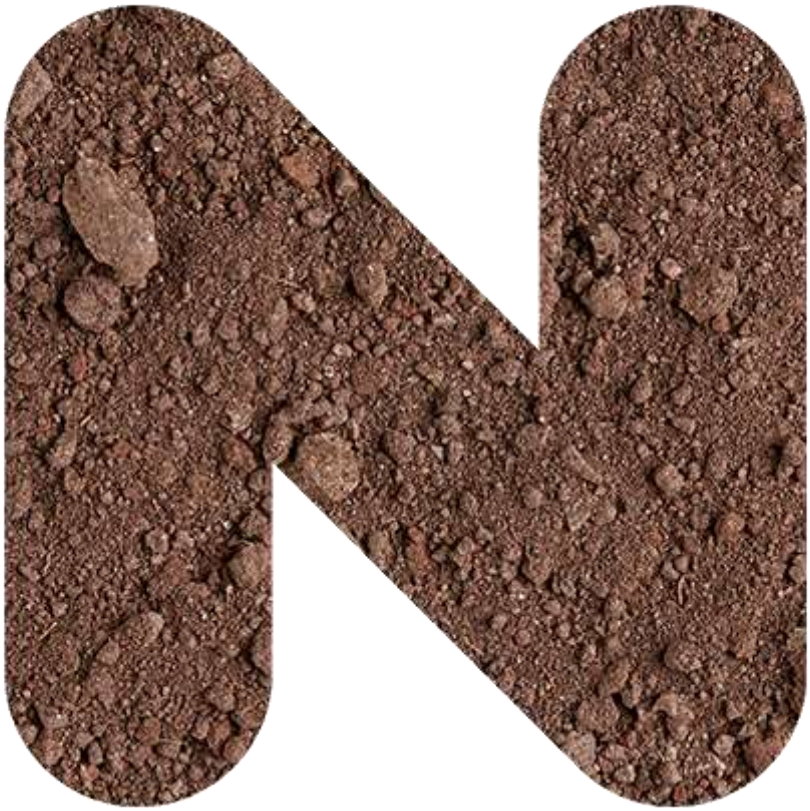
LIFE NADAPTA
THE CLIMA PROJECT

The LIFE-IP NAdapta-CC project has received funding from the LIFE Programme of the European Union



Deliverable DC.4.1_3:

Diagnosis of agricultural soils: Chart of adaptability indicators, threshold values and monitoring in a network of experimental and productive fields

Action C.4.1

Grant Agreement nº. LIFE 16 IPC/ES/000001
Towards an integrated, coherent and inclusive implementation of Climate Change Adaptation policy in a region: Navarre

(LIFE-IP NAdapta-CC)
LIFE 2016 INTEGRATED PROJECTS CLIMATE ACTIONS
Project start date: 2017-10-02 Project end date: 2025-12-31

Coordinator: Partners:

Gobierno de Navarra Nafarroako Gobernua · GAN-NIK · INTIA · Nasuvinsa · NILSA · upna

DISSEMINATION LEVEL		
PU	Public	☒
PP	Restricted to other program participants (including the Commission Services)	☐
RE	Restricted to a group specified by the consortium (including Commission Services)	☐
CC	Confidential, only for members of the consortium (including Commission Services)	☐

Autoría:

- Íñigo Virto, UPNA
- Nerea Arias, INTIA.
- Rodrigo Antón, UPNA.
- Alberto Ruiz-Sagaseta, UPNA.
- Isabel de Soto, UPNA.
- Fco. Javier Arricibita, UPNA.
- Alberto Enrique, UPNA.
- Luis Orcaray, INTIA.
- Miguel Itarte, UPNA

Referencia recomendada a efectos bibliográficos:

Virto, I., Arias, N., Antón, R., Ruiz-Sagaseta, A., de Soto, I., Arricibita, F.J., Enrique, A., Orcaray, L., Itarte, M. (2023). *Diagnosis of agricultural soils: Chart of adaptability indicators, threshold values and monitoring in a network of experimental and productive fields*. Acción C.4. del Proyecto LIFE-IP NAdapta-CC (LIFE 16 IPC/ES/000001) de la Unión Europea. Pamplona. Universidad Pública de Navarra (UPNA), Instituto Navarro de Tecnologías e Infraestructuras Agroalimentarias (INTIA) y Servicio de Economía Circular y Cambio Climático del Gobierno de Navarra.

