

Mapa de existencias de carbono y mapa de textura para los suelos del País Vasco





Proyecto Klimatek 2017-2018

Mapa de existencias de carbono y mapa de textura para los suelos del País Vasco





Ihobe, Ingurumen Jarduketarako Sozietate Publikoa
Ihobe, Sociedad Pública de Gestión Ambiental

EDITA:

Ihobe, Sociedad Pública de Gestión Ambiental
Departamento de Medio Ambiente, Planificación Territorial y Vivienda
Gobierno Vasco

Alda. de Urquijo n.º 36-6.^a (Plaza Bizkaia)
48011 Bilbao

info@ihobe.eus | www.ihobe.eus
www.ingurumena.eus

EDICIÓN:

Diciembre 2019

CONTENIDO:

Este documento ha sido elaborado por NEIKER-Tecnalia, Laboratorio Agroambiental Fraisoro, y las cooperativas Lorra, Abelur, Lurgintza, AGA y Abere gracias a la financiación recibida en el marco de la convocatoria 2017-2018 de Ayudas Klimatek I+B+G para la realización de proyectos I+D, Innovación y demostración en adaptación al cambio climático.

ÍNDICE

1.	INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES-----	1
1.1.	Estrategia vasca para protección de suelos-----	1
1.2.	Políticas europeas para protección de los suelos-----	1
1.3.	Estrategia KLIMA-2050-----	3
1.4.	Carbono orgánico de los suelos y secuestro de carbono-----	4
1.5.	La textura en relación al carbono orgánico del suelo-----	5
2.	OBJETIVOS DEL PROYECTO-----	7
3.	METODOLOGÍA y RESULTADOS-----	8
3.1.	Metodología general de trabajo: fases previstas-----	8
3.2.	Fases y tareas realizadas-----	9
3.2.1.	FASE I: Recopilación de analíticas de suelo y su análisis-----	9
3.2.2.	FASE II: Recopilación de cartografía auxiliar sobre factores que puedan explicar la variabilidad espacial de la textura y del carbono orgánico-----	15
3.2.3.	FASE III y FASE V: Interpolación espacial de la textura y la materia orgánica.-----	22
3.2.4.	FASE IV: Pautas para promover la mitigación y adaptación a través de la acumulación adicional de C orgánico en los suelos de la CAPV -----	23
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS-----	34

1. INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES

1.1. Estrategia vasca para protección de suelos

El suelo es un recurso natural no-renovable a escala humana, constituye el **soporte de la mayor parte de las actividades humanas**, y tiene un carácter multifuncional (soporte, regulación hídrica, alimentación, conservación paisajística, reservorio de biodiversidad, etc.). De todo ello se deduce la relevancia del suelo para la vida humana, que es más notoria **en el caso particular de la CAPV, dado que su disponibilidad es muy limitada** y lleva a la concurrencia de diferentes usos del suelo que a veces conducen a su degradación.

No debemos olvidar que en el año internacional de los suelos, 2015, el Gobierno Vasco actualizó la **normativa de suelos contaminados mediante la Ley 4/2015**, de 25 de junio, para la prevención y corrección de la contaminación del suelo. Sin embargo, en la propia ley se reconoce que “la contaminación no es el único fenómeno que perjudica la calidad ambiental del suelo” y se prevé “la aprobación por parte del Gobierno, de una estrategia para la protección, conservación y restauración de las funciones naturales y de uso de los suelos que puedan degradarse como consecuencia de **la erosión, la pérdida de materia orgánica, la salinización, la compactación, la pérdida de biodiversidad, el sellado, los deslizamientos de tierra y las inundaciones**. De esta manera se pretende, además de lograr la protección medioambiental del suelo, mantener de una manera sostenible, las **funciones ambientales, económicas, sociales, científicas y culturales** del mismo”. Actualmente, está en marcha una “hoja de ruta” de las tareas a desarrollar para conseguir esta **estrategia vasca para la protección, conservación y restauración de las funciones naturales y de uso de los suelos**¹

1.2. Políticas europeas para protección de los suelos

La preocupación por la conservación del suelo en la UE está plasmada en la **Estrategia Temática para la Protección del Suelo** (“EU Thematic Strategy for Soil Protection”, COM(2006)231 final) que establece una serie de acciones encaminadas al objetivo general de protección y utilización sostenible del suelo, a través de la prevención de una mayor degradación de los mismos, la conservación de sus funciones y la restauración de suelos degradados. En el contexto de esta Estrategia Temática del Suelo, desde la Comisión Europea se decidió establecer el “**European Soil Data Centre**” (ESDC), en la misma línea que ya se había iniciado anteriormente con la “European Soil Database” (ESDB), **para que los responsables políticos de la toma de decisiones tuvieran un acceso más fácil a la información disponible sobre los suelos**.

Uno de los parámetros clave de la ESDB es la clase textural (arcillosa, franco-limosa, etc.), junto con el contenido de elementos gruesos. Este parámetro se combinó con datos del “Harmonised World Soil Database” (HWSD) para obtener la textura en porcentajes de arcilla, limo y arena. Uno de los últimos proyectos en este campo ha sido LUCAS (“Land Use and Cover Area frame Statistical survey”), en el cual se han tratado de mejorar los datos de las bases de datos anteriores llegando a un tamaño de píxel de 14 km, y comenzando por las características físicas (Ballabio et al., 2016). A partir de ellos, también se han obtenido algunos **productos derivados como la densidad aparente**.

A partir de estas propiedades físicas y mediante la aplicación de funciones de pedotransferencia, se pueden obtener la clasificación textural, la densidad aparente, la

¹ Estrategia para la protección de los suelos 2020:

http://www.ingurumena.ejgv.euskadi.eus/plana_programa_proiektua/plan-de-suelos-contaminados-del-pais-vasco-horizonte-2018/r49-orokorra/es/

capacidad de retención de agua disponible, la conductividad hidráulica y otros parámetros que son requeridos en numerosos estudios sobre plantas y agua del suelo. Hay que considerar que este tipo de mediciones y búsqueda de correlaciones es costosa, difícil y muchas veces impracticable. Cabe señalar que **el interés por la densidad aparente ha ido incrementando paralelamente a la creciente preocupación por el secuestro de carbono**, ya que se suele utilizar para convertir el contenido de carbono en existencias (t C/ha).

En este mismo sentido, la reciente **Iniciativa francesa “4 por 1000”**, calcula que con un crecimiento anual de las reservas de carbono en los suelos del 4 por 1000, sería posible detener el crecimiento de la concentración de CO₂ en la atmósfera. Este índice de crecimiento no pretende ser una meta normativa para los países, sino que demuestra que hasta el más mínimo incremento del almacenamiento de carbono de los suelos agrarios y bosques tiene un impacto considerable para mejorar la fertilidad de los suelos y la producción agrícola al tiempo que contribuye al logro del objetivo a largo plazo para limitar el aumento de la temperatura a +1,5/2°C.



Figura 1. La iniciativa “4 por 100” tiene el objetivo de mejorar el contenido en materia orgánica y propiciar la captura de carbono en los suelos, mediante la implementación de praxis agrarias adaptadas a las condiciones locales y ambientales, sociales y económicas, como las que propone la agroecología, la agrosilvicultura, la agricultura de conservación y la gestión del paisaje.

Según las estadísticas del ESDC, la información cartográfica desarrollada sobre la textura es solicitada frecuentemente para **modelización de erosión hídrica y del viento, la modelización de biodiversidad, trabajos relacionados con la determinación de capacidad de retención de agua, el crecimiento de cultivos y de la vegetación, conservación del suelo, seguimiento de la humedad del suelo, uso de la tierra, análisis ecológico, vulnerabilidad de aguas subterráneas e hidrología** (Ballabio et al., 2016).

La disponibilidad de información útil sobre el estado de los suelos y sus tendencias es un pre-requisito para poder desarrollar inversiones racionales para la protección de los suelos, así como para evaluar la eficacia de las medidas de conservación, pero los costes de la monitorización de los suelos son sustanciales (Kibblewhite et al., 2012).

1.3. Estrategia KLIMA-2050

La Estrategia de Cambio Climático del País Vasco KLIMA-2050 define las líneas maestras de actuación a fin de reducir las emisiones de GEI y de reforzar la capacidad de adaptación del País Vasco al cambio climático, por medio de la innovación y el desarrollo que apoyen una economía competitiva. Aunque el horizonte final es 2050, la nueva KLIMA-2050 también define objetivos y actuaciones más concretas a los horizontes 2020 y 2030, en sintonía con las directrices marcadas desde la Unión Europea (UE).

De acuerdo con la estrategia KLIMA-2050, ante un escenario futuro con mayor población y mayores necesidades de producción de recursos, el sector primario tendrá una importancia que es necesario visualizar para el desarrollo de políticas y planificaciones futuras. En este sentido, será importante la mejora de las prácticas agrícolas, ganaderas y forestales, de forma que se permitan la reducción de emisiones de GEI y la potenciación del secuestro de carbono por las masas forestales y por el suelo, así como la adaptación a las nuevas condiciones climáticas.

Entre las líneas de actuación de la KLIMA-2050, algunas de las más estrechamente relacionadas con el presente proyecto corresponden a las Metas 4, 5 y 8:

META	Línea de actuación
META 4: Aumentar la resiliencia del medio natural	Regenerar los ecosistemas y naturalizar los mismos para mantener la resiliencia del territorio
META 5: Aumentar la resiliencia del sector primario y reducir sus emisiones	Fomentar las prácticas agrícolas que minimicen la erosión y preserven la materia orgánica del suelo (ej: mínimo laboreo, cubiertas vegetales, etc.)
	Potenciar programas para impulsar la producción local integrada, así como la producción ecológica.
	Aumentar el potencial como sumidero de carbono de Euskadi
	Adaptar las prácticas y la gestión del sector primario (agroganadero) a las nuevas condiciones climáticas, mediante el desarrollo de herramientas que permitan la toma de decisiones a los gestores y profesionales del sector agrario y, definir nuevas prácticas en el sector primario acordes con los cambios en el clima.
META 8: Impulsar la innovación, mejora y transferencia de conocimiento	Estudiar y modelizar los efectos del cambio climático en: los recursos hídricos, ecosistemas terrestres, costeros y marinos, sector primario, medio urbano y salud.
	Implantar un sistema de monitoreo y seguimiento de los efectos del cambio climático.

La importancia del carbono orgánico en el suelo trasciende la capacidad de almacenamiento de CO₂, ya que también implica grandes beneficios desde el punto de vista de la adaptación al cambio climático, ya que la materia orgánica del suelo (MO) contribuye a mejorar la estructura del suelo y, con ello, a reducir la erosión, a conservar la humedad del suelo, a aumentar la biodiversidad edáfica, etc.

La información cartográfica desarrollada sobre la textura es empleada frecuentemente para **modelización de erosión hídrica y del viento, la modelización de biodiversidad, trabajos relacionados con la determinación de capacidad de retención de agua, el crecimiento de cultivos y de la vegetación, conservación del suelo, seguimiento de la humedad del suelo, uso de la tierra, análisis ecológico, vulnerabilidad de aguas subterráneas e hidrología** (Ballabio et al., 2016).

La disponibilidad de información útil sobre el estado de los suelos y sus tendencias es un pre-requisito para poder desarrollar inversiones racionales para la protección de los

suelos, así como para evaluar la eficacia de las medidas de conservación, pero los costes de la monitorización de los suelos son sustanciales (Kibblewhite et al., 2012).

1.4. Carbono orgánico de los suelos y secuestro de carbono

Un **sumidero de carbono** es todo sistema o proceso por el que se extrae de la atmósfera un gas o gases y se almacena. El **Protocolo de Kioto**, instrumento auspiciado por Naciones Unidas para compartir la carga y responsabilidad de las emisiones de gases de efecto invernadero (CO_2 , N_2O , CH_4 , HFC, PFC, SF_6), reconoce el papel de la biomasa y de los suelos como sumideros de C. Así, autoriza a los países firmantes a descontar de sus emisiones la fijación de gases de efecto invernadero (GEI) que tenga lugar mediante actividades suplementarias (actividades de uso de la tierra, cambio de uso de la tierra y silvicultura). Por lo tanto, la fijación de CO_2 atmosférico en biomasa y en suelos que se derive de actividades agrícolas, pascícolas y forestales puede suponer una importante ayuda a la hora de cumplir con los compromisos de reducción de gases acordados para cada país.

En el ciclo de carbono, en el ecosistema, la vegetación actúa como sumidero de CO_2 , al extraer este gas de la atmósfera mediante la fotosíntesis y acumular en sus tejidos el carbono fijado. Parte del carbono presente en la biomasa vegetal se libera a la atmósfera en los procesos de respiración y de descomposición, mientras que el resto del carbono se acumula en la madera (sumidero temporal) y en la materia orgánica del suelo (sumidero relativamente permanente).

En ecosistemas terrestres naturales este proceso de acumulación de carbono alcanza, con el tiempo, un valor de stock de carbono orgánico estable o en equilibrio que depende de, entre otros factores, de la especie vegetal, el clima, la topografía, la litología, y el tipo de suelo. Las perturbaciones que se producen, como laboreo, talas masivas, incendios, erosión, etc., afectan a la dinámica del carbono de los ecosistemas terrestres que, a menudo, han pasado a actuar como fuente de carbono. Con la **realización de prácticas adecuadas** de gestión agrícola, pascícola y forestal se puede, no solo evitar la pérdida de carbono orgánico del suelo sino que, además, se puede favorecer e incrementar la acumulación de los stocks de carbono orgánico en los suelos. Asimismo, con una correcta gestión de las plantaciones forestales se puede favorecer la acumulación de carbono en biomasa si además se fomenta la obtención de productos madereros de ciclo de vida largo.

En el presente proyecto se pretende **cuantificar el stock actual de carbono orgánico de la CAPV en todos los usos** (tierras de cultivo, viñedos, pastos herbáceos, matorral, coníferas y frondosas) teniendo en cuenta las analíticas disponibles hasta la actualidad.

