upna Universidad Pública de Navarra
Nafarroako Unibertsitate Publikoa

Evaluación del secuestro de C atmosférico y beneficios ambientales del Oinez Basoa de Tafalla.

Contrato OTRI 2013 020 049
Informe año 1

I. Virto, M.J. Imaz, P. Bescansa, A. Enrique

Grupo de Investigación Gestión y Manejo Sostenible de Suelos

ETSIA - UPNA

Evaluación del secuestro de C atmosférico y beneficios ambientales del Oinez Basoa de Tafalla.

INFORME AÑO 1

1. INTRODUCCIÓN y OBJETO DEL ESTUDIO

Este Proyecto se centra en la evaluación del efecto de la instalación del Oinez Basoa en el Monte Plano de Tafalla sobre la acumulación de C orgánico en el suelo.

La implantación de este bosque se realizó en una parcela de terreno comunal cultivada de manera convencional para la producción de cereales de secano durante décadas. El bosque implantado forma parte de una serie de bosques de las mismas características que se está desarrollando en Navarra ligados a la celebración del Nafarroa Oinez. El objetivo principal de la implantación de esta serie de bosques es contrarrestar las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) generadas como consecuencia de la celebración del Nafarroa Oinez. La plantación de bosques (Oinez Basoa) ligados a la realización de este evento pretende realizar una reducción solidaria de la concentración atmosférica de CO_2, utilizando el papel de sumidero de este terreno reforestado, tanto en la biomasa aérea como en el suelo sobre el que se asienta el bosque (www.oinezbasoa.com). El Oinez Basoa de Tafalla corresponde a la celebración del Nafarroa Oinez 2011 (organizado en Tafalla por la Ikastola Garcés de Los Fayos) y el de 2012) organizado por San Fermín Ikastola en Zizur Menor).

El proyecto se enmarca por lo tanto dentro de los estudios encaminados a cuantificar los sumideros biosféricos de origen antropogénico de CO_2 atmosférico descritos en el Protocolo de Kyoto. Se consideran sumideros los procesos y mecanismos que permiten estabilizar (almacenar de manera estable o “secuestrar”) C atmosférico, generalmente a partir de la actividad fotosintética y posterior estabilización de los compuestos fotosintetizados. Las actividades que aparecen listadas en los artículos 3.3 y 3.4 del Protocolo como potenciales sumideros de C atmosférico incluyen la forestación, reforestación y deforestación realizadas desde 1990, y el manejo de bosques, tierras de cultivo, de pastoreo y revegetadas. Colectivamente, estas actividades se denominan "Actividades de Uso de la Tierra, Cambios de Uso de la Tierra y Forestación", LULUCF en sus siglas en inglés. Entre las actividades de este tipo, el último informe del Panel Intergubernamental para el Cambio Climático define la reforestación, el manejo sostenible de bosques y la reducción de la deforestación como las opciones más rentables para la mitigación del cambio climático en el sector AFOLU (Agricultura, Silvicultura y Usos de la Tierra, IPCC 2014).

En este contexto, los estudios centrados es cuantificar las reservas de C orgánico en los suelos forestales son abundantes y cada vez más frecuentes. Un ejemplo reciente es el publicado por el CREAF (Centre de Recerca Ecològica i Aplicacions Forestals de Catalunya) y la Universidad Autónoma de Barcelona (Doblas-Miranda et al., 2013), que cuantifica las reservas de C en los suelos de las masas forestales españolas en 2.544 Mt de C, equivalente al CO_2 emitido en los últimos 29 años. El Inventario de C orgánico en suelos y biomasa de la Comunidad Autónoma Vasca (CAV) determinó un stock total de 49 Mt en los suelos (0-30 cm) de la CAV, de las que aproximadamente el 60% (aprox. 30 Mt) corresponden a los suelos forestales. El almacén de C en la biomasa forestal correspondiente se cuantificó en 18 Mt (Gobierno Vasco, 2005). Estos datos demuestran que en la mayor parte de los bosques

atlánticos, la cantidad de C orgánico almacenado en los suelos forestales excede la acumulada en la biomasa. En el marco de este estudio, la decisión de cuantificar el stock de C orgánico acumulado en el suelo del Oinez Basoa de Tafalla parte de este hecho, y de la observación de que los cambios de C orgánico almacenado en los suelos tras un cambio de uso (en este caso de agrícola a forestal) en zonas y/o suelos de regiones semi-áridas suele ser más rápida durante los primeros años tras la transformación que la acumulación en la biomasa implantada.

Objetivos del estudio

Este estudio tiene como objetivo principal, dentro del objetivo general de la plantación y gestión de *Oinez Basoa*, la **cuantificación del C orgánico almacenado de forma estable en el suelo de este bosque**, dos años después de su implantación.

Considerando que es conocido que el ritmo y alcance de secuestro de C atmosférico en terrenos reforestados depende de las características del bosque, el clima, y el suelo sobre el que se implanta (Laganière et al., 2010), el trabajo durante el primer año se desarrolla en **dos etapas**:

1- Una primera etapa en la que se realiza una caracterización de la zona y los suelos de la zona de estudio.

2- Una segunda etapa en la que se evalúa el stock de C orgánico tras el tiempo transcurrido desde la plantación (aprox. 2 años), utilizando un protocolo diseñado *ad hoc* por el Joint Research Center (JRC) de la Comisión Europea (Stolvoboy et al., 2007).

Como etapa necesaria para esta cuantificación, será necesario en el futuro realizar estimaciones de la tasa de C atmosférico almacenado en la biomasa de los árboles de *Oinez Basoa*, que en una primera fase no se contemplan en este Proyecto dado el tamaño de los árboles implantados y su velocidad relativamente lenta de crecimiento.

2. METODOLOGÍA

El control de la evolución de cualquier parámetro del medio natural tras un cambio requiere su monitorización desde la situación antes del cambio (*baseline* o nivel de referencia) y en diferentes momentos desde el cambio. En el caso de este estudio, esta aproximación no es posible, al haber comenzado el estudio después de haber ocurrido el cambio (la implantación del *Oinez Basoa*). Por este motivo, se decidió adoptar una **aproximación del tipo "*space for time*" (espacio por tiempo), basado en la existencia de una parcela contigua, con un manejo tradicional similar a la de implantación del O. Basoa, que continua cultivándose, y de una zona de bosque más antiguo (Figura 1).**

Esta aproximación implica asumir que el suelo de la parcela que ocupa el O.Basoa presentaba las mismas condiciones que el que sigue cultivado (control) antes de la implantación del bosque. También se entiende que según el O.Basoa se desarrolle, formará un bosque similar al existente en la actualidad en la parcela contigua (bosque). Esta interpretación requiere en primer lugar verificar que las condiciones del suelo de las tres parcelas son similares. Por este motivo, de manera simultánea al control del stock de C orgánico en el suelo, es necesario caraterizar de la manera más completa posible el suelo de las tres parcelas.