Este documento corresponde al entregable DC.4.1_3 previsto en el Proyecto LIFE-IP NAdapta-CC.

El Proyecto LIFE-IP NAdapta-CC LIFE 16 IPC/ES/000001 está ejecutado con la contribución financiera del programa LIFE de la Unión Europea

El contenido de este informe no refleja la opinión oficial de la Unión Europea. La responsabilidad de la información y los puntos de vista expresados en esta publicación recaen completamente en su autoría.

www.lifenadapta.eu

Versión 3. 15 de noviembre de 2023

Table of contents

0. SUMMARY 10
1. IMPORTANCIA DEL SUELO EN RELACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO 15
1.1 Mitigación 15
1.2 Adaptación 17
2. ZONIFICACIÓN 24
2.1 Antecedentes 24
2.1.1 Estudio de la variación de indicadores climáticos en Navarra 25
2.1.2 Cadenas de impacto en LIFE-IP NAdapta-CC 30
2.1.3 Medidas contempladas en el marco del proyecto LIFE-IP NAdapta-CC 33
2.2 Información disponible 34
2.3 Desarrollo de la zonificación 36
2.3.1 Zonas y subzonas biogeoclimáticas y series de vegetación 36
2.3.2 Características climáticas y agroclimáticas 40
2.3.3 Otras consideraciones 43
2.3.4 Zonificación 45
2.4 Características edáficas 55
2.4.1 Descripción general 55
2.4.2 Tipologías y limitaciones de suelo por zonas 57
3. DIAGNÓSTICO DE VULNERABILIDAD Y RESILIENCIA 74
3.1 Indicadores de vulnerabilidad y resiliencia 74
3.1.1 Indicadores de calidad del suelo 76
3.1.2 Selección de indicadores LIFE-IP NAdapta-CC 80
3.2 Establecimiento de parcelas experimentales 86
3.2.1 Localización, diseño e indicadores 86
3.2.2 Diagnóstico 90
3.3 Desarrollo de la red de parcelas LIFE-IP NAdapta-CC 100
3.3.1 Identificación de parcelas por zonas y diseño del muestreo 100
3.3.2 Evaluación de la situación de partida: Definición del nivel de referencia regional 106
3.3.3 Evaluación de las estrategias 118
3.3.4 Diagnóstico regional 139

3.4 Base de datos de la red de parcelas 143
4. SELECCIÓN DE PARCELAS PARA SEGUIMIENTO 148
4.1 Criterios empleados en la fase de selección de parcelas 148
4.2 Resumen de la respuesta inicial de las parcelas seleccionadas 149
5. RESULTADOS INDICADORES AÑO 2023 (FASE 3) 152
5.1 5.1 Ratios Respuesta (RR) 152
5.1.1 Zizur – Rotación de cultivos 152
5.1.2 Garinoain – Agricultura de conservación 153
5.1.3 Olite – Aporte de enmiendas orgánicas 153
5.1.4 Pitillas – Aporte de enmiendas orgánicas 154
5.2 Consideraciones sobre la interpretación de los resultados 159
5.3 Evolución de indicadores 2020 – 2023 (valores absolutos) 161
6. BIBLIOGRAFÍA 167