Además, la **cartografía** generada irá acompañada, como paso obligado para identificar medidas de adaptación al cambio climático, de un **documento de pautas para inducir una acumulación adicional de carbono orgánico en los suelos de la CAPV**, y disponible bajo los mismos mecanismos de transferencia o de divulgación descritos anteriormente.

El incremento de temperaturas proyectado por los escenarios futuros tiene asociado un incremento de la mineralización de la materia orgánica de los suelos y, en consecuencia, su pérdida. El disponer de un mapa de existencias de C (Mg C/ha) en los primeros 30 cm del suelo, además de proporcionar el estado actual, es un **punto de partida para conocer el potencial de mejora en cada emplazamiento, identificar medidas de adaptación y para alcanzar efectos beneficiosos** desde el punto de vista ambiental, como son una gestión agrícola, pascícola y forestal sostenible, con la consiguiente mejora de la calidad de las aguas y los suelos y, en general, del medio natural.

La capacidad para alimentar a las personas en 2050 en un contexto de cambio climático dependerá principalmente de nuestra capacidad para **mantener los suelos vivos**. Así, la producción agrícola está estrechamente relacionada con la salud de los suelos, cuyo principal indicador es el grado de materia orgánica. Suelos productivos y estables son un factor que impacta directa y positivamente sobre la resiliencia de los productores frente a los impactos climáticos.

Preservar el carbono orgánico del suelo, restaurar y mejorar los suelos agrícolas degradados y, de forma general, incrementar el carbono en los suelos son los principales integrantes del triple desafío de la **seguridad alimentaria**, la adaptación de los sistemas alimentarios y poblaciones a los efectos del cambio climático y la atenuación de las emisiones antropogénicas.

Por tanto, el presente proyecto ayudará a poder **establecer planes de mejora que incrementen las reservas de carbono en los suelos de la CAPV**, de tal manera que al tiempo de **mejorar la fertilidad de los suelos y la producción agrícola**, contribuye al **logro del objetivo a largo plazo para limitar el aumento de la temperatura a +1,5/2°C**, un máximo para evitar que las consecuencias inducidas por el cambio climático sean de magnitud demasiado significativa.

1.5. La textura en relación al carbono orgánico del suelo

Se ha elaborado un **mapa de texturas (proporción relativa de las distintas partículas minerales inferiores a 2 mm agrupadas por tamaños) de la CAPV**. Con el fin de calcular las existencias de carbono en suelo, se suele determinar el contenido de materia orgánica del suelo (frecuentemente expresado en porcentaje de masa, es decir, g de materia orgánica/100 g de suelo seco tamizado) y, a la hora de convertirlo en existencias de carbono orgánico (t de C/ha) es necesario determinar o, al menos, estimar la densidad aparente (t de suelo seco/m³ de suelo), para lo cual se parte de la textura, que no es más que la proporción de las distintas clases granulométricas inferiores a 2 mm, es decir, la fracción de: arcillas (0-0.002 mm), limos (0.002-0.05 mm) y arenas (0.05-0.2 mm) del suelo.

Es importante conocer cuál es el comportamiento de variables físico-químicas como la **textura y materia orgánica**, ya que son estas variables las que configuran de manera sustancial las **propiedades hidráulicas básicas de los suelos**. La textura puede explicar en buena medida, el comportamiento físico del suelo (Koorevaar et al., 1983). La materia orgánica, como propiedad química, juega un importante papel favoreciendo la agregación del suelo permitiendo la formación de complejos arcillo-húmicos que, actúan como núcleo de los agregados del suelo (Lal et al., 1994), aumentando la porosidad, aireación, infiltración y percolación de fluidos, favoreciendo el incremento de la capacidad de retención de agua en el suelo (Brady, 1984), y participando en la disminución de la escorrentía y el riesgo de erosión (Van Beers, 1980).

La textura de un suelo es una de las propiedades de los suelos más importantes, ya que a su vez influye en otras muchas propiedades físicas, químicas, biológicas e hidrológicas implicadas en los procesos de la superficie terrestre. La textura se presenta **espacialmente variable** en la naturaleza (Burrough, 1993), y muestra unas **características muy estables en el tiempo a diferencia de la materia orgánica** o la estructura del suelo, que pueden variar de forma considerable a corto y medio plazo. Estas particularidades hacen de la textura un elemento trascendental para establecer la facilidad de abastecimiento de los nutrientes, la disponibilidad de agua y la aireación en el suelo, factores fundamentales en el desarrollo de la vegetación (Crave y Gascuel-Odoux, 1997), así como para determinar los procesos de degradación del suelo (López-Bermúdez et al., 1998).

En general, los mapas de carbono y textura del suelo resultan útiles para un amplio abanico de proyectos relacionados con la mitigación y adaptación al cambio climático fundamentalmente porque **el suelo ejerce de paso intermedio entre la hidrosfera, la atmósfera y la litosfera** (modelización de avenidas o disponibilidad de recursos hídricos, proyección de necesidades de riego agrícola y de cosechas, inventarios de GEI, Registro para compensación de emisiones a través de proyectos de absorción de CO₂, selección de especies y cultivares agrícolas, etc.).

2. OBJETIVOS DEL PROYECTO

El objetivo del proyecto es doble: cubrir las carencias cartográficas actuales en relación a la actualización del mapa de existencias de carbono por unidad de superficie y elaborar el mapa de texturas de la CAPV (actualmente no existe). Por tanto, los objetivos desglosados del proyecto son:

- **Elaboración del mapa de existencias de carbono por unidad de superficie (Mg C/ha) de la CAPV**, en los primeros 30 cm de profundidad del suelo, a partir de las analíticas de suelo disponibles hasta la actualidad (junio 2017).
- **Elaboración del mapa de texturas del suelo de la CAPV**, en los primeros 30 cm de profundidad del suelo, a partir de las analíticas de suelo disponibles hasta la actualidad (junio 2017).
- **Identificación de pautas para promover la mitigación y adaptación al cambio climático a través de la acumulación adicional de C orgánico** en los suelos de la CAPV.

3. METODOLOGÍA y RESULTADOS

3.1. Metodología general de trabajo: fases previstas

Tal y como se describía en la memoria del proyecto LURCARBONTEXT, las diferentes fases a realizar durante todo el periodo de desarrollo del proyecto son las siguientes:

- **FASE I: Recopilación de analíticas de suelo**
- **FASE II: Recopilación de cartografía auxiliar sobre factores que puedan explicar la variabilidad espacial de la textura y del carbono orgánico**
- **FASE III: Interpolación espacial de las existencias de carbono en el suelo mediante distintos métodos**
- **FASE IV: Pautas para promover la mitigación y adaptación al cambio climático a través de la acumulación adicional de C orgánico en los suelos de la CAPV**
- **FASE V: Interpolación espacial de la textura del suelo mediante distintos métodos**
- **FASE VI: Divulgación y transferencia de resultados**

3.2. Fases y tareas realizadas

En los siguientes apartados se describen las tareas realizadas.

3.2.1. FASE I: Recopilación de analíticas de suelo y su análisis

Durante la primera fase se llevaron a cabo las siguientes tareas:

- Tarea 1: Actualización a 2017 de la base de datos (textura, contenido en materia orgánica, prácticas de manejo, etc.) a partir de la recopilación de analíticas de suelo.
- Tarea 2: Geolocalización de los puntos (UTMX, UTM Y).
- Tarea 3: Depuración y armonización de los resultados analíticos. (homogeneización de profundidad, método de laboratorio, etc.).
- Tarea 4: Estimación de las existencias de carbono y las texturas asociadas a los resultados analíticos.
- Tarea 5: División de los datos obtenidos por usos del suelo (cultivos, viñedos, pastos, coníferas, frondosas, etc.) y, en la medida de lo posible, por sistemas de producción (en particular, manejo del suelo y aporte de insumos).

La recopilación de analíticas de suelo de la CAPV se considera un **aspecto clave** para el desarrollo del proyecto. Es clave porque estos datos de laboratorio constituyen el contenido de la base de datos de materia orgánica y de textura a partir de la cual se irán estimando los contenidos de carbono y la textura de aquellos emplazamientos sin dato alguno de laboratorio.

Se contaba antes del inicio del presente proyecto con las analíticas de suelos (aproximadamente 8800 datos del periodo 1977-2010; la mayoría del periodo 1991-2008) que sirvieron de base para obtener el mapa de existencias de carbono (Mg C/ha) previamente publicado (Gobierno Vasco, 2014²).

Por tanto, los esfuerzos se centraron en incrementar la base de datos con analíticas del **periodo 2009-2017** a través de la colaboración entre los numerosos socios del proyecto (LORRA, LURGINTZA, ABELUR, ABERE, AGA, FRAISORO), que son prácticamente todos los actores de la CAPV que disponen de este tipo de información. Para ello, fue necesario realizar varias **reuniones de coordinación y puesta en común entre los diversos socios**.

Además, se ha procurado incrementar el número de datos disponibles, más allá de las que se recopilaron para el mapa de stocks de carbono previamente elaborado en Neiker (Gobierno Vasco, 2014). Puesto que estos análisis no se realizan rutinariamente con el fin de ir mejorando una base de datos de suelo de la CAPV, la disponibilidad de los mismos depende en gran medida del azar y del interés que puedan tener los propietarios o usuarios de los suelos, ya sean dedicados a cultivo, prados, praderas, huertas o a

² Gobierno Vasco, 2014. Sumideros de carbono de la Comunidad Autónoma del País Vasco. Capacidad de secuestro y medidas para su promoción. Artetxe, A., O. del Hierro, M. Pinto, N. Gartzia, A. Arias. Ed. Departamento de Medio Ambiente y Política Territorial del Gobierno Vasco. Servicio Central de Publicaciones. ISBN: 978-84-457-3345-5. Vitoria-Gasteiz. Disponible en: https://issuu.com/ingurumena/docs/_c__sumideros.

cualquier otro uso. Sin embargo, ha sido posible enriquecer el conocimiento previo aumentando el número de análisis.

En el caso de las tierras forestales, donde suele ser menos habitual que el propietario/usuario decida analizar los suelos, apenas se pudieron recopilar más datos que los disponibles para el mapa de C anterior, muchos de los cuales procedían de la red BASONET (muestreo de 2001). Dado el tiempo transcurrido desde el muestreo de la red BASONET y aprovechando las tareas del Inventario Forestal Nacional (IFN), se decidió que sería conveniente volver a muestrear y analizar los suelos de algunos puntos de la red BASONET. Así, se han muestreado y analizado 81 nuevas parcelas de la red BASONET que se han incorporado a la base de datos.

En resumen, gracias al presente proyecto se ha incrementado el número de registros en la base de datos de materia orgánica y textura hasta alcanzar los 12000 datos (Figura 1). Prácticamente todos los análisis recopilados tienen información sobre el contenido de materia orgánica del suelo (11914 datos de la Figura 1), mientras que las muestras con análisis de textura son menos numerosos (6800 datos de la Figura 2).

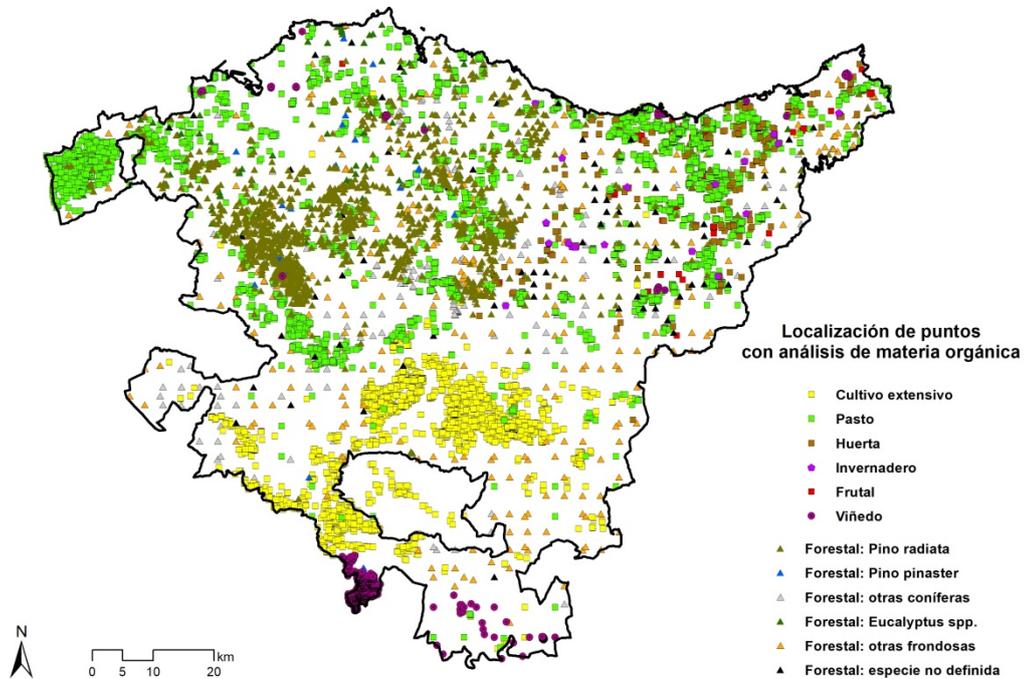


Figura 1. Localización de los datos recopilados para la base de datos de suelo por usos, con analíticas de materia orgánica.

