiones del proceso de repoblación resultan del sumatorio de las emisiones de cada actividad. El origen de las emisiones depende de si la modalidad de la actividad a realizar es manual o mecanizada, como se muestra en la Ilustración 5. Las actividades en modalidad manual incluyen las emisiones por el traslado de material y el traslado de personal, mientras que la realización de la actividad en sí no produce emisiones GEI. Por el contrario, si son mecanizadas sí que se producen emisiones durante la realización de la actividad, originadas por el uso de la maquinaria (incluyendo parte alícuota de fabricación y término de vida de la máquina), a lo que se añaden las emisiones de los traslados de material, personal y maquinaria.

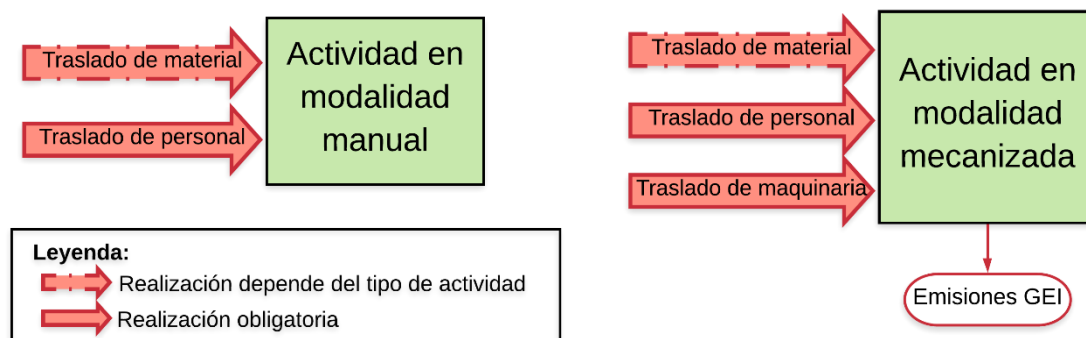


Ilustración 5. Origen de las emisiones GEI según la modalidad de las actividades de la repoblación forestal. En las flechas rojas, actividades cuyas emisiones GEI se contabilizan en la actividad destino. Estas emisiones incluyen las emitidas por el consumo de combustible de los vehículos, y la parte alícuota de las emisiones por producción y término de vida del vehículo. **Fuente:** elaboración propia.

A continuación, se ofrecerán los datos necesarios para calcular las emisiones producidas por los traslados mencionados y por el uso de maquinaria.

Como se ha establecido en los límites del sistema, las emisiones producidas por los traslados deben incluir las originadas en el consumo de combustible y las originadas por su producción y término de vida de forma alícuota a la vida útil utilizada. En este caso, todo ello se considera en los factores de emisiones de transporte utilizados, obtenidos en Ecoinvent.

Existen infinidad de vehículos que se pueden utilizar para realizar los traslados. En este trabajo se propone que el traslado de personal se lleve a cabo en turismos y el traslado de maquinaria en un tráiler que acarrea una góndola (*semi low loader*). En cambio, para el traslado de materiales se propone una variedad de vehículos de mercancías de carretera de los tamaños ofrecidos por una empresa de transporte, que se recogen en la Tabla 8 junto con su clasificación de la Directiva 70/156/CEE y 92/61/CEE.

Tabla 8. Lista de características de los tipos de vehículos de transporte de materiales. **Fuente:** "Reglamento Armonizado Clasificación de Vehículos", 2020; "Flota de camiones de transporte de mercancías", 2020.

Clasificación	Tipo	Características	Volumen (m ³)	MMA (kg)	Medidas (m)		
					l	w	h
N1	V2	Furgón	10.0	1 350	4.20	1.40	1.70
N1	V3	Carrozado	20.0	1 000	4.20	2.12	2.20
N1	V4	Mini-tir	37.5	3 000	6.00	2.50	2.50
N2	V5	Rígido	52.5	8 000	7.50	2.50	2.80
N3	V6	3 ejes	66.5	14 500	9.50	2.50	2.80
N3	V7	Tráiler	97.8	24 000	13.50	2.50	2.90

Las emisiones del traslado producidas por vehículos para mercancías tienen como unidad de referencia la *t km* (tonelada transportada por kilómetro recorrido). Los factores de emisión (kg CO₂ eq/unidad de referencia) varían según el tipo del vehículo. En este sentido, las categorías de Ecoinvent (fuente de los factores de emisión) no coinciden con la clasificación de la Tabla 8. Por ello se recoge una relación entre ambas clasificaciones en la Tabla 9 de tal forma que se sepa qué factor aplicar.

Tabla 9. Relación entre la clasificación de vehículos de Ecoinvent y la tipología de vehículos utilizados en el trabajo, junto con los factores de emisión de Ecoinvent. **Fuente:** "Flota de camiones de transporte de mercancías", 2020.

Clasificación Ecoinvent	Tipología propia	MMA (t)
Vehículo comercial ligero	V2	1.35
	V3	1.00
	V4	3.00
Camión de 7.5-16 t	V5	8.00
	V6	14.50
Camión de 16-32 t	V7	24.00

Los factores de emisión de transporte de mercancía varían según las condiciones de carretera y la proporción de carga máxima ocupada (i.e.: el peso de la carga). Esta variabilidad se puede ver en la Ilustración 6 teniendo en cuenta que las emisiones son directamente proporcionales al uso de combustible.

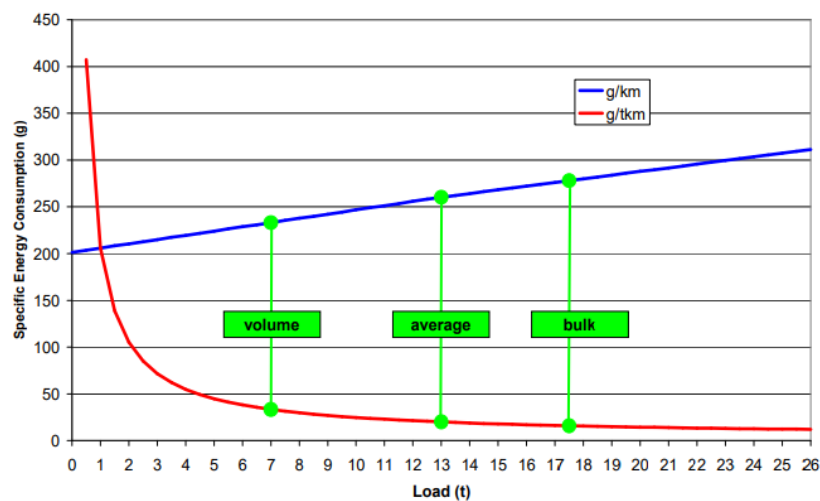


Ilustración 6. Consumo energético expresado en gramos por km o por tonelada kilométrica para un camión cuyo contenedor es de 6 metros de largo dependiendo de su carga. En verde se indica cuando se considera que va con carga vacía (volume), llena (bulk) y media (average). **Fuente:** "Ecological Transport Information Tool for Worldwide Transports", 2020.



Los factores de emisiones han sido calculados para una carga media y condiciones de carretera medias. Estas consideraciones son aceptables dado que la variación del factor de emisiones es muy baja cuando se aumenta el peso entre la media (*average*) y el máximo (*bulk*).

No obstante, como se ha explicado anteriormente, es importante conocer el peso del material a trasladar para aplicar los factores. Esto implica que se deba calcular la cantidad de material que cabe en el vehículo para poder saber el peso que se transporta. La forma más precisa de calcular estas cantidades es utilizar programas de optimización de carga de camiones como *Easycargo*, donde se pueden seleccionar las dimensiones de la mercancía y de los vehículos.

Será una preferencia y un enfoque metodológico optar por trasladar el material en el vehículo más grande y lleno posible, es decir, será preferible trasladar el material en un vehículo tipo V7 lleno antes que en tres vehículos tipo V5 llenos. Esto se basa en un criterio de mínimas emisiones. La justificación se muestra en la Tabla 10 donde, según datos del informe de EcoTransIT (2011) y los cálculos realizados según la Ecuación 1, se comprueba que dos vehículos consumen más que uno que equivale en capacidad a los dos vehículos juntos.

Tabla 10. Comparación de consumo total de combustible entre un vehículo lleno y dos vehículos de mitad de tamaño llenos. **Fuente:** elaboración propia a partir de datos de EcoTransIT, 2011.

Tipo de vehículo	Camión 7.5-12 t	Camión 12-24 t
Peso neto (vehículo más mercancía) (t)	12	24
Número de vehículos	2	1
Consumo energético (g diésel/ tkm)	48	38
Consumo total de diésel (g)	1152	912

$$C_t = MMA \cdot N_V \cdot C_E$$

siendo:

- C_t = consumo total de diésel
- MMA = peso neto
- N_V = número de vehículos
- C_E = consumo energético

Ecuación 1. Consumo total de diésel por un camión para comparación entre tipos de vehículos. **Fuente:** elaboración propia.

2.2.2.1 Traslado de plantas

La planta se traslada en bandejas forestales (no se tendrá en cuenta la opción de raíz desnuda) cuyo tamaño decide el repoblador teniendo en cuenta la especie de planta y su edad. Tanto el tamaño de la bandeja como el de la planta son esenciales para calcular el espacio requerido para poder trasladar el material. Las características de las bandejas forestales ofrecidas por una empresa especializada se recogen en la Tabla 11, y las alturas de las plantas de vivero de las especies reguladas por el BOE más típicamente usadas para las repoblaciones se recogen en la Tabla 12. A partir de estas características se puede conocer el volumen de la mercancía.

Por otro lado, el peso de la mercancía se atribuye principalmente al peso del sustrato, además del de la propia planta y bandeja forestal. Tras haberlo estudiado de forma empírica, se ha determinado un valor medio de relación entre el volumen y el peso del alveolo teniendo en cuenta la planta, el sustrato y el material de la bandeja en condiciones de saturación hídrica. Tras experimentos sobre el peso de las bandejas forestales de distintos tamaños con distintas especies de plantas, se establece que la relación se trata de una densidad de 0.75 g por cada cm³ de volumen de sustrato saturado (J. A. Oliet Palá, comunicación personal, 2020). Se ha aplicado este factor para calcular el peso de cada bandeja forestal recogidas en la Tabla 11.

Tabla 11. Lista de características de los tipos de bandejas forestales. **Fuente:** "Bandejas forestales diseñados a medida", 2020.

Ref	Capacidad alveolo (cm ³)	Medidas (cm)			Alveolos (ud)	Peso (kg)
		Altura	Ancho	Largo		
2000-15	1800	29	61.5	38	15	20.25
1000-18	1000	20	60	34.5	18	13.50
400-32	400	17	53	30	32	9.60
350-28	350	15	53	30	28	7.35
300-45	300	19	53	30	45	10.13
200-45	225	15	53	30	45	7.59
200-60	200	15	53	30	60	9.00
150-60	150	12	53	30	60	6.75

Tabla 12. Especies forestales y su altura según la edad de la plántula. **Fuente:** RD 289/2003, del 7 de marzo.

Especie	1 savia (cm)		2 savias (cm)	
	Intervalo	Media	Intervalo	Media
<i>Pinus canariensis</i>	10-25	17.5	15-35	25.0
<i>Pinus halepensis</i>	8-25	16.5	12-40	26.0
<i>Pinus nigra</i>	8-15	11.5	10-20	15.0
<i>Pinus pinaster</i>	7-30	18.5	15-45	30.0
<i>Pinus pinea</i>	10-30	20.0	15-40	27.5
<i>Pinus sylvestris</i>	8-15	11.5	10-20	15.0
<i>Quercus ilex</i>	8-30	19.0	15-50	32.5
<i>Quercus suber</i>	13-60	36.5	-	-
<i>Pinus uncinata</i>	4	4.0	6	6.0
<i>Quercus faginea</i>	6-30	18.0	10-50	30.0
<i>Quercus pyrenaica</i>	6-30	18.0	10-50	30.0



Teniendo en cuenta la alta casuística de tamaños debido a la variabilidad de las alturas de las plantas, los tamaños de las bandejas y las dimensiones de los vehículos, no se puede proporcionar una modelización de *Easycargo* para todas las situaciones. Se debe realizar la modelización en cada caso concreto. No obstante, se han procesado en *Easycargo* dos situaciones ejemplo para demostrar el rango por el que se mueven los datos. Los resultados obtenidos se recogen en la Tabla 13. Las características de las situaciones ejemplos son las siguientes:

- Bandeja de 53x30x15 cm de 45 alveolos con plántula de 10 cm de altura.
- Bandeja de 53x30x15 cm de 45 alveolos con plántula de 25 cm de altura.

Tabla 13. Comparación del número máximo de bandejas de 53x30x15 de 45 alveolos con plántula distintas alturas según *Easycargo* y la ecuación propuesta. **Fuente:** elaboración propia.

Tipo	Volumen vehículo (m ³)	Bandejas máximas (ud)	
		Planta = 10 cm altura	Planta = 15 cm altura
V2	10.0	210	140
V3	20.0	448	280
V4	37.5	930	558
V5	52.5	1287	819
V6	66.5	1595	1015
V7	97.8	2310	1470

2.2.2.2 Traslado de tubo protector

Al igual que en el traslado de las plantas, es necesario conocer el tamaño del tubo protector y el de los vehículos para poder calcular el número de vehículos que son requeridos para el traslado de la mercancía. Los tamaños de los vehículos se recogen en la Tabla 8. Lista de características de los tipos de vehículos de transporte de materiales. Fuente: "Reglamento Armonizado Clasificación de Vehículos", 2020; "Flota de camiones de transporte de mercancías", 2020. mientras que las características de los tubos protectores disponibles se recogen en la Tabla 14.

Tabla 14. Medidas de los diferentes tubos protectores disponibles.
Fuente: elaboración propia en base a tarifas de TRAGSA.

Altura (cm)	Ancho (cm)	Grosor (cm)	Peso (g)
60	37.7	0.5	115.0
120	37.7	0.5	230.0
150	37.7	0.5	287.5
180	37.7	0.5	345.0

Existen dos formas para trasladarlos: enrollados o en lámina. Debido a las limitaciones de *Easycargo*, se tiene en cuenta únicamente el traslado en lámina. Al haber menos variabilidad que en el caso de las plantas y bandejas forestales, se han modelizado todas las combinaciones de características posibles para obtener el número máximo de tubos protectores que se pueden cargar en los vehículos. Los resultados se incluyen en la Tabla 15 (no se han tenido en cuenta las limitaciones de carga por el peso). Existen dos casos en los que el programa no es capaz de calcular el número exacto por ser demasiado grande, lo cual supone una limitación para la cuantificación de HC.

Tabla 15. Cantidad máxima de tubos protectores de distintos tamaños que se pueden trasladar en lámina en los distintos tipos de vehículo. **Fuente:** elaboración propia con programa *Easycargo*.

Altura del tubo (cm)	Tipo de vehículo	Número máximo de tubos (ud)	Altura del tubo (cm)	Tipo de vehículo	Número máximo de tubos (ud)
60	V2	8 790	150	V2	3 350
	V3	17 297		V3	6 567
	V4	32 856		V4	13 128
	V5	46 208		V5	18 460
	V6	>50 000		V6	23 091
	V7	>50 000		V7	34 038
	120	V2		4 258	180
V3		8 191	V3	5 719	
V4		16 428	V4	10 733	
V5		23 056	V5	15 248	
V6		29 305	V6	19 307	
V7		42 980	V7	28 288	

2.2.2.3 Traslado de personal

El personal que se requiere en el lugar de la repoblación según las tarifas de TRAGSA son peones y jefes de cuadrilla. Los equipos constan de un jefe de cuadrilla y siete peones. Por tanto, un equipo entero requerirá dos coches turismos para trasladarse a obra. Se recomienda incluir el traslado del ingeniero, que no se tiene en cuenta en este trabajo por falta de información de la frecuencia con la que acude a la obra.

Existe gran oferta de modelos de coches, por lo que en este trabajo se utilizará un factor de emisiones genérico, descrito y desglosado en las Tabla 40 y Tabla 55. No obstante, para mayor precisión se recomienda utilizar factores lo más específicos posibles. Estos factores varían según:

- Tamaño del vehículo.
- Tipo de combustible.
- Categoría EURO.

Al igual que en el traslado de material, las emisiones por el traslado de personal varían según el número de vehículos y la distancia. El número de vehículos dependen de varios parámetros, de los cuales algunos son preestablecidos y otros son de libre elección por el repoblador (véase Ecuación 14 y Anexo 3). Los parámetros preestablecidos son los siguientes:

- Duración de jornada: 8 horas.
- Equipo: 1 jefe de cuadrilla y 7 peones.
- Capacidad máxima del vehículo: 4 pasajeros.
- Rendimientos de las actividades: según tarifas de TRAGSA

2.2.2.4 Uso de la maquinaria

El uso de la maquinaria produce emisiones por el consumo del combustible durante su funcionamiento para la realización de las actividades. Siguiendo el principio de coherencia, se deben incluir también las emisiones producidas por la producción de la maquinaria y su término de vida. En la Tabla 16 se muestra la recopilación de toda la maquinaria que se utilizan en las actividades descritas en el Anexo 4. El combustible utilizado en maquinaria es el diésel llamado gasóleo B ("Diferencia entre el gasóleo A, B y C - Blog de Agrupación Gasoil", 2020).

Tabla 16. Lista de maquinaria utilizada en las actividades contempladas en el proceso de repoblación y de uso y mantenimiento. **Fuente:** TRAGSA.

Código	Descripción	Consumo (l/h)	Suposiciones
M01035	Tractor orugas hasta 100 CV	8	-
M01036	Tractor orugas 101/130 CV	11	Interpolación
M01037	Tractor orugas 131/150 CV	14	-
M01038	Tractor orugas 151/190 CV	15.25	Media
M01039	Tractor orugas 171/190 CV	16.38	Interpolación
M01040	Tractor orugas 191/240 CV	17.5	Media
M01044	Tractor ruedas hasta 100 CV	8	-
M01046	Tractor ruedas 125/150 CV	12.75	Media
M01047	Tractor ruedas 151/170 CV	15.45	Media
M01056	Retroexcavadora oruga hidráulica 51/70 CV	6.5	Mínimo
M01057	Retroexcavadora oruga hidráulica 71/100 CV	8	Máximo
M01058	Retroexcavadora oruga hidráulica 131/190 CV	12	Mínimo
M01059	Retroexcavadora oruga hidráulica 161/190 CV	15	Máximo
M01066	Retroaraña 71/100 CV	8	Equivalencia
M01067	Retroaraña 101/130 CV	10	Interpolado
M01068	Retroaraña 131/160 CV	12	Equivalencia
M03008	Desbrozadora de martillo, sin mano de obra	1.75	Media
M03009	Desbrozadora de cadenas, sin mano de obra	1.5	Media
M03012	Destoconador de cuchillas	2.25	Media

Ante la falta de fuentes publicadas sobre datos de consumos horarios de la maquinaria, algunos se han obtenido por contacto directo con TRAGSA (comunicación personal). Los datos obtenidos no eran completos o tenían distinto formato, por lo que se han realizado las siguientes suposiciones:

- *Media*: si los datos proporcionados se expresaban como intervalo.
- *Interpolación*: si no se proporcionaban datos para esa categoría, pero sí para la misma máquina de potencia inmediatamente superior e inferior.
- *Máximo/mínimo*: si los datos proporcionados se expresaban en intervalos que coincidían con los de la misma máquina de potencia diferente.
- *Equivalencia*: para las retroarañas, el consumo se ha considerado similar al consumo de una retroexcavadora con la misma potencia de motor.



Por otro lado, las desbrozadoras pueden ir acopladas en la toma de fuerza del tractor o ser independientes. Dado que cuando se engancha a la toma de fuerza del tractor, aumenta el consumo de este en la cantidad que equivale al consumo independiente de la desbrozadora, para el cálculo de emisiones se considera el consumo de la desbrozadora de forma independiente.

Por otro lado, las emisiones de producción y término de vida se deben tener en cuenta de forma alícuota a la proporción de la vida útil utilizada en las actividades. La diferencia de los límites del sistema de los distintos inventarios utilizados para la maquinaria hace que unos incluyan el término de vida y otros no. No se han encontrado inventarios específicos del término de vida de la maquinaria, pero se recomienda utilizarlos si se encuentran para asegurar la coherencia y uniformidad de la aplicación de la metodología. La maquinaria listada en la Tabla 16 se debe clasificar según los inventarios disponibles de Ecoinvent. Se muestra cómo se realiza la agrupación en la Tabla 17. También existe la limitación de la falta de inventarios aplicables a las desbrozadoras.

Tabla 17. Relación de tipo de máquinas de TRAGSA con los inventarios para adjudicar las emisiones de fabricación. **Fuente:** Ecoinvent y elaboración propia.

Tipo de máquina en inventario	Maquinaria TRAGSA	Vida útil (h)	Término de vida
Tractor agrícola	M01044-M01047	7 000	Sí
Retroexcavadora (<i>Hydraulic digger</i>)	M01056-M01059 M01066-M01068	10 000	No
Máquina de obra pública (<i>Building machine</i>)	M01035-M01040	10 000	No

El inventario de tractor agrícola tiene como unidad funcional 1 kg de tractor, por lo que se necesita conocer el peso de los tres tipos de tractor agrícola. Esto se hace a través de un factor que relaciona la potencia de la máquina con su peso, de valor 40 kg/CV ("*¿Qué es un tractor de alta potencia?*", 2020). Se recogen los pesos calculados para cada tipo de tractor (correspondiente a la potencia media) junto con los pesos establecidos por los inventarios para el resto de maquinaria en la Tabla 18.

Tabla 18. Pesos medios de la maquinaria de TRAGSA teniendo en cuenta el factor 40kg/CV para los tractores agrícolas. **Fuente:** "*¿Qué es un tractor de alta potencia?*", 2020.

Código máquina TRAGSA	Potencia (CV)	Peso (kg)
M01044	<100	3 000*
M01046	125-150	5 500
M01047	151-170	6 420
M01056-M01059; M01066-M01068	Cualquiera	15 000
M01035-M01040	Cualquiera	10 000

*Calculado para 75 CV

2.2.2.5 Traslado de maquinaria

El traslado de la maquinaria se realiza en góndolas (*semi low loaders*) que son plataformas donde se monta la maquinaria y se enganchan a semirremolques. El factor de emisiones utilizado hace referencia al transporte de un tractor agrícola. Sin embargo, este trabajo incluye otros tipos de maquinaria. En este trabajo se aplicará el factor de emisiones a toda la maquinaria, teniendo en cuenta que se puede considerar el peso de esta en los cálculos dado que el factor de emisiones está medido en *tkm*, lo cual proporciona cierta representatividad (proximidad a la realidad). Por otro lado, a diferencia del traslado de personal, que es diario, el traslado de la maquinaria se realiza al inicio de la repoblación y al final de esta, y al inicio y final de las actividades de uso y mantenimiento, ya que están separadas en el tiempo.

2.2.3 USO Y MANTENIMIENTO

Como se ha mostrado en la Ilustración 2, la fase de uso y mantenimiento está formada por lo que tradicionalmente se consideran cuidados culturales de las repoblaciones, que en este trabajo se han dividido en cuatro procesos: tratamientos complementarios a la planta, eliminación de competencia, reposición de marras y retirada de tubos protectores. Los tratamientos complementarios a la plantación incluyen dos procesos unitarios: la construcción de alcorque o castillete y el aporte de abono. Todos los procesos se basan en las unidades de obra de las tarifas públicas de TRAGSA, al igual que las actividades de la repoblación. Por tanto, para esta etapa se tienen en cuenta las consideraciones recogidas para la repoblación en el apartado 2.2.2 de este capítulo.

2.2.4 GESTIÓN DE RESIDUOS

Las emisiones de esta etapa provienen del traslado de los residuos desde el lugar repoblado hasta el centro de tratamiento de residuos, y del tratamiento del residuo en sí, como se muestra en la Ilustración 7.

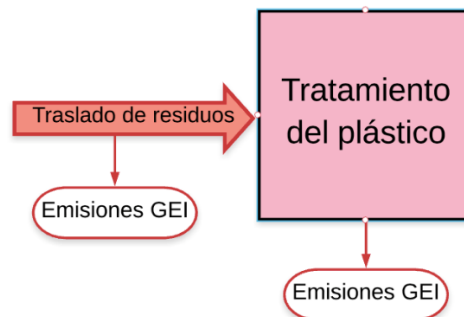


Ilustración 7. Origen de las emisiones GEI de la etapa de gestión de residuos. En las flechas rojas, actividades cuyas emisiones GEI se contabilizan en la actividad destino. Estas emisiones incluyen las emitidas por el consumo de combustible de los vehículos, y la parte alícuota de las emisiones por producción y término de vida del vehículo.