Tables

Tabla 1-1 Resumen de ítems y su relación con las propiedades, información y otros aspectos relacionados con las funciones del suelo en el portal Climate-ADAPT de la UE..... 20
Tabla 3-1 Indicadores edáficos seleccionados de las bases de datos de los proyectos ENVASSO e iSQAPER 78
Tabla 3-2 Estrategias e indicadores edáficos de diagnóstico de vulnerabilidad y resiliencia.. 83
Tabla 3-3 Parámetros, muestras, y metodologías para el estudio de los indicadores edáficos 90
Tabla 3-4. Indicadores NADAPTA en la parcela Ilundain Bosque 2023..... 93
Tabla 3-5. Indicadores NADAPTA en la parcela Ilundain Pueblo..... 95
Tabla 3-6 Caracterización uso del suelo y red de parcelas. 104
Tabla 3-7 Base de datos red de parcelas para ayuda en la toma de decisiones. Información relativa a los grupos de parcelas que constituyen la red de parcelas del proyecto: municipio, estrategia, tipo de suelo, textura, número de parcelas incluidas en cada grupo, valores potenciales y efecto de cada estrategia sobre los indicadores de adaptabilidad considerados. 144
Tabla 5-1. Tabla resumen de los intervalos de confianza de cada una de las ratios respuesta para cada uno de los indicadores de las parcelas estudiadas. "+": límite derecho; "-": límite izquierdo; Color verde: ratio respuesta positivo; Color amarillo: ratio respuesta neutron; Color marrón: ratio respuesta negativo. El porcentaje de cada casilla refleja la diferencia respecto al punto neutro (respuesta del manejo convencional).....156
Tabla 5-2. Tabla resumen de la evolución de los intervalos de confianza de cada una de las ratios respuesta para cada uno de los indicadores de las parcelas estudiadas en los años 2020 y 2023. "+": límite derecho; "-": límite izquierdo; Color verde: ratio respuesta positivo; Color amarillo: ratio respuesta neutron; Color marrón: ratio respuesta negativo. El porcentaje de cada casilla refleja la diferencia respecto al punto neutro (respuesta del manejo convencional). La "Evolución 2020 – 2023" sigue la misma clave de colores que las ratio respuesta. 157

Figures

Figura 1 Contribución potencial de algunas opciones de respuesta para la mitigación, adaptación, reducción de la desertificación y la degradación de la tierra, y la seguridad alimentaria. Extracto de Odoemene (2019). 18
Figura 2 Tendencia decadal de las temperaturas máximas (izda). y mínimas (dcha.), en ºC/década, entre 1954 y 2016 en Navarra. 26
Figura 3 Distribución espacial del mes más húmedo (arriba) y el mes más seco (abajo), en los periodos 1954-1983 (izda.) y 1987-2016 (dcha.). 26
Figura 4 Mapas de temperatura media del periodo normal observado 1991-2017 y proyectados 2021-2050, 2051-2080. 27
Figura 5 Mapas del índice de aridez de Rivas-Martínez del periodo normal observado 1991-2017 y proyectados 2021-2050, 2051-2080. 28
Figura 6 Distribución de la variación del factor R de erosividad de las precipitaciones observado en 2010 y modelizado para 2050 en el Valle del Ebro. 29
Figura 7 Mapa conceptual basado en cadenas de impacto. 30
Figura 8 Mapa de peligros, impactos y receptores en el sector agrario según la acción C1.1 del proyecto LIFE-IP NAdapta-CC. 32
Figura 9 Mapa de suelo 1:50.000 y observaciones realizadas. 35
Figura 10 Mapa de suelo 1:25.000 y observaciones realizadas. 35
Figura 11 Regiones biogeográficas de Navarra. 36
Figura 12 Unidades biogeográficas o bioregiones en Navarra.. 37
Figura 13 Series de vegetación en Navarra. 39
Figura 14 Comparación de las unidades biogeográficas con la zonificación climática de Papadakis. 40
Figura 15 Comparación de las unidades biogeográficas con la zonificación climática del mapa agroclimático para el trigo de secano. 43
Figura 16 Zonas salinas y zonas de yesos. 44
Figura 17 Zonificación en base a los criterios de esta acción. 45
Figura 18 POT sobre zonificación final. 54
Figura 19 Tipologías de suelos dominantes en la zona 1. 57
Figura 20 Tipologías de suelos dominantes en la zona 2. 59
Figura 21 Tipologías de suelos dominantes en la zona 3. 60
Figura 22 Tipologías de suelos dominantes en la zona 4. 61
Figura 23 Tipologías de suelos dominantes en la zona 5. 63
Figura 24 Tipologías de suelos dominantes en la zona 6. 64
Figura 25 Tipologías de suelos dominantes en la zona 7. 65
Figura 26 Tipologías de suelos dominantes en la zona 8. 67
Figura 27 Tipologías de suelos dominantes en la zona 9. 69
Figura 28 Tipologías de suelos dominantes en la zona 10. 70
Figura 29 Tipologías de suelos dominantes en la zona 11. 71
Figura 30 Tipologías de suelos dominantes en la zona 12. 72