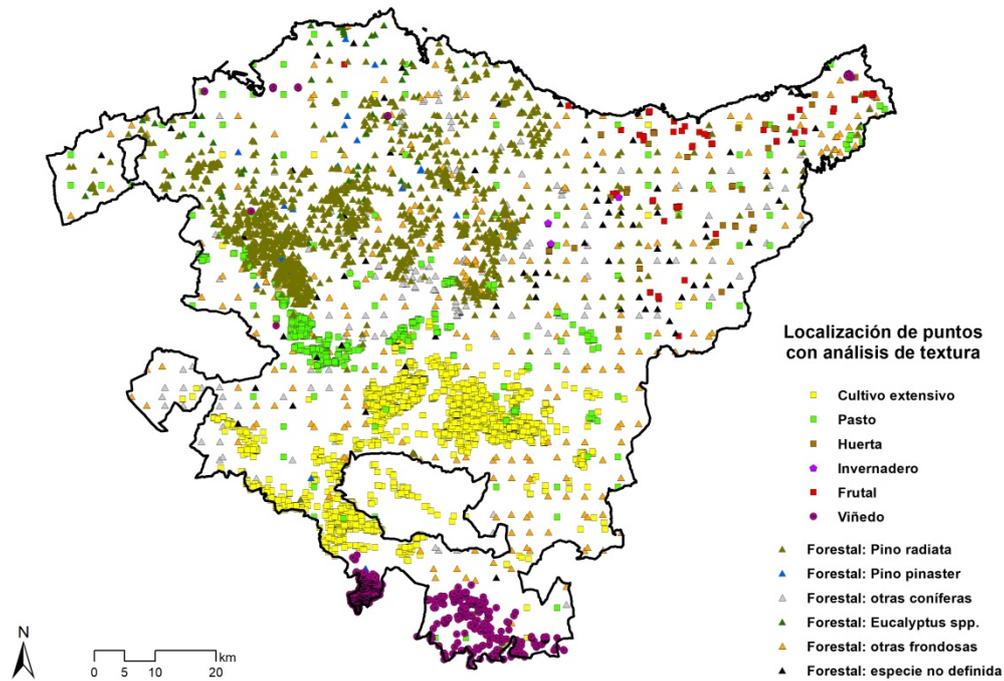


Figura 2. Localización de los datos recopilados para la base de datos de suelo por usos, con analíticas de textura.

A continuación se detallan los aspectos más relevantes para la armonización de la base de datos y el proceso de análisis de los resultados:

- Método de análisis:** la mayoría de los análisis proceden de dos laboratorios (Fraisoro y Neiker) que determinan el contenido de materia orgánica mediante el mismo método analítico, pero no exactamente de la misma forma. De ahí la relevancia de identificar los métodos de análisis utilizados y buscar la equivalencia entre los mismos.

En ambos laboratorios el contenido de materia orgánica se determina mediante el método de Walkley & Black. Se trata de una digestión por vía húmeda, utilizando un exceso de dicromato potásico en medio ácido; en el caso del laboratorio de servicio de Neiker, en este proceso no se aporta calor. El exceso de dicromato se valora con sal de Mohr. Al ser una valoración redox, el método determina equivalentes de C y, asumiendo que la materia orgánica tiene un estado de oxidación de 0, se pasan los equivalentes de C a gramos de C. El resultado final de contenido de C se transforma a contenido de materia orgánica, asumiendo que el 58% de la materia orgánica está constituida por C. Por medio de este método no se oxida totalmente el C orgánico; a menudo, la fracción de C no oxidable con dicromato corresponde a formas carbonizadas.

A pesar de utilizar el mismo método, se ha constatado que los resultados de los análisis de las mismas muestras no son iguales en Neiker y Fraisoro. Por ello, se aplica la siguiente función lineal a fin de ajustar los valores de materia orgánica obtenidos en el laboratorio de Fraisoro, a los que se habrían obtenido en Neiker de haber analizado allí las muestras:

$$y = 0.7434 * x + 0.2041 \quad (R^2 = 0.9596)$$

Donde,

y: contenido en MO obtenido en Neiker (%).

x: contenido en MO obtenido en Fraisoro (%).

Esta recta de regresión se obtuvo analizando el contenido de materia orgánica de unas mismas muestras (en un rango de 0.2-6.9 % de materia orgánica) en ambos laboratorios (ver **Figura 3**).

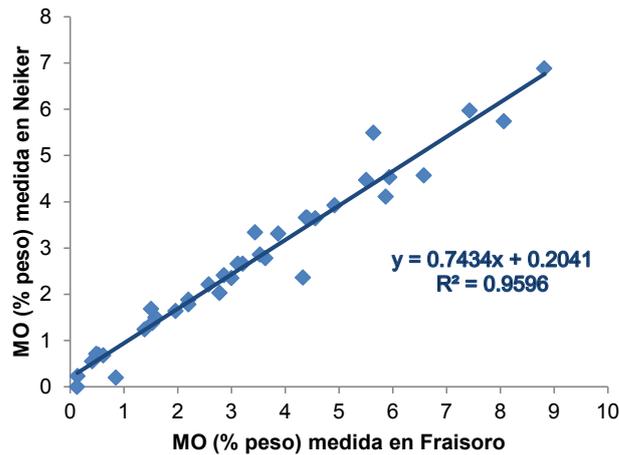


Figura 2. Recta de regresión hallada entre los resultados de los análisis de materia orgánica de Fraisoro y de Neiker.

- **Profundidad de muestreo:** la cartografía a generar sobre textura y materia orgánica debe corresponder a una misma profundidad de perfil de suelo (0-30 cm), pero las analíticas recopiladas abarcan una amplia variedad de profundidades, debido a que no se realizan expresamente para generar este tipo de cartografía, sino para otros fines.

El objetivo del proyecto es obtener las existencias de C orgánico en los 30 cm superiores de suelo porque el IPCC (IPCC, 2006) asume que es la profundidad sobre la que más fácilmente pueden influir las actividades antrópicas.

Sin embargo, en algunos casos, no se dispone del contenido de C de los primeros 30 cm de profundidad del suelo. En los casos en los que se han analizado varios horizontes que llegan a profundidades mayores que 30 cm, se ponderan sus contenidos en C para obtener sólo la cantidad presente en los primeros 30 cm.

La distribución de muestras según profundidades es la siguiente:

0-10 cm:	5883
0-15 cm:	6
0-20 cm:	68
0-25 cm:	1
0-30 cm:	5687
10-30 cm:	615

Las muestras con profundidades de 0-15 cm, 0-20 cm y 0-25 cm se han eliminado del análisis ya que suponen un 0.6% de los datos.

En los casos en los que se analiza una profundidad menor de 30 cm, se ha estimado la distribución del C hasta los 30 cm de acuerdo al trabajo de Jobaggy y Jackson del 2000 que se ha citado hasta el momento en 1842 trabajos científicos. En este trabajo se evalúa la distribución vertical del contenido de carbono en suelos de 694 perfiles edáficos que se diferencian en praderas, matorrales y sistemas forestales.

Para obtener el factor de conversión primero se dividieron las dos capas superiores (0-20 cm y 20-40 cm) en capas de 10 cm (0-10, 10-20 y 20-30 cm) y se estimó qué porcentaje de C correspondía a cada subcapa teniendo en cuenta que la proporción de C en suelo disminuye de forma exponencial con la profundidad. Así, se asumió que de la capa de 0-20 cm, un 65% estaría presente en la capa de 0-10 cm y el 35% restante en la de 20-30cm. Y de la capa de 20-40 cm un 60% se le atribuyó a la capa de 20-30 cm. A partir de este análisis, se han calculado las ecuaciones de la Tabla 2 .

Tabla 1. Ecuaciones aplicadas para llevar el contenido de carbono orgánico a 0-30 cm de profundidad a partir de análisis de muestras de suelo tomadas a profundidades inferiores.

Información disponible de análisis	Ecuación aplicada para completar 0-30 cm de profundidad
Cuando se dispone de los primeros 10 cm de profundidad para praderas	$C_{0-30cm} = C_{0-10cm} * 2.04$
Cuando se dispone de los primeros 10 cm de profundidad para sistemas forestales	$C_{0-30cm} = C_{0-10cm} * 1.79$

C_{0-30cm} Y C_{0-10cm} son la concentración de C (%) en los primeros 30 cm y 10 cm del perfil del suelo.

Las muestras que presentaban la profundidad de muestreo 10-30 cm eran todas de viñedos y para poder transformar la concentración de C de esta profundidad en la profundidad deseada se utilizó la información generada por NEIKER en diferentes trabajos como por ejemplo la tesis doctoral de la Dra. Olatz Unamunzaga titulada: Zonificación de un viñedo de Rioja Alavesa según las propiedades del suelo y su influencia sobre la producción y calidad. Tras la revisión de diferentes perfiles edáficos, se decidió utilizar un factor de conversión de 1.2 para transformar la concentración de C de 10-30 cm a 0-30 cm.

- **Localización:** muchos de los análisis de laboratorio reunidos no eran directamente utilizables en el presente proyecto ya que no disponían de suficiente información sobre su localización espacial. Desde los centros de gestión, se trató de conocer su localización, a través de otros datos recogidos en los laboratorios (propietario, identificación dada por el propietario, uso, etc.).

Todos los formatos de localización empleados (identificación SIGPAC por parcela, identificación SIGPAC por recinto, coordenadas, etc.) se transformaron a un mismo sistema de referencia (UTMs del sistema ETRS89) y, finalmente, se tradujeron en puntos geolocalizados. Es decir, que cuando el análisis de suelo correspondía a la superficie de una parcela (o de un recinto), se asumió que correspondía al centroide de la misma.

- **Densidad aparente:** Densidad Aparente de un suelo se define como la masa de suelo seco por unidad de volumen, incluyendo huecos y poros que contenga, aparentes o no. Esta definición se emplea tanto en Geología como en la Teoría de los Materiales. La densidad aparente del suelo es un buen indicador de importantes características del suelo, tales como porosidad, grado de aireación y capacidad de drenaje. En un tipo de suelo los valores bajos de densidad aparente implican suelos porosos, bien aireados y con buen drenaje.

Por otro lado, si los valores son altos, quiere decir que el suelo es compacto o poco poroso, que tiene poca porosidad en su composición, que la infiltración del agua es lenta, lo cual puede provocar anegamientos.

El método más sencillo para la determinación de la densidad aparente consiste en tomar un volumen fijo de suelo sin perturbar y pesarlo una vez seco, por calentamiento en el horno a 105° C durante 48 horas. Para ello se utiliza un cilindro metálico con un volumen conocido. En uno de sus extremos se le coloca un cabezal cilíndrico, que se irá golpeando con un mazo de goma para poder presionar e introducir el cilindro o anillo toma de muestras dentro del suelo sin afectar a la muestra. Una vez clavado completamente, se extrae el cilindro del suelo, cortando con una herramienta apropiada, que nos permitirá eliminar el sobrante del extremo que se ha clavado. Una vez el cilindro esté lleno y enrasado en ambos extremos, se le coloca dos tapaderas de plástico a ambos extremos. Ya en el laboratorio se extrae el suelo contenido, cuyo volumen corresponde con el del cilindro y que es conocido, se deseca y se pesa. La densidad viene determinada por la relación entre el peso seco obtenido y el volumen correspondiente.

La densidad aparente del suelo es un parámetro fundamental para poder transformar la concentración de C (g C kg⁻¹ suelo) en contenido de C (Mg C ha⁻¹) y teniendo en consideración lo laborioso que es su determinación, nos basamos en ecuaciones de pedotransferencia para obtener dicho dato.

Para sistemas forestales se emplearon funciones de pedotransferencia desarrolladas en NEIKER (Tabla 3). Estas ecuaciones están basadas en la red BASONET que el Departamento de Agricultura del Gobierno Vasco crea en 2001. BASONET se compone de 428 parcelas del Inventario Forestal Nacional y en estas parcelas se recogieron cilindros inalterados de muestras en dos profundidades (0-20 cm y 20-40 cm) para determinar la densidad aparente. Además, se recogieron muestras de suelo donde se analizaron tanto la textura de suelo como la materia orgánica. Es por ello, que NEIKER pudo generar ecuaciones de pedotransferencia para sistemas forestales.

Tabla 2. Ecuaciones aplicadas para calcular la densidad aparente de los suelos forestales.

Información disponible sobre textura (USDA)	Ecuación aplicada para obtener densidad aparente de 0-30 cm
Suelos con un contenido de arcilla ≤ 45%	$D_{aparente} = -0.2135 * \ln(MO) + 1.3185$
Suelos con un contenido de arcilla > 45%	$D_{aparente} = -0.1741 * \ln(MO) + 1.247$

D_{aparente}: densidad aparente, en g cm⁻³ ó Mg m⁻³; MO: contenido en materia orgánica, en porcentaje.

Para suelos no forestales se utilizó la ecuación desarrollada por Rawls y col. (2004) basada en el estudio de 2100 muestras de suelo del horizonte A de los Estados Unidos de América.

The following model was developed to predict soil bulk density from % sand, % clay and % organic carbon using over 2100 A soil horizons taken from the USDA-NRCS Soil Characterization Database.

$$\begin{aligned} \rho_b = & 1.36411 + 0.185628(0.0845397 + 0.701658w - 0.614038w^2 - 1.18871w^3 \\ & + 0.0991862y - 0.301816wy - 0.153337w^2y - 0.0722421y^2 + 0.392736wy^2 \\ & + 0.0886315y^3 - 0.601301z + 0.651673wz - 1.37484w^2z + 0.298823yz \\ & - 0.192686wyz + 0.0815752y^2z - 0.0450214z^2 - 0.179529wz^2 \\ & - 0.0797412yz^2 + 0.00942183z^3) \end{aligned} \quad (2)$$

where: $x = -1.2141 + 4.23123 \text{ sand } (0.004 < \text{sand } (P_{50-2000 \mu\text{m}}) < 0.952(\text{g/g}));$
 $y = -1.70126 + 7.55319 \text{ clay } (0.002 < \text{clay } (P_{<2 \mu\text{m}}) < 0.807(\text{g/g}));$ $z = -1.55601 +$
 $0.507094 \text{ OM } (1 < \text{Organic matter content} < 14.70(\%));$ $w = -0.0771892 +$
 $0.256629x + 0.256704x^2 - 0.140911x^3 - 0.0237361y - 0.098737x^2y - 0.140381y^2$
 $+ 0.0140902xy^2 + 0.0287001y^3.$

Finalmente, para transformar los porcentajes de C de las muestras de suelo en cantidades de C por unidad de superficie (Mg ha^{-1}), se utiliza la siguiente fórmula:

$$C (\text{Mg ha}^{-1}) = C (\%) * D (\text{Mg m}^{-3}) * \text{profundidad (m)} * 100$$

Donde,

C (Mg ha^{-1}): cantidad de C contenida por unidad de superficie (en Mg ha^{-1}).

C (%): contenido de C de la muestra de suelo, en %.

D (Mg m^{-3}): densidad aparente del suelo, en Mg m^{-3} .