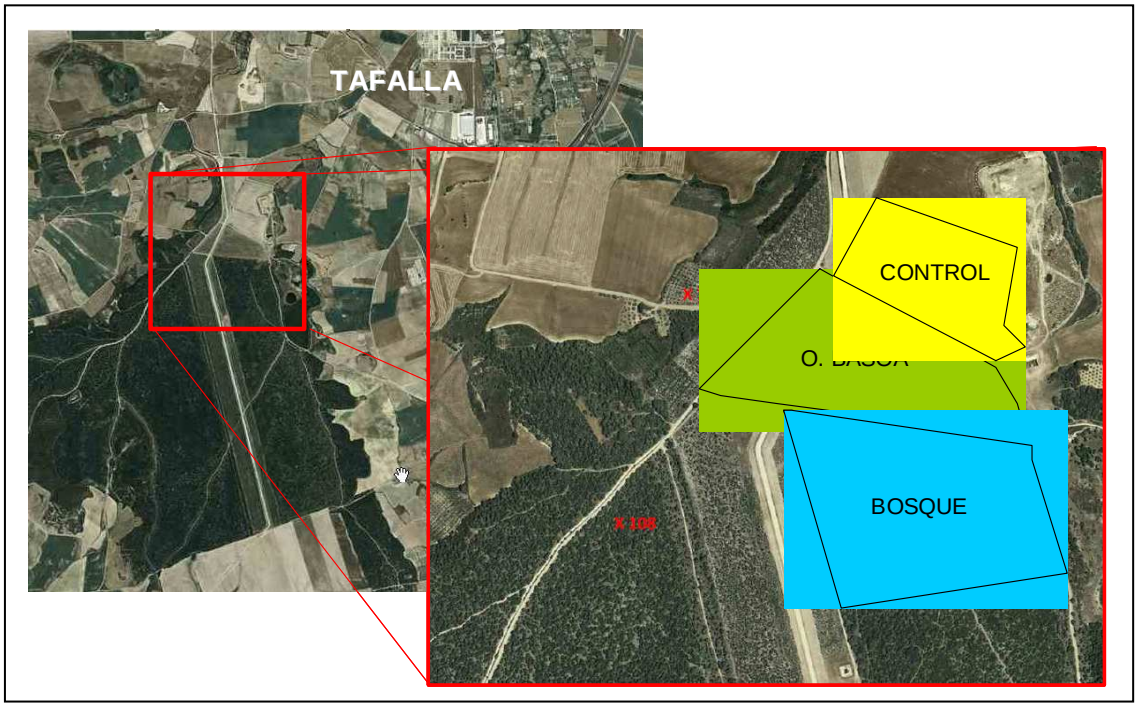

Figura 1. Localización del Oinez Basoa en Tafalla, y de las tres parcelas de estudio.
Fuente: Elaboración propia a partir de imágenes de SITNA.

Fase 1: Caracterización de los suelos

El estudio de los suelos se ha realizado en varias etapas:

En primer lugar, considerando la extensión y la situación geográfica de cada parcela, se realizó una prospección de la **información existente sobre los suelos de la zona**, en un **estudio ayudado de fotointerpretación** para determinar las diferentes unidades de suelo presentes en él. Para ello se utilizaron fotogramas aéreos (pares estereoscópicos), y el mapa de suelos de Navarra a escala 1:25.000 (hoja de Tafalla, Gobierno de Navarra, 2005).

Una vez identificadas estas características se realizaron muestreos destinados a la **caracterización de los suelos en las tres parcelas**. Esta caracterización es necesaria para estimar el potencial de las diferentes unidades para el secuestro de C en el largo plazo. Se realizó conjuntamente a la toma de muestras para la cuantificación del secuestro de C (ver metodología en la fase 2).

Fase 2: Contabilización anual

Como se ha explicado, la cuantificación inicial (primer año) se realizó mediante **la comparación del stock presente en la parcela control (no reforestada), la parcela del O. Basoa y una parcela en el bosque climácico contigua.**

Para esto, se aplicó lo indicado en el *Soil sampling protocol to certify the changes of organic C stock in mineral soil of the European Union. Version 2* (Stolvoboy et al., 2007). Este protocolo tiene como objetivo el desarrollo de un sistema de muestreo estandarizado, definido a nivel de parcela, que permita establecer una monitorización fiable de las variaciones en el stock de C en el suelo. El objetivo final sería conseguir datos validados de secuestro o

pérdida de C en parcelas agrícolas, forestales o de pasto, en función del manejo aplicado en cada una de ellas, de las características del suelo y climáticas.

De acuerdo a este protocolo, el número de puntos que deben controlarse en una parcela dependen de su superficie. Para parcelas menores de 10 ha, como las consideradas en este estudio se recomiendan entre 3 y 4 lugares de muestreo. En cada uno de estos lugares, se muestrea una **cuadrícula seleccionada según la plantilla propuesta por el protocolo**, que garantiza al mismo tiempo una selección al azar de los puntos, y una distribución de los mismos que cubra toda la superficie de la parcela (Stolvoboy et a., 2007). Para cada parcela, se **georefrenciaron los límites de estas cuadrículas** a partir de la superimposición de la plantilla sobre las imágenes de satélite ofrecidas por el SITNA (http://sitna.navarra.es/navegar/). Una vez en el campo, estos puntos se marcaron con estacas (permanentes en O.Basoa y en el bosque), y se realizaron los muestreos correspondientes (Figuras 2 y 3).

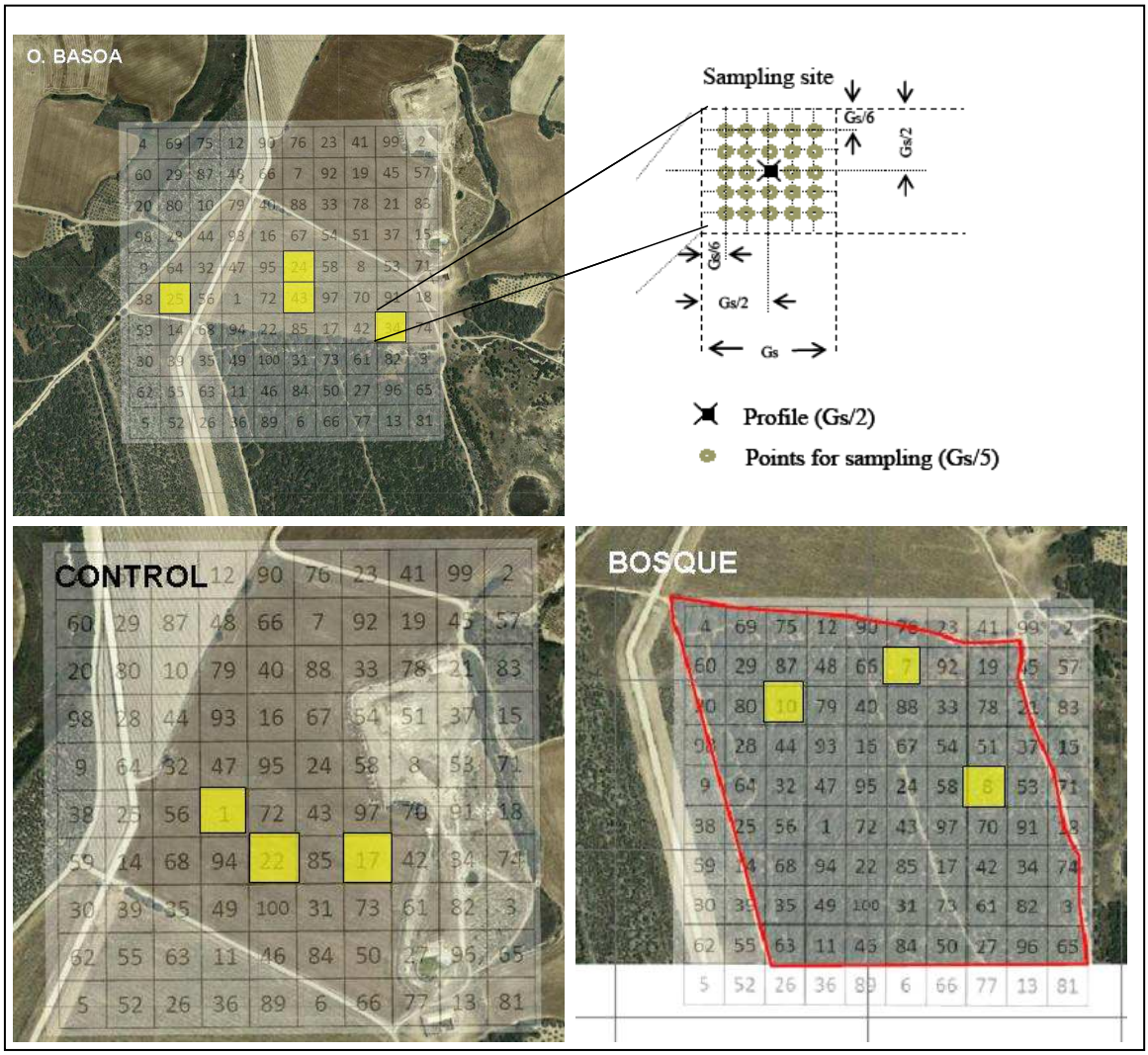

Figura 2. Localización de las zonas muestreadas en las tres parcelas a partir de la plantilla establecida en el protocolo para el control de cambios en el stock de C en el suelo.
Fuente: Elaboración propia a partir de imágenes de SITNA y de Stolbovoy et al. (2007).