Figura 31 Distribución de los indicadores de vulnerabilidad asociados a las características del perfil en la Zona 1. Pendiente, Capacidad de retención de agua disponible en la sección control, salinidad, pedregosidad. 82
Figura 32 Gráfico "de bosque" para los ratios de respuesta (RR) frente al manejo convencional (vertedera), para los diferentes indicadores considerados en la parcela Ilundain Bosque (Agricultura de Conservación). 92
Figura 33 Gráfico "de bosque" para los ratios de respuesta (RR) frente al manejo convencional (vertedera con rastrojo empacado), para los diferentes indicadores considerados en la parcela Ilundain Pueblo (Agricultura de Conservación). 94
Figura 34 Gráfico "de bosque" para los ratios de respuesta (RR) frente al manejo convencional (fertilización mineral), para los diferentes indicadores considerados en la parcela Artajona (Enmiendas orgánicas). 96
Figura 35 Gráfico "de bosque" para los ratios de respuesta (RR) frente al manejo convencional (fertilización mineral), para los diferentes indicadores de fertilidad química en la parcela Artajona (Enmiendas orgánicas). 97
Figura 36 Gráfico "de bosque" para los ratios de respuesta (RR) frente al testigo, para los diferentes indicadores de fertilidad química en la parcela Sesma (Rotaciones). 99
Figura 37 Localización de las parcelas seleccionadas para la red de monitorización en Olite. 102
Figura 38 Diseño de las zonas y puntos de muestreo para parcelas agrícolas en diferentes zonas de Navarra. 102
Figura 39 Red de parcelas de seguimiento y distribución en las 12 zonas definidas en el proyecto LIFE-IP NAdapta-CC. (Acción C4.1). 105
Figura 40 Stock de C orgánico (0-20 cm) en los suelos cultivados de las diferentes zonas bajo manejo convencional. 106
Figura 41 Stock de C orgánico (0-20 cm) en los suelos cultivados de las diferentes zonas bajo manejo convencional, por tipología de suelo. 109
Figura 42 Densidad aparente (0-20 cm) en los suelos cultivados de las diferentes zonas bajo manejo convencional 110
Figura 43 Valores de densidad aparente (0-20 cm) en los suelos cultivados de las diferentes zonas bajo manejo convencional, por tipología de suelo. 112
Figura 44 Capacidad de campo (g agua/g suelo, 0-30 cm) en los suelos cultivados de las diferentes zonas bajo manejo convencional. 114
Figura 45 Capacidad de retención de agua disponible para las plantas, CRAD (L agua/m^2 o mm, 0-30 cm) en los suelos cultivados de las diferentes zonas bajo manejo convencional. 114
Figura 46. Capacidad de campo (g agua/g suelo, 0-30 cm) en los suelos cultivados de las diferentes zonas bajo manejo convencional. 116
Figura 47. Capacidad de retención de agua disponible para las plantas, CRAD (L agua/m^2 o mm, 0-30 cm) en los suelos cultivados de las diferentes zonas bajo manejo convencional. 117
Figura 48 Gráfico "de bosque" para los ratios de respuesta (RR) de los grupos de parcelas considerados en la estrategia "Agricultura de Conservación", para el stock de C orgánico del suelo (0-20 cm). 119

Figura 49 Gráfico "de bosque" para los ratios de respuesta (RR) de los grupos de parcelas considerados en la estrategia "Rotaciones", para el stock de C orgánico del suelo (0-20 cm). 120
Figura 50 Gráfico "de bosque" para los ratios de respuesta (RR) de los grupos de parcelas considerados en la estrategia "Aportes orgánicos externos", para el stock de C orgánico del suelo (0-20 cm). 121
Figura 51 Gráfico "de bosque" para los ratios de respuesta (RR) de los grupos de parcelas considerados en la estrategia "Gestión de pastos y forrajes", para el stock de C orgánico del suelo (0-20 cm). 122
Figura 52 Gráfico "de bosque" para los ratios de respuesta (RR) de los grupos de parcelas considerados en la estrategia "Agricultura de Conservación", para la densidad aparente (0-20 cm).....126
Figura 53 Gráfico "de bosque" para los ratios de respuesta (RR) de los grupos de parcelas considerados en la estrategia "Rotaciones", para la densidad aparente del suelo (0-20 cm). 127
Figura 54 Gráfico "de bosque" para los ratios de respuesta (RR) de los grupos de parcelas considerados en la estrategia "Aportes orgánicos externos", para la densidad aparente del suelo (0-20 cm) 128
Figura 55 Imagen ejemplo.....129