Fuente: elaboración propia.

Según Arnold & Alston (2012), los tubos protectores recogidos, que representan un 60% del peso de los originales, se trasladan al centro de tratamiento de residuos en un coche grande. A pesar de que en este trabajo se utilice un factor genérico, es aconsejable utilizar un factor de emisiones específico para coches grandes.

Dado que las emisiones dependen del número de vehículos que se utilicen, es necesario establecer la cantidad de tubos protectores que se transportan en un coche. Arnold & Alston (2012) indican que en un coche grande se llevan 800 tubos protectores de 60 cm de altura. Por tanto, se debe hacer una estimación para el resto de los tamaños de tubos, mostrada en la Tabla 19.

Tabla 19. Cupos de tubos protectores (residuo) según su altura en un coche grande.

Fuente: Arnold & Alston, 2012.

Altura del tubo protector (cm)	Cupo de tubos protectores en coche grande (ud)
60	800
120	400
150	320
180	200

Por otro lado, el tratamiento de residuos plásticos puede ser de cuatro tipos distintos, para los cuales existen factores de emisiones calculados para UK (se recomienda utilizar datos de España o lugar donde se realice la repoblación si se tienen) recogidos en la Tabla 20. Se supone que todo el conjunto de residuos va a obtener el mismo tratamiento.



Tabla 20. Factores de emisión de las distintas opciones de tratamiento del plástico como residuo. **Fuente:** UK Government GHG Conversion Factors for Company Reporting.

Tratamiento	Factor de emisiones (kg CO ₂ eq/t residuo)
Vertedero	9.0000
Open loop	21.3842
Closed loop	21.3842
Incineración	21.3842

2.2.5 RESUMEN

Teniendo en cuenta todo lo comentado en este capítulo, y las tablas en Anexo 1 y Anexo 2, se recogen a continuación todas las versiones de los factores de emisión que se necesitarán para calcular las emisiones de los procesos expresadas en kg CO₂ eq.

Tabla 21. Recopilación de factores de emisión necesarios para el método de cálculo diseñado para la cuantificación de HC de las repoblaciones forestales. **Fuente:** elaboración propia a partir de datos de todas las fuentes del trabajo.

Fuente de emisión	Variante	Factor de emisión (kg CO ₂ eq/ ud)	Ud
Producción de planta		0.047	1 planta
Producción de tubo protector	60 cm de altura	2 077.750	1 t de tubos
	120 cm de altura	4 155.500	
	150 cm de altura	5 194.375	
	180 cm de altura	6 233.250	
Producción de maquinaria	M01044	23 379.194	1 máquina
	M01046	42 861.856	
	M01047	50 031.476	
	M01056-M01059; M01066-M01068	43 758.346	
	M01035-M01040	29 132.104	
Traslado en vehículo de mercancía	Vehículo comercial ligero	1.464	1 tkm
	Camión 7.5-16 t	0.179	
	Camión 16-32 t	0.115	
Traslado en coche turismo genérico		0.230	1 km
Traslado de maquinaria en tráiler		0.156	1 tkm
Consumo de gasóleo B		2.708	1 litro
Tratamiento de residuos	Vertedero	9.000	1 t
	Reciclaje abierto	21.384	
	Reciclaje cerrado	21.384	
	Incineración	21.384	

Los flujos de los procesos son establecidos por las unidades de referencia de los factores de emisión. La relación que tienen con la unidad funcional de la cuantificación de HC se resume en la Tabla 22.



Tabla 22. Recopilación de las variables que relacionan la unidad de referencia de los factores de emisión con la unidad funcional de la cuantificación de la HC. **Fuente:** elaboración propia.

Factor de emisión	Unidad	Relación con unidad funcional	Unidad
Producción de planta	1 planta	Densidad de la población	plantas/hectárea
Producción de tubo protector	1 t de tubos	Densidad de la población Proporción de plantas entubadas	plantas/hectárea %
Producción de maquinaria	1 máquina	Superficie repoblada	hectáreas
Traslado en vehículo de mercancía	1 tkm	Superficie repoblada	hectáreas
Traslado en coche turismo genérico	1 km	Superficie repoblada	hectáreas
Traslado de maquinaria en tráiler	1 tkm	Superficie repoblada	hectáreas
Consumo de gasóleo B	1 litro	Superficie repoblada	hectáreas
Tratamiento de residuos	1 t	Densidad de la población Proporción de plantas entubadas	plantas/hectárea %

La forma exacta en la que funciona la relación de los factores de emisión y la unidad funcional se explica en el diseño del desarrollo matemático, ya que hay numerosos factores para tener en cuenta. No obstante, de forma simplificada, la relación consiste en dividir las emisiones totales por la superficie de la repoblación para poder expresarlas relativas a la unidad funcional (hectárea); exceptuando la producción de plantas, tubos protectores y tratamiento de residuos, que se relacionan a través de la densidad de la población.

RESULTADOS

Con los datos maestros recopilados se posee la información necesaria para diseñar un método de cálculo que permita cuantificar las emisiones de GEI generadas en cualquier proyecto de repoblación forestal. Por tanto, en este capítulo se describe el método de cálculo. De forma añadida, para poder evaluar el impacto de la repoblación respecto a los sus beneficios por las absorciones, se utilizará el método de cálculo diseñado para cuantificar las emisiones y, por otro lado, se utilizará la herramienta del Registro de Huella de Carbono del MITECO para cuantificar las absorciones de las masas forestales creadas. Ambos cálculos se llevarán a cabo para dos repoblaciones tipo: una repoblación con objetivo de producción de pasta de papel y una repoblación de uso múltiple.

1. MÉTODO DISEÑADO PARA EL CÁLCULO DE LA HUELLA DE CARBONO DE LAS REPOBLACIONES FORESTALES

La cuantificación de la huella de carbono se realiza en base a la unidad de referencia, una hectárea de repoblación de ciertas características. Para hacerlo correctamente, se deben contabilizar las emisiones de cada etapa. Un resumen del origen de todas las emisiones se recoge a continuación.

$$E = E_{AM} + E_{REP} + E_{USO} + E_{RES} \quad (2)$$

$$E_{AM} = E_{AM,pl} + E_{AM,tp} \quad (3)$$

$$E_{REP} = E_{TRAS,rep} + E_{MAQ,rep} \quad (4)$$

$$E_{USO} = E_{TRAS,uso} + E_{MAQ,uso} \quad (5)$$

$$E_{TRAS} = E_{TRANS,pl} + E_{TRANS,tp} + E_{TRANS,maq} + E_{TRANS,per} \quad (6)$$

$$E_{RES} = E_{TRANS,res} + E_{gres} \quad (7)$$

siendo:

E	= emisiones del ciclo de vida de una hectárea de una repoblación [kg CO ₂ eq/ha]
E_{AM}	= emisiones de la etapa de adquisición de material [kg CO ₂ eq/ha]
E_{REP}	= emisiones de la etapa de la repoblación forestal [kg CO ₂ eq/ha]
E_{USO}	= emisiones de la etapa de uso y mantenimiento [kg CO ₂ eq/ha]
E_{RES}	= emisiones de la etapa de gestión de residuos [kg CO ₂ eq/ha]
$E_{AM,pl}$	= emisiones de la adquisición del total de plantas [kg CO ₂ eq/ha]
$E_{AM,tp}$	= emisiones de la adquisición del total de tubos protectores [kg CO ₂ eq/ha]
E_{TRAS}	= emisiones de los traslados al lugar de obra [kg CO ₂ eq/ha]
$E_{TRAS,rep}$	= emisiones de traslados relacionados con la etapa de repoblación [kg CO ₂ eq/ha]
$E_{MAQ,rep}$	= emisiones del uso de la maquinaria en la etapa de repoblación [kg CO ₂ eq/ha]
$E_{TRAS,uso}$	= emisiones de los traslados relacionados con la etapa de uso y mantenimiento [kg CO ₂ eq/ha]
$E_{MAQ,uso}$	= emisiones del uso de la maquinaria en la etapa de uso y mantenimiento [kg CO ₂ eq/ha]
$E_{TRAS,pl}$	= emisiones del traslado de las plantas [kg CO ₂ eq/ha]
$E_{TRAS,tp}$	= emisiones del traslado de los tubos protectores [kg CO ₂ eq/ha]
$E_{TRAS,maq}$	= emisiones del traslado de la maquinaria [kg CO ₂ eq/ha]
$E_{TRAS,per}$	= emisiones del traslado del personal [kg CO ₂ eq/ha]
$E_{TRAS,res}$	= emisiones del traslado de los residuos [kg CO ₂ eq/ha]
E_{gres}	= emisiones del tratamiento de residuos [kg CO ₂ eq/ha]

Ecuación 2, 3, 4, 5, 6, 7. Conjunto de ecuaciones que recopilan los procesos que producen emisiones en el ciclo de vida de la repoblación forestal. Etras es tanto para la etapa de repoblación como de uso y mantenimiento.

Fuente: elaboración propia.



En los próximos apartados se desarrollarán todas las ecuaciones necesarias para realizar el cálculo de las emisiones de cada proceso, tal y como se han recogido en las ecuaciones Ecuación 2, 3, 4, 5, 6, 7. **Conjunto de ecuaciones que recopilan los procesos que producen emisiones en el ciclo de vida de la repoblación forestal. Etras es tanto para la etapa de repoblación como de uso y mantenimiento.** Fuente: **elaboración propia.** Asimismo, en el Anexo 3 se recoge una lista de las variables que conforman las ecuaciones diseñadas, y el tipo de dato que requiere esa variable y de dónde se puede obtener.

1.1 ADQUISICIÓN DE MATERIALES

Aquí se muestra la relación entre los flujos de los inventarios y la unidad funcional a través de las variables que se han indicado en la Tabla 22.

1.1.1 PLANTAS DE VIVERO

$$E_{AM,pl} = f_{pl} \cdot d \quad (8)$$

siendo:

$E_{AM,pl}$ = emisiones correspondientes a la adquisición del total de plantas [kg CO₂eq/ha]
 f_{pl} = factor de emisión de la adquisición de la planta [kg CO₂eq/planta]
 d = densidad de la repoblación [planta/ha]

Ecuación 8. Fórmula para obtener las emisiones correspondientes a la adquisición del total de plantas necesarias para la unidad funcional. **Fuente:** elaboración propia.

1.1.2 TUBOS PROTECTORES

$$E_{AM,tp} = f_{tp} \cdot \frac{P_{tp}}{10^6} \cdot d \cdot \alpha \quad (9)$$

siendo:

$E_{AM,tp}$ = emisiones correspondientes a la adquisición del total de tubos protector [kg CO₂eq/ha]
 f_{tp} = factor de emisión de la adquisición del tubo protector [kg CO₂eq/ton de tubos]
 P_{tp} = peso del tubo protector [g/tubo]
 d = densidad de la repoblación [planta/ha]
 α = proporción de plantas entubadas [%]

Ecuación 9. Fórmula para obtener las emisiones correspondientes a la adquisición del total de tubos protectores necesarios para la unidad funcional. **Fuente:** elaboración propia.

1.2 PROCESO DE REPOBLACIÓN

1.2.1 TRASLADO DE PLANTAS

$$E_{TRAS,pl} = \sum_i \frac{f_{V,i} \cdot D_{pl} \cdot P_{bd} \cdot [(N_{V,i} - 1) \cdot N_{T,bd,V,i} + N_{t,bd,V,i}]}{S} \quad (10)$$

$$N_{T,bd} = \frac{d \cdot S}{N_{alv}} = \sum_i N_{T,bd,i} \quad (11)$$

siendo:

$E_{TRAS,pl}$	= emisiones correspondientes al traslado de plantas [kg CO ₂ eq/ha]
$f_{V,i}$	= factor de emisión de transporte de vehículo de tipo i [kg CO ₂ eq/tkm]
D_{pl}	= distancia entre el vivero y la repoblación [km]
P_{bd}	= peso de una bandeja forestal [ton]
$N_{V,i}$	= número de vehículos de tipo i [ud]
$N_{T,bd,V,i}$	= número total de bandejas forestales en vehículo de tipo i lleno [ud]
$N_{t,bd,V,i}$	= número total de bandejas forestales en vehículo de tipo i vacío [ud]
S	= superficie de la repoblación [ha]
$N_{T,bd}$	= número total de bandejas forestales [ud]
N_{alv}	= número de alveolos de las bandejas forestales [ud]
d	= densidad de la repoblación [planta/ha]
$N_{T,bd,i}$	= número total de bandejas forestales en vehículo i [ud]

Ecuación 10, 11. Fórmulas para obtener las emisiones por el traslado de las plantas al lugar de plantación.

Fuente: elaboración propia.

Como se indicará en el Anexo 3, el número total de bandejas forestales del vehículo i ($N_{T,db,i}$) se obtendrá a través de una modelización de *Easycargo* que necesitará como entradas el número total de bandejas forestales ($N_{T,db}$), las dimensiones de las bandejas forestales (Tabla 11) y las dimensiones de los vehículos (Tabla 8. Lista de características de los tipos de vehículos de transporte de materiales. Fuente: "Reglamento Armonizado Clasificación de Vehículos", 2020; "Flota de camiones de transporte de mercancías", 2020.). Por otro lado, $N_{t,bd,V,i}$ hace referencia a los vehículos que trasladan bandejas pero que no están llenos hasta su máxima capacidad.

1.2.2 TRASLADO DE TUBO PROTECTOR

$$E_{TRAS,tp} = \sum_i \frac{f_{V,i} \cdot D_{tp} \cdot P_{tp} \cdot [(N_{V,i} - 1) \cdot N_{T,tp,V,i} + N_{t,tp,V,i}]}{S} \quad (12)$$

$$N_{T,tp} = d \cdot S \cdot \alpha = \sum_i N_{T,tp,i} \quad (13)$$

siendo:

$E_{TRAS,tp}$	= emisiones correspondientes al traslado de tubos [kg CO ₂ eq/ha]
$f_{V,i}$	= factor de emisión de transporte de vehículo de tipo i [kg CO ₂ eq/tkm]
D_{tp}	= distancia entre la fábrica de tubos protectores y la repoblación [km]
P_{tp}	= peso de un tubo protector [ton]
$N_{V,i}$	= número de vehículos de tipo i [ud]
$N_{T,tp,V,i}$	= número total de tubos protectores en vehículo de tipo i lleno [ud]
$N_{t,tp,V,i}$	= número total de tubos protectores en vehículo de tipo i vacío [ud]
S	= superficie de la repoblación [ha]
$N_{T,tp,i}$	= número total de tubos protectores en vehículo i [ud]
$N_{T,tp}$	= número total de tubos protectores [ud]
d	= densidad de la repoblación [planta/ha]
α	= proporción de plantas entubadas [%]

Ecuación 12, 13. Fórmulas para obtener las emisiones por el traslado de los tubos protectores al lugar de plantación. **Fuente:** elaboración propia.

De forma análoga al traslado de plantas, el número total de tubos protectores del vehículo i se obtendrá a través de una modelización de Easycargo que necesitará como entradas el número total de tubos protectores, las dimensiones de los tubos protectores en lámina (Tabla 14) y las dimensiones de los vehículos (Tabla 8).

1.2.3 TRASLADO DE PERSONAL

$$E_{TRAS,per} = \frac{f_{car} \cdot D_{car} \cdot \sum(N_{car,act,i} \cdot N_{tray,car,act,i})}{S} \quad (14)$$

$$N_{tray,car} = 2 \cdot t_{fin} \quad (15)$$

$$N_{car} = \frac{\frac{N_{per}}{7} + N_{per}}{Car} \quad (16)$$

$$N_{per} = \frac{N_{act,i} \cdot \eta_{act,i}}{t_{fin} \cdot t_{jor}} \quad (17)$$

siendo:

$E_{TRAS,per}$	= emisiones correspondientes al traslado de personal [kg CO ₂ eq/ha]
f_{car}	= factor de emisión del coche [kg CO ₂ eq/km]
$N_{car,act,i}$	= número de coches para la actividad i [ud]
D_{car}	= distancia entre la oficina y la repoblación [km]
$N_{tray,car,act,i}$	= número de trayectos de coche con personal para la actividad i [ud]
S	= superficie de la repoblación [ha]
t_{fin}	= tiempo deseado para término de las tareas [días]
N_{per}	= número total de peones [ud]
Car	= número de pasajeros en un coche [ud]
$N_{act,i}$	= número total de unidades de obra de la actividad i [ud]
$\eta_{act,i}$	= rendimiento de la actividad i [h/ud]
t_{jor}	= duración de la jornada de trabajo [h/día]

Ecuación 14, 15, 16, 17. Fórmulas para obtener las emisiones por el traslado del personal al lugar de plantación. **Fuente:** elaboración propia.

Como se ha mencionado anteriormente, el número de trayectos se establece en dos (ida y vuelta) por día. El número de personal que se necesita depende del número de unidades de obra de la actividad i, de su rendimiento, y del tiempo deseado para la realización de la actividad. El número de unidades de obra de la actividad i depende del tipo de actividad (puntual, lineal y extensión), ya que se relacionarán con las características de la repoblación de distinta manera. Se explica en el siguiente apartado las especificaciones sobre el número de unidades de obra de la actividad i.



1.2.4 USO DE MAQUINARIA

$$E_{MAQ} = \frac{E_{MAQ,prod} + E_{MAQ,act} + E_{MAQ,fin}}{S} \quad (18)$$

$$E_{MAQ,prod} = \sum_i \frac{f_{prod,i} \cdot N_{act,i} \cdot \eta_{act,i}}{vida_{\acute{u}til,i}} \quad (19)$$

$$E_{MAQ,fin} = \sum_i \frac{f_{fin,i} \cdot N_{act,i} \cdot \eta_{act,i}}{vida_{\acute{u}til,i}} \quad (20)$$

$$E_{MAQ,act} = \sum_i f_c \cdot c_{h,i} \cdot N_{act,i} \cdot \eta_{act,i} \quad (21)$$

siendo:

E_{MAQ}	= emisiones correspondientes al uso de la maquinaria [kg CO ₂ eq/ha]
$E_{MAQ,prod}$	= emisiones alcuotas de la producción de la maquinaria [kg CO ₂ eq]
$E_{MAQ,act}$	= emisiones correspondientes la actividad de la maquinaria [kg CO ₂ eq]
$E_{MAQ,fin}$	= emisiones alcuotas del término de la maquinaria [kg CO ₂ eq]
S	= superficie de la repoblación [ha]
$f_{prod,i}$	= factor de emisión de la producción de la máquina de tipo i [kg CO ₂ eq/ud]
$N_{act,i}$	= número total de unidades de obra de la actividad i [ud]
$\eta_{act,i}$	= rendimiento de la actividad i [h/ud]
$vida_{\acute{u}til,i}$	= vida útil de la máquina de tipo i [h]
$f_{fin,i}$	= factor de emisión del término de la máquina de tipo i [kg CO ₂ eq/ud]
f_c	= factor de emisiones del gasóleo B [kg CO ₂ eq/l]
$c_{h,i}$	= consumo horario de la máquina de tipo i [l/h]

Ecuación 18, 19, 20, 21. Fórmulas para obtener las emisiones por el traslado del personal al lugar de plantación. **Fuente:** elaboración propia.

Como se ha mencionado en el apartado 2.2.2.4 de los materiales, no se han encontrado inventarios específicos del término de vida de la maquinaria. No obstante, se incluye en el método de cálculo para poder aplicarlo en caso de sí tenerlos.

En cuanto al número total de unidades de obra de la actividad i, esta depende de la naturaleza del rendimiento. Las tarifas de TRAGSA, que es el documento donde están expresados los rendimientos de las actividades, clasifica las actividades en puntuales, lineales y por extensión. En el caso de que se trate de una actividad puntual o por extensión, el cálculo es directo, relacionándose con la superficie de la repoblación o con la densidad. En cambio, si la actividad es lineal, la cantidad de unidades de obra depende de la separación de las plantas. Esta separación viene definida por el marco de plantación o, en su defecto, por la densidad. La inversa de la densidad proporciona el área que requiere cada pie, pudiendo obtener la distancia a la que se encuentran a través de su raíz cuadrada. El número de unidades de obras lineales será por tanto el producto del número de plantas y la separación entre cada pie.

1.2.5 TRASLADO DE MAQUINARIA

$$E_{TRAS,maq} = N_{tray,maq} \cdot \sum_i \frac{f_{gon} \cdot N_{maq,i} \cdot D_{maq} \cdot P_{maq,i}}{S} \quad (22)$$

$$N_{maq,i} = \frac{N_{act,i} \cdot \eta_{act,i}}{t_{fin} \cdot t_{jor}} \quad (23)$$

siendo:

$E_{TRAS,maq}$	= emisiones correspondientes al transporte de la maquinaria [kg CO ₂ eq/ha]
$N_{tray,maq}$	= número de trayectos para traslado de maquinaria [ud]
f_{gon}	= factor de emisión de transporte de máquina con góndola [kg CO ₂ eq/tkm]
$N_{maq,i}$	= número de máquinas de tipo i [ud]
D_{maq}	= distancia entre el almacén de máquinas y la repoblación [km]
$P_{maq,i}$	= peso de la máquina de tipo i [ton]
S	= superficie de la repoblación [ha]
$N_{maq,i}$	= número total máquina de tipo i [ud]
$N_{tact,i}$	= número total de unidades de obra de la actividad i [ud]
$\eta_{act,i}$	= rendimiento de la actividad i [h/ud]
t_{fin}	= tiempo deseado para finalización de las tareas [días]
t_{jor}	= duración de la jornada de trabajo [h/día]

Ecuación 22, 23. Fórmulas para el cálculo de las emisiones producidas por el traslado de la maquinaria.

Fuente: elaboración propia.

1.3 USO Y MANTENIMIENTO

Al igual que en el apartado de análisis de inventario, se considera que las emisiones de uso y mantenimiento son equiparables al proceso de repoblación en cuanto al origen de las emisiones de los procesos incluidos en esta etapa del ciclo de vida. Consecuentemente, se utilizan las mismas ecuaciones especificando que se tratan de la etapa de uso y mantenimiento.

1.4 GESTIÓN DE RESIDUOS

1.4.1 TRASLADO DE RESIDUOS

$$E_{TRAS,res} = \frac{f_{car} \cdot N_{car,res} \cdot D_{res}}{S} \quad (24)$$

$$N_{car,res} = \frac{0.6 \cdot N_{T,tp}}{cupo_{car}} \quad (25)$$

siendo:

- $E_{TRAS,res}$ = emisiones correspondientes al traslado de residuos de tubos [kg CO₂eq/ha]
- f_{car} = factor de emisión del coche [kg CO₂eq/km]
- $N_{car,res}$ = número de coches para el traslado de residuos [ud]
- D_{res} = distancia entre la repoblación y el centro de tratamiento de residuos [km]
- S = superficie de la repoblación [ha]
- $N_{T,tp}$ = número total de tubos protectores [ud]
- $cupo_{car}$ = cupo de tubos protectores que caben en un coche [ud]

Ecuación 24, 25. Fórmulas para el cálculo de emisiones por el traslado de residuos.

Fuente: elaboración propia.

1.4.2 TRATAMIENTO DE RESIDUOS

$$E_{gres} = \frac{0.6 \cdot f_{gres} \cdot P_{tp} \cdot N_{T,tp}}{S} \quad (26)$$

siendo:

- E_{gres} = emisiones correspondientes a la gestión de residuos de tubos [kg CO₂eq/ha]
- $f_{gres,i}$ = factor de emisión del tratamiento de residuos plásticos [kg CO₂eq/ton]
- P_{tp} = peso total de un tubo protector [ton]
- $N_{T,tp}$ = número total de tubos protectores [ud]
- S = superficie de la repoblación [ha]

Ecuación 26. Fórmula para el cálculo de emisiones por el tratamiento de residuos. **Fuente:** elaboración propia.

2. CÁLCULO DE EMISIONES DE REPOBLACIONES FORESTALES EJEMPLO

Como se ha mencionado en el inventario, los datos de emisiones de cada proceso unitario se han obtenido de la base de datos Ecoinvent principalmente, además del MITECO y TRAGSA. Todos ellos están expresando el impacto potencial teniendo en cuenta el PGC. La forma de calcular el impacto a partir de los inventarios de Ecoinvent es utilizando la herramienta SimaPro. Esta herramienta proporciona un desglose de las emisiones de cada GEI expresado en kg de CO₂ equivalente, por lo que la evaluación del impacto completa se obtiene al sumar todos los impactos parciales obtenidos para cada proceso unitario en base a los datos de Ecoinvent. La herramienta utiliza el método *ILCD 2011 Midpoint+ V1.11 / EC-JRC Global, equal weighting* para obtener los resultados y no se consideran las emisiones de las actividades que representen menos de un 0.1% de las emisiones del proceso inventariado, además de no contabilizar las emisiones por las infraestructuras ni las emisiones a largo plazo, acorde con lo establecido en los límites del sistema. Estos desgloses se recogen en el Anexo 2.