En cada una de las cuadrículas, se muestrearon tanto el punto central como otros 24 puntos uniformemente repartidos dentro de la cuadrícula (Figura 2). **Las muestras tomadas en el punto central sirvieron a la vez para la caracterización del suelo en cada parcela (Fase 1), como para la determinación de la densidad aparente del suelo (necesaria para el cálculo final del stock de C)**. Las muestras recogidas en los otros 24 puntos de la cuadrícula se combinaron para analizar las propiedades relacionadas con el stock de C orgánico (ver más adelante fracciones de la materia orgánica).

El muestreo en el punto central de cada cuadrícula implicó por lo tanto la toma de **muestras alteradas** recogidas con barrena a tres profundidades (0-5, 5-15 y 15-30 cm), y de **muestras inalteradas** (anillos de 100 cm^3) a dos profundidades (0-10 y 10-20 cm), como establece el protocolo para suelos forestales (Figura 3). Es importante señalar en este sentido, que las características de los suelos estudiados (ver más adelante caracterización), limitan la profundidad efectiva del horizonte superior hasta aproximadamente 20-30 cm, por lo que en este caso, la aplicación del protocolo permitió muestrear en su totalidad este horizonte del suelo, en el que se acumula la mayor parte de la materia orgánica en este tipo de suelos.

Figura 3. Delimitación de las cuadrículas mediante estacas y momentos del muestreo en las parcelas control (izda.) y bosque (dcha.)

Las muestras recogidas se trasladaron al laboratorio para su análisis y determinación de las propiedades necesarias para su caracterización:

- Las **muestras inalteradas** se secaron a 105 ºC para determinar su peso seco y obtención de la densidad aparente (g/cm^3).

- Las **muestras alteradas simples** recogidas en el punto central de cada cuadrícula se secaron al aire y se molieron en un tamiz de 2 mm para separar la tierra fina (< 2 mm) de los elementos gruesos (> 2 mm). Sobre la tierra fina se realizaron los análisis necesarios para la determinación de la textura, contenido en C orgánico, pH, conductividad eléctrica (CE), contenido en carbonatos alcalinotérreos, capacidad de intercambio catiónico y cationes de cambio. Para ello se utilizaron los métodos estándar de laboratorio (Carter, 1993). Estos parámetros sirvieron para caracterizar en detalle el suelo de las tres parcelas (fase 1).

- Las **muestras alteradas compuestas** recogidas en los 25 puntos de cada cuadrícula se secaron al aire y se tamizaron como en el caso anterior. Sobre ellas, se realizó el **análisis del C orgánico total y el correspondiente a la fracción más lábil.** Esta división del estudio de la fracción lábil no está incluida en el protocolo aplicado (Stolbovoy et al,, 2007). Sin embargo, se realizó en este estudio porque **permite identificar qué proporción del C orgánico acumulado en el suelo lo está en forma de residuos particulados (materia orgánica particulada o POM), de entrada reciente en el suelo.** Esta fracción es la que tiene un mayor potencial de liberación de nutrientes y a la vez, de estabilización en el largo plazo, al ser la más "activa" desde el punto de vista de la actividad biológica del suelo. Una de las principales causas que hacen complicada la evaluación del secuestro de C atmosférico en el suelo es que su estabilización se realiza en un ciclo complejo, en el que el C pasa de estar en forma de tejidos vegetales principalmente, a estar incorporado de manera estable en el suelo (unido a la fracción mineral, Figura 4).

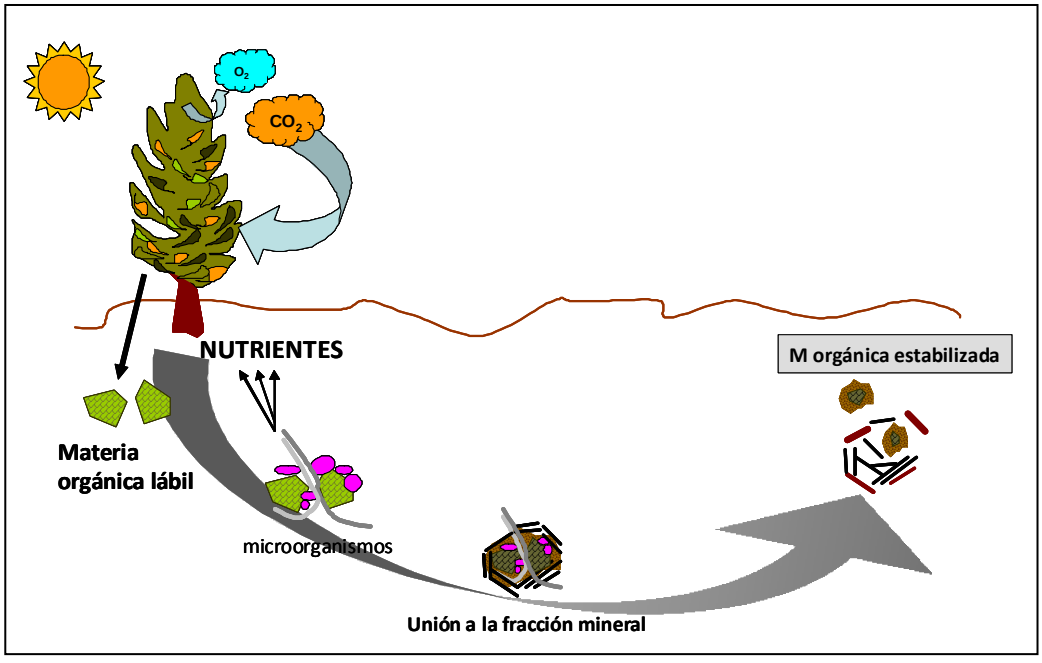

Figura 4. Ciclo simplificado de la incorporación al suelo del C orgánico fotosintetizado por las plantas. Fuente: Elaboración propia a partir de Chenu, 2003.

Durante este proceso, el C orgánico pasa por formas gradualmente menos lábiles o fácilmente mineralizables (materia orgánica fresca, biomasa microbiana, materia orgánica

protegida por la fracción mineral, materia orgánica recalcitrante, etc). **Las propiedades del suelo determinan en gran medida la velocidad y magnitud de transferencia del C de de unas formas a otras**. De cara a la estabilización final, cambios en el manejo pueden inducir por ejemplo que el C almacenado en forma de materia orgánica lábil se pierda en mucho menos tiempo que el invertido para almacenarlo. Por esta razón es importante conocer las formas en que el C orgánico está progresivamente secuestrándose en el suelo.

En el caso de suelos convertidos de tierras de labor a bosques, o reforestados, debe considerarse que a las ganancias potenciales debido a la "activación" de este ciclo, se suman las debidas a la supresión del laboreo regular, que contribuye de manera notable a estabilizar la materia orgánica en el suelo.

Con los datos obtenidos de C orgánico total y lábil, se calculó el stock de C orgánico almacenado en cada parcela. Dada la naturaleza pedregosa de los suelos, este valor tuvo que ser corregido por la **pedregosidad**. La proporción de elementos gruesos en cada parcela se calculó a partir de la masa de elementos gruesos en las muestras recogidas (proporción gravimétrica), y mediante análisis de imagen de muestras de la superficie de la parcela control (única con la superficie desnuda en el momento del muestreo: proporción volumétrica, Figura 5). Al ser un parámetro de gran variabilidad en el espacio, para la comparación final de los datos de stock se asumió en todas las parcelas una pedregosidad igual a la existente en la parcela del Oinez Basoa (Baritz et al., 2011).