Actualización del entregable (versión 3)

El entregable se ha actualizado en noviembre de 2023 incluyendo los cambios que se señalan a continuación:

- Actualización de la base de datos generada a partir del monitoreo de la red de parcelas con la inclusión de 13 nuevas parcelas, y actualización por tanto de los resultados correspondientes a estas parcelas. Esto se describe en la sección 3.4 BASE DE DATOS RED DE PARCELAS, y en la nueva sección 3.3.3.4. Indicadores Nadapta en nuevas parcelas (2023). .

- Nueva sección 3.3.3.4. Indicadores Nadapta en nuevas parcelas (2023) y 3.4 BASE DE DATOS RED DE PARCELAS añadida al documento. En dicha sección, se describen las parcelas incorporadas, y se recopila parte de la información que contiene la base de datos que ha sido elaborada a partir de los datos recopilados en la red de parcelas.

- Continuación de los muestreos de las 11 parcelas no experimentales seleccionadas en la fase 2 y actualización de los resultados para 2023 con los nuevos datos. Se ha creado el apartado 5. RESULTADOS AÑO 2023 (FASE 3) para presentarlos, tanto en formato de Ratio Respuesta como en valores absolutos, y comentarlos. A su vez, dentro de este apartado se ha desarrollado el punto 5.2 (Consideraciones sobre la interpretación de resultados), para definir el contexto que permita analizar correctamente estos resultados. Además del análisis de los resultados de este año, se ha realizado una comparativa con los registrados en 2020.

- Respecto a las parcelas demostrativas, se han añadido los nuevos resultados físico-químicos de las parcelas de Ilundain y se ha añadido la información de resistencia a la penetración (compactación). Los resultados correspondientes a los indicadores de calidad del suelo, se encuentran en este entregable, dentro del apartado 3.2.2.1 Agricultura de Conservación: Ensayos de Ilundain, mientras que el resto de resultados, en el Anexo AC4.1.2c_3, en los apartados 2.6 y 3.6.

- En la campaña 2021/2022 la parcela correspondiente a los ensayos con enmiendas orgánicas se trasladó de Artajona (maíz regadío) a Olóriz (cereal de secano), como consecuencia de las limitaciones al monocultivo en la nueva PAC. La descripción de la nueva parcela se encuentra en el apartado 3.2.1. Localización, diseño e indicadores. En la campaña de 2022 se midieron indicadores de cultivo (Anexo AC4.1.2b_3).

- En el caso de la parcela de Eneriz, debido a problemas con el equipo de laboratorio, en el Anexo AC4.1.2a_3, se presentan los resultados parciales de los indicadores Nadapta. Añadido al Anexo AC4.1.3_3, el nuevo protocolo de muestreo desarrollado para las parcelas no experimentales.

0. SUMMARY

The LIFE-IP NAdapta-CC project proposes an integrated strategy for adaptation to climate change in the region of Navarra. It is framed within the climate change roadmap of Navarra (KLINa), which defines the 2030-2050 agenda of the Community, and which reflects the commitments made by Navarra in the fight against Climate Change to meet the international objectives of the European Union Strategy of the Paris Agreement (COP21) and the Sustainable Development Goals (SDGs) of the UN.

From a cross-sectoral approach, the project's lines of action are divided into 6 areas of action: territorial monitoring, water, forests, agriculture and livestock, health and infrastructure and territorial planning. Each line of action is in turn divided into several more specific actions.