Profundidad (m): profundidad de muestreo, en metros.

3.2.2.FASE II: Recopilación de cartografía auxiliar sobre factores que puedan explicar la variabilidad espacial de la textura y del carbono orgánico

Los procedimientos de escalado dependen del siguiente razonamiento: la acumulación de materia orgánica y/o textura en cada punto de muestreo depende de los parámetros de influencia para los cuales los datos espaciales están disponibles como clima, material parental, tipo de uso y pendiente (covariables).

La selección de las covariables se ha basado en la información disponible y en la influencia de cada variable tanto en la textura como la materia orgánica del suelo. Las covariables seleccionadas se agrupan en 4 grupos:

1. Variables derivadas del modelo digital terrestre

La recomendación para escalas nacionales es usar un modelo digital del terreno (MDT) de 30 m de resolución. En este caso se ha utilizado un MDT del País Vasco con una resolución de 5 m, ya que existe esa información disponible en el portal de GeoEuskadi del Gobierno Vasco (Figura 4). Las covariables derivadas del MDT más interesantes para la determinación de la materia orgánica del suelo son la **elevación**, ya que incide directamente en la temperatura, **pendiente** porque determina el grado de susceptibilidad a la erosión y por tanto a la pérdida de materia orgánica, la **orientación**, **aspecto**, la **curvatura** y el **sombreado** son parámetros relacionados con la radiación que recibe cada punto por lo que

influye en la tasa de mineralización de la materia orgánica. Así mismo se ha valorado la posibilidad de incluir parámetros relacionados con la humedad del suelo (Topographic wetness index) ya que la humedad es otro de los parámetros que incide en la mineralización de C.

2. Materia parental

La roca madre tiene un impacto crucial en la formación del suelo, la geoquímica del suelo y la física del suelo. La información sobre la roca madre suele estar disponible habitualmente en mapas geológicos donde generalmente suele haber información sobre la formación de rocas, los componentes minerales y la edad, y a menudo carecen de información de los sedimentos superficiales más jóvenes (incluso en mapas cuaternarios). Las clasificaciones utilizadas por los geólogos consideran principalmente la geoquímica y la estructura de la roca. La geoquímica tiene un impacto esencial en la química del suelo, p.e. capacidad de intercambio catiónico, saturación de bases y stock de nutrientes. La estructura de la roca determina a su vez la capacidad de desintegrarse, que tiene un impacto en las propiedades físicas del suelo, como la textura, permeabilidad y espesor del suelo. En este caso se ha utilizado la información geológica disponible en el portal de GeoEuskadi del Gobierno Vasco desarrollado por el Instituto Vasco de la Energía (EVE) en 1984 y una resolución de 1:25.000 (Figura 5).

3. Usos de suelo

El uso y la cobertura de la tierra son factores fundamentales para mapear las propiedades de los suelos. Hay varias fuentes de información sobre la cobertura y usos de suelo como GlobCover, GeoCover, GlobeLand30 o CORINE Land Cover. En este caso se ha utilizado el Sistema de Identificación Geográfica de Parcelas Agrícolas (SIGPAC) para clasificar los usos de suelo en huerta (HU), pastizal (PA, PR, PS), viñedo (VI), olivar (OV), frutal (FY), cultivos extensivos (TA) y forestal (FO). En el caso de la superficie forestal el SIGPAC no ofrece más información por lo que se ha decidido utilizar el Inventario Forestal Nacional para clasificar la superficie forestal en pino radiata, pinus pinaster y otras coníferas, *Eucalyptus*, otras frondosas y especie no definida. La categoría especie no definida engloba aquellos sistemas forestales que agrupan a una gran variedad de especies arbóreas y arbustivas de distribución atlántica, aunque dominan principalmente las especies arbóreas del género *Quercus* (Figura 6).

4. Variables climáticas

Las variables climáticas que más inciden en el almacenamiento de la materia orgánica en los suelos minerales son la humedad y la temperatura ya que determinarán la tasa de mineralización de la misma. Las variables climáticas que se utilizarán para la interpolación espacial son aquellas generadas en el proyecto KLIMATEK: Elaboración de escenarios de cambio climático de alta resolución para el País Vasco liderado por NEIKER. Las variables elegidas son: precipitación anual, temperatura media, temperatura máxima y mínima correspondientes al período 1971-2016 a una resolución de píxel de 30'' (Figura 7).

Dado que la resolución espacial de las covariables seleccionadas difiere, se están armonizando para poder conseguir la mejor información disponible.

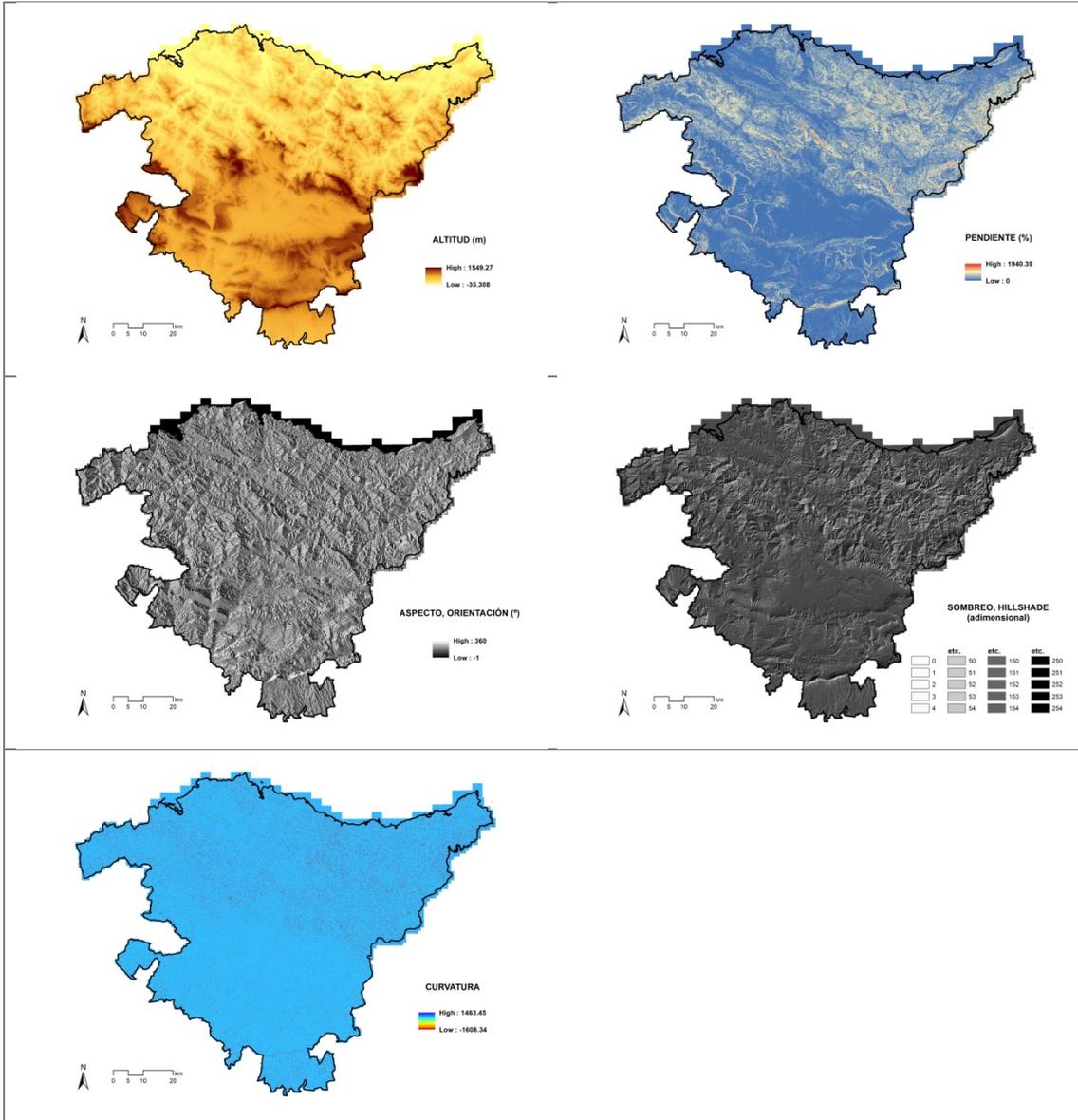
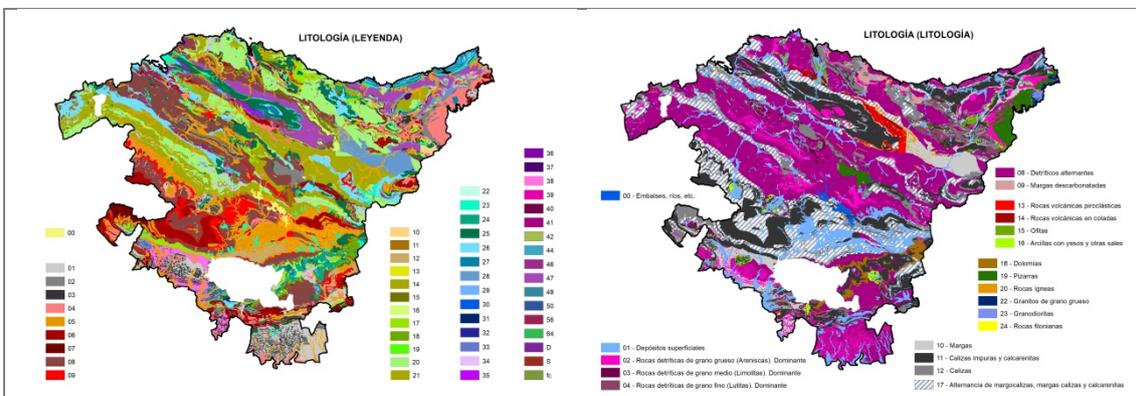


Figura 4. Covariables. Altitud y derivados del Modelo Digital del Terreno (LiDAR de 2016 con 5 m de resolución): pendiente, orientación, curvatura, y sombreado.



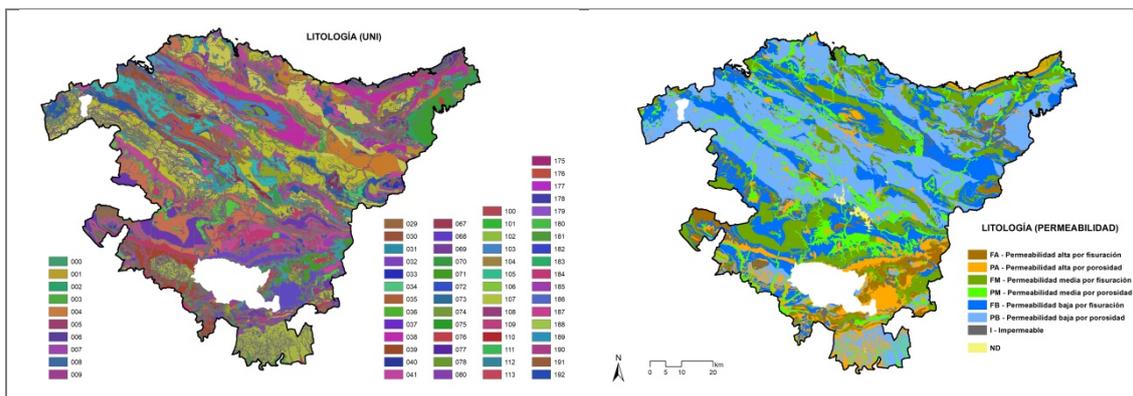


Figura 5. Covariables. Distintos aspectos de la litología y con distinto grado de detalle.

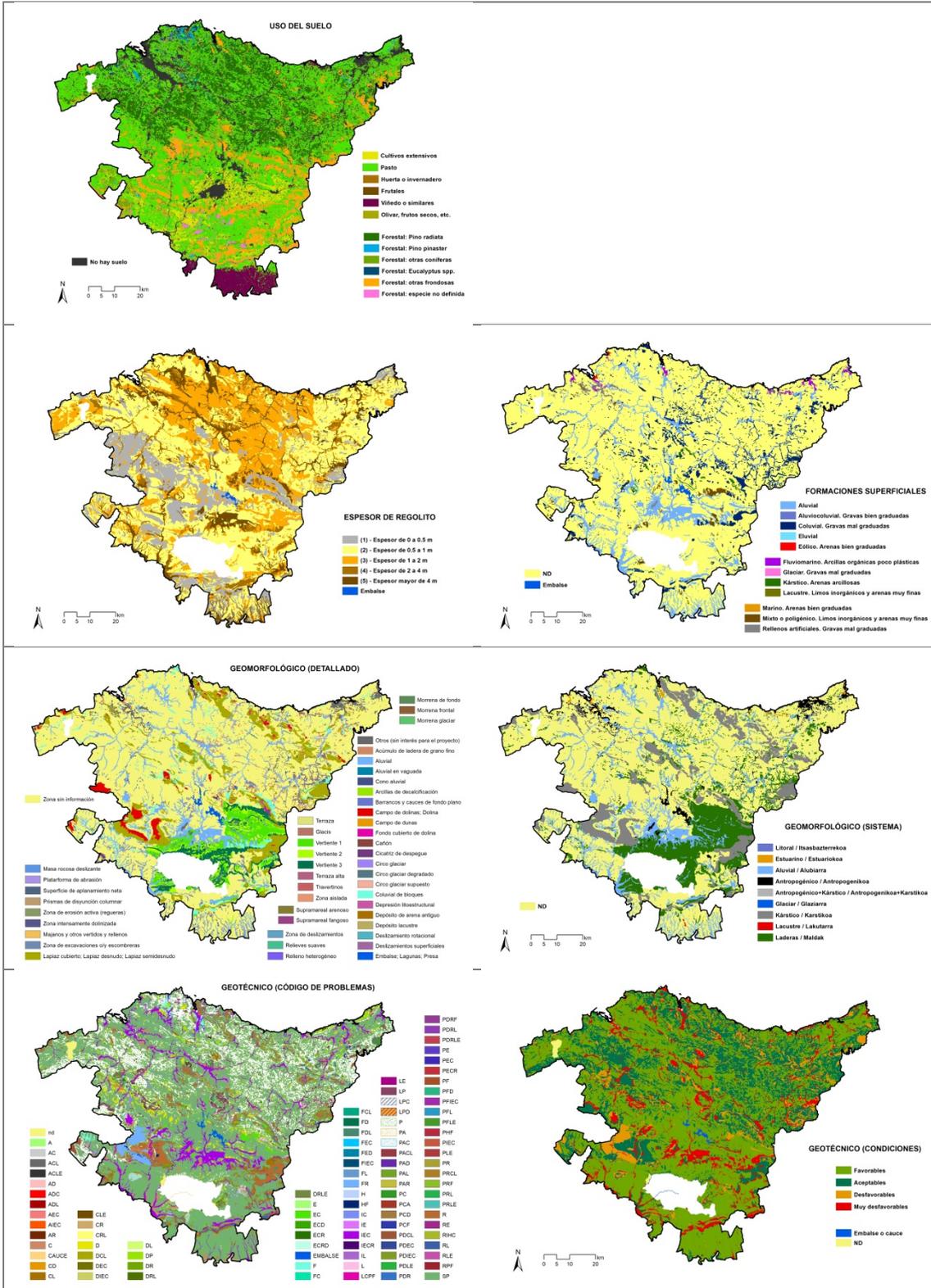


Figura 6. Covariables. Uso del suelo (combinación entre el SIGPAC-2017 y el IF-2016), espesor de regolito, formaciones superficiales, geomorfología (con distinto grado de detalle), geotécnico (con distinto grado de detalle).