En conjunto con el método de cálculo diseñado, se ha elaborado una hoja de cálculo integrando y programando las ecuaciones del método de cálculo de tal forma que se puedan introducir las características de la repoblación que se pretenda realizar, y obtener una estimación de la HC que produce llevar a cabo esta repoblación. Esta hoja de cálculo puede utilizarse de forma general con todo tipo de repoblaciones, teniendo en cuenta ciertas limitaciones metodológicas, especialmente por la definición de los límites del sistema.

El Excel está estructurado en tres hojas principales: entradas, actividades y resultados. En las dos primeras se deben introducir datos que serán utilizados para calcular los resultados a través de las ecuaciones. Según el color de las celdas, los datos introducidos son de distintos tipos. Los significados de la simbología se encuentran en la hoja Glosario del Excel y en el Anexo 3 de este documento.

LEYENDA															
<table style="width: 100%; border: none;"> <tr> <td style="width: 20px; height: 15px; background-color: #90EE90; border: 1px solid black;"></td> <td style="padding-left: 5px;">Valor libre a introducir</td> </tr> <tr> <td style="width: 20px; height: 15px; background-color: #ADD8E6; border: 1px solid black;"></td> <td style="padding-left: 5px;">Valor fijo</td> </tr> <tr> <td style="width: 20px; height: 15px; background-color: #FFDAB9; border: 1px solid black;"></td> <td style="padding-left: 5px;">Lista desplegable</td> </tr> <tr> <td style="width: 20px; height: 15px; background-color: #DDA0DD; border: 1px solid black;"></td> <td style="padding-left: 5px;">Celda dependiente del contenido de otra celda</td> </tr> </table>		Valor libre a introducir		Valor fijo		Lista desplegable		Celda dependiente del contenido de otra celda	<table style="width: 100%; border: none;"> <tr> <td style="width: 20px; height: 15px; background-color: #A9A9A9; border: 1px solid black;"></td> <td style="padding-left: 5px;">Celda dependiente de resultado de ecuación</td> </tr> <tr> <td style="width: 20px; height: 15px; background-color: #FFFF00; border: 1px solid black;"></td> <td style="padding-left: 5px;">Valor a introducir dependiente de fuente externa</td> </tr> <tr> <td style="width: 20px; height: 15px; background-color: #FF0000; border: 1px solid black;"></td> <td style="padding-left: 5px;">Problema con valores introducidos (de origen externo)</td> </tr> </table>		Celda dependiente de resultado de ecuación		Valor a introducir dependiente de fuente externa		Problema con valores introducidos (de origen externo)
	Valor libre a introducir														
	Valor fijo														
	Lista desplegable														
	Celda dependiente del contenido de otra celda														
	Celda dependiente de resultado de ecuación														
	Valor a introducir dependiente de fuente externa														
	Problema con valores introducidos (de origen externo)														

Ilustración 8. Leyenda del tipo de celdas que se pueden rellenar o se rellenan automáticamente en el Excel.

Fuente: elaboración propia.

La hoja Entradas tiene distintas secciones. En primer lugar, las tablas de datos generales se deben rellenar con las características de la repoblación, de los materiales utilizados, y otros datos intermedios que se utilizarán en las ecuaciones finales. Se muestra a continuación dicha columna tal y como aparece por defecto. En caso de que una única especie deba llevar tubos protectores, esta debe considerarse “esp 2”, ya haya una o dos especies. Por otro lado, si solo se trabaja con una especie, no se deben dejar vacías las celdas del tamaño de bandeja en ninguna de las tablas para evitar disfuncionalidades en el Excel. Se muestran estas tablas en la Ilustración 9.

DATOS GENERALES

DATOS DE LIBRE ELECCIÓN		
Variable	Valor	Unidad
S		ha
d		planta/ha
esp1		%
esp2		%
alpha		%
D_pl		km
D_tp		km
D_car		km
D_maq		km
D_res		km
h_pl1		cm
h_pl2		cm
pdte		%
FCC		%

DATOS PARA EASYCARGO esp 1		
Variable	Valor	Unidad
h_tp	Ninguna	cm
w_tp	37,7	cm
e_tp	0,5	cm
N_T,tp	0	ud
P_tp	0	g
cc_bd	200	cc
h_bd,pl	15	cm
w_bd	53	cm
L_bd	30	cm
P_bd	9	kg
N_T,bd	0	ud

DATOS DE VALOR FIJO		
Variable	Valor	Unidad
Car	4	personas
t_jor	8	h/día
N_tray,maq	2	ud
cupo_car1	0	ud
N_car,res1	0	ud
cupo_car2	800	ud
N_car,res2	0	ud
N_alv1	60	ud
N_alv2	32	ud

DATOS PARA EASYCARGO esp 2		
Variable	Valor	Unidad
h_tp	60	cm
w_tp	37,7	cm
e_tp	0,5	cm
N_T,tp	0	ud
P_tp	115	g
cc_bd	400	cc
h_bd,pl	17	cm
w_bd	53	cm
L_bd	30	cm
P_bd	9,8	kg
N_T,bd	0	ud

Tipo de tratamiento de residuos:

Ilustración 9. Imagen sacada de la hoja Entradas del Excel realizado que incluye las tablas donde se deben introducir los datos generales. **Fuente:** elaboración propia.

Los datos para *Easycargo* son necesarios junto con las dimensiones de los vehículos, que están recogidas en la Tabla 8 para poder modelizar la optimización de la carga de mercancía. Los datos obtenidos en el programa se deben introducir en la sección dedicada a ello dentro de la hoja, como se muestra en la Ilustración 10. Existen dos tablas idénticas, una para la repoblación y otra para las marras.

DATOS OBTENIDOS EN EASYCARGO

Variable	Valor	Unidad	Variable	Valor	Unidad	Variable	Valor	Unidad
N_L,v2		ud	N_T,bd,v2		ud	N_t,bd,v2		ud
N_L,v3		ud	N_T,bd,v3		ud	N_t,bd,v3		ud
N_L,v4		ud	N_T,bd,v4		ud	N_t,bd,v4		ud
N_L,v5		ud	N_T,bd,v5		ud	N_t,bd,v5		ud
N_L,v6		ud	N_T,bd,v6		ud	N_t,bd,v6		ud
N_L,v7		ud	N_T,bd,v7		ud	N_t,bd,v7		ud
N_L,v2		ud	N_T,tp,v2		ud	N_t,tp,v2		ud
N_L,v3		ud	N_T,tp,v3		ud	N_t,tp,v3		ud
N_L,v4		ud	N_T,tp,v4		ud	N_t,tp,v4		ud
N_L,v5		ud	N_T,tp,v5		ud	N_t,tp,v5		ud
N_L,v6		ud	N_T,tp,v6		ud	N_t,tp,v6		ud
N_L,v7		ud	N_T,tp,v7		ud	N_t,tp,v7		ud

Ilustración 10. Imagen sacada de la hoja Entradas del Excel realizado que incluye la tabla para introducir los resultados obtenidos en *Easycargo*. **Fuente:** elaboración propia.

Por otro lado, la hoja Entradas tiene dos secciones en las cuales se deben responder una serie de preguntas sobre las características de las actividades que se quieren realizar. Estas características se presentan en forma de menús desplegables creados en base a las tarifas TRAGSA, cuyo análisis se ha realizado en el Anexo 4 de este documento.

REPOBLACIÓN FORESTAL	
¿Se realiza eliminación de vegetación preexistente?	No
*Considerar d, pendiente y FCC	
¿Se realiza preparación del suelo?	No
*Considerar d, pdte y FCC	
¿Distribución de tubos protectores?	No
¿Colocación de tubos protectores?	No
*Considerar h_tp y pdte	
¿Distribución de planta?	No
¿Ejecución de plantación?	No
*Considerar pdte y cc_bd	

USO Y MANTENIMIENTO	
¿Reposición de mallas?	No
*Considerar pdte y cc_bd	
¿Retirada tubos protectores?	No
¿Aporte de abono o hidrogel?	No
Protección de planta con castillete	No
¿Realización de alcorque?	No
¿Se realiza eliminación de competencia?	No
*Considerar d, pdte y FCC	

Ilustración 11. Imagen sacada de la hoja Entradas del Excel realizado que incluye las secciones donde se caracterizan las actividades de la etapa de repoblación y de uso y mantenimiento. **Fuente:** elaboración propia.

Una vez caracterizadas las actividades, en la hoja de Actividades se debe introducir el rendimiento, la unidad de referencia y la maquinaria correspondiente a la unidad de obra descrita por las características establecidas en la hoja Entradas. Esta información se consigue en las tarifas TRAGSA. Asimismo, se debe seleccionar la extensión en el tiempo que se desee para cada actividad en toda la superficie de la repoblación y el porcentaje de la repoblación a la que se aplican las actividades. La extensión del tiempo debe ser aquella que requiera como máximo que haya 2 unidades de la misma máquina en campo a la vez para reducir las emisiones por su transporte. En cuanto al porcentaje de la repoblación a la que se aplican, este puede ser mayor que uno si la actividad se debe repetir más de una vez a lo largo del tiempo, como puede ser la eliminación de la competencia en dos años distintos.

Tras haber rellenado correctamente todo lo anterior, se puede leer la cuantificación de la HC en la hoja Resultados, expresados por la unidad funcional (la hectárea de repoblación) y desglosado por etapas y actividades. Asimismo, se aporta un gráfico tipo donuts o *sunburst* que ilustran la atribución de cada etapa y actividad a la huella de carbono. Por otro lado, se aportan dos gráficos que ilustra las emisiones del traslado de personal por actividad de la repoblación y del uso y mantenimiento.

Las hojas de cálculo elaboradas se han utilizado para llevar a cabo dos ejemplificaciones, de tal manera que se pueda tener una idea inicial sobre el verdadero impacto de las repoblaciones forestales, y para identificar limitaciones de la programación o el diseño del método de cálculo. Es importante tener en cuenta para la aplicación de los ejemplos elegidos que, al ser ficticios, se va a suponer que todas las distancias que se tienen en cuenta en los cálculos y que se deben rellenar en la tabla de datos de libre elección sean de 50 km. Además, el tamaño medio de la repoblación se considerará de 100 ha.



Durante la modelización de los ejemplos, se han ido identificando errores y mejorando el Excel. No obstante, las limitaciones identificadas que no se han solventado se mencionan a continuación:

- No tiene en cuenta el trayecto de vuelta de los vehículos de traslado de materiales ni de los coches que trasladan los residuos.
- El peso de la mercancía de cada vehículo se calcula con una ponderación de los pesos de los distintos tipos de bandejas o tubos. Por ello, existe cierto error ya que no todos los vehículos tendrán ambos tipos de material, y los que lo tengan no van a contener los materiales en dicha proporción.
- No se tiene en cuenta las emisiones de la producción de otros materiales que no sean plantas y tubos protectores.
- El Excel es aplicable a un rodal de características homogéneas, por lo que para aplicarlo a una repoblación completa se deberá ejecutar un Excel para cada tipo de rodal.
- Los gráficos tienen una sensibilidad que no permite apreciar las actividades que suponen menos de un 1%.
- Los gráficos de donut o *sunburst* no permiten etiquetar las categorías con el porcentaje que representan dentro de la categoría superior a la que pertenecen.
- Se puede aplicar directamente únicamente a repoblaciones de no más de dos especies de distintas alturas y bandejas forestales.
- Está programado para que el número de unidades de obra de actividades lineales se determine directamente a través de la densidad. Por tanto, si existe un marco de plantación distinto, los resultados se desviarán de la realidad.
- No se está teniendo en cuenta las emisiones por la producción de plantas y tubos protectores para la reposición de marras.

A continuación se describen los ejemplos de repoblación que se han elegido y los resultados obtenidos al aplicar el Excel de cuantificación de HC.



2.1 REPOBLACIÓN PRODUCTORA DE PASTA DE PAPEL EN LA CORNISA CANTÁBRICA

El género *Eucalyptus* es principalmente originario de Australia, llegando a España aproximadamente en 1846 por Pontevedra. El 77% de las masas de eucalipto en España se encuentra en la cornisa cantábrica y sus plantaciones se dedican principalmente a la producción de pasta de papel, aunque se tiende a diversificar los usos. Además, los eucaliptos tienen gran potencial como sumideros de CO₂ debido a su rápido crecimiento y adaptación al cultivo. Teniendo en cuenta lo anterior, se ha considerado que es una opción adecuada aplicar el método de cálculo a una repoblación de *Eucalyptus globulus*, que es la especie más importante del género en el país (Ruiz & Luz, 2010).

En cuanto a las **características de la repoblación** para los datos generales, se establece una densidad de 1430 pies/ha en un marco de 3.5x2 m. La altura de la planta utilizada es de 20 cm, producida en bandeja forestal tipo *Super Leach* de 100 cm³. Se considera que el terreno tiene una pendiente del 40% sin afloramientos rocosos.

En cuanto a las **actividades de la repoblación**, no se requiere tratamiento de la vegetación preexistente al tratarse de un brezal de talla baja (< 40 cm) (Ruiz & Luz, 2010) y al proponerse como método de preparación del suelo en forma de ahoyado mecanizado con *ripper* de dos subsoladores a dos metros de separación prácticamente elimina la vegetación preexistente a hecho debido al marco de plantación. Este tratamiento de suelo consiste en la apertura de hoyos mediante la introducción intermitente de subsoladores de un tractor de cadenas en línea de máxima pendiente.

En la etapa de **uso y mantenimiento** se recomienda realizar eliminación química de la vegetación competidora a través de la aplicación manual realizando un tratamiento anual durante dos años consecutivos a partir del primer otoño.

Esta información se debe adaptar al Excel, que está basado en los datos recopilados en el epígrafe del inventario. Por ello, surgen ciertas limitaciones:

- Las bandejas disponibles son de 150 cm³, por lo que puede provocar desviaciones en las emisiones por traslado.
- No existe una unidad de obra específica para eliminación química de competencia dentro de las tarifas de TRAGSA. Podría considerarse similar la unidad de obra de mantenimiento de cortafuegos. El porcentaje de aplicación se considera 2 veces al aplicarse dos años consecutivos.

Las unidades de obra que se han seleccionado según las características descritas se recogen en la Tabla 23. Se muestra el documento Excel relleno en el Anexo 6.

Tabla 23. Unidades de obra correspondientes a las actividades descritas para la repoblación productora ejemplo. **Fuente:** elaboración propia a partir de las tarifas TRAGSA.

Código	UR	Descripción	σ (h)	Máquina
F01158	mil	Ahoyado 2 rejones, suelo suelto-tránsito	4.800	M01040
F02077	mil	Distribución planta bandeja <=250 cm ³ , distancia <=500 m, pte	1.164	Ninguna
F02093	mil	Plantación bandeja <=250 cm ³ , hoyos, suelo s-trán, pte <50%	28.912	Ninguna
F09104	ha	Mantenimiento manual de cortafuegos con herbicida	56.000	Ninguna

Los resultados numéricos de la cuantificación se recogen en la Ilustración 12, y los gráficos se corresponden con Ilustración 13 e Ilustración 14. Para compensar la limitación de las etiquetas en el gráfico de donut o *sunburst* se ha añadido una columna a la Ilustración 12 del porcentaje parcial que representa cada categoría dentro de su categoría superior. En total, esta repoblación supone unas emisiones de 559.38 kg CO₂ eq/ha.



Desglose de emisiones por etapas del ciclo de vida

Emisiones	Símbolo	Valor	Unidades	%	% parcial
Emisiones de la etapa de adquisición de material	E_AM	67,21	kg CO2 eq/ha	12,02	
Emisiones de la adquisición del total de plantas	E_AM,pl	67,21	kg CO2 eq/ha	12,02	100,00
Emisiones de la adquisición del total de tubos protectores	E_AM,tp	0,00	kg CO2 eq/ha	0,00	0,00
Emisiones de la etapa de la repoblación forestal	E_REP	395,63	kg CO2 eq/ha	70,73	
<i>Emisiones de los traslados de la etapa de repoblación</i>	<i>E_TRAS,REP</i>	<i>50,35</i>	<i>kg CO2 eq/ha</i>	<i>9,00</i>	<i>12,73</i>
Emisiones del traslado de las plantas	E_TRAS,pl	1,04	kg CO2 eq/ha	0,19	2,06
Emisiones del traslado de los tubos protectores	E_TRAS,tp	0,00	kg CO2 eq/ha	0,00	0,00
Emisiones del traslado del personal	E_TRAS,per	46,20	kg CO2 eq/ha	8,26	91,76
Emisiones del traslado de la maquinaria	E_TRAS,MAQ	3,11	kg CO2 eq/ha	0,56	6,18
<i>Emisiones del uso de la maquinaria en la etapa de repoblación</i>	<i>E_MAQ,REP</i>	<i>345,28</i>	<i>kg CO2 eq/ha</i>	<i>61,73</i>	<i>87,27</i>
Emisiones de la producción de maquinaria	E_MAQ,prod	20,00	kg CO2 eq/ha	3,57	5,79
Emisiones del término de vida de maquinaria	E_MAQ,fin		kg CO2 eq/ha	0,00	0,00
Emisiones de la actividad de la maquinaria	E_MAQ,act,i	325,28	kg CO2 eq/ha	58,15	94,21
Emisiones de la etapa de uso y mantenimiento	E_USO	96,54	kg CO2 eq/ha	17,26	
<i>Emisiones de los traslados de la etapa de uso y mantenimiento</i>	<i>E_TRAS,USO</i>	<i>96,54</i>	<i>kg CO2 eq/ha</i>	<i>17,26</i>	<i>100,00</i>
Emisiones del traslado de las plantas	E_TRAS,pl	0,00	kg CO2 eq/ha	0,00	0,00
Emisiones del traslado de los tubos protectores	E_TRAS,tp	0,00	kg CO2 eq/ha	0,00	0,00
Emisiones del traslado del personal	E_TRAS,per	96,54	kg CO2 eq/ha	17,26	100,00
Emisiones del traslado de la maquinaria	E_TRAS,MAQ	0,00	kg CO2 eq/ha	0,00	0,00
<i>Emisiones del uso de la maquinaria en la etapa de uso</i>	<i>E_MAQ,USO</i>	<i>0,00</i>	<i>kg CO2 eq/ha</i>	<i>0,00</i>	<i>0,00</i>
Emisiones de la producción de maquinaria	E_MAQ,prod	0,00	kg CO2 eq/ha	0,00	0,00
Emisiones del término de vida de maquinaria	E_MAQ,fin		kg CO2 eq/ha	0,00	0,00
Emisiones de la actividad de la maquinaria	E_MAQ,act,i	0,00	kg CO2 eq/ha	0,00	0,00
Emisiones de la etapa de gestión de residuos	E_RES	0,00	kg CO2 eq/ha	0,00	
Emisiones del traslado de los residuos	E_TRAS,res	0,00	kg CO2 eq/ha	0,00	0,00
Emisiones del tratamiento de residuos	E_gres	0,00	kg CO2 eq/ha	0,00	0,00
EMISIONES DEL CICLO DE VIDA DE LA REPOBLACIÓN		559,38	kg CO2 eq/ha	100	

Desglose de emisiones por hectárea de las actividades de la repoblación

Nombre de actividad	E_TRAS,per	E_TRAS,MAQ	E_MAQ,prod	E_MAQ,fin	E_MAQ,act
Preparación del suelo Ahoyado con rejón	10,343205	3,11	20,00		325,28
Distribución de planta esp1	1,379094	0,00	0,00		0,00
Plantación esp1 En hoyos	34,47735	0,00	0,00		0,00

Desglose de emisiones por hectárea de las actividades de uso y mantenimiento

Nombre de actividad	E_TRAS,per	E_TRAS,MAQ	E_MAQ,prod	E_MAQ,fin	E_MAQ,act
Eliminación de competencia Química	96,53658	0,00	0,00		0,00

Ilustración 12. Resultados obtenidos en el Excel para la repoblación productora. **Fuente:** elaboración propia.

Reparto de emisiones por etapas del ciclo de vida y procesos unitarios

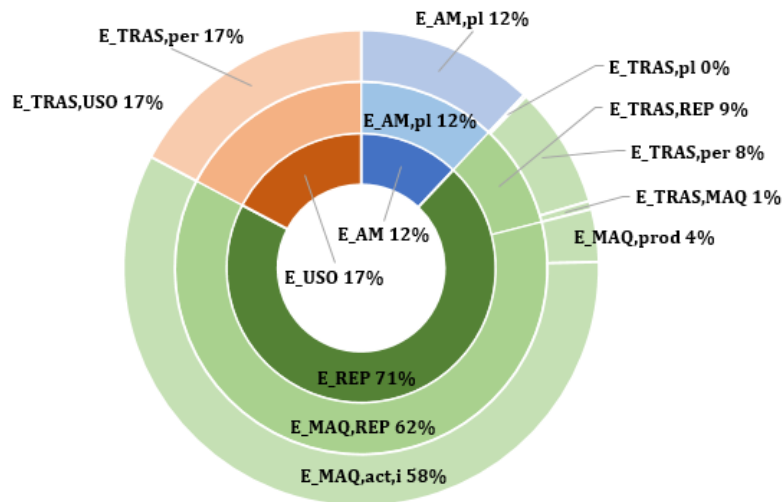


Ilustración 13. Representación del reparto de emisiones por etapas del ciclo de vida y procesos unitarios de la repoblación productora. **Fuente:** elaboración propia.

Sobre este total se observa que las emisiones de la etapa de repoblación suponen seis veces las producidas por la adquisición de materiales y cuatro veces las de la etapa de uso y mantenimiento. La actividad de la maquinaria es el proceso de mayores emisiones, seguido por el traslado de personal de la etapa de uso.

Reparto de emisiones de traslado de personal por actividades de la repoblación (%)

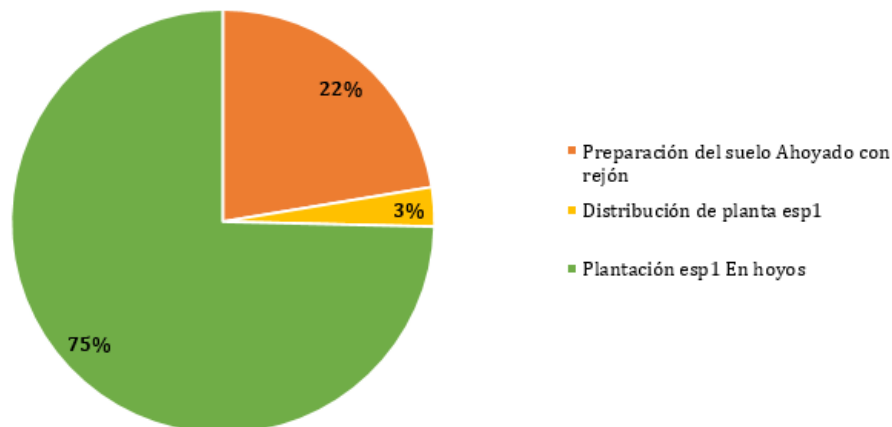


Ilustración 14. Representación del reparto de emisiones de traslado de personal por actividades de la repoblación productora. **Fuente:** elaboración propia.

Las emisiones del traslado de personal son las únicas producidas por las actividades manuales. Se contempla que la plantación es la actividad con mayor contribución en este tipo de emisiones. Esto se debe a que su rendimiento es mayor, es decir, requiere un mayor número de horas para realizar la misma cantidad de unidades de obra.



2.2 REPOBLACIÓN DE USO MÚLTIPLE EN LA ZONA MEDITERRÁNEA CON OMBROCLIMA SECO-SUBHÚMEDO CON 600 MM

Como se ha mencionado anteriormente, las repoblaciones de uso múltiple son la tendencia actual para la compensación de emisiones a través de repoblaciones (Ruiz & Luz, 2010). Como ejemplo, se ha elegido la zona mediterránea, específicamente en ombroclima seco-subhúmedo con unas precipitaciones anuales de 600 mm.

Se ha diseñado una repoblación pluriespecífica cuya información para los **datos generales** es la siguiente. La densidad es de 1 000 pies/ha. Se estima una pendiente media de 30% sin afloramientos rocosos. Se constituye por tres especies, de las cuales dos son fagáceas representando cada una el 30% de la densidad. Requieren bandeja forestal tipo *Super Leach* de 400 cm³ y tubos protectores de 60 cm de altura. La tercera especie es un *Pinus* que representa el 60% de la densidad y requiere bandeja forestal tipo *Super Leach* de 200 cm³. La altura media de la planta es de 30 cm.