The action corresponding to Agriculture and Livestock includes 6 sub-actions. The first of these is Action 4.1 "*Optimizing the adaptability of agrosystems to climate change through soil, organic matter and crop management strategies*". One of the objectives of this action is to promote a resilient soil management plan for the optimization of the adaptability of agrosystems to Climate Change through soil management strategies, adapted to the region of Navarra.

To this end, in the first phase of the project, a **vulnerability study of agricultural soils in the region** was carried out, and the effect of different strategic agricultural management strategies (conservation agriculture, rotations, use of organic amendments, and improved grassland management) on indicators of adaptability to expected changes in climate in the region, and related to the main features of soil vulnerability, was evaluated.

To this end, several subtasks were identified. **A zoning system was used to divide the region into 12 zones with homogeneous behavior for agricultural development**. Then, based on the main climate impacts detected in the community for the coming years, and the intrinsic edaphic properties related to them, **resilience indicators were identified**. These indicators include mainly aspects related to **organic matter and the soil physical condition**.

In a third phase, a **network of plots** was defined to characterize the agricultural use of the region, in which plots in production under conventional management were selected in order to define a baseline of vulnerability in the region, and plots under the previously mentioned "adaptive" management. In this case, the adaptive or "resilient" management proposed, based on the Climate Change Roadmap for the region (KLINA), includes crop rotation, conservation agriculture, the use of organic amendments for fertilization purposes, and optimized grassland and pasture management. At the same time, a **series of demonstration plots** were established in which these same management practices are being tested.

Once this network was defined, a **sampling strategy** was defined to define the status of the chosen indicators according to the management applied (conventional or "adaptive") in each of the different zones established, and in groups of plots on comparable soil units. This involved systematic soil sampling in the three demonstration plots and 148 actual production plots. The results obtained in this work made it possible to **determine, for the first time in the region in a systematic and quantitative way**, two basic aspects for monitoring the adaptability to climate changes of the agrosystems considered. On the one hand, it was possible to establish

a **baseline** (corresponding to the levels observed in conventionally managed plots) for the different zones and soil types. On the other hand, it was possible to **determine, for each strategy considered, the net effect on the indicators of interest in real production plots**.

In summary, the data indicated that **the effect of adaptive management in the different zones is variable depending on the type of management, the zone, and the indicators considered**. In general, it was observed that gains in organic C in the surface horizon of agricultural soils were more evident with external inputs, or are modulated by climate in conservation agriculture. These gains do not necessarily correspond to changes in other parameters, such as water retention, which highlights the need to understand the complexity of the interrelationships between different aspects of management, and between different soil properties, at the regional scale.
Likewise, the results observed in terms of plant-available water retention highlight the fact that possible differences in this aspect induced by different managements that facilitate organic C storage may be ephemeral in conventional cropping practices.

At the regional level, it can therefore be understood **that the strategies considered may have a positive effect in relation to adaptation, from the point of view of soil properties**. This effect, however, is **modulated by other factors**. It is therefore necessary to consider the characteristics of agrosystems at the regional scale, to consider the advantages and possible limitations of each of them, in order to move towards a diagnosis and advice for each type of farm. This is the objective of the following phases of this action.

In the following phase, after a filtering process based on selection criteria developed with the results observed in the first phase, the number of plots was reduced from the initial 148 to the final 11 plots on which to continue monitoring soil quality indicators. In phase 3, sampling has been carried out on these plots for this year. The data obtained have been interpreted and compared with those recorded in 2020 in order to observe the evolution of the indicators. Some of the conclusions recorded so far are shown below:

- The management corresponding to the contribution of organic amendments presents the best results of all the plots sampled in 2023.
- Crop rotation is the management with the least effect of all, with a predominantly neutral response in 2023.
- Conservation agriculture shows the most heterogeneous results in 2023.
- A decrease in organic carbon concentration and stock is observed in the conventional plots of Zizur (rotations) and Pitillas (amendments).
- Despite the higher concentration and stock of organic carbon in the adaptive plot of Olite (amendments) compared to the conventional plot, a remarkable decrease of both indicators is detected in the adaptive plot from 2020 to 2023.
- It is advisable to avoid drawing conclusions based on the results of a single year and to observe the long-term evolution.