Figura 5. Proceso de transformación de imágenes para el cálculo de la pedregosidad superficial por análisis de imagen a partir de la imagen binaria (dcha.).

3. RESULTADOS

3.1. Caracterización de los suelos

El estudio de fotointerpretación de la zona en la que se ubican las tres parcelas reveló una alta uniformidad en la unidad topográfica sobre la que se encuentra. Según el Mapa Geológico 1:50.000 (IGME, 1987. Hojas 173 (Tafalla) y 206 (Peralta)) trata de **suelos desarrollados sobre una terraza del Cidacos**, que constituye la base del Monte Plano. Se trata de materiales de 30-40 m de potencia, con una granulometría mixta de gravas y arenas, y una superficie plana (como indica el toponímico). Presenta una altitud media de 470 m s.n.m. (Figura 6).

La uniformidad de este material geológico, y su escasa o nula pendiente, han favorecido el desarrollo de suelos homogéneos en prácticamente la totalidad de su superficie. El Mapa de Suelos de Navarra 1:25.000 incluye toda la superficie dentro una misma unidad cartográfica, y señala la existencia de tres perfiles cercanos a la zona de estudio (Figura 6).

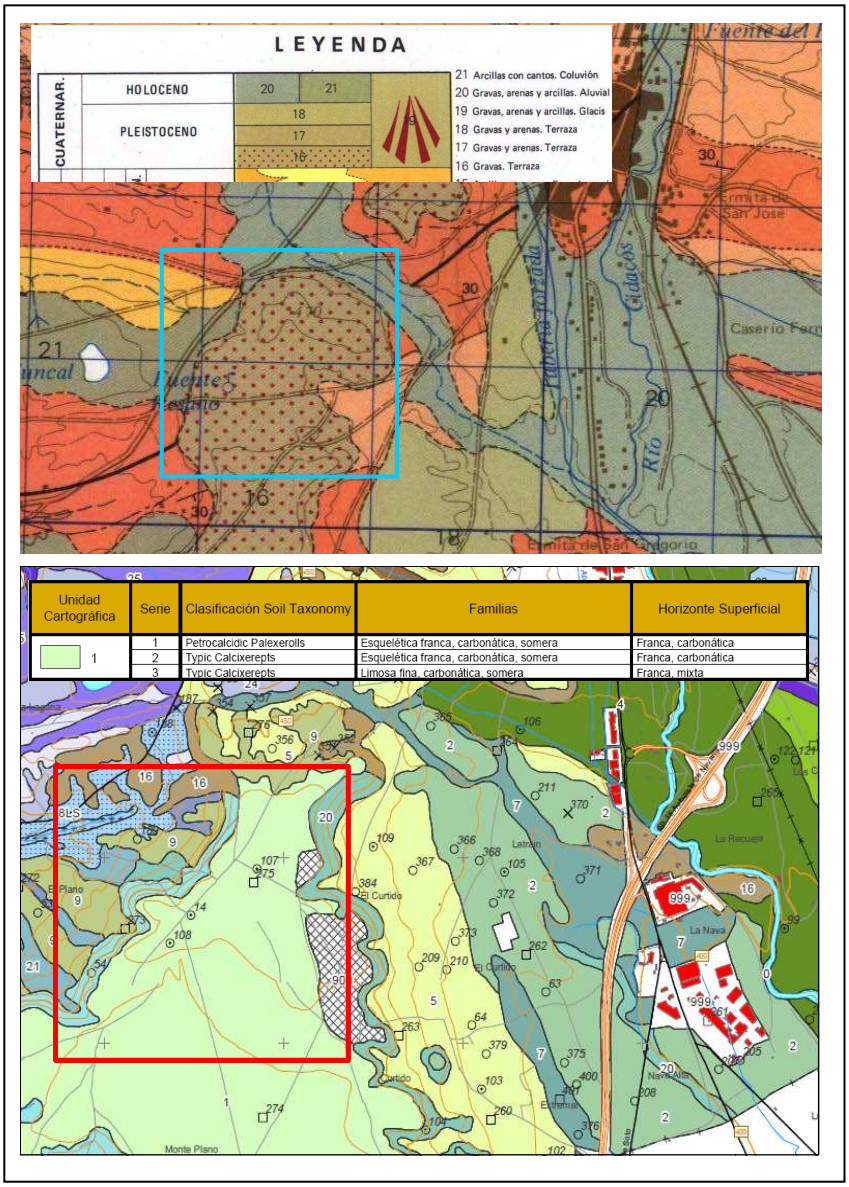

Figura 6. Localización de la zona de estudio en el mapa geológico (arriba) y el mapa de suelos de Navarra (abajo).

Los perfiles estudiados se han clasificado como Typic Calcixerepts o Petrocalcic Palexeroll según la taxonomía de suelos americana (Soil Taxonomy). Se trata de **suelos con un desarrollo del perfil que incluye un horizonte superficial de aproximadamente 30 cm de espesor, sobre un horizonte de espesor variable en el que la acumulación de carbonatos ha generado la cementación del material de partida** (el material de la terraza). El proceso de lavado de carbonatos del horizonte superior no ha sido completo en estos suelos, lo que significa que la concentración de estos componentes es alta también en dicho horizonte.

Como se ha explicado más arriba, esto significa que el desarrollo de las raíces es muy limitado en los horizontes profundos del suelo, excepto para árboles de cierto porte. De este modo, la mayor parte de la actividad biológica y del C orgánico del suelo se localizan en el horizonte superficial. Los datos del perfil característico (correspondiente al punto 107 de la figura 6) se recogen en la figura 7 (del Valle, comunicación personal).

Perfil: ***Tafalla 107***
DATOS GENERALES:
Clasificación: *Petrocalcic Palexeroll*, Franca gruesa, Carbonática, Somera
Geomorfología: Terraza alta
Material de partida: Gravas y materiales finos aluviales
Pendiente: 1%
Pedregosidad Superficial: 50% de cantos rodados y trozos de costra caliza

Figura 7. Características y perfil correspondiente al suelo tipo en la zona de estudio.
Fuente: del Valle (comunicación personal). Fotografía: I. Virto.

Los resultados de los análisis realizados sobre las muestras de las tres parcelas de estudio aparecen en la tabla 1 (elementos gruesos y textura) y la tabla 2 (propiedades químicas).

Tabla 1. Características físicas de los suelos de las parcelas estudiadas.

	E. gruesos	**Textura USDA (%)**			
Prof.	(%)	Arena gruesa (2-0,200 mm)	Arena fina (0,200-0,05 mm)	Limo (0,05-0,002 mm)	Arcilla < 0,002 mm
O. BASOA					
0-5 cm	25,6 ± 2,8	24,7 ± 2,0	23,5 ± 0,8	33,4 ± 1,2	18,4 ± 1,5
5-15 cm	28,6 ± 3,0	22,7 ± 1,7	24,4 ± 0,8	32,6 ± 1,0	20,4 ± 1,9
15-30 cm	25,9 ± 4,0	24,7 ± 1,6	23,6 ± 0,3	31,4 ± 0,5	20,4 ± 1,9
> 30 cm	30,8 ± 0,8	26,3 ± 1,4	21,9 ± 0,2	33,0 ± 2,4	18,8 ± 0,8
CONTROL					
0-5 cm	43,4 ± 0,7	19,7 ± 1,3	23,2 ± 0,4	34,3 ± 1,1	22,8 ± 0,0
5-15 cm	40,1 ± 0,6	20,6 ± 0,6	21,7 ± 0,2	34,3 ± 0,5	23,4 ± 0,5
15-30 cm	NA	22,7 ± 0,9	21,3 ± 1,1	33,2 ± 1,9	22,8 ± 0,0
BOSQUE					
0-5 cm	49,6 ± 17,9	27,3 ± 5,8	33,8 ± 5,4	15,5 ± 3,9	23,4 ± 4,2
5-15 cm	40,4 ± .4	22,5± 2,8	33,8 ± 1,6	16,6 ± 1,1	27,1 ± 2,1
15-30 cm	NA	20,0 ± 0,0	31,5 ± 0,0	17,7 ± 0,0	30,9 ± 0,0

Se observa en esta tabla que **la textura de las tres parcelas es similar** en relación al contenido de arcilla y arena gruesa. El contenido total en limos y arenas finas también es similar, siendo inferior la proporción de limo en la parcela del bosque. La fracción arcilla ha sido definido como el principal factor edáfico en relación a la recuperación del stock de C en suelos reforestados en un reciente meta-análisis sobre el tema (Laganière et al., 2010). Esto se explica por el papel esencial de esta fracción en la formación de complejos órgano-minerales (asociación de la materia orgánica con los minerales del suelo), y en el desarrollo de la agregación (ver figura 4).