La **preparación de terreno** necesaria es la terraza volcada, que también se denomina acaballonado superficial. Esta actuación es un tratamiento mixto, que combina el decapado y subsolado en una misma faja, ejecutados en curva de nivel. No provoca inversión de horizonte en profundidad al remover únicamente los 10 cm superficiales. Normalmente se realiza con un tractor de cadenas.

En cuanto al **uso y mantenimiento**, se requiere un desbroce manual alrededor de cada árbol el segundo año con desbrozadora portada manualmente por el operario.

Algunas consideraciones realizadas relativas a las limitaciones del Excel son:

- El consumo de la desbrozadora no se ha considerado ya que el dato que se ha recogido es para desbrozadoras que se enganchan a tractores, no para portarlas manualmente.
- Las unidades de obra del desbroce manual se calculan introduciendo en el porcentaje de aplicación de la actividad, el valor correspondiente a la mitad de la extensión, debido a que sólo hace falta realizarlo en torno a los pies.
- Se ha considerado el diámetro basal del *Cistus ladanifer* basado en la ilustración a escala de su ficha en Flora Vasculare Ibérica.

En la Tabla 24 se muestran las unidades de obra seleccionadas según todo lo anterior. Se muestra el documento Excel relleno en el Anexo 6.

Tabla 24. Unidades de obra correspondientes a las actividades descritas para la repoblación multiusos ejemplo.
Fuente: elaboración propia a partir de las tarifas TRAGSA

Código	UR	Descripción	σ (h)	Maquina
F01167	km	Acaballonado superficial o terraza volcada pendiente 20-30%	1.800	M01039
F02145	mil	Distribución tubo protector 60 cm D<=500m pte <=50%	1.164	Ninguna
F02140	mil	Colocación tubo protector 60 cm de altura sin tutor	38.000	Ninguna
F02077	mil	Distribución planta bandeja <=250 cm ³ , distancia <=500 m, pte<50%	1.164	Ninguna
F02079	mil	Distribución planta bandeja >250 cm ³ , distancia <=500m, pte <50%	1.663	Ninguna
F02120	mil	Plantación bandeja <=250 cm ³ en suelo mecanizado	20.615	Ninguna
F02121	mil	Plantación bandeja >250 cm ³ en suelo mecanizado	22.677	Ninguna
F02155	mil	Retirada de tubo protector <60 cm	19.000	Ninguna
F04059	ha	Roza con motodesbrozadora diam basal <3cm fcc >80% pte <50%	124.25	Ninguna



Los resultados numéricos de la cuantificación se recogen en la Ilustración 15 y los gráficos se corresponden con, Ilustración 16, Ilustración 17 e Ilustración 18. Para compensar la limitación de las etiquetas en el gráfico de donut o *sunburst* se ha añadido una columna a la Ilustración 15 del porcentaje parcial que representa cada categoría dentro de su categoría superior. En total, esta repoblación supone unas emisiones de 654.71 kg CO2 eq/ha.

Desglose de emisiones por etapas del ciclo de vida

Emisiones	Símbolo	Valor	Unidades	% total	% parcial
Emisiones de la etapa de adquisición de material	E_AM	190,36	kg CO2 eq/ha	29,08	
Emisiones de la adquisición del total de plantas	E_AM,pl	47,00	kg CO2 eq/ha	7,18	24,69
Emisiones de la adquisición del total de tubos protectores	E_AM,tp	143,36	kg CO2 eq/ha	21,90	75,31
Emisiones de la etapa de la repoblación forestal	E_REP	333,58	kg CO2 eq/ha	50,95	
<i>Emisiones de los traslados de la etapa de repoblación</i>	<i>E_TRAS,REP</i>	<i>64,51</i>	<i>kg CO2 eq/ha</i>	<i>9,85</i>	<i>19,34</i>
Emisiones del traslado de las plantas	E_TRAS,pl	1,63	kg CO2 eq/ha	0,25	2,52
Emisiones del traslado de los tubos protectores	E_TRAS,tp	0,24	kg CO2 eq/ha	0,04	0,37
Emisiones del traslado del personal	E_TRAS,per	59,53	kg CO2 eq/ha	9,09	92,28
Emisiones del traslado de la maquinaria	E_TRAS,MAQ	3,11	kg CO2 eq/ha	0,48	4,83
<i>Emisiones del uso de la maquinaria en la etapa de repoblación</i>	<i>E_MAQ,REP</i>	<i>269,07</i>	<i>kg CO2 eq/ha</i>	<i>41,10</i>	<i>80,66</i>
Emisiones de la producción de maquinaria	E_MAQ,prod	16,58	kg CO2 eq/ha	2,53	6,16
Emisiones del término de vida de maquinaria	E_MAQ,fin		kg CO2 eq/ha	0,00	0,00
Emisiones de la actividad de la maquinaria	E_MAQ,act,i	252,48	kg CO2 eq/ha	38,56	93,84
Emisiones de la etapa de uso y mantenimiento	E_USO	68,95	kg CO2 eq/ha	10,53	
<i>Emisiones de los traslados de la etapa de uso y mantenimiento</i>	<i>E_TRAS,USO</i>	<i>68,95</i>	<i>kg CO2 eq/ha</i>	<i>10,53</i>	<i>100,00</i>
Emisiones del traslado de las plantas	E_TRAS,pl	0,00	kg CO2 eq/ha	0,00	0,00
Emisiones del traslado de los tubos protectores	E_TRAS,tp	0,00	kg CO2 eq/ha	0,00	0,00
Emisiones del traslado del personal	E_TRAS,per	68,95	kg CO2 eq/ha	10,53	100,00
Emisiones del traslado de la maquinaria	E_TRAS,MAQ	0,00	kg CO2 eq/ha	0,00	0,00
<i>Emisiones del uso de la maquinaria en la etapa de uso</i>	<i>E_MAQ,USO</i>	<i>0,00</i>	<i>kg CO2 eq/ha</i>	<i>0,00</i>	<i>0,00</i>
Emisiones de la producción de maquinaria	E_MAQ,prod	0,00	kg CO2 eq/ha	0,00	0,00
Emisiones del término de vida de maquinaria	E_MAQ,fin		kg CO2 eq/ha	0,00	0,00
Emisiones de la actividad de la maquinaria	E_MAQ,act,i	0,00	kg CO2 eq/ha	0,00	0,00
Emisiones de la etapa de gestión de residuos	E_RES	61,82	kg CO2 eq/ha	9,44	
Emisiones del traslado de los residuos	E_TRAS,res	60,93	kg CO2 eq/ha	9,31	98,57
Emisiones del tratamiento de residuos	E_gres	0,89	kg CO2 eq/ha	0,14	1,43

EMISIONES DEL CICLO DE VIDA DE LA REPOBLACIÓN

654,71 kg CO2 eq/ha

100

Desglose de emisiones por hectárea de las actividades de la repoblación

Nombre de actividad	E_TRAS,per	E_TRAS,MAQ	E_MAQ,prod	E_MAQ,fin	E_MAQ,act
Tratamiento mixto Acaballonado	9,19396	3,11	16,58		252,48
Distribución de planta esp1	0,459698	0,00	0,00		0,00
Distribución de planta esp2	0,919396	0,00	0,00		0,00
Plantación esp1 En suelo mecanizado	13,79094	0,00	0,00		0,00
Plantación esp2 En suelo mecanizado	13,79094	0,00	0,00		0,00
Distribución de tubo protector	0,689547	0,00	0,00		0,00
Colocación de tubo protector	20,68641	0,00	0,00		0,00

Desglose de emisiones por hectárea de las actividades de uso y mantenimiento

Nombre de actividad	E_TRAS,per	E_TRAS,MAQ	E_MAQ,prod	E_MAQ,fin	E_MAQ,act
Retirada de tubos protectores	13,79094	0,00	0,00		0,00
Eliminación de competencia Roza sin maquinaria	55,16376	0,00	0,00		0,00

Ilustración 15. Resultados obtenidos en el Excel para la repoblación multiusos. **Fuente:** elaboración propia.

Reparto de emisiones por etapas del ciclo de vida y procesos unitarios

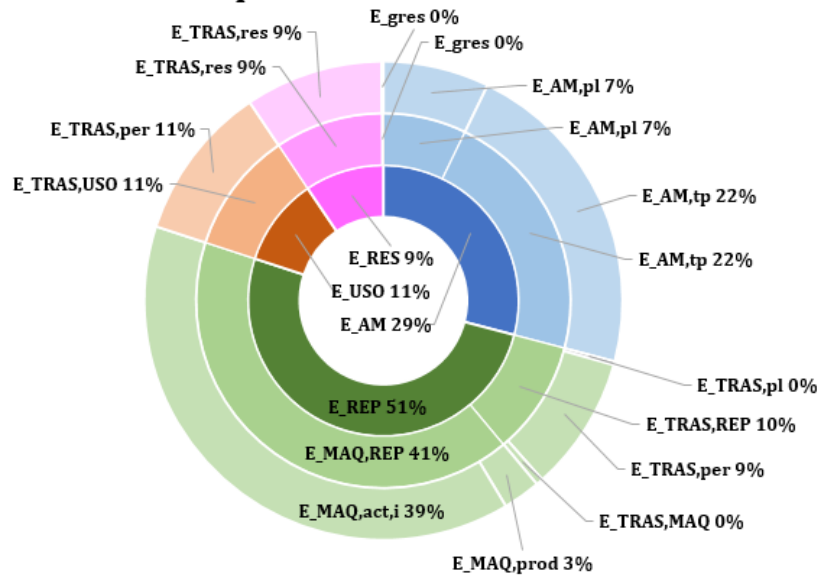


Ilustración 16. Representación del reparto de emisiones por etapas del ciclo de vida y procesos unitarios de la repoblación productora. **Fuente:** elaboración propia.

Al incluir tubos protectores en esta repoblación, la contribución a la HC de la etapa de adquisición de materiales ha tomado mayor importancia (29%). Se aprecia que las proporciones de las actividades, dentro la etapa de repoblación, se mantienen. Por otro lado, dentro de la gestión de residuos, el traslado de estos es el responsable de prácticamente la mayoría de las emisiones.

Reparto de emisiones de traslado de personal por actividades de la repoblación (%)

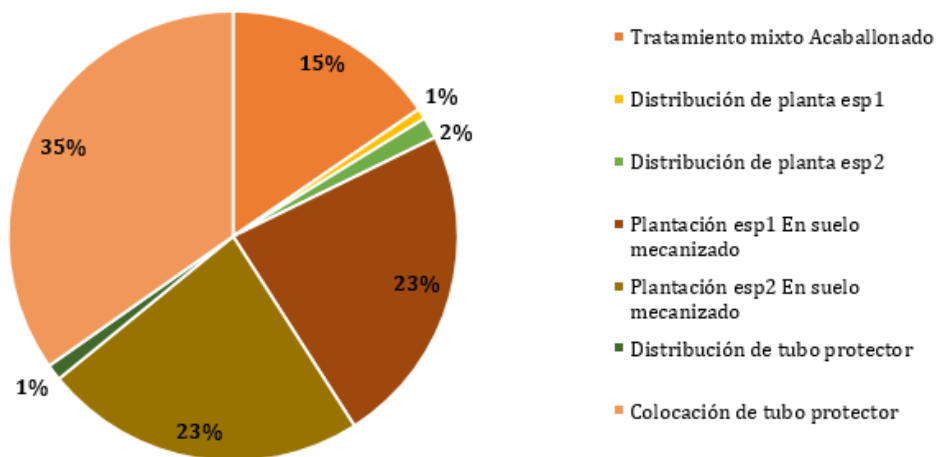


Ilustración 17. Representación del reparto de emisiones de traslado de personal por actividades en la etapa del uso y mantenimiento de la repoblación multiusos. **Fuente:** elaboración propia.

Las emisiones del traslado de personal de la etapa de repoblación muestran que la colocación de los tubos protectores es una actividad que requiere más tiempo que las demás, siendo las distribuciones de material dentro de la repoblación las actividades más rápidas.

Reparto de emisiones de traslado de personal por actividades del uso y mantenimiento (%)

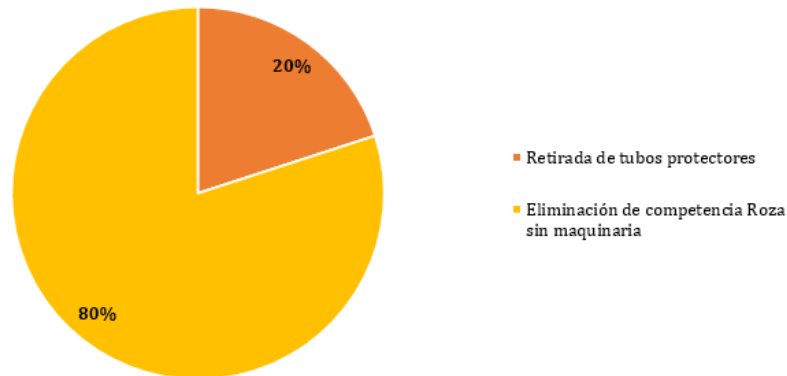


Ilustración 18. Representación del reparto de emisiones de traslado de personal por actividades la etapa de repoblación de la repoblación multiusos. **Fuente:** elaboración propia.

Por otro lado, se comprueba que la eliminación de la competencia es la actividad de la etapa de uso y mantenimiento que más tiempo conlleva y, por tanto, tiene mayor contribución a la HC que la retirada de tubos protectores.



3. CÁLCULO DE ABSORCIONES DE LAS REPOBLACIONES FORESTALES EJEMPLO (HERRAMIENTA DEL REGISTRO DE HUELLA DE CARBONO)

El Registro de la Huella de Carbono proporciona una calculadora de absorciones de masas forestales que se utiliza para la inscripción de proyectos de repoblaciones, de tal forma que se tengan reguladas las emisiones que pueden compensar a través de las repoblaciones realizadas. Esta herramienta se puede utilizar para calcular la rentabilidad de las emisiones producidas en el proceso repoblador respecto a las absorciones potenciales de las masas creadas.

Esta calculadora consiste en un archivo Excel capaz de estimar la absorción total del proyecto de repoblación a realizar, además de establecer las absorciones disponibles. Para que funcione, se deben introducir los datos generales del proyecto, que son la superficie de la plantación, en año de inicio de la plantación y el periodo de permanencia durante el cual el promotor se compromete a gestionar la masa y garantizar su persistencia. Este último debe ser como mínimo 30 años y se considerará como máximo 50 años debido a la incertidumbre que tiene obtener factores de absorción de las especies para periodos tan extensos.

La calculadora diferencia dos tipos de repoblaciones según su gestión: repoblaciones sin aprovechamiento maderero o de aprovechamiento no intensivo, y repoblaciones de aprovechamiento intensivo con cortas a hecho. Para que estime las absorciones, se debe introducir las especies que constituyen las repoblaciones y el número total de pies objetivo de cada una de ellas. De forma añadida, para las repoblaciones de aprovechamiento intensivo, se debe establecer el turno (periodo de tiempo transcurrido entre cortas) como mínimo de 8 años y como máximo el propio periodo de permanencia.

No obstante, estas absorciones no están inmediatamente disponibles para compensar emisiones. En vista a asegurar que los promotores mantengan la masa forestal durante el periodo de permanencia solo se les permite disponer o comercializar el 20% de estas recién habiendo ejecutado el proyecto, menos un 10% de ese 20% que se dedica a la bolsa de garantía. Cada cinco años se revisa el estado de la masa y se ponen a disposición para su uso o comercialización una nueva cantidad de absorciones.

A continuación, se muestran los resultados obtenidos al introducir los datos de cada repoblación ejemplo en la calculadora de emisiones.

DISCUSIÓN

En la discusión se va a llevar a cabo una interpretación del ciclo de vida, tal como se describe en metodología en el apartado de evaluación del impacto. Para identificar las actividades de mayor impacto, se analizan las cuantificaciones de HC de las aplicaciones de los resultados del capítulo anterior, que representan el impacto de las emisiones GEI respecto al cambio climático.

Para ello, se debe hacer una interpretación a distintos niveles. El primer nivel debe ser analizar las etapas del ciclo de vida, profundizando en las actividades que incluyen cada una. Asimismo, se señalarán las características que originan las diferencias de emisiones entre las repoblaciones. Por otro lado, se interpretará el impacto en el contexto de los objetivos, es decir, ponerlas en relación con las emisiones capturadas por los bosques. Por último, se recogerán las limitaciones observadas y las propuestas de mejora.

1. IDENTIFICACIÓN DE IMPACTO POR ACTIVIDADES

A continuación, se comparan las dos repoblaciones ejemplo que se han realizado, ya que los resultados varían entre ellas, de forma general en la Tabla 25.

Tabla 25. Proporción de la HC que producen las etapas del ciclo de vida para cada repoblación ejemplo.
Fuente: elaboración propia.

Etapas	Repoblación productora	Repoblación multiusos
Adquisición de materiales	12.02%	29.08%
Repoblación	70.73%	50.95%
Uso y mantenimiento	17.60%	10.53%
Gestión de residuos	0.00%	9.44%

En los siguientes apartados, se va a diseccionar cada una de las etapas de tal forma que se puedan identificar las actividades de mayor impacto.

1.1 ADQUISICIÓN DE MATERIALES

La adquisición de materiales supone un porcentaje importante de las emisiones. Ante la gran diferencia entre la contribución de esta etapa en ambas repoblaciones, se debe evaluar el origen de tal variación.

Tabla 26. Proporción de la HC que producen los procesos de la etapa de adquisición de materiales para cada repoblación ejemplo. **Fuente:** elaboración propia.

Etapa	Repoblación productora	Repoblación multiusos
Plantas	100%	24.69%
Tubos protectores	0.00%	75.31%

Comparando las aportaciones indicadas en la Tabla 25 y viendo en la Tabla 26 cómo el porcentaje de emisiones correspondiente a la producción de tubos protectores es mucho mayor que la correspondiente a la producción de plantas, se determina que la necesidad de tubos protectores implica un impacto relevante. De hecho, apenas necesitando un 60% de plantas entubadas, su producción emite 3 veces lo que el 100% de plantas, y supone aproximadamente el 20% de la HC del ciclo de vida completo.

No obstante, hay que tener en cuenta que el uso de los tubos protectores permite un ahorro de uso de agua y de producción de plantas al producir un microclima y aumentar la supervivencia de las plantas, tal y como se establece en Arnold & Alston (2012). Esto quiere decir que existen otros impactos que se evitan por el uso de tubos protectores que no se tienen en cuenta en este trabajo al tratarse únicamente de una cuantificación de HC, pero que deben evaluarse para tener una visión más holística del impacto ambiental de esta etapa.

1.2 REPOBLACIÓN

En la Tabla 25 se puede observar que la etapa del ciclo de vida que produce una mayor contribución a las emisiones totales son los procesos de preparación del terreno y plantación. Profundizando en esta etapa, se deben comprobar las emisiones de cada proceso unitario para identificar el origen de la mayoría de las emisiones. Se recogen en la Tabla 27 los datos necesarios para dicha tarea, que han sido extraídos de la Ilustración 12 e Ilustración 15.

Tabla 27. Proporción de la HC que producen los procesos de la etapa de repoblación para cada repoblación ejemplo haciendo referencia a su categoría inmediatamente superior. **Fuente:** elaboración propia.

Proceso unitario	Repoblación productora	Repoblación multiusos
<i>E_TRAS,REP</i>	<i>12.73%</i>	<i>19.34%</i>
E_TRAS,pl	2.06%	2.52%
E_TRAS,tp	0.00%	0.37%
E_TRAS,per	91.76%	92.28%
E_TRAS,maq	6.18%	4.83%
<i>E_MAQ,REP</i>	<i>87.27%</i>	<i>80.66%</i>
E_MAQ,prod	5.79%	6.16%
E_MAQ,fin	0.00%	0.00%
E_MAQ,act,i	94.21%	93.84%



Se aprecia que las actividades mecanizadas son las que producen mayor impacto, dado que representan en torno al 80-90% de las emisiones de la etapa de repoblación, y a su vez esta etapa representa entre un 50-70% de las emisiones de las repoblaciones ejemplo utilizadas. Por tanto, en la repoblación productora las emisiones procedentes del uso de la maquinaria son el 58.15% del total del ciclo de vida, y el 38.56% en la repoblación multiusos (véase Ilustración 12 y Ilustración 15).

Bien es verdad que las emisiones de la producción de la maquinaria estarían mejor ordenadas conceptualmente en la etapa de adquisición de materiales. No obstante, no provocan una gran diferencia en la contribución de las etapas, dado que suponen aproximadamente un 3-5% de las emisiones totales del ciclo de vida (véase Ilustración 12. e Ilustración 15).

Por otro lado, el traslado del personal es el de mayor impacto dentro de los traslados, por lo que se deberá intentar utilizar vehículos lo menos contaminantes posibles y que puedan llevar el mayor número de trabajadores a la vez.

1.2.1 ACTIVIDADES DE LA REPOBLACIÓN

Este apartado es necesario al observar que los valores absolutos de la contribución a la HC de la actividad de la maquinaria difieren en gran medida entre los dos ejemplos de repoblación. La actividad de la maquinaria de la repoblación productora emite 325.28 kg de CO₂ eq por hectárea frente a los 252.48 de la repoblación multiusos.

Es de esperar que las actividades con un rendimiento menor (mayor valor de h por unidad de obra) producirán mayor cantidad de emisiones al estar consumiendo combustible más tiempo para la misma unidad de referencia. Además, se producirán más emisiones cuanto mayor sea el consumo. En caso de querer comparar actividades para determinar cuáles son menos contaminantes, no se puede realizar directamente. Esto se debe a que los rendimientos están expresados en distintas unidades de referencia según el tipo de actividad.

El camino más sencillo es comparar los rendimientos una vez transformados a rendimientos puntuales. Las actividades lineales tendrán un mayor rendimiento (menor número de h por la unidad) cuanto mayor sea la densidad de la plantación. Esto se debe a que a mayor densidad, menor espaciamiento entre los pies y ejecutan más unidades en la misma longitud.

Por ejemplo, el acaballado superficial tiene un rendimiento de 1.8 h/km. Para una densidad de 1 000 pies/ha, la separación de los pies es de 3.15 metros, aproximadamente, mientras que para una densidad de 1 430 pies/ha, la separación es de 2.64 metros. Esto quiere decir que en 1 km equivale a 318 y 379 hoyos, respectivamente. Por tanto, los rendimientos puntuales de cada situación son de 5.6 y 4.75 h/mil. Es decir, a mayor densidad se requiere menos tiempo para realizar más hoyos, dando lugar a un menor impacto.

Consecuentemente, si se tiene que elegir entre varios proyectos y el criterio a seguir es que las actividades mecanizadas sean las de menor impacto, se deberán comparar según el rendimiento de las actividades y el consumo de la maquinaria utilizada. En caso de que las actividades sean del mismo tipo, la comparación puede ser directa. Por el contrario, la comparación entre actividades lineales y puntuales se deben realizar para la misma densidad de plantación, ya que la transformación del rendimiento lineal en puntual para la es función de la densidad.

Para ejemplificar, se han realizado los cálculos para comparar las actividades de las repoblaciones ejemplo, recogidos en la Tabla 28. Los consumos de la maquinaria son distintos, por lo que la decisión también dependerá de ellos. Los rendimientos, una vez transformados los lineales, se comparan. Para el caso de mayor densidad, se optaría por

el acaballonado, dado que tiene un mejor rendimiento (menos h/mil), y produce una menor HC. En cambio, para el caso de la densidad menor, se optaría por el ahoyado con Ripper, dado que su rendimiento es mucho menor y, a pesar de utilizar una máquina de consumo horario mayor, la HC sería menor que si se realizase la actividad lineal.

Tabla 28. Comprobación de la variable que causa la variación de la HC dentro de las emisiones por la actividad de maquinaria. **Fuente:** elaboración propia

Densidad	1000 pies/ha		1430 pies/ha		
	Producción (subolado)	Multiusos (acaballonado)	Productora (subsolado)	Multiusos (acaballonado)	
<i>E_{maq,act,i} (kg CO₂/ha)</i>	227.00	<	252.48	>	301.93
<i>σ (h/mil)</i>	4.8	<	5.6*	>	4.75*
<i>Consumo de la máquina (l/h)</i>	17.5	>	16.38	>	16.38

*transformado

Teniendo en cuenta las dos consideraciones anteriores (a mayor cantidad de horas y mayor consumo horario se producen más emisiones), se puede considerar que mientras los rendimientos sean parecidos, las diferencia entre emisiones será debido al consumo horario. En cambio, cuando los rendimientos son ciertamente distintos, el factor que determinará la diferencia de impacto serán estos mismos. Como los rendimientos dependen de la densidad, esta será la responsable de la variación en la HC en un último término en lo que respecta a las emisiones por la actividad de la maquinaria.