***

El proyecto LIFE-IP NAdapta-CC propone una estrategia integrada de adaptación al cambio climático en la Comunidad Foral de Navarra. Se enmarca en la hoja de ruta de cambio climático de Navarra (KLINa), que define la agenda 2030-2050 de la Comunidad, y que recoge los compromisos adquiridos por Navarra en la lucha contra el Cambio Climático para cumplir con los objetivos internacionales de la Estrategia de la Unión Europea del Acuerdo de París (COP21) y los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la ONU.

Desde un enfoque intersectorial, las líneas de actuación del proyecto se dividen en 6 áreas de actuación: vigilancia del territorio, agua, bosques, agricultura y ganadería, salud e infraestructuras y ordenación del territorio. Cada línea de acción se divide a su vez en varias acciones más específicas.

La acción correspondiente a Agricultura y Ganadería incluye 6 subacciones. La primera de ellas es la **acción 4.1 "*Optimizar la adaptabilidad de los agrosistemas al cambio climático mediante estrategias de gestión del suelo, la materia orgánica y los cultivos*".** Uno de los objetivos de esta acción es promover un plan de gestión de suelos resilientes para la optimización de la adaptabilidad de los agrosistemas al Cambio Climático a través de estrategias de gestión de suelos, adaptadas a la región de Navarra.

Para ello, en la primera fase del proyecto, se ha realizado un **estudio de vulnerabilidad de los suelos agrícolas de la región, y se ha evaluado el efecto de diferentes estrategias de gestión agrícola estratégica** (agricultura de conservación, rotaciones, uso de enmiendas orgánicas y mejora de la gestión de los pastizales) **sobre los indicadores de adaptabilidad a los cambios climáticos esperados en la región**, y relacionados con las principales características de vulnerabilidad de los suelos.

Para ello, se identificaron varias subtareas. Se utilizó un **sistema de zonificación para dividir la región en 12 zonas con un comportamiento homogéneo para el desarrollo agrícola**. Luego, en base a los principales impactos climáticos detectados en la comunidad para los próximos años, y las propiedades edáficas intrínsecas relacionadas con ellos, **se identificaron indicadores de resiliencia**. Estos indicadores incluyen principalmente aspectos relacionados con la materia orgánica y el estado físico del suelo.

En una tercera fase, se definió una **red de parcelas** para caracterizar el uso agrícola de la región, en la que se seleccionaron parcelas en producción bajo manejo convencional para definir una línea base de vulnerabilidad en la región, y parcelas bajo el manejo "adaptativo" anteriormente mencionado. En este caso, el manejo adaptativo o "resiliente" propuesto, basado en la Hoja de Ruta del Cambio Climático para la región (KLINA), incluye **la rotación de cultivos, la agricultura de conservación, el uso de enmiendas orgánicas para la fertilización y el manejo optimizado de pastos y praderas**. Al mismo tiempo, se estableció una serie de parcelas de demostración en las que se están probando estas mismas prácticas de gestión.

Una vez definida esta red, se definió una estrategia de muestreo para definir el estado de los indicadores elegidos en función de la gestión aplicada (convencional o "adaptativa") en cada una de las diferentes zonas establecidas, y en grupos de parcelas sobre unidades de suelo comparables. Para ello se realizó un muestreo sistemático del suelo en las **tres parcelas de demostración y en 148 parcelas de producción real**. Los resultados obtenidos en este trabajo permitieron determinar, por primera vez en la región de forma sistemática y cuantitativa, dos aspectos básicos para el seguimiento de la adaptabilidad al cambio climático de los agrosistemas considerados. Por un lado, **se pudo establecer una línea base** (correspondiente a los niveles observados en las parcelas manejadas convencionalmente) para las diferentes zonas y tipos de suelo. Por otro lado, fue posible **determinar, para cada estrategia considerada, el efecto neto sobre los indicadores de interés en parcelas de producción reales**.