Tabla 2. Características químicas de las parcelas estudiadas

Prof.	**C _S_ânico** (%)	**pH**	**C.E.** (Ms/cm)	**$CaCO_3$** (%)	**CIC** cmol+/g	**Cationes de cambio** (cmol+/g suelo)			
O. BASOA						**K**	**Na**	**Ca**	**Mg**
0-5 cm	2,7 ± 0,1	7,9 ± 0,1	168 ± 6	42,4 ± 7,3	18,3 ± 1,5	1,4 ± 0,2	0,04 ± 0	25,7 ± 0,4	1,3 ± 0,0
5-15 cm	2,5 ± 0,1	8,1 ± 0,1	162 ± 5	40,3 ± 3,5	18,7 ± 1,4	1,0 ± 0,1	0,05 ± 0	26,3 ± 0,6	1,2 ± 0,1
15-30 cm	2,4 ± 0,2	8,3 ± 0,0	156 ± 5	43,8 ± 3,6	17,2 ± 1,1	0,9 ± 0,0	0,05 ± 0	25,7 ± 0,7	1,2 ± 0,1
> 30 cm	2,5 ± 0,2	8,2 ± 0,0	158 ± 15	43,3 ± 2,4	17,2 ± 0,7	1,1 ± 0,0	0,06 ± 0	25,1 ± 0,4	0,8 ± 0,0
CONTROL									
0-5 cm	2,5 ± 0,0	8,0 ± 0,0	485 ± 68	39,6 ± 2,4	15,3 ± 5,2	0,8 ± 0,1	0,1 ± 0	20,4 ± 0,2	1,4 ± 0,0
5-15 cm	2,6 ± 0,1	8,0 ± 0,1	488 ± 65	39,1 ± 1,5	19,7 ± 0,7	0,9 ± 0,1	0,1± 0	20,2 ± 0,3	1,5 ± 0,1
15-30 cm	2,5 ± 0,0	8,0 ± 0,0	501 ± 54	42,1 ± 0,6	18,0 ± 0,7	0,9 ± 0,0	0,1 ± 0	19,8 ± 0,4	1,4 ± 0,0
BOSQUE									
0-5 cm	5,6 ± 1,2	7,9 ± 0	253 ± 28	10,6 ± 3,2	31,8 ± 2,1	0,9 ± 0,0	0,1 ± 0	26,7 ± 0,4	1,3 ± 0,2
5-15 cm	4,4 ± 0,8	8,1 ± 0	180 ± 45	22,4 ± 6,5	29,3 ± 1,6	0,7 ± 0,1	0,1± 0	26,4 ± 0,7	1,2 ± 0,2
15-30 cm	2,7 ± 0,0	8,2 ± 0	94 ± 0	19,1 ± 0	23,6 ± 0,0	0,5 ± 0,0	0,0 ± 0	24,3 ± 0,0	0,8 ± 0,0

Los resultados de los análisis químicos, en relación con las propiedades del suelo más directamente relacionadas con la estabilización del C orgánico, indican que:

- son **similares en relación al pH** (básico en todos los casos, como corresponde a suelos con carbonatos alcalinotérreos).

- Contienen **cantidades significativas de carbonatos** en todas las profundidades estudiadas. Destacan los valores más bajos en la parcela de bosque, que puede relacionarse a la ausencia de labores que mezclen el horizonte superior con el subyacente, en el que se acumulan cantidades muy significativas de carbonatos (ver Figura 7).

- La concentración de **C orgánico fue significativamente mayor en la parcela de bosque**, como es lógico. Como consecuencia de esto, la capacidad de intercambio catiónico fue significativamente mayor. Esto significa que, como es sabido, la acumulación de materia orgánica en suelos forestales tiene, entre otras ventajas, un incremento de la fertilidad intrínseca del suelo.

Por lo tanto, **las dos parcelas que se utilizan para evaluar la estabilización de C orgánico durante los dos primeros años (O.Basoa frente al control cultivado), son por tanto muy similares entre sí.** La parcela de bosque contiene más materia orgánica y menos carbonatos, por lo que la comparación como expectativa en el largo plazo, será necesario matizar los resultados en relación a este aspecto.

3.2. Almacenamiento de C orgánico (secuestro de C)

El cálculo de la cantidad de C orgánico almacenado en cada una de las parcelas se realizó a partir de las ecuaciones descritas en el protocolo aplicado (Stolbovoy et al., 2007). El proceso pasa por considerar en primer lugar la concentración de C orgánico (g de C/100 de suelo) en la profundidad total considerada (en este caso 0-20 cm), posteriormente la cantidad por unidad de superficie (g de C/m2) en la tierra fina, y finalmente esta misma cantidad corregida según la proporción de elementos gruesos (pedregosidad). Se considera que el volumen del suelo ocupado por cantos y otros elementos gruesos no almacena C orgánico. La figura 8 recoge estos valores para las tres parcelas estudiadas.

Los valores de C orgánico almacenado por unidad de superficie (en este caso t/ha), una vez realizadas las correcciones necesarias fue de 54,3 ± 0,4 en la parcela control, 65,8 ± 2,1 en el O.Basoa, y 94,9 ± 11,5 en la parcela de bosque. Estos valores se encuentran dentro del orden de magnitud y del rango de los valores observados en otros estudios realizados en la zona. Por ejemplo, en un estudio realizado sobre suelos de cultivo en secano en Olite (Virto et al., 2007) se observaron 46,5 t C orgánico/ha en el suelo con manejo convencional (labrado anualmente), que pasaron a 51,5 t/ha tras 10 años sin laboreo. En un viñedo de la zona (Traibuenas) se obtuvieron valores de 39,2 t/ha en el suelo desnudo (labrado continuamente y sin vegetación), que pasaron a 52,3 t/ha tras un año con cubierta vegetal permanente en las calles, 48,04 t/ha tras cinco años (Virto et al., 2012). El valor algo más elevado observado en la parcela control en este estudio en comparación al secano en Olite (con el manejo más próximo) podría deberse al aporte de residuos orgánicos que tiene ocasionalmente la parcela control en forma en forma de estiércol.

A una escala mayor, el estudio realizado por Doblas-Miranda et al. (2013) arroja, para los suelos de las diferentes Comunidades Autónomas, valores entre 6,5 (Murcia) y 11,6

(Galicia) kg/m^2 para los suelos no agrícolas (bosques, matorrales y praderas). En este estudio, el valor atribuido a Navarra es de 10,7 kg/m2, equivalente a 107 t/ha. Esto significa que el valor observado en la zona de bosque (94,9 t/ha) es cercano a la media en Navarra.

Para suelos agrícolas, la reciente revisión de Lugateo et al. (2014) para Europa ofrece un valor medio de 44,9 t/ha para suelos cultivados en los primeros 30 cm. Los pastos llegan a 60 t/ha en la misma profundidad, y las praderas no pastadas 73 t/ha. Los valores observados entran por tanto dentro de los valores medios en usos del suelo similares.