1.3 USO Y MANTENIMIENTO

Teniendo el apartado anterior en cuenta, se puede predecir que en el caso de que las actividades de uso y mantenimiento sean mecanizadas, las emisiones de esta etapa pueden llegar a tener un peso importante en la cuantificación de la HC. Sin embargo, las actividades seleccionadas en los ejemplos son manuales, y por ello parece que el impacto de esta etapa del ciclo de vida no es tan importante como las emisiones de la etapa de repoblación.

Sería interesante comprobar cómo afecta la reposición de marras a la HC y la distribución de las emisiones a cada etapa del ciclo de vida, lo cual no se ha realizado en este trabajo al no incluir esta actividad en las repoblaciones ejemplo.

1.4 GESTIÓN DE RESIDUOS

La evaluación del impacto producido por esta etapa del ciclo de vida es limitada, dado que únicamente se ha realizado para un tratamiento. No obstante, a través de los factores de emisión se puede predecir que el tratamiento en vertedero tiene menor impacto que cualquier tipo de reciclaje o incineración. Esto puede aplicarse al cambio climático, pero se debería analizar de forma más holística considerando distintas categorías de impacto, como se haría en el ACV, para justificar la elección otros tratamientos distintos al de vertedero. De todas formas, el traslado de los residuos produce emisiones mucho mayores que el propio tratamiento.

2. RENTABILIDAD DEL IMPACTO

A partir de los resultados obtenidos con la herramienta del Registro de Huella de Carbono para cada repoblación ejemplo, se ha podido analizar la rentabilidad del impacto del proceso repoblador respecto a las absorciones de la masa forestal creada.

Se observa que la repoblación productora tiene estimadas unas absorciones previstas al final del periodo de permanencia, que es el mismo para ambas repoblaciones, mucho mayores que la repoblación multiusos. Esto se debe a que el eucalipto tiene una mayor tasa de crecimiento que las fagáceas y pino elegidos y, además, la gestión de la masa hace que se mantenga en un estadio joven durante el cual la tasa de captura es mayor que en estadios más tardíos. Esto se basa en la información recogida en la introducción.

La HC producida por los procesos repobladores suponen un impacto mínimo comparado con las absorciones previstas. Esto se puede ver con los datos que se han recogido en la Tabla 29.

Tabla 29. Rentabilidad de la HC de las repoblaciones ejemplo según las tasas de captura de las repoblaciones de Registro de Huella de Carbono. **Fuente:** elaboración propia.

Repoblación ejemplo	Productora	Multiusos
HC (kg CO ₂ eq/ha)	559.38	654.71
Absorciones anuales (t CO ₂ /ha año)	10.18	2.75
Proporción HC frente a absorciones anuales (%)	5.50	23.81
Proporción HC frente a absorciones totales (%)	0.14	0.59
Tiempo de amortiguación de HC	20 días	2 meses y 26 días
Amortiguación del impacto al final del periodo (pies/ha)	2	6

La huella de carbono producida por los procesos repobladores es amortiguada en 20 días para la repoblación productora, y casi 3 meses para la repoblación multiusos. Esto se ha determinado calculando la proporción que representa la HC frente a las absorciones anuales, y traduciéndolo en tiempo. Las absorciones anuales han sido calculadas dividiendo las absorciones totales por el periodo de permanencia.

En cambio, para determinar el número de pies en cada hectárea que se dedican a la amortiguación de la HC del proceso repoblador, se necesita saber la proporción que representa la HC frente a las absorciones totales. En ninguno de los dos casos llega al 1%, por lo que se puede considerar que su impacto es mínimo y su rentabilidad máxima.

3. LIMITACIONES Y PROPUESTAS DE MEJORA

A lo largo del trabajo se han tomado decisiones y consideraciones que producen limitaciones para conseguir los objetivos de la forma óptima. Se recogen a continuación.

Tabla 30. Lista de las limitaciones de este trabajo y las propuestas de mejora. **Fuente:** elaboración propia.

Limitaciones	Propuesta de mejora
<i>Metodología y límites del sistema</i>	
El enfoque es sobre un único impacto: el calentamiento global.	Aplicar un ACV.
La adquisición de materiales incluye únicamente a las plantas y los tubos protectores.	Incluir otros materiales que son utilizados en las repoblaciones, como los tutores, mallas cinéticas y herbicidas.
Las emisiones por la producción, uso y término de vida de las desbrozadoras no se han tenido en cuenta.	Realizar o buscar ACV correspondientes, y medir su consumo.
Las emisiones de término de vida de las máquinas no se han tenido en cuenta debido a la falta de inventarios	Realizar o buscar ACV de término de vida de la maquinaria.
Al haberse ceñido a las tarifas de TRAGSA, se dejan fuera del sistema numerosos trabajos forestales.	Extender el estudio para que se consideren todos los trabajos forestales posibles.
<i>Calidad de los datos</i>	
El inventario de la producción de planta no especifica si se trata de frondosas o coníferas. No incluye las emisiones relacionadas con el gasto del agua. No es aplicable a planta a raíz desnuda.	Realizar o buscar ACV específicos de la producción de frondosas y coníferas. Añadir emisiones relacionadas con el gasto de agua. Realizar o buscar ACV específico para planta a raíz desnuda
El factor de emisión de la producción de tubos protectores ha sido calculado en base a los inventarios de producción de los materiales que se necesitan para la producción de los tubos y las necesidades energéticas del proceso, por lo que no es de la misma calidad que el resto de los factores de emisión, al no estar verificado por Ecoinvent	Realizar o buscar ACV de tubos protectores verificados por una institución equivalente a Ecoinvent.
Los factores de traslado de material y maquinaria son valores medios supuestos para ciertas condiciones de carga que pueden no coincidir con la situación real, por lo que se genera cierto error.	Realizar las correcciones adecuadas para cada situación, de tal forma que el factor de emisión sea lo más representativo de la realidad posible.
No se han considerado los trayectos de los vehículos de traslado de materiales ni de residuos de vuelta, cuando van vacíos, ya que tal como se ha planteado no producirían emisiones.	
Existe infinidad de tipos de vehículos, tanto para el traslado de materiales como de personal, y maquinaria, pero solo se han tenido en cuenta una pequeña parte.	Incluir un mayor número de vehículos con factores de emisión específicos para cada tipo de vehículo y máquina.
Las modelizaciones en Easycargo de ejemplo (no se han utilizado para el cálculo de resultados) no han tenido en cuenta las limitaciones de peso de los vehículos.	Tener en cuenta los límites de peso de los vehículos a la hora de modelizar en Easycargo.
Algunos de los inventarios utilizados de las emisiones de producción de maquinaria no han sido realizados en base a maquinaria real.	Realizar o buscar ACV realizados en base a maquinaria real.
Los pesos de la maquinaria y su consumo han sido aproximados.	Utilizar datos medidos sobre el peso y consumo de cada máquina en específico.
No todos los datos tienen una calidad óptima, al haber datos obtenidos por comunicación personal, no son obtenidos en sitio o no tienen la cobertura geográfica o temporal adecuada.	Realizar una búsqueda más intensa para asegurar la cobertura temporal y geográfica. Siempre que sea posible, realizar los ACV que no existan y obtener los datos del sitio. Evaluar la sensibilidad y precisión de este método comparándolo con datos recogidos en sitio.



Limitaciones	Propuesta de mejora
<i>Método de cálculo y Hoja de cálculo</i>	
El método de cálculo diseñado y por tanto la Hoja de cálculo pueden no reflejar correctamente la forma de considerar ciertos trabajos forestales que no estén recogidos en TRAGSA.	Actualizar ambos una vez se haya extendido el estudio.
El Excel puede hacer la cuantificación para un rodal cada vez, que tenga un máximo de dos especies de altura y bandejas forestales distintas.	Rediseñar el Excel para que se puedan elegir un mayor número de plantas de distintas características.
El Excel no puede realizar la cuantificación sin datos obtenidos a través de otro programa (Easycargo).	Integrar las fórmulas de optimización de Easycargo en el Excel.
Dado que se mezclan tipos de bandejas forestales en un mismo vehículo, se ha realizado una estimación basada en las proporciones de la repoblación para cada especie. No obstante, no coincide esta proporción con la que es transportada en el vehículo.	Modificar el Excel de tal forma que se pueda especificar cuántas bandejas de cada tipo traslada cada vehículo.
Easycargo no modeliza más de 50 000 unidades de mercancía, por lo que no se obtienen datos concretos para mercancías superiores.	Dividir la mercancía en grupos de menor cantidad y modelizar en vehículos más pequeños.
Se calcula el número de unidades de obra para actividades lineales a partir de la densidad, ignorando un posible marco de plantación específico.	Añadir al Excel la opción de elegir que se aplique un marco de plantación o no.
El Excel se ha diseñado sin que se incluyan las emisiones por la producción de plantas y tubos protectores que se utilizarán en la reposición de marras.	Reprogramar el Excel para que sí se incluyan.
Los gráficos de donut tienen una sensibilidad aproximada del 1%, por lo que las actividades de menor aportación a la HC no se verán representadas	Esperar a que Microsoft solvante estas limitaciones o utilizar otro programa de diseño de gráficos.
Los gráficos de donut no permiten etiquetar las subcategorías con el porcentaje que representan dentro de la categoría superior a la que pertenecen.	

Tras esta recopilación de limitaciones, se aprecia que tienen mayor presencia en la calidad de los datos, seguido por el método de cálculo diseñado. En el caso de este último, se piensa que se pueden solucionar de forma relativamente rápida y sencilla. En cambio, las limitaciones de la calidad de los datos requieren de un proceso más complejo para poder ponerlas fin. A pesar de la presencia de limitaciones, este estudio es pionero en el cálculo de la HC de las repoblaciones forestales. Por tanto, sirve como guía y acercamiento preliminar, de tal forma que permite realizar cambios y adaptaciones según las consideraciones que cada uno vaya a tomar a la hora de realizar la cuantificación de la HC de un proyecto de repoblación forestal.

A continuación, en el epígrafe de conclusiones, se recogerá una serie de propuestas para poder mejorar de forma general este trabajo y dando pie a vías de investigación que podrían realizarse.



CONCLUSIONES

Parte de la interpretación tal y como se describe en la metodología se recoge en este epígrafe. La complejidad de este trabajo hace necesaria una recopilación de las ideas más importantes que se han extraído tras la revisión bibliográfica, la aplicación de la metodología y el análisis de los resultados, en forma de conclusiones.

El objetivo principal de este trabajo era facilitar la cuantificación de la huella de carbono de las repoblaciones, lo cual se ha realizado tras resumir la metodología de la normativa y proporcionar los datos necesarios para realizar la cuantificación. Durante el proceso para alcanzar este objetivo, se ha comprobado que la metodología de ACV sufre de una complejidad notable dada la dificultad para obtener factores de emisión consistentes y de calidad alta.

Ante esta contemplación, se concluye que esta complejidad hace que los ACV y cuantificaciones de HC puede ser el motivo por el que hay escasez de ellos y por tanto su uso no sea más extendido. Por tanto, se propone motivar la realización de ACV relacionados con todas las industrias, pero especialmente para ámbito forestal, dado que es uno de los que menos han sido analizados. Una opción para incentivarlo sería proporcionando la norma a un precio más asequible y en formato de formulario o aplicación, de tal forma que se deban rellenar los campos necesarios, facilitando el procedimiento en gran medida a las organizaciones y asegurando que se realiza de forma consistente, ya que la redacción de la norma da lugar a distintas interpretaciones.

Por otro lado, el objetivo principal no se hubiese cumplido sin haber diseñado un método de cálculo de carácter generalista para que se pueda aplicar a una casuística de repoblaciones lo más amplia posible, con ciertas limitaciones. El método de cálculo es complejo, por lo que para facilitar su aplicación, se ha desarrollado una hoja de cálculo programada buscando que el carácter intuitivo y visual para automatizar todos los cálculos. Tras haberlo elaborado y aplicado, se concluye que este Excel supone las bases de un programa que podría normalizar la cuantificación de la HC de las repoblaciones forestales, independientemente de sus características, y que puede introducir mejoras para evitar las limitaciones indicadas. Asimismo, este programa, que en cierta manera sería una automatización de la hoja de cálculo creada, puede permitir cuantificar la HC de una repoblación completa, y no solo de un rodal. Además, es recomendable analizar cómo varía la HC en función de las actividades y características de las repoblaciones.

No obstante, el Excel ha permitido cuantificar la HC de dos repoblaciones ejemplo e identificar las actividades de mayor impacto. Ante el análisis de los resultados, se concluye que la actividad de la maquinaria contribuye en mayor medida a la HC, por lo que si se quiere producir el menor impacto posible, se deberá mejorar el rendimiento y el consumo de la maquinaria, y utilizar combustibles menos contaminantes. Por otro lado, se concluye que el traslado del personal es de un impacto considerable, por lo que se recomienda utilizar vehículos de emisiones mínimas, como pueden ser los eléctricos. También se ha identificado que la producción de tubos protectores supone la segunda aportación más destacable a la HC.

Por otro lado, tras un análisis a un nivel más profundo, se concluye que la densidad de la repoblación es el factor que influye en unas mayores o menores emisiones producidas durante la población, con mismas condiciones de consumo de la maquinaria, dado que tiene una relación estrecha con el rendimiento y la cantidad de actividad que se debe realizar, influyendo por tanto en las horas de trabajo.



En relación con la cuantificación realizada utilizando la hoja de cálculo elaborada, se concluye que se puede utilizar de guía para conocer las actividades donde se deben realizar medidas de reducción de emisiones de GEI, pero no puede utilizarse aisladamente para tomar ciertas decisiones sobre las características o recursos aplicar en la repoblación forestal. Es posible que algunas decisiones, como utilizar coches eléctricos, reduzca el impacto del proceso repoblador respecto al cambio climático siguiendo únicamente los resultados de la cuantificación. No obstante, existen otros muchos tipos de impactos ambientales que no se cuantifican a través de la HC. Por ello, es conveniente que se sigan las siguientes vías de investigación, para poder tener una comprensión más holística del impacto que tienen las decisiones y características de una repoblación forestal:

- El uso de los tubos protectores aporta mayor tasa de supervivencia de las plantas y un menor gasto de agua, por lo que se deberá comprobar que las emisiones de la producción de los tubos protectores son menores que las que tendría producir las plantas para la reposición de marras y el uso de agua. En este estudio se debe incluir el ACV de los tratamientos de residuos que se pueden aplicar a los tubos protectores retirados, ya que aunque, por ejemplo, el vertedero tenga menor impacto para el cambio climático, se produce una lixiviación que se evita a través del reciclaje.
- La elección de los vehículos para reducir las emisiones por traslado de personal deberá estar basada en una comparación de los impactos obtenidos a través de ACV para cada vehículo, ya que es posible que si bien puede esperarse que los vehículos de combustión sean más contaminantes, cuando la obtención de las baterías de los coches eléctricos y la electricidad que necesitan pueden producir una mayor cantidad de impactos.

Por otro lado, parte del objetivo principal del trabajo era incrementar la sensibilidad de los balances de carbono de las repoblaciones forestales como medidas compensatorias. Esto se ha conseguido proporcionando los datos maestros y el método de cálculo. Para que el objetivo principal sea efectivo, se propone introducir la herramienta de cálculo elaborada (y corregida) en el Registro de Huella de Carbono del MITECO, de tal forma que se resten las emisiones producidas por el proceso repoblador de las absorciones disponibles de la masa forestal creada para que la compensación y comercialización sean más ajustadas a la realidad.

A través del cumplimiento de los objetivos del trabajo, se ha llegado a una de las conclusiones más importantes. Al analizar la rentabilidad de las emisiones de GEI de la repoblación forestal respecto a las absorciones previstas de la masa forestal creada, se observa el proceso repoblador supone menos de un 1% de las emisiones que puede capturar la masa forestal creada. La HC producida por los procesos repobladores suponen un impacto mínimo comparado con las absorciones previstas. Por tanto, este mínimo impacto hace que las repoblaciones sean una medida compensatoria totalmente recomendable.

Para concluir, las repoblaciones forestales son una herramienta que se puede utilizar para llegar a cumplir numerosas metas de distintos ODS. La calidad de entidad pública que posee la UPM la hace responsable de ser partícipe en el camino hacia las metas. Especialmente para la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Montes, Forestal y del Medio Natural son de gran interés dado que su personal está altamente capacitado para trabajar en el diseño de estas repoblaciones, y están formando a nuevos profesionales cuyas capacidades son aptas para desarrollar repoblaciones forestales.

De esta manera, si la UPM realizase repoblaciones forestales como medida compensatoria, no solo estaría cumpliendo con su responsabilidad para con el mundo, actuando contra el cambio climático, sino que estaría creando empleo que podrían ocupar



tanto los jóvenes ingenieros como los más experimentados. De esta manera se está incluyendo la **meta 8.6** “reducir considerablemente la proporción de jóvenes que no están empleados y no cursan estudios ni reciben capacitación” a la larga lista de metas de los ODS que se pueden cumplir a través de la aplicación de repoblaciones forestales”.

Por otro lado, este trabajo es una aportación a la **meta 13.3** “mejorar la educación, la sensibilización y la capacidad humana e institucional respecto de la mitigación del cambio climático” dado que aumenta el conocimiento del impacto de la repoblación forestal, pudiendo determinar de forma más exacta la capacidad de mitigación del cambio climático al incluir las emisiones producidas al realizar la repoblación en los balances de carbono.



BIBLIOGRAFÍA

1. PÁGINAS WEBS

- Acuerdo de París*. Ec.europa.eu (2020). European Commission. Recuperado 21 octubre 2020, de https://ec.europa.eu/clima/policies/international/negotiations/paris_es
- Bandejas forestales diseñados a medida*. Plasnor.com (2020). Recuperado 21 octubre 2020, de <https://www.plasnor.com/es/bandejas-forestales/>
- Bosques españoles y su evolución*. Mapa.gob.es. (2020). Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Recuperado 9 septiembre 2020, de <https://www.mapa.gob.es/es/desarrollo-rural/temas/politica-forestal/inventario-cartografia/inventario-forestal-nacional/index.aspx>
- Buscador de proyectos de absorción*. Miteco.gob.es. (2020). Ministerio de Transición Ecológica. Recuperado 21 octubre 2020, de https://www.miteco.gob.es/es/cambio-climatico/temas/mitigacion-politicas-y-medidas/buscador_proyectos.aspx
- Cambio climático*. Un.org. (2019) Desarrollo Sostenible. Recuperado 8 septiembre 2020, de <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/climate-change-2/>.
- Diferencia entre el gasóleo A, B y C*. Agrupaciongasoil.es (2020). Recuperado 21 octubre 2020, de <http://www.agrupaciongasoil.es/blog/diferencia-entre-el-gasoleo-a-b-y-c/#:~:text=Por%20este%20motivo%2C%20est%20C3%A1n%20destinados,se%20emplea%20tambi%C3%A9n%20para%20calefacci%C3%B3n>.
- European Green Deal*. Ec.europa.eu. (2020). European Commission. Recuperado 8 septiembre 2020, de https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en#documents
- Flota de camiones de transporte de mercancías*. Lgk.es (2020). Recuperado 21 octubre 2020, de <https://lgk.es/flota-camiones-de-transporte/>
- Huella de carbono UPM - Actividades de Reducción*. Sites.google.com. (2014). Recuperado 9 septiembre 2020, de <https://sites.google.com/site/carbonfootprintmontes/actividades-de-reduccion>
- Información general sobre el Registro de huella, compensación y proyectos de absorción de CO2*. Miteco.gob.es (2020). Ministerio de Transición Ecológica. Recuperado 21 octubre 2020, de https://www.miteco.gob.es/es/cambio-climatico/temas/mitigacion-politicas-y-medidas/que_es_Registro.aspx
- Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero (GEI)*. Miteco.gob.es. (2020) Recuperado 8 septiembre 2020, de <https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/sistema-espanol-de-inventario-sei-/Inventario-GEI.aspx>.
- Kyoto 1st commitment period (2008–12)*. Ec.europa.eu (2020). European Commission. Recuperado 21 octubre 2020, de [https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/progress/kyoto_1_es#:~:text=Kioto%3A%20primer%20periodo%20de%20compromiso%20\(2008%2D2012\),-Pol%C3%ADtica&text=El%20Protocolo%20de%20Kioto%20\(1997,de%20gases%20de%20efecto%20invernadero](https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/progress/kyoto_1_es#:~:text=Kioto%3A%20primer%20periodo%20de%20compromiso%20(2008%2D2012),-Pol%C3%ADtica&text=El%20Protocolo%20de%20Kioto%20(1997,de%20gases%20de%20efecto%20invernadero).



Land use and forestry regulation for 2021-2030. Ec.europa.eu (2020). European Comission. Recuperado 21 octubre 2020, de https://ec.europa.eu/clima/policies/forests/lulucf_en

Mitigación: políticas y medidas. Miteco.gob.es (2020). Ministerio de Transición Ecológica . Recuperado 21 octubre 2020, de https://www.miteco.gob.es/es/cambio-climatico/temas/mitigacion-politicas-y-medidas/informeannual2019_tcm30-510846.pdf

¿Qué es un tractor de alta potencia?. Interempresas.net (2020). Recuperado 21 octubre 2020, de <https://www.interempresas.net/Grandes-cultivos/Articulos/149908-Que-es-un-tractor-de-alta-potencia.html>

Reglamento Armonizado Clasificación de Vehículos. Sice.oas.org (2020). Recuperado 21 octubre 2020, de <http://www.sice.oas.org/trade/mrcsrs/resolutions/AN3594.asp>



2. RECURSOS LITERARIOS

- Arnold, J., & Alston, S. (2012). Life cycle assessment of the production and use of polypropylene tree shelters. *Journal Of Environmental Management*, 94(1), 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2011.09.005>
- Antón Vallejo, M. A. (2004). *Utilización del Análisis del ciclo de vida en la evaluación del impacto ambiental del cultivo bajo invernadero mediterráneo*. Universitat Politècnica de Catalunya. Disponible en: <http://hdl.handle.net/2117/94137> Link a capítulo específico es: <https://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/6827/04CAPITOL3.pdf>
- Cunningham, S., Mac Nally, R., Baker, P., Cavagnaro, T., Beringer, J., Thomson, J., & Thompson, R. (2015). Balancing the environmental benefits of reforestation in agricultural regions. *Perspectives In Plant Ecology, Evolution And Systematics*, 17(4), 301-317. doi: 10.1016/j.ppees.2015.06.001
- Demoly, J., & Montserrat, P. (2020). *Cistus*. Recuperado 21 octubre 2020, de http://www.floraiberica.es/floraiberica/texto/pdfs/03_066_01_Cistus.pdf
- Ecological Transport Information Tool for Worldwide Transports. (2020). Recuperado 21 octubre 2020, de https://www.ecotransit.org/download/EcoTransIT_World_Methodology_Data_100521.pdf
- Falkowski, P., Scholes, Boyle, Canadell, Canfield, & Elser et al. (2000). The Global Carbon Cycle: A Test of Our Knowledge of Earth as a System. *Science*, 290(5490), 291-296. <https://doi.org/10.1126/science.290.5490.291>
- Fuss, S., Lamb, W., Callaghan, M., Hilaire, J., Creutzig, F., & Amann, T. et al. (2018). Negative emissions—Part 2: Costs, potentials and side effects. *Environmental Research Letters*, 13(6), 063002. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aabf9f>
- Haya Leiva, E. (2016). Análisis de ciclo de vida. *Escuela de organización industrial, España*. Disponible en: https://static.eoi.es/savia/documents/teoria_acv_migma1.pdf
- Huerga, E. C., & Navarro, S. H. (2008). Estimación del secuestro de carbono en suelos bajo masas forestales de *Pinus halepensis* en Castilla y León (España). *Cuadernos de la SECF*, (25). Disponible en: https://www.researchgate.net/profile/Jesus_Martin-Gil2/publication/256619681_Estimation_of_carbon_sequestration_by_Pinus_halepensis_forest_soils_in_Castilla_y_Leon_Spain/links/0deec52879a3b26f5f000000.pdf
- Karhu K, Wall A, Vanhala P et al. (2011) Effects of afforestation and deforestation on boreal soil carbon stocks—comparison of measured C stocks with Yasso07 model results. *Geoderma* 164:33–45. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2011.05.008>
- Laganiere, J., Angers, D., & Pare, D. (2010). Carbon accumulation in agricultural soils after afforestation: a meta-analysis. *Global Change Biology*, 16(1), 439-453. doi: 10.1111/j.1365-2486.2009.01930.x
- Lewis, T., Verstraten, L., Hogg, B., Wehr, B., Swift, S., & Tindale, N. et al. (2019). Reforestation of agricultural land in the tropics: The relative contribution of soil, living biomass and debris pools to carbon sequestration. *Science Of The Total Environment*, 649, 1502-1513. doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.08.351
- Lin, J., Rohleder, C., & Nurcan, S. (2018). Material Management in LCA Integrated PLM. *2018 IEEE International Conference on Engineering, Technology and Innovation (ICE/ITMC)*. doi: 10.1109/ice.2018.8436374