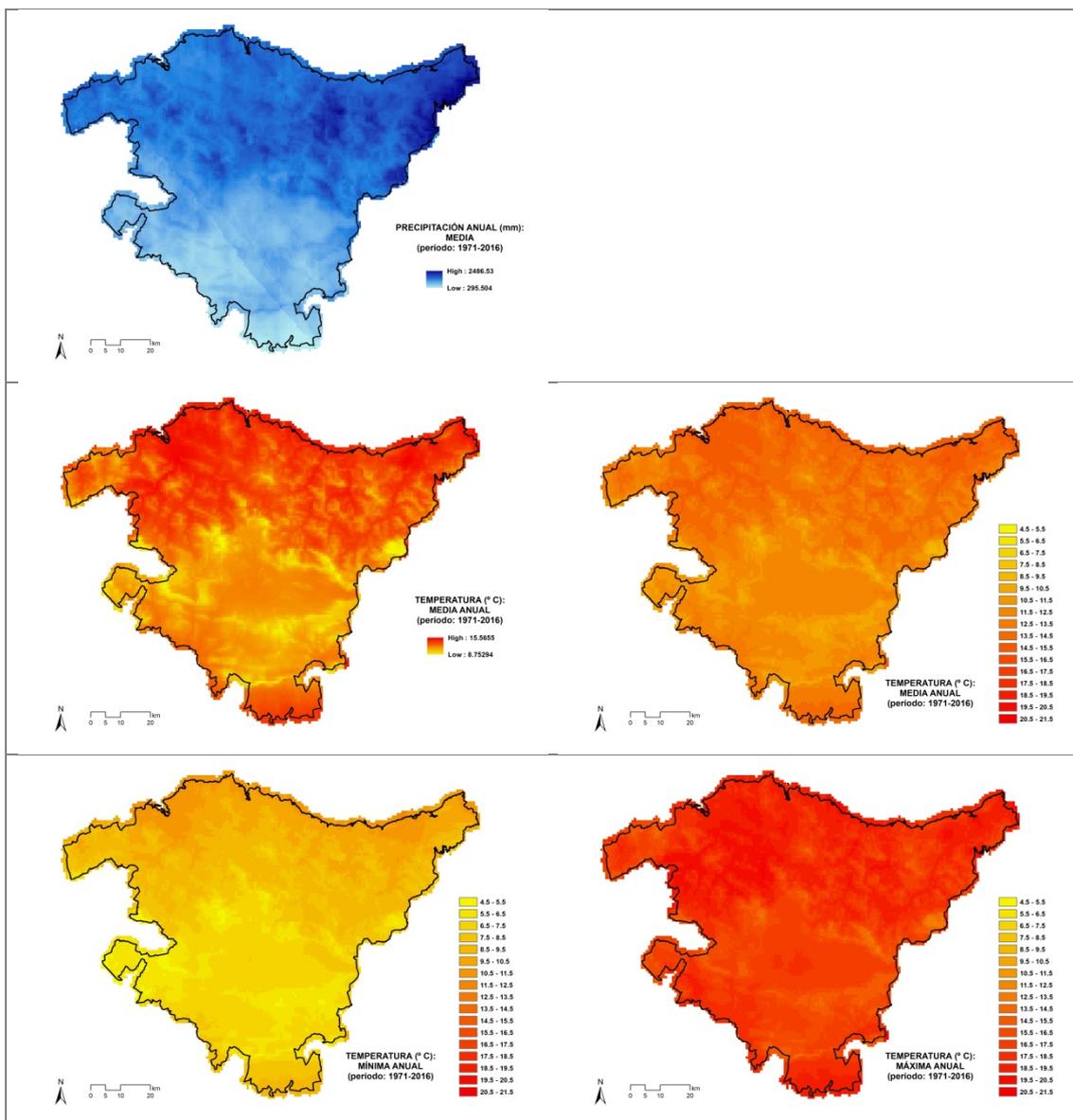


Figura 7. Covariables. Precipitación media anual y temperaturas (media, mínima y máxima), correspondientes al período 1971-2016 a una resolución de píxel de 30''.

Una vez recopilada la información espacial es necesario generar una tabla de propiedades de suelo. La información contenida en las covariables se extrae para cada sitio de muestreo georreferenciado y se incorpora a la tabla de propiedades de suelo (ver ejemplo Figura 8). Esta tabla se usa para el entrenamiento y la validación del modelo estadístico para predecir las existencias de SOC y textura que posteriormente se pueden aplicar en toda su extensión espacial.

Mapa de existencias de carbono y mapa de textura para los suelos del País Vasco

ID_2	Grupo_sp	USO_SIGPAC	prof_MO	prof_textu	Arg	Arena	Limo	Arcilla	MO	X_etr89	Y_etr89	MDT_m	ASP_g	CUR_g	HIL_p	SLO_p	PR_mm	TG_C	TN_C	TX_C	reg_cod	reg_m	
3297	C_remolacha_0819	cultivo	0-30 cm	0-30 cm	2009	13.81	53.45	32.75	2.11	520177	4747230	503.350006	345.965027	0.60009766	181	0.82455671	749.857727	12.2585678	7.0729661	17.4900475	3	(3) -Espesor de 1 a 2 m	
3298	C_UDAPA_0046	cultivo	0-30 cm	0-30 cm	2012	26.89	50.67	22.44	1.1	520806	4747240	504.73999	227.865021	-0.32006836	180	0.70803493	802.916748	12.2545509	7.04604816	17.4962711	1	(1) -Espesor de 0 a 0.5	
3299	C_AGA_0574	cultivo	0-30 cm	0-30 cm	2013	21.25	44.24	34.51	2.28	524131	4747260	503.48999	165.961182	0.15979004	179	0.41232464	816.753052	12.3089094	7.19404078	17.5042553	1	(1) -Espesor de 0 a 0.5	
3300	C_UDAPA_0667	cultivo	0-30 cm	0-30 cm	2013	21.25	44.24	34.51	2.28	524131	4747260	503.48999	165.961182	0.15979004	179	0.41232464	816.753052	12.3089094	7.19404078	17.5042553	1	(1) -Espesor de 0 a 0.5	
3301	C_AGA_0303	cultivo	0-30 cm	0-30 cm	2013	18.05	43.38	38.57	1.6	534506	4747270	528.77002	175.362839	-0.07983398	176	2.78392363	786.765015	12.1537437	6.87068892	17.4632053	2	(2) -Espesor de 0.5 a 1	
3302	C_UDAPA_0302	cultivo	0-30 cm	0-30 cm	2013	18.05	43.38	38.57	1.6	534506	4747270	528.77002	175.362839	-0.07983398	176	2.78392363	786.765015	12.1537437	6.87068892	17.4632053	2	(2) -Espesor de 0.5 a 1	
3303	R_EROSION2005_231	FRONDOSA	FO	0-10 cm	0-10 cm	2005	68.8	15.4	15.8	8.07	477394	4747290	913.76001	243.828827	-2.75976563	186	52.0347099	918.192688	10.0739927	5.08964586	15.1180716	1	(1) -Espesor de 0 a 0.5
3304	R_EROSION2005_230	conifera	FO	0-10 cm	0-10 cm	2005	68	12.6	19.4	9.36	482394	4747290	1027.59998	209.339005	6.87939453	135	53.8294258	835.168457	10.9415903	5.72040892	16.0674152	1	(1) -Espesor de 0 a 0.5
3305	R_EROSION2005_229	cultivo	TA	0-10 cm	0-10 cm	2005	68.8	11	20.2	0.57	487394	4747290	638.169983	114.701508	2.63989258	153	14.7771378	765.011169	11.5672941	5.93557405	17.2561417	4	(4) -Espesor de 2 a 4 m
3306	R_EROSION2005_228	conifera	PA	0-10 cm	0-10 cm	2005	84.2	9.6	6.2	0.19	492394	4747290	828.080017	50.5103951	-1.3203125	167	30.1913433	725.093567	12.0296478	6.04429197	18.0537834	2	(2) -Espesor de 0.5 a 1
3307	R_EROSION2005_227	GRASSLAND	PR	0-10 cm	0-10 cm	2005	77.6	9	13.4	5.9	497394	4747290	976.47998	333.645706	-2.08032227	180	28.9313164	987.197388	9.88488674	4.87141514	15.2715759	2	(2) -Espesor de 0.5 a 1
3308	R_EROSION2005_226	conifera	FO	0-10 cm	0-10 cm	2005	66.8	21.6	11.6	10.24	502394	4747290	711.72998	323.354645	-1.60009766	212	20.4400673	925.534546	11.570035	6.33653784	16.8881378	3	(3) -Espesor de 1 a 2 m
3309	R_EROSION2005_225	GRASSLAND	PR	0-10 cm	0-10 cm	2005	65.6	19.8	14.6	9.26	507394	4747290	603.47998	122.316826	-0.36035156	153	14.1695938	954.805054	12.0455914	6.93508291	17.255724	2	(2) -Espesor de 0.5 a 1
3310	R_EROSION2005_224	FRONDOSA	FO	0-10 cm	0-10 cm	2005	55.6	17.2	27.2	10.09	512394	4747290	836.179993	56.5590363	-4.03979492	160	31.9973341	794.779419	11.4534245	6.59928799	16.4748554	1	(1) -Espesor de 0 a 0.5
3311	R_EROSION2005_223	cultivo	TA	0-10 cm	0-10 cm	2005	53.2	24.4	22.4	6.67	517394	4747290	533.429993	162.879456	0.27978516	171	5.51970816	828.714172	12.0739021	6.96487808	17.2596493	2	(2) -Espesor de 0.5 a 1
3312	R_EROSION2005_222	cultivo	TA	0-10 cm	0-10 cm	2005	50.4	16	33.6	4.6	522394	4747290	505.059998	268.296997	-1.2800293	183	2.52614021	740.392578	12.2690248	6.98599291	17.5360069	1	(1) -Espesor de 0 a 0.5
3313	R_EROSION2005_221	cultivo	CA	0-10 cm	0-10 cm	2005	29.8	40.6	29.6	3.62	527394	4747290	509.649994	79.8671341	-1.92004395	173	6.67919111	757.670105	12.3330469	7.27897692	17.6637802	2	(2) -Espesor de 0.5 a 1
3314	R_EROSION2005_220	cultivo	TA	0-10 cm	0-10 cm	2005	37.6	25.8	36.6	5.64	532394	4747290	518.640015	256.706696	-0.83959961	181	1.41282511	835.474426	12.1966248	6.85130215	17.5597591	5	(5) -Espesor mayor de
3315	R_EROSION2005_219	GRASSLAND	PR	0-10 cm	0-10 cm	2005	29.2	46.6	24.2	9.88	537394	4747290	557.340027	18.1895599	-1.87963867	193	22.1049747	878.169922	12.0431519	6.87154818	17.2992725	2	(2) -Espesor de 0.5 a 1
3316	R_EROSION2005_218	cultivo	TA	0-10 cm	0-10 cm	2005	28	46	26	3	542394	4747290	582.119995	5.08239222	-0.80004883	190	9.31151199	785.732605	12.2194166	7.11011982	17.4221525	2	(2) -Espesor de 0.5 a 1
3317	R_EROSION2005_217	FRONDOSA	FO	0-10 cm	0-10 cm	2005	38	26	36	9.1	547394	4747290	622.700012	64.6381989	-0.43969727	166	18.093977	848.855591	12.0179234	7.07640219	17.0432129	2	(2) -Espesor de 0.5 a 1
3318	R_EROSION2005_216	cultivo	TA	0-10 cm	0-10 cm	2005	43.6	19.8	36.6	0.27	552394	4747290	594.210022	191.862732	-0.91967773	177	3.03961849	915.436462	12.435605	7.71185112	17.2920094	3	(3) -Espesor de 1 a 2 m
3319	R_EROSION2005_215	GRASSLAND	TA	0-10 cm	0-10 cm	2005	35.8	15.4	48.8	8.9	557394	4747290	585.530029	215.426117	-0.79956055	176	8.9277916	986.345703	12.5383072	7.94615412	17.1936588	3	(3) -Espesor de 1 a 2 m
3320	C_remolacha_0869	cultivo	0-30 cm	0-30 cm	2009	17.68	43.51	38.81	2.33	536462.667	4747333.33	566.090027	208.260757	2.08056641	167	19.2718029	889.616333	12.1060047	6.92196083	17.3765612	2	(2) -Espesor de 0.5 a 1	
3321	C_particular_0074	cultivo	0-30 cm	0-30 cm	2007	21.13	48.88	29.98	1.31	520431	4747360	504.01001	202.98851	0.00024414	179	1.79235208	802.916748	12.2545509	7.04604816	17.4962711	3	(3) -Espesor de 1 a 2 m	
3322	C_remolacha_0270	cultivo	0-30 cm	0-30 cm	2009	24.95	51.08	23.97	1.42	516682	4747380	524.47998	289.036926	1.59960938	182	1.53393602	769.943665	12.2026424	7.07768488	17.4015999	4	(4) -Espesor de 2 a 4 m	
3323	C_UDAPA_0692	cultivo	0-30 cm	0-30 cm	2013	9.87	42.45	47.68	2.42	521223	4747380	504.480011	240.072113	-0.15979004	181	2.85559894	760.290405	12.2637424	6.995049	17.529356	1	(1) -Espesor de 0 a 0.5	
3324	C_remolacha_0473	cultivo	0-30 cm	0-30 cm	2008	32.21	47.83	19.96	1.61	518974	4747420	533.559998	146.668762	1	168	6.64276171	805.389587	12.2727833	7.0969739	17.4962948	3	(3) -Espesor de 1 a 2 m	
3325	C_UDAPA_0191	cultivo	0-30 cm	0-30 cm	2013	25.22	38.54	36.24	1.44	533714	4747420	531.880005	183.523041	0.59985352	165	11.7973499	837.197205	12.1742067	6.86105585	17.5111885	2	(2) -Espesor de 0.5 a 1	
3326	C_remolacha_0795	cultivo	0-30 cm	0-30 cm	2009	19.05	45.05	35.9	2.02	532229	4747450	520.340027	174.46814	1.36035156	178	1.55754685	817.378723	12.2140074	6.82839394	17.6126652	4	(4) -Espesor de 2 a 4 m	
3327	C_particular_0418	cultivo	0-30 cm	0-30 cm	2007	15.02	42.18	42.8	2.26	524000	4747480	504.779999	3.35921257	-0.32006836	181	0.85153025	816.753052	12.3089094	7.19404078	17.5042553	1	(1) -Espesor de 0 a 0.5	
3328	C_particular_0157	cultivo	0-30 cm	0-30 cm	2007	26.17	34.94	38.9	1.53	519492	4747490	516.47998	159.376541	0.23974609	167	7.45253801	749.857727	12.2585678	7.0729661	17.4900475	1	(1) -Espesor de 0 a 0.5	
3329	C_UDAPA_0399	cultivo	0-30 cm	0-30 cm	2013	28.96	47.25	23.79	1.72	519492	4747490	516.47998	159.376541	0.23974609	167	7.45253801	749.857727	12.2585678	7.0729661	17.4900475	1	(1) -Espesor de 0 a 0.5	
3330	C_remolacha_0933	cultivo	0-30 cm	0-30 cm	2008	12.29	53.51	34.2	3.15	520951	4747490	504.309998	348.693908	0.44006348	181	0.89233202	802.916748	12.2545509	7.04604816	17.4962711	1	(1) -Espesor de 0 a 0.5	
3331	C_remolacha_0338	cultivo	0-30 cm	0-30 cm	2009	23.08	47.76	29.16	1.47	540626	4747490	552.469971	101.30455	-0.20043945	179	0.63752109	841.09314	12.0842752	6.9916811	17.3018913	2	(2) -Espesor de 0.5 a 1	
3332	C_remolacha_0631	cultivo	0-30 cm	0-30 cm	2008	19.78	52.43	27.78	1.77	534242	4747510	536.609985	232.496964	0.11987305	181	0.06531191	786.765015	12.1537437	6.87068892	17.4632053	2	(2) -Espesor de 0.5 a 1	
3333	G_ABERE_0168	GRASSLAND	0-10 cm	0-10 cm	2013	0	0	0	5.52	558668	4747510	602.460022	27.6355324	-4.75952148	187	22.7448101	1212.3446	11.1189079	6.91871309	15.4627619	3	(3) -Espesor de 1 a 2 m	