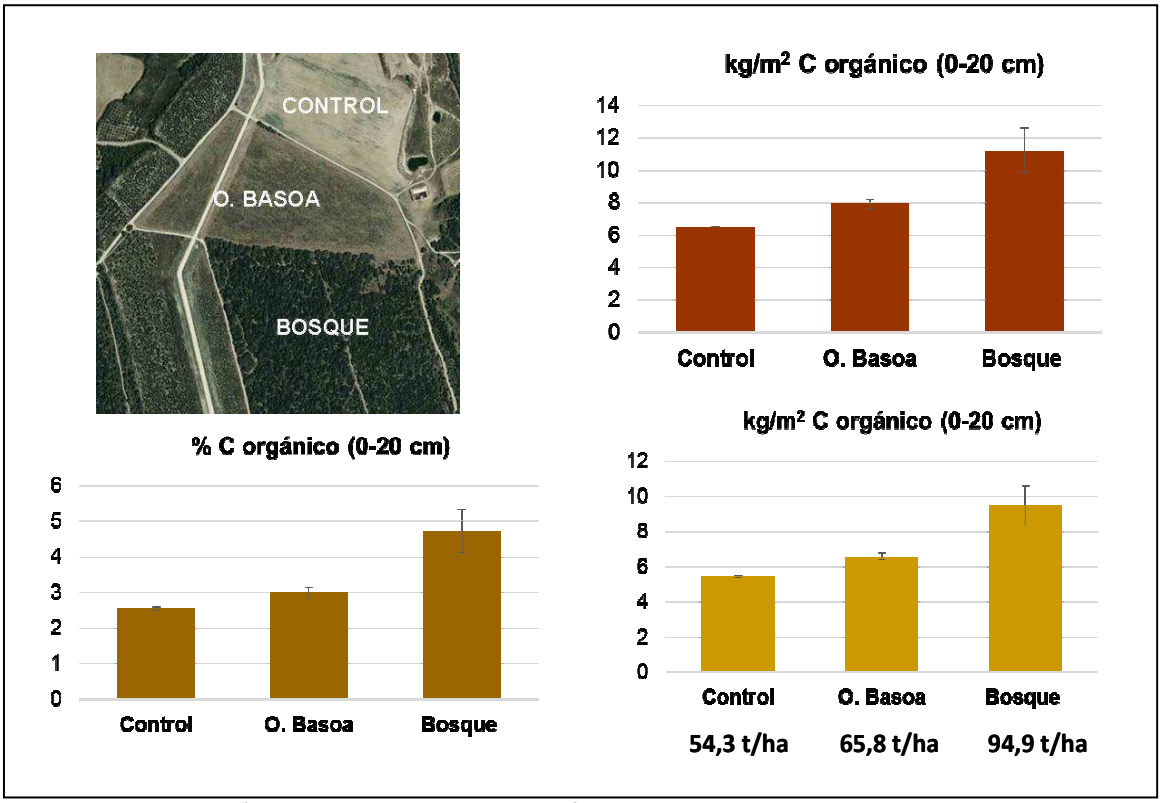

Figura 8. Concentración y almacenamiento de C orgánico en las tres parcelas estudiadas, expresado en concentración (abajo, izda.), en Kg/m^2 en la tierra fina (arriba, derecha), y kg/m^2 y t/ha en la tierra fina tras la corrección por pedregosidad (abajo, dcha.). Las barras representan el error estándar (n=3-4).

A partir de los datos de C orgánico almacenado, **la diferencia observada entre el O. Basoa y la parcela control fue de 1,15 ± 0,21 kg/m^2 de C orgánico.** Considerando como se ha descrito una aproximación de "espacio por tiempo" (es decir, un valor de C almacenado en la parcela del O. Basoa antes de la implantación del bosque igual al que presenta en la actualidad la parcela control), esta sería la cantidad "acumulada" desde la implantación del O. Basoa. A su vez, **la diferencia entre el control con el bosque establecido es de 4,05 ± 1,15 kg/m^2 de C orgánico.**

El uso de un protocolo adecuado de muestreo asegura la posibilidad de calcular de manera fiable la cantidad de C orgánico presente en toda la superficie de cada parcela. Así, considerando que la superficie total de la parcela ocupada por el O.Basoa es de 82.769,3 m^2 (datos SITNA, figura 9), para la diferencia descrita anteriormente (1,15 ± 0,21 kg/m^2), esto significa **92,88 ± 17,4 t C acumulado en O. Basoa frente al control cultivado. Esta cifra equivale a 355 ± 66,5 t de CO_2.**

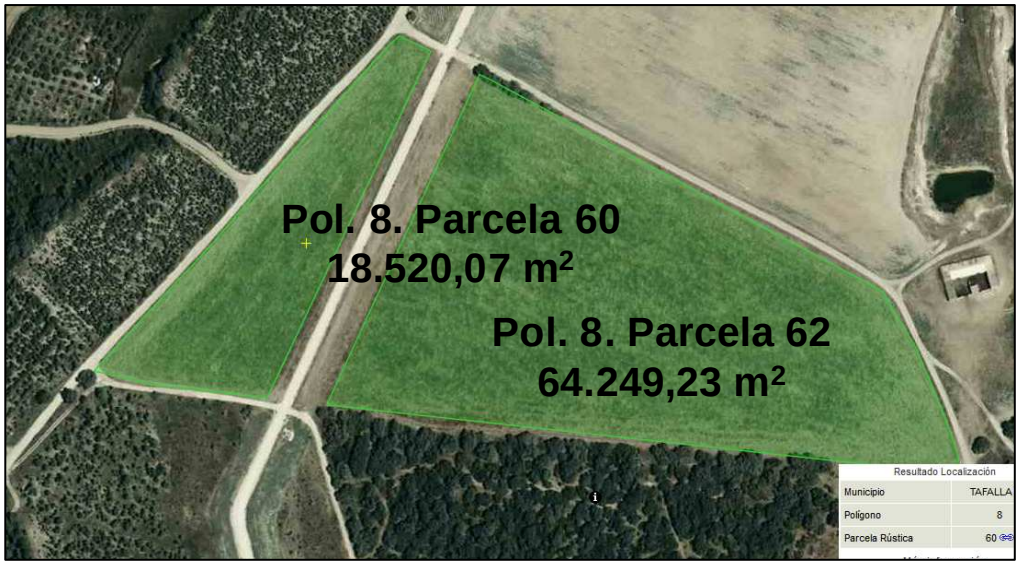

Figura 9. Superficie de las parcelas del Oinez Basoa de Tafalla.
Fuente: SITNA.

La evaluación de los valores de CO_2 equivalente acumulados o emitidos en suelos agrícolas necesita su comparación con referentes y estándares. Una comparación frecuente es la de las tasas de acumulación con las emisiones medias. Las emisiones de CO_2 equivalente (que incluyen las de CO_2 propiamente dichas y las de otros GEI) medias de un territorio, según el número de habitantes permite comparar por ejemplo estos valores. Estos valores son variables a nivel mundial, incluso entre los países con las mayores emisiones mundiales (entre 20,8 t CO_2 eq./persona x año en Australia a 1,31 en India en 2008, según datos de UCSUSA (http://www.ucsusa.org/global_warming/). En el caso de Navarra, considerando unas emisiones totales 6.291.000 t CO_2 eq en 2011 (Fuente: MAGRAMA), y una población de 640.129 habitantes (Fuente: Gobierno de Navarra), se obtendría una tasa de 9,83 t CO_2 eq./persona x año). Este valor no representa en realidad las emisiones medias de cada ciudadano, sino las del territorio en función de su población.

Según este parámetro, los 355 ± 66,5 t de CO_2 existentes en el suelo del O. Basoa en comparación con el control, equivaldrían a las emisiones per cápita de 36,1 ± 6,7 personas den Navarra en 2011.

Otra manera de evaluar los datos es comparar la cantidad almacenada en el suelo con las emisiones asociadas a determinadas actividades. Por ejemplo, considerando una equivalencia de 2,7 kg CO_2 equivalente por litro de diésel (EEA, 2014), 355 ± 66,5 t de CO_2 equivaldrían a las emisiones de 131.481 ± 24,7 litros de diésel. En función del consumo de los diferentes vehículos a motor, u otra maquinaria que funcione a base de diésel, este valor podría servir para estimar los kms recorridos, KW producidos, etc.