- Lippke, B., Oneil, E., Harrison, R., Skog, K., Gustavsson, L., & Sathre, R. (2011). Life cycle impacts of forest management and wood utilization on carbon mitigation: knowns and unknowns. *Carbon Management*, 2(3), 303-333. <https://doi.org/10.4155/cmt.11.24>
- Liu, X., Yang, T., Wang, Q., Huang, F., & Li, L. (2018). Dynamics of soil carbon and nitrogen stocks after afforestation in arid and semi-arid regions: A meta-analysis. *Science Of The Total Environment*, 618, 1658-1664. doi: 10.1016/j.scitotenv.2017.10.009
- MAPA. (2017). *Informe Anual de Indicadores: Agricultura, Pesca, Alimentación y Medio Ambiente*. Miteco.gob.es. Recuperado 5 diciembre 2020, de https://www.miteco.gob.es/ministerio/pags/Biblioteca/Revistas/pdf_AAYPP%2Finforme_anual_agric_pesca_ali_mm_2017.pdf.
- Martínez, L., Cuéllar, Y., Páez, N., & Pedraza, J. (2018). Huella de Carbono del Ciclo de Vida de Plantaciones Forestales Comerciales (*Eucalyptus grandis*, *Pinus patula*) y Forestal Protectora (*Guadua angustifolia kunth*) en Colombia. In *Advances in Cleaner Production, Proceedings of the 7th International Workshop* (Vol. 21, pp. 88-89). Disponible en: http://www.advancesincleanerproduction.net/7th/files/sessoes/6A/1/martinez_la_et_al_a_cademic.pdf
- Moreira Muzio, M. (2020). *Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero*. Inventariogei.ambiente.gob.ar. Recuperado 8 septiembre 2020, de <https://inventariogei.ambiente.gob.ar/files/inventario-nacional-gei-argentina.pdf>.
- Nave, L., Walters, B., Hofmeister, K., Perry, C., Mishra, U., Domke, G., & Swanston, C. (2018). The role of reforestation in carbon sequestration. *New Forests*, 50(1), 115-137. <https://doi.org/10.1007/s11056-018-9655-3>
- Pan, Y., Luo, T., Birdsey, R., Hom, J., & Melillo, J. (2004). New estimates of carbon storage and sequestration in China's forests: effects of age-class and method on inventory-based carbon estimation. *Climatic Change*, 67(2-3), 211-236.
- Pardos Carrión, J. A. (2010). *Los ecosistemas forestales y el secuestro de carbono ante el calentamiento global*. Madrid: Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria. Disponible en: http://www.inia.es/gcontrec/pub/60587OT_LIBRO_WEB_1277883079734.pdf
- Pemán García, J.; Navarro Cerrillo, R.M.; Nicolás Peragón, J.L.; Prada Sáez, M.A.; Serrada Hierro, R. (2012) Producción y Manejo de semillas y plantas forestales. Tomo I. Naturaleza y parques nacionales. Serie Forestal. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente.
- Ruiz, C., & Luz, M. (2010). El ciclo de vida de la madera aserrada de *Eucalyptus globulus* Labill-Valle del Mantaro. Disponible en: <http://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/UNCP/2579/Cerron%20Ruiz.pdf?sequence=1>
- Ruiz, F., & López, G., & Toval, G., & Alejano, R. (2008). Selvicultura de *Eucalyptus globulus* Labill. En: Serrada, R. Montero, G.; Reque, J.A. (Eds.) Compendio de Selvicultura Aplicada en España, pp 117-154. Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria. Ministerio de Educación y Ciencia. Madrid.
- Serrada, R. (2000). Tratamiento de la vegetación preexistente.
- Serrada, R. (2018). La preparación del suelo en la repoblación forestal.



- Taylor, S., & Marconi, S. (2020). Rethinking global carbon storage potential of trees. A comment on Bastin et al. (2019). *Annals Of Forest Science*, 77(2). <https://doi.org/10.1007/s13595-020-0922-z>
- TRAGSA. (2020). Tarifas TRAGSA 2020 Trabajos forestales y medioambientales. Recuperado 7 abril 2020, de <http://tarifas.tragsa.es/prestowebisapi.dll?FunctionGo&id=5841&cod=TRAGSA2020-1.0879/F&path=Tragsa2020W-Act-no-sujetas-Trgsa-Resto.cfg>
- Umaña Morera, M. (2011). Sostenibilidad y ciclo de vida de los materiales. Disponible en: https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/14046/Una%C3%B1aMarisel_Tesina.pdf
- Voicu, M., Shaw, C., Kurz, W., Huffman, T., Liu, J., & Fellows, M. (2017). Carbon dynamics on agricultural land reverting to woody land in Ontario, Canada. *Journal Of Environmental Management*, 193, 318-325. doi: 10.1016/j.jenvman.2017.02.019
- Wernet, G., Bauer, C., Steubing, B., Reinhard, J., Moreno-Ruiz, E., and Weidema, B. (2016). The ecoinvent database version 3 (part I): overview and methodology. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, [online] 21(9), pp.1218–1230. Disponible en: <<http://link.springer.com/10.1007/s11367-016-1087-8>>.



3. NORMATIVA

- España. Ley 43/2003, de 21 de noviembre, de Montes. Boletín Oficial del Estado, 22 de noviembre de 2003, núm. 280.
- España. Proyecto de Ley de Cambio Climático y Transición Energética 121/00019. Boletín Oficial de las Cortes Generales. 29 de mayo de 2020. Núm 19-1. Disponible en: http://www.congreso.es/public_oficiales/L14/CONG/BOCG/A/BOCG-14-A-19-1.PDF
- España. Real Decreto 289/2003, del 7 de marzo, sobre comercialización de los materiales forestales de reproducción. Boletín Oficial del Estado, 8 de marzo de 2003, núm. 58, pp. 9262-9299. Disponible en: <https://www.boe.es/boe/dias/2003/03/08/pdfs/A09262-09299.pdf>
- ISO. (2006). UNE-EN ISO 14040:2006, Gestión ambiental. Análisis del Ciclo de Vida. Principios y marco de referencia. *Normas ISO*.
- ISO. (2013). ISO 14067:2013 Greenhouse gases — Carbon footprint of products — Requirements and guidelines for quantification and communication. *Normas ISO*
- UNFCCC. (1997) Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change adopted at COP3 en Kyoto, Japan, el 11 diciembre 1997
- Unión Europea. Reglamento (UE) 0036/2020 del Consejo, de 4 de marzo de 2020, por el que se establece el marco para lograr la neutralidad climática y se modifica el Reglamento (UE) 2018/1999 (“Ley del Clima Europea”). Disponible en: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?qid=1588581905912&uri=CELEX:52020PC0080>

Anexo 1. DESCRIPCIÓN DE FUENTES

En este anexo se incluyen unas tablas donde se caracterizan los inventarios o fuentes de donde se han obtenido los factores de emisiones.

Tabla 31. Descripción del inventario utilizado para la caracterización de la adquisición de materia prima correspondiente a las plantas. **Fuente:** Ecoinvent.

Inventario	Fuente	Ecoinvent
<i>1 p Tree seedling, for planting {RER} tree seedling production, in unheated greenhouse / APOS, U (del proyecto Ecoinvent 3 - allocation at point of substitution - unit).</i>	Unidad de referencia	1 planta
	Periodo de validez	2002
	Detalles	Emisiones calculadas a partir de un conjunto de 1 000 plantas de vivero sin calefacción. La producción de las 1 000 plantas requiere 1.05 kg de polietileno de alta densidad (HDPE) y 0.0525 kg de plástico envolvente de polietileno lineal de baja densidad (LLDPE) además de las semillas, sustrato y fertilizante. El empaquetado consta de 3.65 kg de cartón que se desecha tras la plantación, pero las emisiones relacionadas con el desecho se incluyen en el inventario.
	Límites	No incluye emisiones por el gasto de agua.
	Calidad	Alta – excepto cobertura temporal

Tabla 32. Descripción del inventario utilizado para la producción del polipropileno. **Fuente:** Ecoinvent.

Inventario	Fuente	Ecoinvent
<i>1 kg Polypropylene, granulate {RER} production APOS, U (del proyecto Ecoinvent 3 - allocation at point of substitution - unit)</i>	Unidad de referencia	1 kg
	Periodo de validez	2011-2016
	Detalles	Representa un mix de tecnologías de producción que incluye: polimerización en suspensión, polimerización en suspensión a granel y polimerización en fase gaseosa utilizando catalizadores de Ziegler-Natta y metalloceno.
	Límites	Desde que entran los materiales a la fábrica hasta que el polipropileno está listo para salir de ella. Incluye energía suministrada pero no electricidad.
	Calidad	Media-alta – excepto cobertura temporal y tecnológica.

Tabla 33. Descripción del inventario utilizado para la producción del aceite lubricante. **Fuente:** Ecoinvent.

Inventario	Fuente	Ecoinvent
<i>1 kg Lubricating oil {RER} production / APOS, U (del proyecto Ecoinvent 3 - allocation at point of substitution - unit).</i>	Unidad de referencia	1 kg
	Periodo de validez	2000-2020
	Detalles	Este inventario está basado en datos bibliográficos e industriales de la producción. Los distintos tipos de aceites se consiguen a través del procesamiento del diésel.
	Límites	Incluye desde que el diésel entra en la fábrica hasta que está listo para salir de ella.
	Calidad	Alta

Tabla 34. Descripción del inventario utilizado para la producción del acero. **Fuente:** Ecoinvent.

Inventario	Fuente	Ecoinvent
<i>1 kg Steel, low-alloyed {RER} steel production, electric, low-alloyed / APOS, U (del proyecto Ecoinvent 3 - allocation at point of substitution - unit)</i>	Unidad de referencia	1 kg
	Periodo de validez	2013-2023
	Detalles	Procesado de acero para distintos usos.
	Límites	Incluye desde que llega el material a la fábrica hasta que el acero está listo para salir de la fábrica.
	Calidad	Alta

Tabla 35. Descripción del inventario utilizado para la producción del acero. **Fuente:** UK Government GHG Conversion Factors for Company Reporting.

Fuente	UK Government GHG Conversion Factors for Company Reporting
Unidad de referencia	1 kWh
Periodo de validez	31/07/2019
Detalles	Factor de emisión del mix eléctrico.
Límites	Para este tipo de factores, siempre se usa el del año anterior.
Calidad	Alta

Tabla 36. Descripción del inventario utilizado para la producción del polietileno de baja densidad para el empaquetado. **Fuente:** Ecoinvent.

Inventario	Fuente	Ecoinvent
<i>1 kg Polyethylene, low density, granulate {RER} production / APOS, U (del proyecto Ecoinvent 3 - allocation at point of substitution - unit).</i>	Unidad de referencia	1 kg
	Periodo de validez	2011-2016
	Detalles	Representa un mix de tecnologías de producción que incluye: polimerización de alta presión usando oxígeno y polimerización de alta presión usando peróxidos orgánicos. .
	Límites	Desde que entran los materiales a la fábrica hasta que el polipropileno está listo para salir de ella. Incluye energía suministrada pero no electricidad
	Calidad	Alta – excepto cobertura temporal

Tabla 37. Descripción del inventario utilizado para el factor de emisión de transporte en vehículo comercial ligero. **Fuente:** Ecoinvent.

Inventario	Fuente	Ecoinvent
<i>1 tkm Transport, freight, light commercial vehicle {GLO} market for / APOS, U (del proyecto Ecoinvent 3 - allocation at point of substitution - unit)</i>	Unidad de referencia	1 tkm
	Periodo de validez	2011
	Detalles	Se trata de un factor de emisión medio calculado a partir del transporte total realizado en el mundo.
	Límites	Incluye producción, uso (transporte) y término de vida. Además, incluye las emisiones de procesos de subcontratación.
	Calidad	Alta – excepto cobertura temporal

Tabla 38. Descripción del inventario utilizado para el factor de emisión de transporte en camiones de 7.5-16 toneladas de MMA. **Fuente:** Ecoinvent.

Inventario	Fuente	Ecoinvent
<i>1 tkm Transport, freight, lorry 7.5-16 metric t, unregulated {ZA} transport, freight, lorry 7.5-16 metric t, unregulated APOS, U (del proyecto Ecoinvent 3 - allocation at point of substitution - unit)</i>	Unidad de referencia	1 tkm
	Periodo de validez	2019
	Detalles	Se trata de un factor de emisión medio calculado a partir del transporte total realizado en Sudáfrica.
	Límites	Incluye producción, uso (transporte) y término de vida. Además, incluye las emisiones de procesos de subcontratación.
	Calidad	Alta – excepto geográfica

Tabla 39. Descripción del inventario utilizado para el factor de emisión de transporte en camiones de 16-32 toneladas de MMA. **Fuente:** Ecoinvent.

Inventario	Fuente	Ecoinvent
<i>1 tkm Transport, freight, lorry 16-32 metric t, unregulated {ZA} market for transport, freight, lorry 16-32 metric t, unregulated APOS, U (del proyecto Ecoinvent 3 - allocation at point of substitution - unit)</i>	Unidad de referencia	1 tkm
	Periodo de validez	2019
	Detalles	Se trata de un factor de emisión medio calculado a partir del transporte total realizado en Sudáfrica.
	Límites	Incluye producción, uso (transporte) y término de vida. Además, incluye las emisiones de procesos de subcontratación.
	Calidad	Alta – excepto geográfica

Tabla 40. Descripción del inventario utilizado para el factor de emisión de transporte de un coche de pasajeros genérico. **Fuente:** Ecoinvent.

Inventario	Fuente	Ecoinvent
<i>1 m Transport, passenger car {RER} market for APOS, U (del proyecto Ecoinvent 3 - allocation at point of substitution - unit)</i>	Unidad de referencia	1 m
	Periodo de validez	2012
	Detalles	
	Límites	Incluye producción, uso y término de vida.
	Calidad	Alta – excepto cobertura temporal

Tabla 41. Descripción del inventario de la producción de 1 kg de tractor agrícola. **Fuente:** Ecoinvent.

Inventario	Fuente	Ecoinvent
<i>1 kg Tractor, 4-wheel, agricultural {RoW} production APOS, U (del proyecto Ecoinvent 3 - allocation at point of substitution - unit)</i>	Unidad de referencia	1 kg
	Periodo de validez	1995-2002
	Detalles	Calculado en base a un tractor de 3 000 kg y 7 000 horas de vida útil.
	Límites	Incluye producción, mantenimiento y término de vida del tractor. No incluye emisiones por abrasión del neumático.
	Calidad	Alta – excepto cobertura temporal

Tabla 42. Descripción del inventario de la producción de una retroexcavadora. **Fuente:** Ecoinvent

Inventario	Fuente	Ecoinvent
<i>1 p Hydraulic digger {RER} / production / APOS, U (del proyecto Ecoinvent 3 - allocation at point of substitution - unit)</i>	Unidad de referencia	1 unidad de 15 000 kg
	Periodo de validez	1996-2001
	Detalles	Calculado en base a una máquina ficticia hecha de 100% de acero con una vida útil de 10 000 horas. Se recomienda no utilizar el inventario si va a tener un papel importante.
	Límites	Incluye el transporte de las partes al lugar de ensamblaje, el transporte al comprador, el consumo eléctrico y energético. No incluye término de vida por haberse utilizado recursos 100% reciclados.
	Calidad	Media – excepto cobertura temporal y representatividad

Tabla 43. Descripción del inventario de la producción de una máquina de obras públicas. **Fuente:** Ecoinvent

Inventario	Fuente	Ecoinvent
<i>1 p Building machine {RER} / production / APOS, U (del proyecto Ecoinvent 3 - allocation at point of substitution - unit)</i>	Unidad de referencia	1 unidad de 10 000 kg
	Periodo de validez	1996-2001
	Detalles	Calculado en base a una máquina ficticia hecha de 100% de acero con una vida útil de 10 000 horas. Se recomienda no utilizar el inventario si va a tener un papel importante.
	Límites	Incluye el transporte de las partes al lugar de ensamblaje, el transporte al comprador, el consumo eléctrico y energético. No incluye término de vida por haberse utilizado recursos 100% reciclados.
	Calidad	Media – excepto cobertura temporal y representatividad

Tabla 44. Descripción del inventario utilizado para el factor de emisión de transporte de un tractor agrícola en tráiler. **Fuente:** Ecoinvent.

Inventario	Fuente	Ecoinvent
<i>1 tkm Transport, tractor and trailer, agricultural {GLO} / market for / APOS, U (del proyecto Ecoinvent 3 - allocation at point of substitution - unit)</i>	Unidad de referencia	1 tkm
	Periodo de validez	1991-2002
	Detalles	Transporte de tractor en tráiler con velocidad media de 15 km/h.
	Límites	Incluye montaje del tractor en el tráiler, transporte, y descarga del tractor.
	Calidad	Alta – excepto cobertura temporal



Tabla 45. Descripción del inventario utilizado para la producción del acero. **Fuente:** UK Government GHG Conversion Factors for Company Reporting.

Fuente	UK Government GHG Conversion Factors for Company Reporting
Unidad de referencia	1 t
Periodo de validez	31/07/2019
Detalles	Factor de emisión de distintos tratamientos para residuos plásticos.
Límites	Para este tipo de factores, siempre se usa el del año anterior.
Calidad	Alta

Anexo 2. DESGLOSE DE FACTORES

En este anexo se incluyen los desgloses de las emisiones de GEI de cada inventario que se ha obtenido por la herramienta SimaPro en base a datos de Ecoinvent. Asimismo, se incluye el desglose de emisiones de la electricidad.

Tabla 46. Desglose de los GEI por la producción de 1 planta. **Fuente:** Ecoinvent.

Sustancia	Compartimento	Emisiones (kg CO ₂ eq)
Dióxido de carbono biogénico	Aire	0.00720277
Dióxido de carbono, fósil	Aire	0.03606404
Dióxido de carbono, en el aire	Crudo	-0.00319830
Dióxido de carbono, transformación de terreno	Aire	0.00020608
Monóxido de dinitrógeno	Aire	0.00445757
Etano, 1,1,1,2-tetrafluoro-, HFC-134a	Aire	0.00022746
Metano, biogénico	Aire	0.00011667
Metano, fósil	Aire	0.00173645
Hexafluoruro de azufre	Aire	0.00016643
Sustancias remanentes		0.00005550
TOTAL (por planta)		0.04703467

Tabla 47. Desglose de los GEI de la producción de 1 kg de polipropileno. **Fuente:** Ecoinvent.

Sustancia	Compartimento	Emisiones (kg CO ₂ eq)
Dióxido de carbono, biogénico	Aire	0.02520609
Dióxido de carbono, fósil	Aire	1.46392130
Dióxido de carbono, en el aire	Crudo	-0.01429270
Monóxido de dinitrógeno	Aire	0.00266807
Metano, fósil	Aire	0.30509075
Sustancias remanentes		0.00327844
TOTAL (por kg de polipropileno)		1.78587190

Tabla 48. Desglose de los GEI de la producción de 1 kg de aceite lubricante. **Fuente:** Ecoinvent

Sustancia	Compartimento	Emisiones (kg CO ₂ eq)
Dióxido de carbono, biogénico	Aire	0.03519420
Dióxido de carbono, fósil	Aire	0.94726422
Dióxido de carbono, en el aire	Crudo	-0.02848215
Monóxido de dinitrógeno	Aire	0.00814788
Metano, biogénico	Aire	0.00127652
Metano, fósil	Aire	0.07944004
Hexafluoruro de azufre	Aire	0.00149984
Sustancias remanentes		0.00154373
TOTAL (por kg de aceite lubricante)		1.04588430

Tabla 49. Desglose de GEI de la producción de 1 kg de acero. **Fuente:** Ecoinvent.

Sustancia	Compartimento	Emisiones (kg CO ₂ eq)
Dióxido de carbono biogénico	Aire	0.02680646
Dióxido de carbono, fósil	Aire	0.39667497
Dióxido de carbono, en el aire	Crudo	-0.02091013
Dióxido de carbono, transformación de terreno	Aire	0.00097935
Monóxido de dinitrógeno	Aire	0.00461009
Metano, biogénico	Aire	0.00147815
Metano, fósil	Aire	0.01938052
Hexafluoruro de azufre	Aire	0.00134220
Sustancias remanentes		0.00043803
TOTAL (por kg de acero)		0.43079965

El uso de la electricidad en Reino Unido implica emisiones por la generación de esta y emisiones por su transmisión y distribución, como se recoge en la siguiente tabla, con datos del año 2018:

Tabla 50. Datos de emisiones de la electricidad en Reino Unido en 2018. **Fuente:** UK Government GHG Conversion Factors for Company Reporting.

Actividad	Unidad	kg CO ₂ eq	kg CO ₂	kg CH ₄	kg N ₂ O
Generación	kWh	0.28307	0.28088	0.00066	0.00153
Trasmisión y distribución	kWh	0.02413	0.02394	0.00006	0.00013
TOTAL (por kWh)		0.30720	0.30482	0.00072	0.00166

Tabla 51. Desglose de GEI de la producción de 1 kg de LDPE. **Fuente:** Ecoinvent

Sustancia	Compartimento	Emisiones (kg CO ₂ eq)
Dióxido de carbono biogénico	Aire	0.05154673
Dióxido de carbono, fósil	Aire	1.54856510
Dióxido de carbono, en el aire	Crudo	-0.03197805
Monóxido de dinitrógeno	Aire	0.00566853
Metano, biogénico	Aire	0.00210018
Metano, fósil	Aire	0.28411569
Hexafluoruro de azufre	Aire	0.00224961
Sustancias remanentes		0.00149800
TOTAL (por kg de LDPE)		1.86376580



Tabla 52. Desglose de GEI del mercado de transporte de 1 tkm de vehículo comercial ligero.

Fuente: Ecoinvent

Sustancia	Compartimento	Emisiones (kg CO ₂ eq)
Dióxido de carbono, fósil	Aire	1.431539500
Monóxido de dinitrógeno	Aire	0.016765226
Metano, fósil	Aire	0.014642822
Sustancias remanentes		0.001642564
TOTAL (por tkm)		1.463661200

Tabla 53. Desglose de GEI del mercado de transporte de 1 tkm de camión de 7.5-16 t.

Fuente: Ecoinvent

Sustancia	Compartimento	Emisiones (kg CO ₂ eq)
Dióxido de carbono biogénico	Aire	0.000200816
Dióxido de carbono, fósil	Aire	0.174734790
Monóxido de dinitrógeno	Aire	0.001493956
Metano, fósil	Aire	0.003151346
Sustancias remanentes		-0.000088700
TOTAL (por tkm)		0.179482180

Tabla 54. Desglose de GEI del mercado de transporte de 1 tkm de un camión de 16-32 t.

Fuente: Ecoinvent

Sustancia	Compartimento	Emisiones (kg CO ₂ eq)
Dióxido de carbono biogénico	Aire	0.000129095
Dióxido de carbono, fósil	Aire	0.112329030
Monóxido de dinitrógeno	Aire	0.001049584
Metano, fósil	Aire	0.002019512
Sustancias remanentes		-0.000057000
TOTAL (por tkm)		0.115470180

Tabla 55. Desglose de GEI del mercado de transporte de 1 km en coche de pasajeros genérico.