Figura 8. Extracto de la tabla de propiedades de suelo.

3.2.3. FASE III y FASE V: Interpolación espacial de la textura y la materia orgánica.

En el contexto de la predicción de la materia orgánica y la textura del suelo en base a la información geoclimática y litológica, la literatura de los métodos de interpolación espacial incluye técnicas estadísticas como *MARS-Multivariate Adaptive Regression Splines* (Friedman, 1991), *GAM-Generalized Additive Models* (Hastie y Tibshirani, 1990), Kriging (Cressie, 1993) o *Gaussian Process Regression* (Rasmussen y Williams, 2006), ó técnicas de aprendizaje automático o *Machine Learning* como *random forest* (Breiman, 2001), *cutbist* (Quinlan, 1993) o redes neuronales (Bishop, 1995). En esta fase del proyecto, se realizará el análisis de los datos empleando los métodos citados anteriormente. La bondad del ajuste de los distintos modelos estadísticos se realizará mediante validación cruzada. Se estudiarán diferentes medidas de calibración y evaluación de los modelos como el coeficiente de determinación, error cuadrático medio o el sesgo del error medio. El modelo final será aquel que presente un mejor comportamiento en función de dichos criterios.

Modelo de textura

Para el modelo de textura se han analizado las muestras con datos de porcentaje de arena, arcilla y limo a 0-10 cm y 0-30 cm de profundidad (Figura 8) y se han utilizado como covariables del modelo además de las presentadas en las Figuras 4 y 6, la longitud y latitud geográficas con el objetivo de capturar el patrón espacial. Dado que la textura se expresa como % de las tres clases (arena, arcilla y limo) y su suma ha de ser del 100%, se ha realizado la transformación aditiva log-ratio propuesta por Aitchison (1982) para datos composicionales. De este modo, el modelo ajustado elegido consistirá en un modelo de respuesta multivariante para las variables de arena y arcilla transformadas, y la tercera (limo) será el resultado de la diferencia entre 100% y la suma de las otras dos. Se han considerado dos alternativas para el enfoque multivariante: I) *MARS (Multivariate Adaptive Regression Splines)* y II) *GAMs (Generalized Additive Models)*, dado que ambos enfoques permiten la implementación del modelo de respuesta múltiple y la interpretabilidad del modelo resultante.

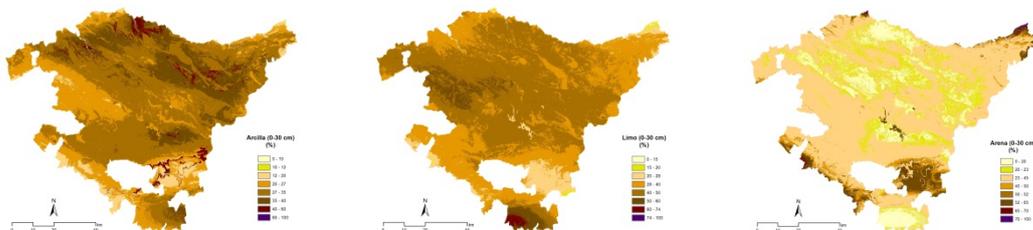


Figura 9. Mapas de arcilla, limo y arena para la CAPV con una resolución de 10x10m

Modelo para MO

El mapa de predicción obtenido en el modelo de textura se ha utilizado para obtener los porcentajes de arena, arcilla y limo en las localizaciones muestreadas y a su vez se han utilizado como covariables en la predicción del % de materia orgánica (MO) junto a las covariables de las Figuras 4 y 6 y la longitud y latitud geográficas. En este caso, dado que la variable respuesta (MO) es univariante, se han comparado diversas técnicas de regresión como árboles aleatorios, cubist, redes neuronales, procesos gaussianos y los ya mencionados y utilizados para el mapa de predicción de textura (MARS y GAMs).

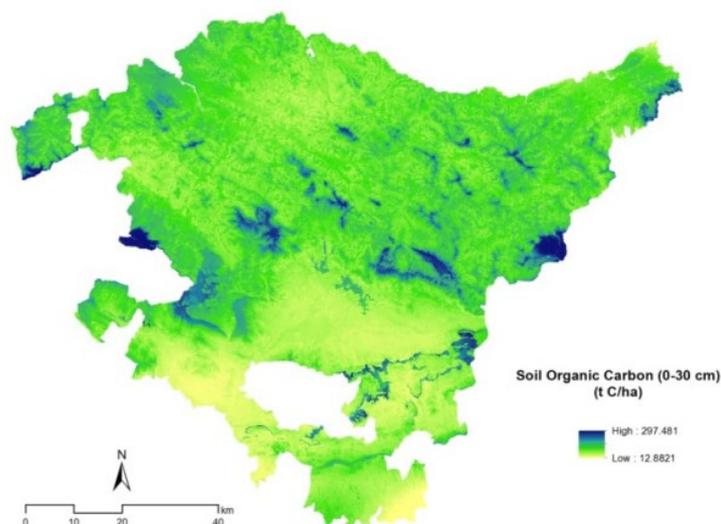


Figura 10. Mapa del contenido de carbono orgánico en los primeros 30 cm de los suelos de la CAPV con una resolución de 10x10m

3.2.4.FASE IV: Pautas para promover la mitigación y adaptación a través de la acumulación adicional de C orgánico en los suelos de la CAPV

Los ecosistemas edáficos se identifican como importantes sumideros de C. Sin embargo, habría que destacar que los suelos *per se* no actúan como sumideros de C bajo cualquier condición y, sobre todo, que dicha acumulación no es permanente ni infinita. Los cambios en la gestión de los suelos o en el uso del suelo son los responsables de las grandes acumulaciones de C orgánico en el suelo que tienen lugar durante un período de tiempo determinado. Por tanto, un cambio de manejo en cualquier ecosistema se traducirá necesariamente en un cambio en los niveles de C orgánico del suelo (COS). En LURCARBONTEXT se quieren proponer pautas para promover la acumulación adicional de C en suelos mediante cambios en la gestión de los mismos. Aunque NEIKER e IHOBE ya publicaron en el 2004 un estudio sobre la potencialidad de los suelos y la biomasa agrícolas, pascícolas y forestales de la CAPV como sumideros de carbono, en LURCARBONTEXT se propone evaluar la capacidad mitigadora de diferentes prácticas recomendadas para el secuestro de C.

El objetivo de este ejercicio es simular el posible efecto del cambio de gestión de suelos sobre el potencial de almacenamiento de C en suelos agrarios de la CAPV a largo plazo en comparación con el escenario actual. Los protocolos actuales de contabilidad de gases de efecto invernadero requieren que cualquier acción de gestión destinada a compensar las emisiones de CO₂ muestre una "adicionalidad", es decir, que sea adicional al escenario "como de costumbre".

Para la simulación se ha realizado una búsqueda bibliográfica para poder recopilar la información de tasas de secuestro de C sobre distintas prácticas de gestión de suelo y uso de suelos. Se ha recopilado información para suelos agrícolas, pastos permanentes y sistemas forestales. Posteriormente, se ha planteado un escenario hipotético donde se implementarían esas medidas de cambio de gestión de suelo en parte de la superficie agraria de la CAPV para demostrar que se podrían compensar, en el marco de los inventario de gases de efecto invernadero que se realizan anualmente por IhoBE, las

emisiones procedentes del sector Agricultura que incluye emisiones derivadas tanto de la actividad agrícola como de la ganadera.

Prácticas de gestión de suelo para favorecer la acumulación adicional de C en suelo

Las prácticas más prometedoras para favorecer el secuestro de C en **tierras de cultivo** y las tasas de acumulación son las siguientes:

1. Conversión de suelo agrícola a pradera: El término pradera permanente refleja un uso complejo de la tierra donde el aprovechamiento es diverso: mediante pastoreo, siega o ambos (mixto). Debido a la falta de bases de datos que definieran la gestión local, Lugato y col. (2015) propusieron condiciones de gestión simplificadas que intentaban imitar el balance de carbono que fuese probable que se produjera. En particular, eliminaron la biomasa del suelo para simular tres cortes (mayo, julio y septiembre), mientras que la restitución de carbono se implementó a partir de la aplicación de estiércol manteniendo la tasa real de fertilización orgánica. No se realizaron cambios en la densidad del ganado animal. Las tasas medias anuales de secuestro fueron superiores a $0,6 \text{ t C ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ en el corto plazo (2020), disminuyendo solo un poco después (Lugato y col., 2015).
2. Incorporación de residuos de cosecha y reducción del laboreo: Lugato y col. (2015) consideran como escenario actual, aquel en el que el 50% de la paja de cereal se retira del campo (a excepción del maíz para ensilaje y grano en los que se eliminó la biomasa por encima del suelo y solo el grano, respectivamente). Para el escenario alternativo los autores consideraron la incorporación de toda la paja de cereal al suelo. Además, en el escenario actual, la práctica de manejo más común es el laboreo convencional: aplicar un laboreo primario tras la cosecha del cultivo (generalmente entre septiembre y noviembre), seguido de una labranza secundaria y más superficial antes de la siembra (según el tipo de cultivo). Un escenario de laboreo reducido se basó en la sustitución del arado primario convencional por un laboreo más superficial (tipo chisel) que distribuye la materia orgánica de restos de cosecha en la superficie y reduce la tasa de descomposición de SOM. Las tasas medias anuales de secuestro para el escenario de incorporación de restos y laboreo mínimo fueron de $0,31 \text{ t C ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ para el 2050 (Lugato y col., 2015).
3. Implantación de cubiertas vegetales: La vegetación sobre el suelo se mantiene a lo largo de todo el año, si bien es frecuente e incluso deseable que se produzca un agostamiento estival. Generalmente, este tipo de cubierta ejerce una gran competencia con el cultivo y su uso se limita a zonas de elevada pluviometría (por encima de 700-800 mm/año) o para cultivos en los que se disponga de suficientes recursos hídricos y estos se puedan aplicar sin ningún tipo de restricción temporal, cuantitativa o legal. También cabe la posibilidad de adoptar este tipo de cubierta con especies nuevas que resulten poco competitivas o que se adapten al ciclo del cultivo, de tal manera que ejerzan esta competencia de una forma equilibrada y armoniosa con el desarrollo del cultivo. Las tasas medias anuales de secuestro para el escenario de cubiertas vegetales son de $0,11 \text{ t C ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ (Lugato y col., 2015).