Estas interpretaciones deben en todo caso ser **matizadas en dos aspectos:**

- En primer lugar, como se ha indicado, se corresponden a una **aproximación "tiempo por espacio".** Asumir que el enriquecimiento neto en C orgánico del suelo del O. Basoa es equivalente a la diferencia con la parcela control implica asumir que su estado antes de la implantación era el mismo que el de ésta. Esta asunción parece razonable considerando que

ambas parcelas tienen el mismo tiempo de suelo y han tenido un manejo similar durante décadas. Sin embargo, **este dato no puede ser verificado en las condiciones de este estudio.**

- En segundo lugar, respecto a la tasa de acumulación, es necesario recordar que **la acumulación de C en el suelo después de un cambio de uso (en este caso la reforestación) no es lineal.** En suelos muy empobrecidos en materia orgánica, como el de este estudio, hay una tendencia hacia una acumulación mayor durante los primeros años, y una ralentización según el bosque se desarrolla. Si se entiende que la situación de la parcela de bosque contigua al O. Basoa es la situación que el O. Basoa alcanzará en su máximo desarrollo, la gráfica de la figura 10 representa la posible evolución en el tiempo según los resultados obtenidos en este estudio. La gráfica representa esta evolución en el tiempo considerando un periodo de 20 años para alcanzar el máximo desarrollo en el O. Basoa. Estudios recientes señalan que el tiempo de alcance de un nuevo equilibrio en estos cambios de uso puede ser superior a 120 años (Poeplau et al., 2011).

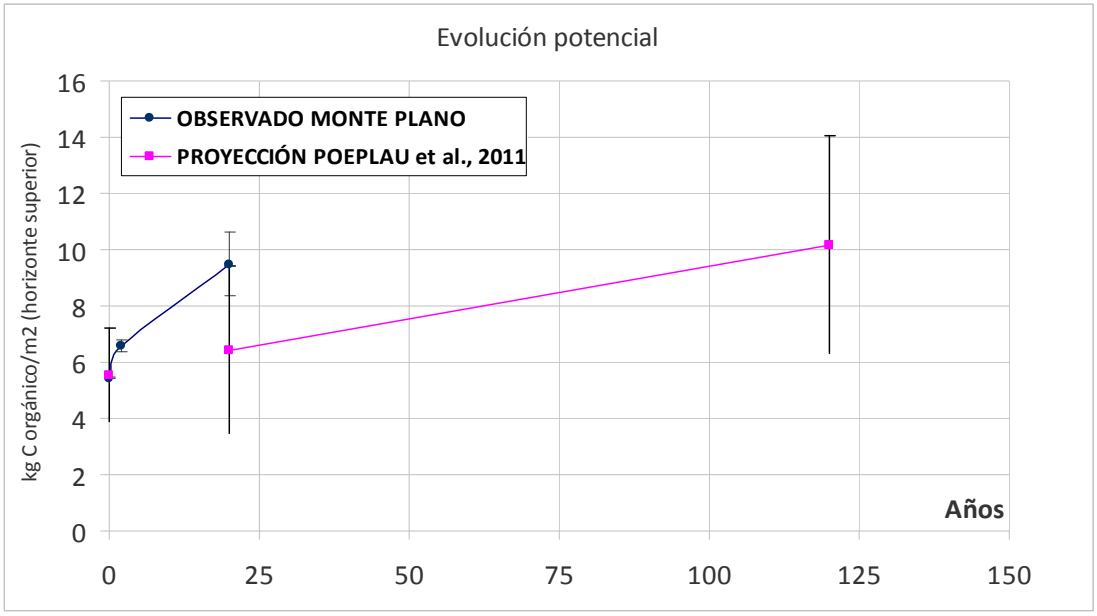

Figura 10. Evolución teórica observada en las tres parcelas estudiadas, y proyección teórica en el tiempo según el meta-análisis de Poeplau et al. (2011) para el suelo mineral de cultivos convertidos a bosque en zonas de clima templado.
Fuente: Elaboración propia a partir de datos propios y de Poeplau et al. (2011).

En esta gráfica puede verse además que existe una incertidumbre relativamente alta respecto al almacenamiento en el largo plazo, debido al hecho observado de que la variabilidad del stock de C orgánico es mayor en el bosque que en el O. Basoa y en la parcela control. Considerando que la situación en el largo plazo del O. Basoa será equivalente a la del bosque actual, la diferencia de stock entre ambos es de 2,91 ± 1,15 kg/m^2 C orgánico, lo que equivale a una acumulación potencial de 240,8 ± 95,2 t C orgánico en el O. Basoa. Esto supone en términos de CO_2 equivalente de **920,2 ± 363,7 t CO_2 equivalente.** A este valor habría que añadirle el correspondiente al desarrollo de la biomasa forestal (acumulación en la madera).

Calidad de la materia orgánica:

Finalmente, los datos obtenidos sobre la proporción de materia orgánica lábil (en forma de materia orgánica particulada, POM) se presentan en la figura 11., junto con la estratificación observada de la materia orgánica en las tres parcelas.

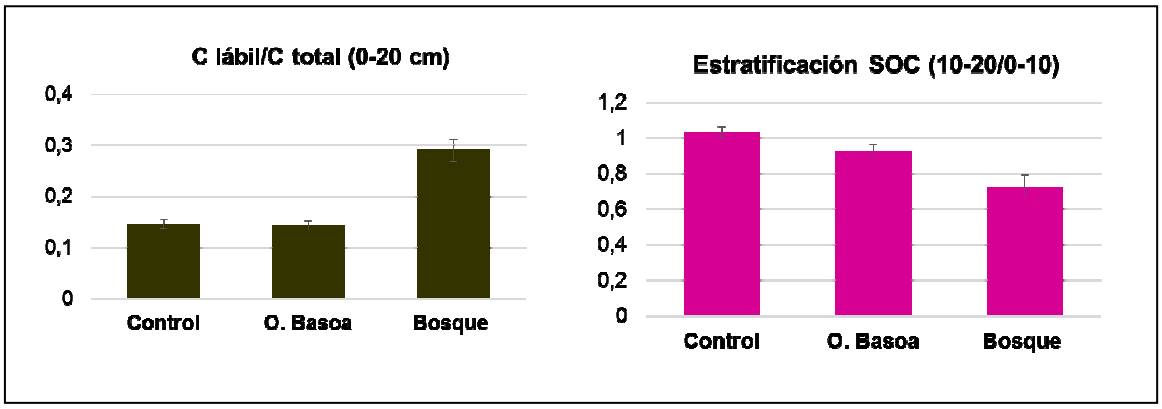

Figura 11. Proporción de C orgánico en la fracción lábil sobre el total (izquierda), y estratificación de la materia orgánica acumulada (derecha) en las tres parcelas estudiadas. Fuente: Elaboración propia.

La **proporción de C lábil sobre el total fue similar en el O. Basoa y en la parcela control** (14,4 ± 0,9 % y 14,6 ± 0,9 %, respectivamente), y en ambos casos inferior a la observada en el bosque (29,1 ± 2,2 %). Este resultado indica que el potencial de acumulación de este tipo de materia orgánica es todavía grande. Los beneficios asociados a esta cumulación progresiva pasan por la relación existente entre la concentración de esta fracción y la actividad biológica del suelo.