Fuente: Ecoinvent

Sustancia	Compartimento	Emisiones (kg CO ₂ eq)
Dióxido de carbono biogénico	Aire	0.000000268
Dióxido de carbono, fósil	Aire	0.000225342
Monóxido de dinitrógeno	Aire	0.000001990
Metano	Aire	0.000000312
Metano, fósil	Aire	0.000002080
Sustancias remanentes		-0.000000144
TOTAL (por km)		0.000229849

Tabla 56. Desglose de GEI la fabricación de 1 kg de tractor agrícola. **Fuente:** Ecoinvent

Sustancia	Compartimento	Emisiones (kg CO ₂ eq)
Dióxido de carbono biogénico	Aire	0.29249973
Dióxido de carbono, fósil	Aire	7.06001770
Dióxido de carbono, en el aire	Crudo	-0.25118540
Dióxido de carbono, cambio de uso de suelo	Aire	0.02049278
Monóxido de dinitrógeno	Aire	0.06863922
Metano, biogénico	Aire	0.01782729
Metano, fósil	Aire	0.55964430
Metano, tetrafluoruro, CFC-14	Aire	0.00846580
Hexafluoruro de azufre	Aire	0.01295948
Sustancias remanentes		0.00370390
TOTAL (por kg de tractor)		7.79306480

Tabla 57. Desglose de GEI la fabricación de una retroexcavadora. **Fuente:** Ecoinvent

Sustancia	Compartimento	Emisiones (kg CO ₂ eq)
Dióxido de carbono biogénico	Aire	1047.3261
Dióxido de carbono, fósil	Aire	40768.726
Dióxido de carbono, en el aire	Crudo	-756.81908
Monóxido de dinitrógeno	Aire	257.31298
Metano, fósil	Aire	2288.7383
Hexafluoruro de azufre	Aire	57.721964
Sustancias remanentes		95.339663
TOTAL (por retroexcavadora)		43 758.346000

Tabla 58. Desglose de GEI la fabricación de una máquina de obras públicas. **Fuente:** Ecoinvent

Sustancia	Compartimento	Emisiones (kg CO ₂ eq)
Dióxido de carbono biogénico	Aire	693.6115
Dióxido de carbono, fósil	Aire	27142.8760
Dióxido de carbono, en el aire	Crudo	-501.3696
Monóxido de dinitrógeno	Aire	171.0337
Metano, fósil	Aire	1524.3517
Hexafluoruro de azufre	Aire	38.2612
Sustancias remanentes		63.3392
TOTAL (por retroexcavadora)		29 132.1040



Tabla 59. Desglose de GEI del mercado de transporte de 1 tkm de transporte de un tractor agrícola en tráiler.
Fuente: Ecoinvent

Sustancia	Compartimento	Emisiones (kg CO₂ eq)
Dióxido de carbono, fósil	Aire	0.152449200
Monóxido de dinitrógeno	Aire	0.001706140
Metano, fósil	Aire	0.001465657
Sustancias remanentes		0.000066700
TOTAL (por km)		0.155687680

Anexo 3. TABLA DE VARIABLES

A continuación se recogen en dos tablas un resumen de toda la simbología de las ecuaciones, en qué ecuaciones aparecen cada una, su significado, la unidad en la que se deben utilizar, y el lugar de origen de los valores que pueden tomar las variables. La primera tabla recoge un desglose de las emisiones producidas en cada etapa del ciclo de vida de la repoblación

Tabla 60. Resumen de las etapas y procesos que producen emisiones GEI en el ciclo de vida de la repoblación.
Fuente: elaboración propia.

Ecuación	Simbología	Significado	Ecuación de cálculo
3	E_{AM}	Emisiones de la etapa de adquisición de material	
	$E_{AM,pl}$	Emisiones de la adquisición del total de plantas	Ecuación 8
	$E_{AM,tp}$	Emisiones de la adquisición del total de tubos protectores	Ecuación 9
4	E_{REP}	Emisiones de la etapa de la repoblación forestal	
	$E_{TRAS,rep}$	Emisiones de los traslados de la etapa de repoblación	Ecuación 6
	$E_{MAQ,rep}$	Emisiones del uso de la maquinaria en la etapa de repoblación	Ecuación 18
5	E_{USO}	Emisiones de la etapa de uso y mantenimiento	
	$E_{TRAS,uso}$	Emisiones de los traslados de la etapa de uso y mantenimiento	Ecuación 6
	$E_{MAQ,uso}$	Emisiones del uso de la maquinaria en la etapa de uso	Ecuación 18
6	E_{TRAS}	Emisiones del traslado	
	$E_{TRAS,pl}$	Emisiones del traslado de las plantas	Ecuación 10
	$E_{TRAS,tp}$	Emisiones del traslado de los tubos protectores	Ecuación 12
	$E_{TRAS,maq}$	Emisiones del traslado de la maquinaria	Ecuación 23
	$E_{TRAS,per}$	Emisiones del traslado del personal	Ecuación 14
7	E_{RES}	Emisiones de la etapa de gestión de residuos	
	$E_{TRAS,res}$	Emisiones del traslado de los residuos	Ecuación 25
	E_{gres}	Emisiones del tratamiento de residuos	Ecuación 27



Tabla 61. Recopilación de las variables utilizadas en el método de cálculo diseñado para la cuantificación de la HC de la repoblación forestal. **Fuente:** elaboración propia.

Ecuación	Otras ecuaciones	Simbología	Variable	Unidad	Origen
8	5	$E_{AM,pl}$	<i>Emisiones correspondientes a la adquisición del total de plantas</i>	<i>kg CO₂ eq/ha</i>	
		f_{pl}	Factor de emisión de la adquisición de la planta	kg CO ₂ eq/planta	Tabla 21
	9, 11, 13	d	Densidad de la repoblación	planta/ha	Libre
9	5	$E_{AM,tp}$	<i>Emisiones correspondientes a la adquisición del total de tubos protectores</i>	<i>kg CO₂ eq/ha</i>	
		f_{tp}	Factor de emisión de la adquisición del tubo protector	kg CO ₂ eq/t tubo	Tabla 7
	12	P_{tp}	Peso del tubo protector	g/tubo	Tabla 14
	13	α	Proporción de plantas entubadas	%	Libre
10	6	$E_{TRAS,pl}$	<i>Emisiones correspondientes al traslado de plantas</i>	<i>kg CO₂ eq/ha</i>	
	12	$f_{V,i}$	Factor de emisión de transporte de vehículo de tipo i	kg CO ₂ eq/tkm	Tabla 21
		$N_{V,i}$	Número de vehículos de tipo i	ud	<i>Easycargo</i>
		D_{pl}	Distancia entre el vivero y la repoblación	km	Libre
		P_{bd}	Peso de una bandeja forestal	t	Tabla 11
		$N_{T,bd,V,i}$	Número total de bandejas forestales en vehículo de tipo i lleno	ud	<i>Easycargo</i>
		$N_{t,bd,V,i}$	Número total de bandejas forestales en vehículo de tipo i no lleno	ud	<i>Easycargo</i>
	11, 12, 13, 14, 18, 22, 25, 27	S	Superficie de la repoblación	ha	Libre
11		$N_{T,bd}$	<i>Número total de bandejas forestales</i>	<i>ud</i>	
		N_{alv}	Número de alveolos de la bandeja forestal	ud	Tabla 11
		$N_{T,bd,i}$	Número total de bandejas forestales en vehículo i	ud	<i>Easycargo</i>
12		$E_{TRAS,tp}$	<i>Emisiones correspondientes al traslado de tubos protectores</i>	<i>kg CO₂ eq/ha</i>	
		$N_{T,tp,V,i}$	Número total de tubos protectores en vehículo de tipo i lleno	ud	<i>Easycargo</i>
		$N_{t,tp,V,i}$	Número total de tubos protectores en vehículo de tipo i no lleno	ud	<i>Easycargo</i>
		D_{tp}	Distancia entre la fábrica de tubos protectores y la repoblación	km	Libre
13	25	$N_{T,tp}$	<i>Número total de tubos protectores</i>	<i>ud</i>	
14		$E_{TRAS,per}$	<i>Emisiones correspondientes al traslado de personal</i>	<i>kg CO₂ eq/ha</i>	
	24	f_{car}	Factor de emisión del coche	kg CO ₂ eq/km	Tabla 21
		D_{car}	Distancia entre la oficina y la repoblación	km	Libre



15	14	$N_{tray,car}$	<i>Número de trayectos de coche con personal</i>	<i>ud</i>	
	17, 23	t_{fin}	Tiempo deseado para finalización de las tareas	días	Libre
16	14	N_{car}	<i>Número de coches</i>	<i>ud</i>	
		Car	Número de pasajeros en un coche	ud	Fijo = 4
17	16	N_{per}	<i>Número total de peones</i>	<i>ud</i>	
	19, 20, 21, 23	$N_{act,i}$	Número total de unidades de obra de la actividad i	ud	Libre
	17, 19, 20, 21	$\eta_{act,i}$	Rendimiento de la actividad i	h/ud	Tarifas TRAGSA
	23	t_{jor}	Duración de la jornada de trabajo	h/día	Fijo = 8
18		E_{MAQ}	<i>Emisiones correspondientes al uso de la maquinaria</i>	<i>kg CO₂ eq/ha</i>	
19	18	$E_{MAQ,prod}$	<i>Emisiones alícuotas de la producción de la maquinaria</i>	<i>kg CO₂ eq</i>	
		$f_{prod,i}$	Factor de emisión de la producción de la máquina del tipo i	kg CO ₂ eq/ud	Tabla 21
	20	$vida_{util,i}$	Vida útil de la máquina de tipo i	h	Tabla 17
20	18	$E_{MAQ,fin}$	<i>Emisiones alícuotas del término de la maquinaria</i>	<i>kg CO₂ eq</i>	
		$f_{fin,i}$	Factor de emisión del término de la máquina de tipo i	kg CO ₂ eq/ud	-
21	18	$E_{MAQ,act}$	<i>Emisiones correspondientes a la actividad de la maquinaria</i>	<i>kg CO₂ eq</i>	
		f_c	Factor de emisiones de gasóleo B	kg CO ₂ eq/l	Tabla 21
		ch,i	Consumo horario de la máquina de tipo i	l/h	Tabla 16
22		$E_{TRAS,maq}$	<i>Emisiones correspondientes al traslado de la maquinaria</i>	<i>kg CO₂ eq/ha</i>	
		$N_{tray,maq}$	Número de trayectos para traslado de maquinaria	ud	Fijo = 2
		f_{gon}	Factor de emisión de transporte de máquina con góndola	kg CO ₂ eq/tkm	Tabla 21
		D_{maq}	Distancia entre el almacén de máquinas y la repoblación	km	Libre
		$P_{maq,i}$	Peso de la máquina de tipo i	t	Tabla 18
23	22	$N_{maq,i}$	<i>Número de máquinas de tipo i</i>	<i>ud</i>	
24		$E_{TRAS,res}$	<i>Emisiones correspondientes al traslado de residuos de tubos</i>	<i>kg CO₂ eq/ha</i>	
		D_{res}	Distancia entre la repoblación y el centro de tratamiento de residuos	km	Libre
25		$N_{car,res}$	<i>Número de coches para el traslado de residuos</i>	<i>ud</i>	
		$cupo_{car}$	Cupo de tubos protectores que caben en un coche	ud	Tabla 19
26		E_{gres}	<i>Emisiones correspondientes a la gestión de residuos de tubos</i>	<i>kg CO₂ eq/ha</i>	
		$f_{gres,i}$	Factor de emisión del tratamiento del tipo i de residuos plásticos	kg CO ₂ eq/t	Tabla 21

Anexo 4. DESCRIPCIÓN ACTIVIDADES

Este anexo es una recopilación de las características que definen las unidades de obra que corresponden a las actividades que componen la etapa de repoblación y de uso y mantenimiento. De esta manera, se facilita encontrar la unidad de obra correcta en las tarifas de TRAGSA. Asimismo, las tablas de este anexo se han utilizado para diseñar el Excel que lleva a cabo la cuantificación de la HC.

Las modalidades de las actividades se construyen combinando todas las variables que se encuentren en la misma columna que, en algunos casos, serán condicionantes para otras variables y sus valores. La combinación de las variables determina los rendimientos y la maquinaria utilizada, en caso de ser mecanizadas. Los rendimientos de estas actividades están referidos a unidades puntuales, lineales y de extensión.

1. REPOBLACIÓN FORESTAL

1.1 PREPARACIÓN DEL TERRENO

En la preparación del terreno existen actividades de eliminación de vegetación preexistente y actividades de preparación del suelo, aunque también hay actividades que agrupan ambas actividades. En caso de que se decida hacer ambos tipos de actividades, la eliminación de vegetación será previa a la preparación de suelo.

1.1.1 ELIMINACIÓN DE VEGETACIÓN PREEXISTENTE

1.1.1.1 *Lineal*

Tabla 62. Caracterización las modalidades de la actividad *decapado*, del proceso unitario de eliminación de vegetación preexistente, dentro del proceso de preparación del terreno. **Fuente:** tarifas TRAGSA.

Actividad	Variable	Maquinaria
Decapado	Pendiente < 20%	Tractor orugas 151/190
	>20% - ≤30%	CV

1.1.1.2 *Extensión*

Tabla 63. Caracterización de las modalidades de la roza sin maquinaria en extensión del proceso unitario de eliminación de vegetación dentro del proceso de preparación del terreno. **Fuente:** tarifas TRAGSA.

Actividad	Variables
Roza sin maquinaria	Díámetro basal < 3 cm
	3-6 cm
	6-8 cm
	Pendiente < 50 %
	> 50 %
	Superficie de cabida cubierta < 50 %
50-80 %	
> 80 %	
Tipo	Manual
	Con moto desbrozadora

Tabla 64. Caracterización de las modalidades de la roza con maquinaria en extensión del proceso unitario de eliminación de vegetación dentro del proceso de preparación del terreno. **Fuente:** tarifas TRAGSA.

Actividad	Variables		Maquinaria
Roza con maquinaria	Fracción de cabida cubierta	< 50 %	Retroaraña 131/160 CV Desbrozadora de cadenas
		50-80 %	
		80-100 %	
		100 %	
Tipo	Con retroaraña		Retroaraña 131/160 CV Desbrozadora de cadenas
		Mecanizada	
		< 10 %	Tractor orugas 100 CV Desbrozadora de cadenas
		10-20 % 20-30 %	

1.1.2 ELIMINACIÓN DE VEGETACIÓN PREEXISTENTE Y PREPARACIÓN DE SUELO (COMBINADO)

1.1.2.1 Lineal

Tabla 65. Caracterización las modalidades de la actividad *acaballonado* del proceso unitario de eliminación de vegetación preexistente y preparación de suelo, dentro del proceso de preparación del terreno. **Fuente:** tarifas TRAGSA.

Actividad	Variable	Maquinaria
Acaballonado	Pendiente	< 20 %
		20-30 %
	Tipo	Con desfonde Superficial o terraza volcada

1.1.2.2 Extensión

Tabla 66. Caracterización las modalidades de la actividad *desbroce y ahoyado con retroaraña*, del proceso unitario de eliminación de vegetación preexistente y preparación de suelo, dentro del proceso de preparación del terreno. **Fuente:** tarifas TRAGSA.

Actividad	Variable	Maquinaria
Desbroce y ahoyado retroaraña	Densidad	< 1200 pies/ha
		> 1200 pies/ha
		Retroaraña 131/160 CV Doble cabezal de desbroza y ahoyado

1.1.3 PREPARACIÓN DEL SUELO

1.1.3.1 Puntual

Tabla 67. Caracterización las modalidades de la actividad *apertura de hoyo con barrena*, del proceso unitario de preparación de suelo, dentro del proceso de preparación del terreno. **Fuente:** tarifas TRAGSA.

Actividad	Variable	Maquinaria
Apertura hoyo con barrena	Densidad	< 700 hoyos/ha
		> 700 hoyos/ha
		Tractor ruedas 100 CV



Tabla 68. Caracterización las modalidades de la actividad *apertura de hoyo manual*, del proceso unitario de preparación de suelo, dentro del proceso de preparación del terreno. **Fuente:** tarifas TRAGSA.

Actividad	Variables	
Apertura hoyo manual	Tamaño	40x40x40 cm 60x60x60 cm
	Suelo	Suelto
		Tránsito
		Pedregoso
	Densidad	< 700 ho/ha > 700 ho/ha
	Pendiente	< 50 % > 50 %

Tabla 69. Caracterización las modalidades de la actividad *apertura de hoyo mecanizado*, del proceso unitario de preparación de suelo, dentro del proceso de preparación del terreno. **Fuente:** tarifas TRAGSA.

Actividad	Variables			Maquinaria	
Apertura hoyo mecanizada	Tamaño	60x60x60 cm	Suelo	Suelto o tránsito Pedregoso	Retroaraña 71/100 CV Retroexcavadora oruga hidráulica 71/100 CV Retroexcavadora oruga hidráulica 70/100 CV Retroaraña 71/100 CV
			Pendiente	> 30 %	
	100x100x100 cm	Suelo	Suelto o tránsito Pedregoso		
			Pendiente	< 30 %	
		Pendiente	30-50 %		

Tabla 70. Caracterización las modalidades de la actividad *preparación de hoyo*, del proceso unitario de preparación de suelo, dentro del proceso de preparación del terreno. **Fuente:** tarifas TRAGSA.

Actividad	Variable	
Preparación hoyo	Tamaño	40x40x40
	Suelo	Suelto
		Tránsito
		Pedregoso
	Densidad	< 700 ho/ha > 700 ho/ha
	Pendiente	< 50 % > 50 %

Tabla 71. Caracterización las modalidades de la actividad *casillas*, del proceso unitario de preparación de suelo, dentro del proceso de preparación del terreno. **Fuente:** tarifas TRAGSA.

Actividad	Variables		
	Plantamón	Con	Suelto
Casillas	Densidad	< 700 cas/ha	Suelto
		> 700 cas/ha	Suelto
	Pendiente	< 50 %	Tránsito
		> 50 %	Suelto
	Tipo	Picadas Raspadas	

Tabla 72. Caracterización las modalidades de la actividad *ahoyado con rejón*, del proceso unitario de preparación de suelo, dentro del proceso de preparación del terreno. **Fuente:** tarifas TRAGSA.

Actividad	Variables			Maquinaria
Ahoyado con rejón	Suelo	Suelto-tránsito	Número de rejones	Tractor orugas 191/240 CV
		Pedregoso	$\frac{2}{1}$	

Tabla 73. Caracterización las modalidades de la actividad *tapado de hoyos*, del proceso unitario de preparación de suelo, dentro del proceso de preparación del terreno. **Fuente:** tarifas TRAGSA.

Actividad	Variable
Tapado de hoyos	Tamaño
	40x40
	60x60
	Suelto-tránsito
	Pedregoso
	< 700 ho/ha
	> 700 ho/ha

1.1.3.2 Lineal

Tabla 74. Caracterización las modalidades de la actividad *subsulado*, del proceso unitario de preparación de suelo, dentro del proceso de preparación del terreno. **Fuente:** tarifas TRAGSA.

Modalidad	Variable			Maquinaria	
Subsulado	Profundidad	> 50 cm	Pendiente	< 20 %	Tractor orugas 171/190 CV
			20-30 %		
		< 20 %			
	> 60 cm	Pendiente	20-30 %	Tractor orugas 191/240 CV	
		Máxima pendiente			
	Suelo	Doble pase	Pendiente	< 20 %	
20-30 %					
Suelto					
	Tránsito				
	Pedregoso				

Tabla 75. Caracterización las modalidades de la actividad *construcción de faja*, del proceso unitario de preparación de suelo, dentro del proceso de preparación del terreno. **Fuente:** tarifas TRAGSA.

Modalidad	Variable
Construcción faja	Pendiente
	< 30 %
	> 30 %

Tabla 76. Caracterización las modalidades de la actividad *subsulado*, del proceso unitario de preparación de suelo, dentro del proceso de preparación del terreno. **Fuente:** tarifas TRAGSA.

Modalidad	Variable
Subsulado	Pendiente
	< 20 %
	20-30 %
	Máx
	Profundidad
	>50cm
> 60cm	1 vástago
Suelo	Suelto
	Tránsito
	Pedregoso

También se incluye el rotovateado como actividad lineal.



1.1.3.3 Extensión

Tabla 77. Caracterización las modalidades de la actividad *banqueta manual*, del proceso unitario de preparación de suelo, dentro del proceso de preparación del terreno. **Fuente:** tarifas TRAGSA.

Actividad		Variables		
Banqueta manual	Densidad	< 700 bq/ha	Suelo	Suelto
		> 700 bq/ha	Suelo	Tránsito
	Pendiente	< 50 %		Pedregoso
		> 50 %		Suelto
				Tránsito

Tabla 78. Caracterización las modalidades de la actividad *banqueta mecanizada*, del proceso unitario de preparación de suelo, dentro del proceso de preparación del terreno. **Fuente:** tarifas TRAGSA.

Actividad	Variables		Maquinaria
Banqueta mecanizada	Con pico mecánico	Pendiente < 50 %	Grupo eléctrico 10/30 CV
		Pendiente > 50 %	
	Con retroexcavadora	Pendiente < 30 %	Retroexcavadora oruga hidráulica 131/160 CV
		Pendiente > 30 %	Retroaraña 101/130 CV

1.2 PLANTACIÓN

Dentro de la plantación, se incluyen tanto las actividades con las plantas como con los tubos protectores. El orden que seguir es empezar por la distribución y continuar con la ejecución o colocación. Pueden ser simultáneos los correspondientes a los tubos y las plantas. Todas las actividades incluidas en la plantación son de carácter puntual.

1.2.1 PLANTA

1.2.1.1 Distribución

Tabla 79. Caracterización las modalidades de la actividad *distribución de bandeja*, del proceso de plantación. **Fuente:** tarifas TRAGSA.

Modalidad	Variable	Maquinaria
Bandeja	Pendiente	< 50 %
		> 50 %
	Tamaño	< 250 cm ³
		> 250 cm ³

1.2.1.2 Ejecución de plantación

Tabla 80. Caracterización las modalidades de la actividad *plantación manual*, del proceso de plantación. **Fuente:** tarifas TRAGSA.

Actividad	Variables		
Bandeja	< 250 cm ³		
	> 250 cm ³		
Pendiente	< 50%		
	> 50%		
Plantación manual	En hoyos	Suelo	Tránsito Pedregoso
	Tipo	En hoyo tapado En banqueta En barrón de terrenos afables En casilla*	

Tabla 81. Caracterización las modalidades de la actividad *plantación en hoyo preparado con barrena*, del proceso de plantación. **Fuente:** tarifas TRAGSA.

Actividad	Variable	
En hoyo preparado con barrena	Profundidad	< 0.6 m
		0.6-1 m

Tabla 82. Caracterización las modalidades de la actividad *plantación en suelo mecanizado*, del proceso de plantación. **Fuente:** tarifas TRAGSA.

Actividad	Variables		
En suelo mecanizado	Bandeja	Tamaño	< 250 cm ³
			> 250 cm ³



1.2.2 TUBOS PROTECTORES

1.2.2.1 Distribución

Tabla 83. Caracterización las modalidades de la actividad *distribución del tubo protector*, del proceso de plantación. **Fuente:** tarifas TRAGSA.

Variables	
Pendiente	< 50 %
	> 50 %
Tamaño	60
	120
	180

1.2.2.2 Colocación

Tabla 84. Caracterización las modalidades de la actividad *colocación del tubo protector*, del proceso de plantación. **Fuente:** tarifas TRAGSA.

Actividad		Variables		
Tubo protector	Tutores	Con	Tamaño	180
				150
			120	
		60		
		Sin	Tamaño	120
60				

1.2.2.3 Retirada

Tabla 85. Caracterización las modalidades de la actividad *retirada del tubo protector*, del proceso de plantación. **Fuente:** tarifas TRAGSA.

Variable	
Tamaño	< 60cm
	> 60cm

2. USO Y MANTENIMIENTO

2.1 DESBROCES

Tabla 86. Caracterización las modalidades de la actividad *roza sin maquinaria*, del proceso de uso y mantenimiento. **Fuente:** tarifas TRAGSA.

Actividad	Variables	
Roza sin maquinaria	Diámetro basal	< 3 cm
		3-6 cm
		6-8 cm
	Pendiente	< 50 %
		> 50 %
	Superficie de cabida cubierta	< 50 %
		50-80 %
> 80 %		
Tipo	Manual	
	Con moto desbrozadora	

Tabla 87. Caracterización las modalidades de la actividad *roza con maquinaria*, del proceso de uso y mantenimiento. **Fuente:** tarifas TRAGSA.

Actividad	Variables			Maquinaria
Roza con maquinaria	Superficie de cabida cubierta	< 50 %		Retroaraña 131/160 CV Desbrozadora de cadenas
		50-80 %		
		80-100 %		
		100 %		
	Tipo	Con retroaraña		
Mecanizada		Pendiente	< 10 %	
			10-20 % 20-30 %	

Además se debe considerar la eliminación química de la vegetación.

2.2 REPOSICIÓN MARRAS

Tabla 88. Caracterización las modalidades de la actividad *reposición de marras manual*, del proceso de uso y mantenimiento. **Fuente:** tarifas TRAGSA.