4. Agroforestería: Los sistemas agroforestales son agroecosistemas complejos que combinan árboles y cultivos, o árboles y pastos, dentro de la misma unidad de gestión. Agroforestería es un término genérico que incluye una amplia variedad de sistemas (e.g., *alley cropping*, *hedgerows*, dehesas, silvopastoralismo,...), que varían según los arreglos de especies de árboles y cultivos en función de la zona climática y la región, lo que dificulta la clasificación de los sistemas agroforestales. El beneficio de los sistemas agroforestales en términos de regulación del cambio climático es ampliamente reconocido, con síntesis y meta-análisis recientes, reiterando su impacto positivo en el secuestro de SOC (Cardinael y col. 2018). Según Cardinael y col. (2018), la tasa media de almacenamiento de SOC (\pm intervalos de confianza) para las tierras de cultivo convertidas en sistemas agroforestales es de $0.75 \pm 0.19 \text{ t C ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$.

Las medidas favorables para la acumulación de C y las tasas de acumulación de C en suelos para **sistemas forestales**:

5. Modificación de la silvicultura en los pinares de la CAPV: Para poder proponer medidas de acumulación de C en pinares se ha utilizado la información publicada en el libro titulado "Sumideros de C de la Comunidad Autónoma del País Vasco". La Tabla 20 presenta la media y desviación típica de los contenidos de C en suelos de pinares maduros en la zona de estudio (Bizkaia + Álava cantábrica). Con esos datos se calcula que el percentil 95% del contenido de C en suelos de pinares adultos en esta zona sería de unos 116 Mg C ha^{-1} . Asumimos que ése es el contenido que podrían alcanzar los pinares de la CAPV siguiendo las pautas de gestión adecuadas como reducir la superficie ocupada por pistas y parques de madera o reducir las perturbaciones asociadas a la pérdida de materia orgánica en suelos como desplazamientos de mantillo o decapados. Si se implantaran estas directrices de conservación de suelos en el momento de aprovechamiento final se podrían alcanzar esos contenidos de C en un turno (40 años), por lo que la tasa de acumulación de C en esas plantaciones donde se implantara la gestión forestal adaptativa al cambio climático sería de $1,09 \text{ t C ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$.
6. Modificación de la silvicultura en los eucaliptales de la CAPV: El método de aprovechamiento forestal afecta significativamente al C en suelo. Según Johnson y Curtis (2001), la tala y aprovechamiento completo del árbol disminuye el C en suelo de media un 6%, mientras que el aprovechamiento solamente el fuste incrementa el C en suelo de media un 18%, ya que el resto de la biomasa (hojas, ramas, etc.) queda en campo. Actualmente en la CAPV, el aprovechamiento en los eucaliptales es de árbol completo. Si la media de contenidos de C en los suelos de los eucaliptales vascos es de $68.36 \text{ Mg C ha}^{-1}$, el incremento de un 18% de C en suelo debería llevarnos a unas tasas de acumulación de C de $0,82 \text{ t C ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ en un turno de 15 años.
7. Forestación/reforestación de montes desarbolados y/o matorrales con cubierta arbórea permanente (silvicultura cercana a la naturaleza): La decisión sobre la idoneidad de esta transformación deberá considerar el papel ecológico, social y económico que en la actualidad cumplen estos sistemas terrestres desarbolados, dado que determinadas circunstancias socio-económicas y de valor ambiental

pueden motivar su conservación. En el caso de que se optara por la transformación, habría que tener en cuenta que los factores más importantes que afectan el cambio de C en el suelo tras una forestación son el uso anterior de la tierra, el clima y el tipo de bosque establecido. Algunos resultados sugieren que gran parte del C en suelo se pierde cuando se establecen especies de maderas blandas, en particular plantaciones de *Pinus radiata*. Sin embargo, la acumulación de C en el suelo puede ser mayor cuando se establecen especies de maderas duras de hoja caduca o especies fijadoras de N₂ (ya sea como sotobosque o como plantación) (Paul y col., 2002). La mayoría de los estudios científicos donde se evalúa el potencial de secuestro de C en suelo mediante forestación/reforestación trata sobre la reforestación de tierras de cultivo (e.g., Rahman y col., 2017), por lo que para este ejercicio se ha decidido utilizar una tasa de secuestro de C de 0,7 t C ha⁻¹ año⁻¹ basándonos en la información generada para bosques Alemanes (Grüneberg y col, 2014).

Para tierras de pasto las prácticas de cambios en la gestión de suelo más probables son:

8. Mejora de la gestión de los pastos: evitar la eliminación continua de la biomasa aérea o promover la máxima producción de biomasa herbácea pueden aumentar los contenidos de carbono en los suelos de pastos, por lo que en la relación a la mejora de la gestión de los pastos son particularmente importantes, por un lado, la fertilización (enmiendas orgánicas de calidad) y la elección de las especies herbáceas de las praderas (siembras de enriquecimiento) y evitar el sobrepastoreo y las quemadas por otro. En conjunto, el IPCC establece unas tasas de acumulación de C en suelos mediante la gestión mejorada de los pastos entre 0,48 y 1,19 t C ha⁻¹ año⁻¹ en 20 años.

Escenario de cambios de gestión para mitigar el cambio climático (opciones para diseñar incentivos):

Lo que se pretende en este ejercicio es ver la capacidad que tiene el suelo agrario de eliminar el carbono de la atmósfera y de fijarla en el suelo (ver figura 9). Para ello se proponen 11 medidas concretas de cambios de gestión de suelo que tienen como objetivo incrementar el contenido de C en los suelos además de reducir las pérdidas mediante la mineralización de C. Estas medidas se detallan a continuación:

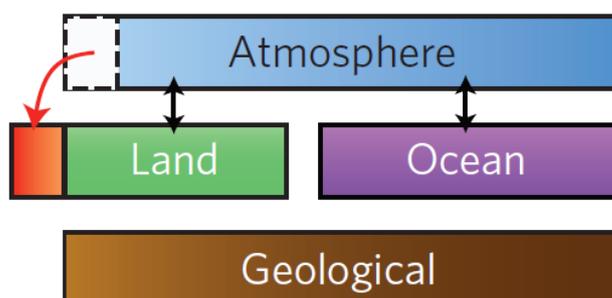


Figura 9: Representación esquemática de los flujos de carbono entre las reservas atmosféricas, terrestres, oceánicas y geológicas aplicando cambios en la gestión de los suelos agrarios extraída de Smith y col. (2015).

Las 11 medidas propuestas se han cuantificado para alcanzar aproximadamente una fijación anual equivalente a las emisiones de CO₂-equivalente que se atribuyen al sector Agricultura en los inventarios de gases de efecto invernadero realizados en la CAPV (cerca de 670 Gg CO₂-eq año⁻¹).

Cambios en sistemas forestales:

1. Se propone convertir en montes con cubierta arbórea permanente aquellos bosques cultivados que estén en pendientes superiores a 30°. Según la FAO (2017), no se debería permitir la extracción de madera en laderas con pendientes de más de 30 grados de inclinación (57% de pendiente). Este tipo de sistemas forestales (denominados bosques de montaña) son ecosistemas frágiles debido a que están situados en laderas escarpadas con suelos habitualmente delgados (leptosoles) y están sometidos a climas con altas precipitaciones, son *Environmentally Sensitive Areas* (ESA), por eso se propone una silvicultura cercana a la naturaleza donde el objetivo de gestión prioritario no sea la extracción de madera sino mantener y mejorar la función protectora del bosque. El movimiento de masas de piedras, suelo, agua, nieve o hielo en las pendientes montañosas puede constituir un peligro para la vida de las personas y las infraestructuras; por lo tanto, los bosques de montaña suelen desempeñar una función importante de protección, protegiendo activos y bienes (como asentamientos humanos o carreteras) situados a altitudes por debajo de riesgos naturales como desprendimiento de rocas, aludes, inundaciones y desplazamientos de tierra. Esta medida afectaría aproximadamente a 39.000 hectáreas de la CAPV (solo en Bizkaia y Gipuzkoa) y fijaría aproximadamente 100.800 t CO₂ eq. año⁻¹.
2. Modificación de la silvicultura en el 40% de los pinares productivos de radiata: se propone que el 40% de los pinares de pino radiata de la CAPV modifiquen su silvicultura para secuestrar más C en los suelos. Para ello se debería reducir la superficie del rodal ocupada por pistas y parques de madera a no más de un 10% de la superficie total y se debería mantener el mantillo en casi la totalidad del rodal tras las labores silvícolas. Esta medida afectaría aproximadamente a 50.000 hectáreas según el inventario forestal del 2016 y fijaría aproximadamente 200.000 t CO₂ eq. año⁻¹.
3. Modificación de la silvicultura en el 60% de los eucaliptales productivos: se propone, en el 60% de los eucaliptales de la CAPV, extraer solo el fuste de los eucaliptos para su aprovechamiento, dejando el resto de la biomasa forestal en campo. Esta medida afectaría a casi 11.000 hectáreas según el inventario forestal del 2016 y fijaría 32.822 t CO₂ eq. año⁻¹.
4. Reforestar el 70% de los montes desarbolados y convertirlos en montes con cubierta forestal permanente: En este caso, se propone que el objetivo de gestión forestal no sea la producción de madera sino aumentar la biodiversidad, mejorar la calidad de los suelos y las aguas, secuestrar C,... Esta medida afectaría a casi

11.000 hectáreas desarboladas según el inventario forestal del 2016 y podría fijar casi 28.000 t CO₂ eq. año⁻¹.

5. Convertir el 35% de los matorrales de la CAPV (aquellas que se identifiquen como tierras forestales abandonadas tras el aprovechamiento final) en montes con cubierta forestal permanente: En este caso, se propone que el objetivo de gestión forestal no sea la producción de madera si no mejorar la biodiversidad, mejorar la calidad de los suelos y las aguas, secuestrar C,... Esta medida afectaría a más de 28.000 hectáreas según el inventario forestal del 2016 y podría fijar más de 73.000 t CO₂ eq. año⁻¹.

Cambios en tierras de pasto:

6. Mejorar la gestión del 35% de los pastos con enmiendas orgánicas de buena calidad, evitando quemas, el sobrepastoreo y haciendo siembras de enriquecimiento de especies herbáceas: Se propone incentivar este tipo de gestión en el 35% de los pastos permanentes de la CAPV que afectaría a aproximadamente 37.000 hectáreas y podría fijar alrededor de 162.000 t CO₂ eq. año⁻¹.

Medidas para tierras de cultivo:

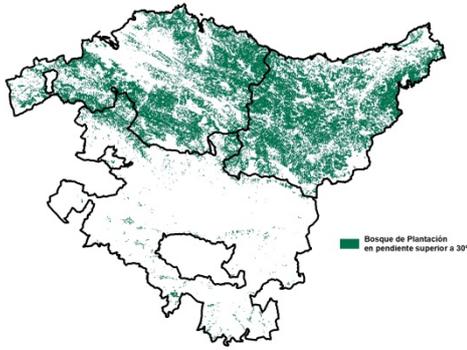
7. Implantar cubiertas vegetales en el 30% de los frutales y olivares de la CAPV: Esta medida afectaría a 1.725 hectáreas según la distribución de usos de suelo de Euskadi en 2016 (Eustat) y podría fijar aproximadamente 700 t CO₂ eq. año⁻¹.
8. Implantar cubiertas vegetales en el 40% de los viñedos de la CAPV: Esta medida afectaría a 5.300 hectáreas según la distribución de usos de suelo de Euskadi en 2016 (Eustat) y podría fijar aproximadamente 2.150 t CO₂ eq. año⁻¹.
9. Convertir en sistemas agroforestales el 25% de los cultivos extensivos: Un sistema agroforestal que podría funcionar en Álava sería una combinación de nogal para producción de madera y fruto y producción de cereal. Este sistema de producción diversificaría los ingresos y dispersaría el riesgo, favoreciendo la resiliencia del sector agrario de la CAPV. Esta medida afectaría aproximadamente a 15.000 hectáreas y podría fijar alrededor de 40.600 t CO₂ eq. año⁻¹.



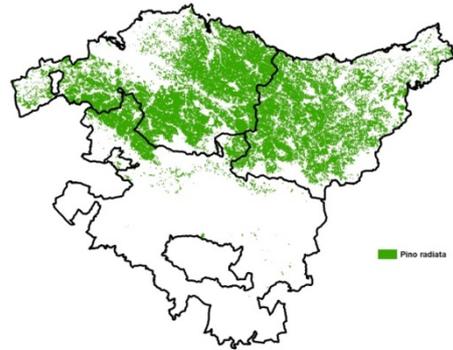
Figura 10: Ejemplo de un sistema agroforestal de nogal-cereal de 40 años en Les Eduts en Charente-Maritime, Francia, con cosecha de cebada el 5 de julio de 2016 (Fotografía de Philippe Van Lerberghe) (www.agforward.eu)

10. Implantar en el 35 % de los cultivos extensivos medidas para incorporar restos de cosecha y reducir el laboreo: Este tipo de medidas ya se están fomentando desde el Gobierno Vasco en el Plan de Fomento de la Producción Ecológica (FOPE), pero hasta el momento la superficie bajo estos estándares está en el 1,1 % de la superficie agraria utilizada. Esta medida afectaría aproximadamente a 21.000 hectáreas y podría fijar alrededor de 23.500 t CO₂ eq. año⁻¹.
11. Convertir el 5% de cultivos extensivos a pradera: Esta medida se aplicaría en aquellas tierras que se identifiquen como marginales, ya que no es objetivo de este ejercicio comprometer el uso agrícola de suelos de calidad. Esta medida afectaría aproximadamente a 3.000 hectáreas y podría fijar alrededor de 6.500 t CO₂ eq. año⁻¹.