Respecto a la **estratificación**, que representa la tendencia de la materia orgánica del suelo a acumularse en la superficie de manera natural. Este hecho es importante desde el punto de vista de los beneficios ambientales de la acumulación de la materia orgánica, al ser la superficie del suelo la interfase de éste con la atmósfera. La acumulación de materia orgánica en esta interfase otorga al suelo una mejor protección física, por ejemplo frente a la erosión, y permite una mayor actividad biológica en este nivel. De esta manera, la estatificación de la materia orgánica se ha utilizado desde hace tiempo como un criterio de calidad del suelo en estudios de cambios de manejo de suelos agrícolas como este (Franzulebbers, 2002; Imaz et al., 2010). En el caso de las parcelas de estudio, el suelo cultivado mostró una relación muy próxima a 1 (1,03 ± 0,03) en 10-20 cm en relación a 0-10. Esto indica una distribución uniforme de la materia orgánica en los 20 cms estudiados, como corresponde a suelos labrados anualmente (el laboreo contribuye a uniformizar la materia orgánica en la zona labrada). En el suelo del O. Basoa se observó una **ligera tendencia hacia una mayor estatificación en el suelo del O.Basoa** (expresada por un menor ratio: 0,92 ± 0,03, figura 11). La mayor estratificación se observó, como es esperable, en el suelo de bosque (0,73 ± 0,06). En los próximos años, puede esperarse por tanto una tendencia a una mayor estratificación en el suelo de O. Basoa.

4. CONCLUSIONES

El objetivo de este estudio fue la cuantificación del C orgánico almacenado de forma estable en el suelo del Oinez Basoa del Monte Plano de Tafalla, en comparación con el presente en dos parcelas contiguas: una parcela cultivada como lo estuvo la correspondiente al O. Basoa antes de su implantación, y otra correspondiente al bosque mediterráneo presente en la zona. Se propuso este estudio como una aproximación del tipo "espacio por tiempo" para el estudio del secuestro potencial de C atmosférico en el O. Basoa.

Considerando que la dinámica de estabilización de C atmosférico en suelos agrícolas reforestados depende entre otros factores de las características del suelo (Laganière et al., 2010), se realizó en primer lugar una caracterización del suelo de las tres parcelas. Esta caracterización permitió observar en primer lugar que la profundidad efectiva de los tres suelos está limitada por la existencia de un horizonte cementado a una profundidad de 20-30 cm. Se observó además que el suelo del O. Basoa y la parcela cultivada son similares en relación a los factores que regulan en mayor medida la dinámica del C orgánico (textura y contenido en arcilla, contenido en carbonatos, pH y capacidad de intercambio de cationes). La comparación del contenido y evolución de C orgánico puede realizarse entre ambos suelos, considerando en todo caso que la aproximación "espacio por tiempo" no permite presentar valores absolutos de secuestro de C.

El suelo de la zona de bosque es en líneas generales del mismo tipo que en las otras dos parcelas. Sin embargo, presenta algunas diferencias (menor contenido en carbonatos y mayor contenido en materia orgánica, lo que resulta en mayor capacidad de intercambiar cationes), explicables por el hecho de no haber sido alterado por las labores de cultivo. Si se quiere considerar el suelo del bosque actual como un reflejo del estado futuro del suelo del O. Basoa (aproximación "espacio por tiempo"), es necesario tener en cuenta estas diferencias en la interpretación.

Tras esta caracterización, la aplicación del protocolo propuesto por el JRC para la cuantificación de los cambios en el C orgánico almacenado en los suelos de Europa (Stolbovoy et al., 2007) permitió determinar una diferencia entre la parcela del O. Basoa y el suelo cultivado de 1,15 ± 0,21 kg/m^2 de C orgánico. A su vez, la diferencia entre el control con el bosque establecido fue de 4,05 ± 1,15 kg/m^2 de C orgánico. Así, considerando que la superficie total de la parcela ocupada por el O.Basoa es de 82.769,3 m^2, esto significa 92,88 ± 17,4 t C acumulado en O. Basoa frente al control cultivado. Esta cifra equivale a 355 ± 66,5 t de CO_2.

La acumulación de C orgánico en el suelo, además de representar una manera eficaz de estabilizar C atmosférico, ofrece una serie de beneficios ambientales, al ser el motor de cambios significativos en la calidad biológica, química y física del suelo. La evaluación de estos beneficios ambientales será el objeto de futuros controles en los suelos estudiados.

AGRADECIMIENTOS

Este Proyecto ha sido financiado por NIE (Nafarroako Ikastolen Elkartea).
La información sobre cartografía de suelos y estudios previos realizados fue facilitada por J. del Valle (Gobierno de Navarra). Las siguientes personas han participado en la recogida de muestras, análisis de datos y otras tareas del Proyecto: Isabel de Soto (UPNA), Conchi González (UPNA), Miquitaio Rego (UCMozambique), Flavio Mutaquiha (UCMozambique), Yannick Frippiat (UPNA-ULBruxelles).

REFERENCIAS

Baritz, R., Zirlewagen D. Jones, R. et al. 2011. Carbon in European soils. In Jandl, R., Rodeghiero, M., Olsson, M. (Eds.) Soil Carbon in Sensitive European Ecosystems. Wiley-Blackwell, Chichester, Reino Unido. Pp. 49-84.

Carter M.R., 1993. Soil Sampling and Methods of Analysis. Canadian Society of Soil Science. Lewis Publishers, Boca Raton, FL, USA.

Doblas-Miranda, E., Rovira, P., Brotons, L., Martínez-Vilalta, J., Retena, J., Plá, M., Vayreda, J. 2013. Soil carbon stocks and their variability across the forests, shrublands and grasslands of peninsular Spain. Biogeosciences 10: 8353-8361.

Franzluebbers, A.J. 2002. Water infiltration and soil structure related to organic matter and its stratification with depth. Soil & Tillage Research 66: 197–205.

Gobierno de Navarra. 2005. Mapa de Suelos de Navarra 1:25.000. Hoja Tafalla.

Gobierno Vasco. 2005. Inventario de C orgánico en suelos y biomasa de la Comunidad Autónoma del País Vasco. (disponible en: http://www.ingurumena.ejgv.euskadi.net/r49-11293/es/contenidos/inventario/carbono_organico/es_pub/indice.html)

Imaz, M.J, I. Virto, P. Bescansa, A, Enrique, O. Fernández-Ugalde, D.L. Karlen. 2010. Tillage and residue management effects on semi-arid Mediterranean soil quality. Soil & Tillage Research 107: 17-25.

Instituto Geológico y Minero de España (IGME). 1987. Mapa Geológico de España 1:50.000. Hoja 173 (Tafalla) y 206 (Peralta). Disponible en: http://www.igme.es/infoigme/catalogo/catalogo.aspx?tab=0

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2014. Fifth Assessment Report. Working Group III. Summary for Policymakers. (http://www.ipcc-wg3.de/)

Laganière, J., Angers, D.A., Paré, D. 2010. Carbon accumulation in agricultural soils after afforestation : a meta-analysis. Global Change Biology 16: 439-453.

Lugateo, E., Panagos, P., Bampa. F. et al. 2014. A new baseline of organic carbon stock in European agricultrual soils using a modeling approach. Global Change Biology 20: 313-326.

Poeplau, C., Don, A., Vesterdal, L., Leifield, J., van Wesemaels, B., Schumacher, J., Gensior, A. 2011. Temporal cynamics of soil organic carbon after land-use change in the temperate zone – carbon response functions as a model approach. Global Change Biology 17:2415-2427.

Stolbovoy, V., Montanarella, L., Filippi, N. et al. 2007. Soil sampling protocol to certify the changes of organic carbón stock in mineral soil of the European Union. Version 2. EUR 21576 EN/2. Office for Official Publications of the European Communities. Luxembourg. 56 pp.

Virto,I., M.J. Imaz, O.Fernández-Ugalde, I.Urrutia, A.Enrique, P. Bescansa. 2012. Soil quality evaluation following the implementation of permanent cover crops in

semi-arid vineyards. Organic matter, physical and biological soil properties. Spanish Journal of Agricultural Research 10(4): 1121-1132.

Virto,I., P. Bescansa, M.J. Imaz, A. Enrique, W. Hoogmoed. 2007. Burning crop residues under no-till in semi arid land, Northern Spain. Effects on soil organic matter, aggregation and earthworm populations. Australian Journal of Soil Research 45(6): 414-421.