Actividad	Variables		
Bandeja	< 250 cm ³		
	> 250 cm ³		
Pendiente	< 50%		
	> 50%		
Plantación manual	% marras	< 20 %	
		20-40 %	
		40-60 %	
		> 60 %	
Tipo	En hoyos	Suelo	Suelto-tránsito Pedregoso
	En casillas	Suelo	Suelto-tránsito
	En banquetas		
	En barrón de terrenos afables		
	En suelo mecanizado*	Suelo	Suelto-tránsito Pedregoso

*Es independiente de la pendiente.

Tabla 89. Caracterización las modalidades de la actividad *reposición de marras en hoyos con barrena*, del proceso de uso y mantenimiento. **Fuente:** tarifas TRAGSA.

Actividad	Variables	
Hoyos con barrena	% marras	< 20 %
		20-40 %
		40-60 %
		> 60 %
	Profundidad	< 0.6 m 0.6-1 m

2.3 OTROS

Se incluyen actividades como la creación de castilletes o alcorques, y el aporte de abono.

Anexo 5. MANUAL DE EASYCARGO

Este anexo está dedicado a explicar el funcionamiento del programa Easycargo, y cómo saber cuáles de los datos que proporciona se deben introducir en el Excel de la cuantificación de la HC.

En primer lugar, se deben introducir los tamaños de los vehículos que se van a utilizar. En la pestaña de espacio de carga, haciendo clic en el botón *crear propio espacio de carga* (véase Ilustración 21), se deben rellenar las casillas mostradas en Ilustración 22.

Nombre	Tipo	longitud interna	anchura interna	altitud interna	Carga máxima	Usuario	Creado
V2		4.200	1.400	1.700	1.350 kg	Alex Alex	06/10/2020 20:31
V3		4.200	2.120	2.200	1.000 kg	Alex Alex	06/10/2020 20:31
V4		6.000	2.500	2.500	3.000 kg	Alex Alex	06/10/2020 20:30
V5		7.500	2.500	2.800	8.000 kg	Alex Alex	06/10/2020 20:30
V6		9.500	2.500	2.800	14.500 kg	Alex Alex	06/10/2020 20:29
V7		13.500	2.500	2.900	24.000 kg	Alex Alex	06/10/2020 20:28

Ilustración 21. Captura de pantalla donde introducir los vehículos a utilizar.

Nombre: V7 Longitud (L): 13500 mm Anchura: 2500 mm Altura (H): 2900 mm
 Tipo: Contenedor Carga máxima del espacio de carga: 24000 kg

Ilustración 22. Captura de pantalla donde introducir los datos de los vehículos a utilizar al clicar en el botón *crear propio espacio de carga*.

Para el ejemplo de la repoblación productora, la carga a trasladar es las bandejas de *Eucalyptus globulus*. En la pestaña principal del programa, se debe presionar en la cruz en la parte izquierda para añadir el objeto transportado. Se deben introducir las dimensiones de la bandeja forestal, incluyendo su peso y el número que se deben trasladar. En la parte izquierda de la pantalla, se selecciona el vehículo y se presiona el botón de *cargar*.

Como se ve en la Ilustración 23, el total de bandejas no se ha podido cargar en el vehículo más grande. Por lo tanto, se deben separar en dos grupos para comprobar qué vehículo es el adecuado para trasladar el resto de las bandejas, como se puede comprobar en la Ilustración 24.

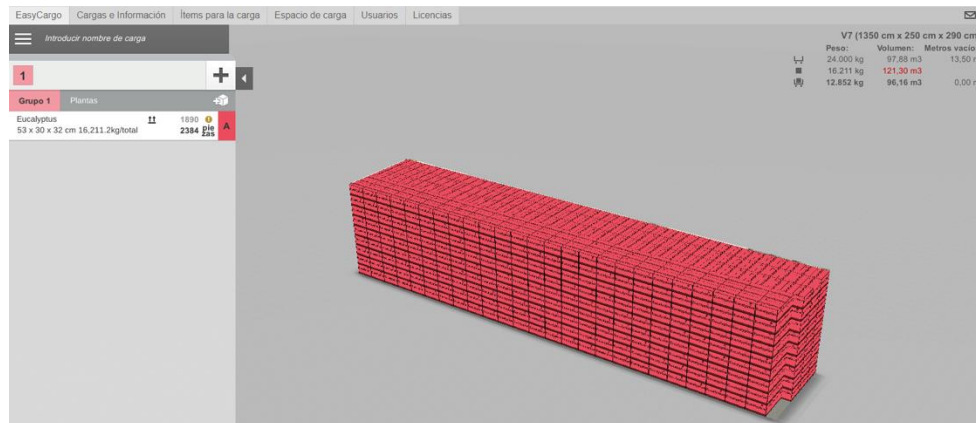


Ilustración 23. Captura de pantalla del V7 cargado con el máximo de bandejas forestales de *Eucalyptus globulus*.

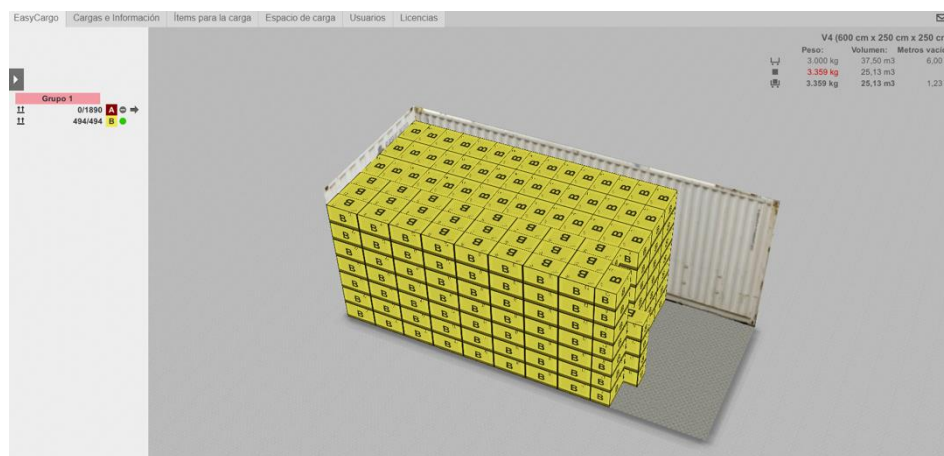


Ilustración 24. Captura de pantalla del V4 cargado con la parte de bandejas forestales de *Eucalyptus globulus* que no se podían cargar en el vehículo V7.

Para el ejemplo de la repoblación multiusos, la carga a trasladar consta de las bandejas forestales de las fagáceas y de los pinos, además de los tubos protectores. Se considera que los tubos protectores tienen una localización origen diferente a las bandejas forestales, por lo que se trasladarán en vehículos distintos.

Empezando por los tubos protectores, debido a su alta cantidad, el programa no es capaz de modelizarlo. No obstante, se puede comprobar que por cuestión de volumen, el V6 no es suficiente (letras en rojo en la esquina superior derecha). Por tanto, se necesita un V7. Todo esto se puede comprobar en las Ilustración 25 e Ilustración 26.

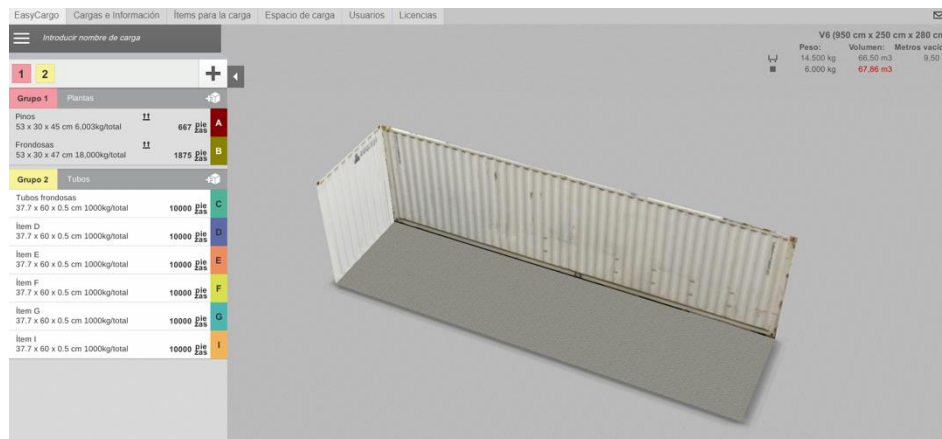


Ilustración 25. Captura de pantalla del V6 donde se indica que el volumen de los tubos protectores es mayor que el volumen del vehículo.

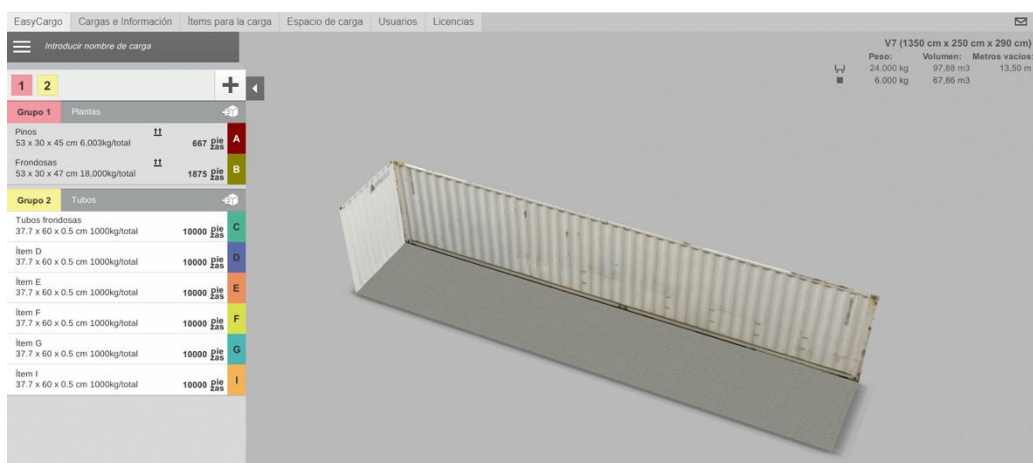


Ilustración 26. Captura de pantalla del V7 donde se indica que el volumen de los tubos protectores se puede cargar.

Para las bandejas forestales, una vez se ha comprobado el número de ellas que se puede cargar en el V7 (Ilustración 27), se cargan las bandejas restantes en el vehículo más adecuado (Ilustración 28). No se debe olvidar el límite de peso de los vehículos, dado que es posible que por volumen sean capaces de soportar la mercancía, pero no son adecuados por los límites de peso.

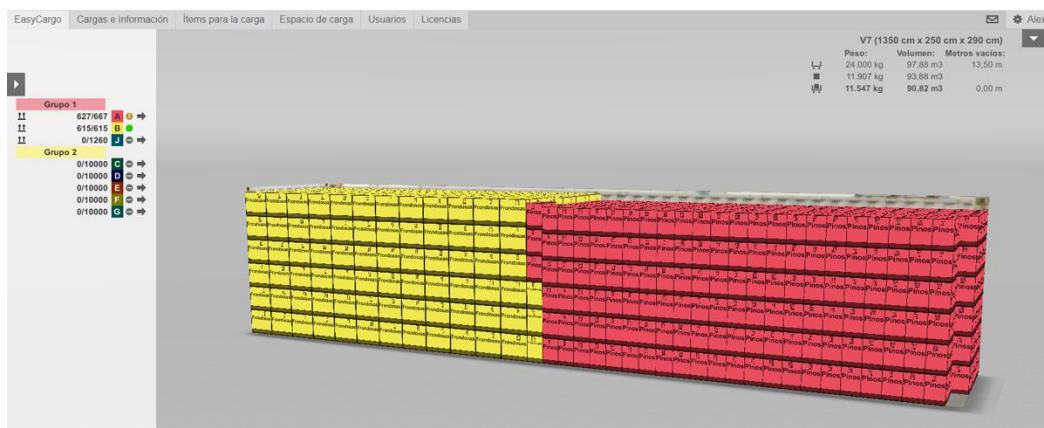


Ilustración 27. Captura de pantalla del V7 cargado en su máxima capacidad con bandejas de frondosas y pino.



Anexo 6. DOCUMENTOS EXTERNOS SOBRE EL MÉTODO DE CÁLCULO Y LOS RESULTADOS DE LAS CUANTIFICACIONES

Se pone a su disposición el Excel diseñado para la cuantificación de la HC basándose en las consideraciones de este trabajo en el siguiente link:

https://upm365-my.sharepoint.com/:x:/g/personal/a_agonzalez_alumnos_upm_es/ESXaqfi3HXNCgvUPrKcC5QQBmfNk4Dicz4dE2lvKJ8OBCw?e=HNJc90

Se dispone asimismo el link del Excel relleno con los datos de la repoblación productora:

https://upm365-my.sharepoint.com/:x:/g/personal/a_agonzalez_alumnos_upm_es/EfPTlay4jLdCnjxon4YveTgB1GI9bnEWA9vdPIAvDmDmw?e=61WhaO

Por último, se proporciona el link del Excel relleno con los datos de la repoblación multiusos:

https://upm365-my.sharepoint.com/:x:/g/personal/a_agonzalez_alumnos_upm_es/ES0Cds0XUx1PphmCHewiBvEBqSx3pMxxxzbzJfF_O0H8Rw?e=qKbb0d

Asimismo, se pone a disposición el PDF original de las ecuaciones diseñadas para el método de cálculo, de tal forma que se puedan apreciar con mejor calidad visual.

https://upm365-my.sharepoint.com/:b:/g/personal/a_agonzalez_alumnos_upm_es/Eeg370y7lbhEtJHjW2B6lMsBFhOvDlXedko--S8gbug6ig?e=pgHGC0



Anexo 7. INFORME EJECUTIVO

1. CONDICIONES TÉCNICAS ESPECÍFICAS DEL ESTUDIO

Dada la complejidad del estudio realizado y los temas que se tocan a lo largo de este, son necesarias ciertas condiciones para poder realizarlo con éxito y eficacia. Las condiciones específicas se pueden agrupar en conocimientos previos, capacidades técnicas y herramientas necesarias.

1.1 CONOCIMIENTOS PREVIOS:

Es recomendable estar familiarizado con el ciclo del carbono, el cambio climático, la dinámica de la atmósfera, la realización de repoblaciones forestales, el análisis de ciclo de vida, y poseer ciertos conocimientos matemáticos que permitan expresar y diseñar el método de cálculo.

1.2 CAPACIDADES TÉCNICAS

Es importante ser capaz de analizar procesos complejos y tomar decisiones en base a criterios técnicos. Asimismo, se necesitará poseer capacidades de manejar Excel para aplicar el método de cálculo, y programas de evaluación de impacto en base a inventarios.

1.3 HERRAMIENTAS

Las herramientas utilizadas en este proyecto son las siguientes: bases de datos (Ecoinvent), MS Excel, SimaPro, Easycargo, Lucidchart y edición de textos LaTeX

2. FASES PARA ELABORACIÓN DEL ESTUDIO

La elaboración de este estudio se puede dividir en las siguientes fases:

1. Búsqueda de información sobre las repoblaciones forestales.
2. Establecimiento de límites y alcance del sistema.
3. Búsqueda de inventarios de emisiones.
4. Comprensión y aplicación de la metodología de las normas ISO.
5. Establecer la unidad funcional y los flujos de los procesos unitarios.
6. Diseño de método de cálculo.
7. Aplicación de método de cálculo.
8. Redacción de la memoria y anexos.



3. DESCRIPCIÓN DE TAREAS

Cada fase del proceso de elaboración del estudio tiene tareas más detalladas, tal y como sigue.

1. Búsqueda de información sobre las repoblaciones forestales.
 - a. Recopilación de información sobre los procesos de repoblación.
 - b. Recopilación de información sobre la relación entre las repoblaciones y la huella de carbono.
 - c. Selección de objetivos del trabajo.
2. Establecimiento de límites y alcance del sistema.
 - a. Determinar las actividades del ciclo de vida de las repoblaciones a incluir.
 - b. Elaboración de un mapa de procesos donde relacionar las actividades
 - c. Identificar actividades que son fuente de emisiones.
3. Búsqueda de inventarios de emisiones.
 - a. Identificación de los inventarios necesarios.
 - b. Obtención de los resultados de emisiones de los inventarios
4. Comprensión y aplicación de la metodología de las normas ISO.
 - a. Lectura comprensiva de las normas.
 - b. Descripción de las metodologías.
5. Establecer la unidad funcional y los flujos de los procesos unitarios.
 - a. Definir la unidad funcional.
 - b. Diseñar el mapa de procesos para relacionar flujos de los procesos unitarios.
6. Diseño de método de cálculo.
 - a. Elaboración de las fórmulas.
 - b. Elaboración del Excel basado en las fórmulas, mapa de procesos y límites del sistema.
7. Aplicación de método de cálculo.
 - a. Diseño de repoblaciones ejemplo sobre las cuales utilizar el Excel.
 - b. Descripción y análisis de los resultados obtenidos.
8. Redacción de la memoria y anexos.



4. CRONOGRAMA

Tareas	Semana																				
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
Recopilación de información sobre los procesos de repoblación.																					
Recopilación de información sobre la relación entre las repoblaciones y la huella de carbono.																					
Selección de objetivos del trabajo.																					
Determinar las actividades del ciclo de vida de las repoblaciones a incluir.																					
Elaboración de un mapa de procesos donde relacionar las actividades																					
Identificar actividades que son fuente de emisiones.																					
Identificación de los inventarios necesarios.																					
Obtención de los resultados de emisiones de los inventarios																					
Lectura comprensiva de las normas.																					
Descripción de las metodologías.																					
Definir la unidad funcional.																					
Diseñar el mapa de procesos para relacionar flujos de los procesos unitarios.																					
Elaboración de las fórmulas.																					
Elaboración del Excel basado en las fórmulas, mapa de procesos y límites del sistema.																					
Diseño de repoblaciones ejemplo sobre las cuales utilizar el Excel.																					
Descripción y análisis de los resultados obtenidos.																					
Redacción de la memoria y anexos.																					



5. COSTE DEL ESTUDIO

A continuación se establece una estimación de los costes que puede suponer la realización del trabajo. Los precios están basados en las tarifas TRAGSA y en los precios publicados en las webs utilizadas.

	Cantidad	Precio unitario (€)	Coste (€)
MANO DE OBRA			
Jefe de proyecto	50	47.63	2 381.50
Titulado medio/grado con menos de 1 año de experiencia (h)	400	20.08	8 032.00
MATERIALES			
Anualidad SimaPro	1	7 000.00	7 000.00
Cuota diaria <i>Easycargo</i>	1	4.90	4.90
Mensualidad <i>Lucidchart</i>	1	5.95	5.95
Mensualidad Microsoft 365 Empresa Estándar	5	10.50	52.50
UNE-EN ISO 14040:2006	1	59.00	59.00
UNE-EN ISO 14044:2006/A1:2018	1	47.00	47.00
UNE-EN ISO 14067:2019	1	83.00	83.00
TOTAL			17 665.85

Anexo 8. PÓSTER

BASES PARA LA CUANTIFICACIÓN DE LA HUELLA DE CARBONO DE LAS REPOBLACIONES FORESTALES DESDE EL ENFOQUE DEL ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA

Basis for carbon footprint quantification of reforestation processes from a life cycle analysis approach

Autor: Alejandro Alonso González

Directores: Juan A. Oliet Palá & Agustín Rubio Sánchez

Grado en Ingeniería del Medio Natural

Departamento Sistemas y Recursos Naturales

E.T.S.I. Montes, Forestal y del Medio Natural

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

OBJETIVOS

1. Definir el ciclo de vida de la repoblación forestal.
2. Identificar actividades emisoras de GEI.
3. Recopilar fuentes de datos sobre emisiones de GEI.
4. Diseñar método de cálculo para la cuantificación de la huella de carbono.
5. Evaluar el impacto de la repoblación forestal respecto a absorciones de masa forestal creada.

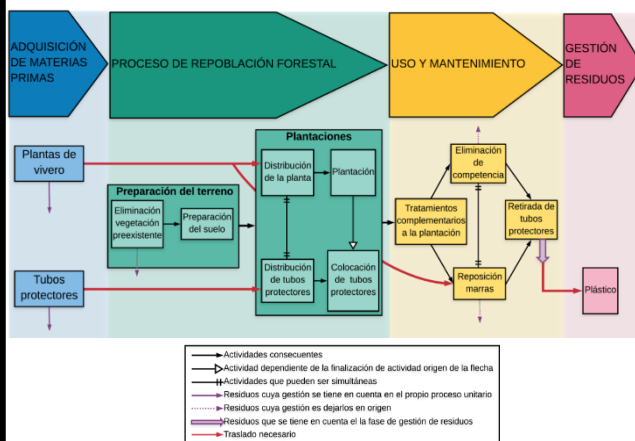
METODOLOGÍA

Norma ISO 14040:2006 Análisis de ciclo de vida

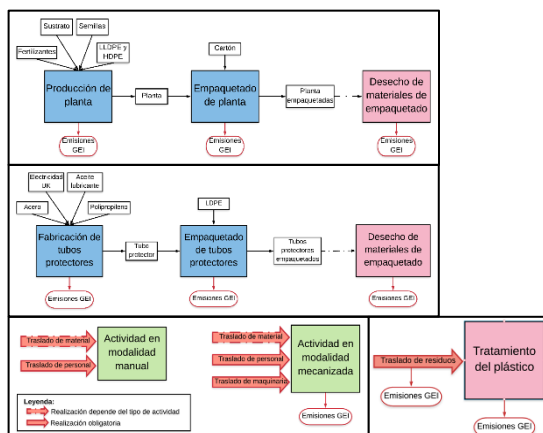
Norma ISO 14044:2006 Análisis de ciclo de vida

Norma ISO/TS 14067:2018 Huella de carbono de productos

Sistema producto de la repoblación forestal



Identificación de actividades emisoras de GEI



Fuentes de datos de emisión

- MITECO
- UK Government
- TRAGSA
- Ecoinvent

RESULTADOS

Método de cálculo diseñado

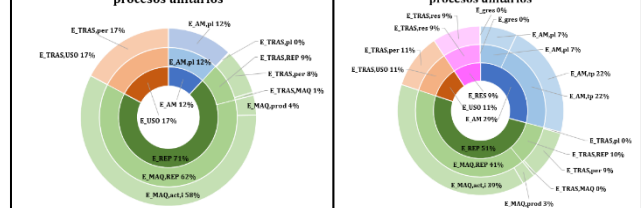


¡ESCANÉAME!

Repoblaciones ejemplo

	Productora	Multisusos
	<i>Eucalyptus globulus</i>	40% <i>Pinus</i> 60% <i>Quercus</i>
	1430 pies/ha	1000 pies/ha
Descripción	Bandeja 100 cc Ahoyado mecanizado (ripper) Desbroce químico	Bandeja 400cc y 200cc Acaballonado superficial Desbroce manual
Emisiones	559.38 kg CO₂ eq/ha	654.71 kg CO₂ eq/ha
Absorciones	407.25 t CO₂/ha (40 años)	110.12 t CO₂/ha (40 años)

Reparto de emisiones por etapas del ciclo de vida y procesos unitarios



CONCLUSIONES

- La **complejidad de la metodología** de análisis de ciclo de vida, ligada a la dificultad para obtener consistencia y datos de calidad, es un obstáculo para expandir su uso.
- El **método de cálculo** es complicado y se **debe mejorar** para poder salvar las limitaciones de este trabajo y permitir su **aplicación global**.
- Las **actividades de mayor impacto** (más emisiones) son el uso de la maquinaria y la producción de tubos protectores, siendo relevante además el traslado de personal.
- El **factor** que influye en el **impacto** es la **densidad**, dado que de esta depende el rendimiento (con mismas condiciones de consumo de la maquinaria)
- Las **repoblaciones** son recomendables dado su **mínimo impacto** (las emisiones representan < 1% de las absorciones).





Anexo 9. AGRADECIMIENTOS

Quiero dedicar este espacio a agradecer y destacar la ayuda que he recibido por parte de las personas que han sido fundamentales para la realización de este trabajo.

Por un lado, a Ana Rodríguez Olalla, que me ha guiado a través de las normativas de la UNE, me ha recomendado como adaptar la estructura de estas a la estructura clásica de un TFG y me ha solventado las dudas sobre cuándo parar.

Por otro lado, a Sergio Álvarez, porque sin él no existirían resultados numéricos en este trabajo. Gracias por sacar los datos a través de la herramienta SimaPro e inspirarme sobre el tipo de factores de emisión que tengo que utilizar.

Por último, pero no menos importante, quiero agradecer a Juan A. Oliet Palá y Agustín Rubio Sánchez por elegirme candidato para realizar este TFG dándome la oportunidad de formar parte del programa de sostenibilidad de la UPM, Res2+U, que tan importante es para la universidad, además de haberme guiado a lo largo de la realización del trabajo.