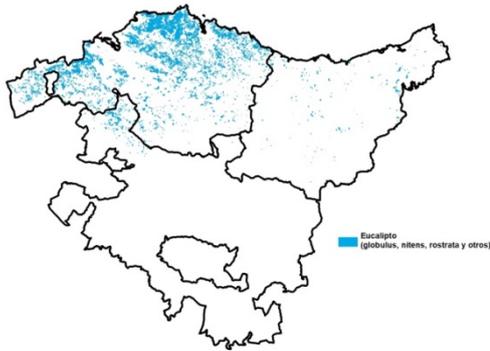
En la Figura 11 se muestran, a modo orientativo, las superficies que estarían asociadas a las 11 medidas que se proponen para incrementar el secuestro de C en los suelos. Estas superficies constituyen el 100 % de los usos que se indican y han sido extraídas del Inventario Forestal (IF-2016) y del SIGPAC (SIGPAC-2017), aproximándose a los empleados para los cálculos. Dentro de estas superficies, la identificación de aquellas más idóneas para la aplicación de las medidas propuestas dependería, además de su potencial para el secuestro de carbono, de muchos otros factores (personales –puesto que incluyen tanto superficies de propiedad pública como privada-, legales, económicos, sociales, ambientales, etc.).



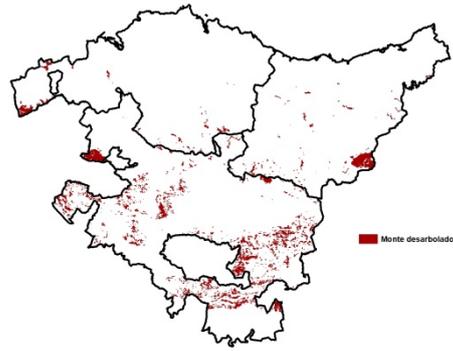
Plantaciones forestales con pendientes altas (Medida 1)



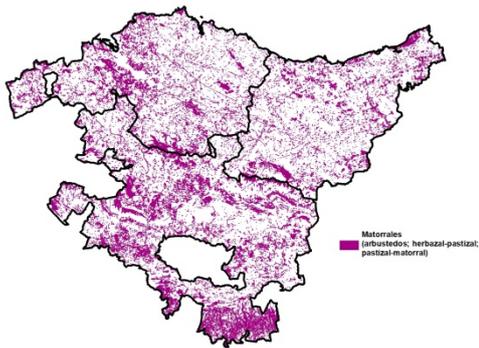
Plantaciones de *Pinus radiata* (Medida 2)



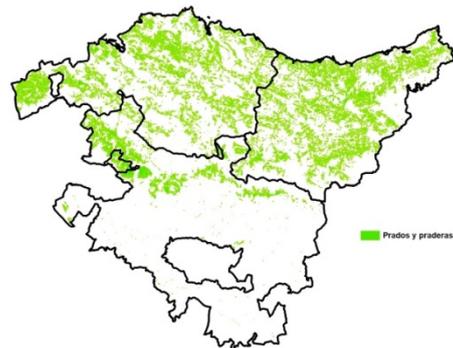
Plantaciones de *Eucalyptus spp.* (Medida 3)



Montes desarbolados (Medida 4)



Matorrales (Medida 5)



Prados y praderas (Medida 6)

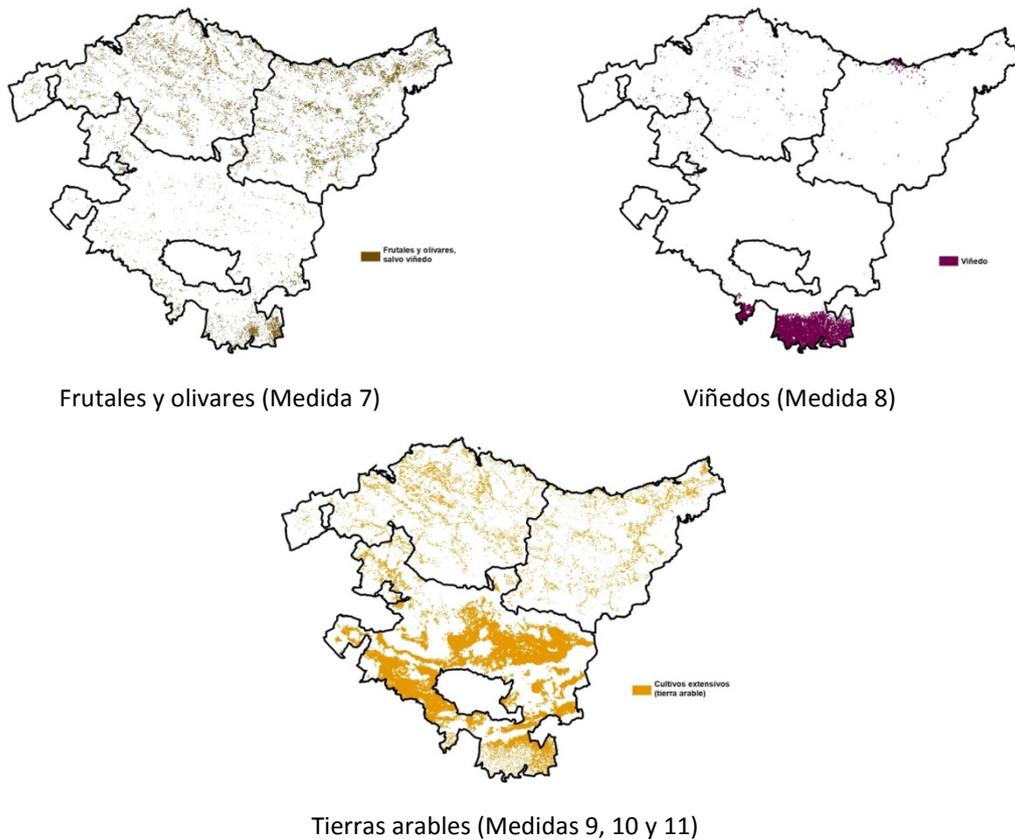


Figura 11: Localización de la superficie a la que se referirían las 11 medidas de compensación descritas para el sector Agricultura. NOTA: se ha representado el 100% de las superficies en lugar de los porcentajes calculados para las 11 medidas.

Evaluación del escenario planteado:

Las 11 medidas propuestas podrían fijar aproximadamente 670.000 t CO₂ eq. ha⁻¹ año⁻¹ y afectarían a casi 222.000 hectáreas de la CAPV, el 30 % de la superficie. Para poder evaluar la capacidad de mitigación de los cambios de gestión de suelos propuestos se presentan a continuación las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) de la CAPV según sectores en 2016:

Sector	miles T CO ₂	%
energía	6.203	32.9
industria	4.020	21.3
transporte	5.983	31.7
residencial	657	3.5
servicios	410	2.2
agricultura	675	3.6
residuos	916	4.9
total	18865	100

El sector agricultura aglutina tanto al sector agrícola como al ganadero. La ganadería genera emisiones de gases de efecto invernadero, debido principalmente a la producción de metano (CH₄) en el proceso de digestión de los rumiantes. En el inventario presentado el 60% de las emisiones del sector agricultura son derivados del metano (405.060 t CO₂ eq. ha⁻¹ año⁻¹) del ganado, por lo que los 270.040 t CO₂ eq. ha⁻¹ año⁻¹ restantes procederían de emisiones de óxido nitroso del sector agrícola, principalmente del uso de abonos nitrogenados.

Las medidas número 1 y 2 podrían fijar aproximadamente 298.900 t CO₂ eq. ha⁻¹ año⁻¹, neutralizando las emisiones del sector agrícola y las medidas restantes (de la 3 a la 11) podrían mitigar el 100% de las emisiones derivadas del metano. En conjunto, las 11 medidas propuestas tendrían la capacidad de fijar el 100% de las emisiones del propio sector agricultura generando un sector neutro en emisiones.

Sin embargo, habría que resaltar que desde el punto de vista de la mitigación del cambio climático y la necesidad de cumplir con los objetivos del Acuerdo de París, es particularmente importante la reducción de la emisión de gases de efecto invernadero tanto en el propio sector agricultura como en todos los demás sectores. Esto resalta la necesidad de desarrollo de tecnologías de emisiones negativas (NETs) y estas tecnologías además de no estar disponibles en estos momentos, tendrán una capacidad limitada de detener los aumentos en la concentración de gases de efecto invernadero en la atmósfera a la escala prevista en los escenarios del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC).

El último informe del IPCC (IPCC WGIII AR5, 2014) sobre mitigación del cambio climático en sistemas agrícolas, forestales y otros usos de la tierra (AFOLU) aborda algunas limitaciones y retos sobre la efectividad de la mitigación a diferentes escalas. Por ejemplo, mientras diferentes medidas de mitigación (e.g. reducción de las emisiones de N₂O a través de una optimización de la fertilización) tienen un efecto permanente en su capacidad de mitigación del cambio climático, las medidas relacionadas con el secuestro de C no tienen ese carácter permanente e, incluso, cuando la medida de mitigación se interrumpe o altera puede existir un proceso reversible en el que el C previamente secuestrado en el suelo vuelve a emitirse a la atmósfera.

Es por ello importante resaltar la importancia de mantener a largo plazo este tipo de cambios de gestión de suelos si el objetivo es secuestrar C en los suelos a la vez que generamos suelos más fértiles, prevenimos la erosión del suelo, mejoramos la biodiversidad y contribuimos en gran medida a la resiliencia de los sistemas agrarios a través de la provisión de servicios ecosistémicos. Así mismo, habría que resaltar que estas prácticas recomendadas también tienen un papel importante que desempeñar en la adaptación al cambio climático debido a su contribución al mejor uso, almacenamiento y eficiencia del agua (Lasco *et al.*, 2014).

Tabla 4: Prácticas de manejo recomendadas para el secuestro de C, su tasa potencial de secuestro de C y la fuente de donde se ha recogido la información.

Práctica	Tasa potencial de secuestro de C (t C ha ⁻¹ año ⁻¹)	Fuente
Generar montes con cubierta arbórea permanente (silvicultura cercana a la naturaleza)	0,7	Grüneberg y col. (2014)
Modificación de la silvicultura en pinares	1,09	Propia
Modificación de la silvicultura en eucaliptales	0,82	Johnson y Curtis (2001) adaptado a la CAPV
Implementar en los cultivos extensivos mínimo laboreo e incorporación de restos	0,31	Lugato y col. (2015)
Convertir de cultivos extensivos a pradera	0,6	Lugato y col. (2015)
Convertir cultivos extensivos en sistemas agroforestales	0,75	Cardinael y col. (2018)
Implantar cubiertas vegetales	0,11	Lugato y col. (2015)
Mejorar la gestión los pastos con enmiendas orgánicas	0,76	Smith y col. (2008)

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aitchison, J. 1982. The statistical analysis of compositional data. *J. R. Stat. Soc. Ser. B Methodol.* 139–177.
- Ballabio, C., P. Panagos and L. Montanarella. 2016. Mapping topsoil physical properties at European scale using the LUCAS database. *Geoderma* 261: 110–123.
- Johnson, D. W. and Curtis, P. S. 2001. Effects of forest management on soil C and N storage: meta analysis. *For. Ecol. Manage.* 140: 227-238.
- Bishop, C. M. 1995. *Neural networks for pattern recognition*. Clarendon Press. ISBN 0198538499. OCLC 33101074.
- Breiman, L. 2001. «Random Forests». *Machine Learning* 45 (1): 5–32.
- Cressie, N. 1993. *Statistics for spatial data*, Wiley, New York.
- Smith, P., Martino, D., Cai, Z., Gwary, D., Janzen, H., Kumar, P., McCarl, B., Ogle, S., O'Mara, F., Rice, C., Scholes, B., Sirotenko, O., Howden, M., McAllister, T., Pan, G., Romanenkov, V., Schneider, U., Towprayoon, S., Wattenbach, M. & Smith, J. 2008. Greenhouse gas mitigation in agriculture. *Philosophical Transactions of the Royal Society B - Biological Sciences*, 363: 789–813.
- Gobierno Vasco. 2014. Sumideros de carbono de la Comunidad Autónoma del País Vasco. Capacidad de secuestro y medidas para su promoción. Artetxe, A., O. del Hierro, M. Pinto, N. Gartzia, A. Arias. Ed. Departamento de Medio Ambiente y Política Territorial del Gobierno Vasco. Servicio Central de Publicaciones. ISBN: 978-84-457-3345-5. Vitoria-Gasteiz. Disponible en: https://issuu.com/ingurumena/docs/_c__sumideros.
- Friedman, J. H. 1991. "Multivariate Adaptive Regression Splines". *The Annals of Statistics*. 19: 1.
- Hastie, T. y Tibshirani. 1990. *Generalized Additive Models*. Chapman and Hall, London.
- Ihobe y Neiker. 2005. Inventario de carbono orgánico en suelos y biomasa en la Comunidad Autónoma del País Vasco. Departamento de Ordenación del Territorio y Medio Ambiente y Departamento de Agricultura y Pesca del Gobierno Vasco. Serie Programa Marco Ambiental nº 48, abril 2005. Disponible en: <http://www.ihobe.net/Publicaciones/>
- FAO. 2017. Soil organic carbon mapping cookbook. Disponible en: <http://www.fao.org/3/I8895EN/i8895en.pdf>
- IPCC. 2006. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Volume 4. 2006. Eggleston H.S., Buendia L., Miwa K., Ngara T. y Tanabe K. (eds). Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme. Published: IGES, Japan. ISBN 4-88788-032-4.
- Kibblewhite, M. G. L. Miko and L. Montanarella. 2012. Legal frameworks for soil protection: current development and technical information requirements. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 4 :573–577.

KLIMA-2050. 2015. Estrategia de cambio climático 2050 del País Vasco. Ed. Servicio de publicaciones del Gobierno Vasco (Vitoria-Gasteiz, 2015). Disponible en: <http://www.ingurumena.ejgv.euskadi.eus/informacion/estrategia-vasca-de-cambio-climatico-2050/r49-11293/es/>

Quinlan. 1993. C4.5: Programs For Machine Learning. Morgan Kaufmann Publishers Inc. San Francisco, CA

Rasmussen, C.E., and Williams, C.K.I. 2006. Gaussian Process for Machine Learning, The MIT Press.

EUSKO JAURLARITZA



GOBIERNO VASCO

INGURUMEN, LURRALDE PLANGINTZA
ETA ETXEBIZITZA SAILA

DEPARTAMENTO DE MEDIO AMBIENTE,
PLANIFICACIÓN TERRITORIAL Y VIVIENDA

www.ihobe.eus
www.ingurumena.eus