En resumen, los datos indicaron que **el efecto de la gestión adaptativa en las distintas zonas es variable en función del tipo de gestión, la zona y los indicadores considerados**. En general, se observó que **las ganancias de C orgánico en el horizonte superficial de los suelos agrícolas fueron más evidentes con los aportes externos**, o están moduladas por el clima en la agricultura de conservación. Estas ganancias **no se corresponden**

necesariamente con cambios en otros parámetros, como la retención de agua, lo que pone de manifiesto la necesidad de comprender la complejidad de las interrelaciones entre los diferentes aspectos de la gestión, y entre las diferentes propiedades del suelo, a escala regional.

Asimismo, los resultados observados en cuanto a la retención de agua disponible por las plantas ponen de manifiesto que las posibles diferencias en este aspecto inducidas por los distintos manejos que facilitan el almacenamiento de C orgánico pueden ser efímeras en las prácticas de cultivo convencionales.

Por lo tanto, a nivel regional, se puede entender que **las estrategias consideradas pueden tener un efecto positivo en relación con la adaptación, desde el punto de vista de las propiedades del suelo. Este efecto, sin embargo, está modulado por otros factores**. Por lo tanto, es necesario tener en cuenta las características de los agrosistemas a escala regional, para considerar las ventajas y posibles limitaciones de cada uno de ellos, con el fin de avanzar hacia un diagnóstico y asesoramiento para cada tipo de explotación. Este es el objetivo de las siguientes fases de esta acción.

En la fase siguiente, tras un proceso de filtrado basado en criterios de selección desarrollados con los resultados observados en la primera fase, el número de parcelas se redujo de las 148 iniciales a las **11 parcelas** finales sobre las que continuar el seguimiento de los indicadores de calidad edáficos. En la fase 3 se han llevado a cabo los muestreos correspondientes a este año en estas parcelas. Los datos obtenidos han sido interpretados y comparados con los registrados en 2020 para poder observar la evolución de los iondicadores. A continuación se muestran algunas de las conclusiones registradas hasta el momento:

- El manejo correspondiente al aporte de enmiendas orgánicas presenta los mejores resultados de todas las parcelas muestreadas en 2023.
- La rotación de cultivos es el manejo con menor efecto de todos, predominando la respuesta neutra en 2023.
- La agricultura de conservación presenta los resultados más heterogéneos en 2023.
- Se observa una disminución de la concentración y stock de carbono orgánico en las parcelas convencionales de Zizur (rotaciones) y Pitillas (aporte de enmiendas)
- A pesar de la mayor concentración y stock de carbono orgánico en la parcela adaptativa de Olite (aporte de enmiendas) en comparación con la parcela convencional, se detecta una disminución remarcable de ambos indicadores en la parcela adaptativa de 2020 a 2023.
- Se aconseja evitar realizar conclusiones a partir de los resultados de un solo año y observar la evolución a largo plazo.

1. IMPORTANCIA DEL SUELO EN RELACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO

El papel de los sistemas edáficos en los ciclos biogeoquímicos del carbono (C) y el nitrógeno (N), y en particular, en el intercambio de estos elementos entre la atmósfera y los ecosistemas terrestres, es conocido, y ha despertado un interés creciente por su estudio en las últimas décadas, al estar este intercambio directamente relacionado con los gases de efecto invernadero (GEI) que contienen estos elementos (CO_2, CH_4, N_2O).

La interferencia del manejo agrícola en estos ciclos, y sus consecuencias en el balance total de emisiones de GEI, es de hecho objeto de atención desde hace tiempo en las políticas y estrategias de regulación de estas emisiones (IPCC, 2006).

El suelo presenta además en este contexto un interés especial por su papel como **captador de C atmosférico en forma de CO_2**. Este papel ha puesto de relevancia la importancia de los estudios sobre **la estabilización de la materia orgánica en el suelo**, y sobre las consecuencias de diferentes estrategias de manejo agrícola en esta estabilización, como ponen de manifiesto actividades de redes científicas como la Red Remedia (http://www.redremedia.org) y numerosos trabajos de investigación e informes oficiales a nivel nacional e internacional (Pellerin et al. 2013, 2013; MAPAMA, 2018). Además, el suelo es una **parte fundamental de los ecosistemas terrestres,** y también se ve amenazado dentro de éstos por la variabilidad y los cambios en las condiciones climáticas (EEA, 2015). Más allá de la relación directa del clima como factor de formación del suelo, y las posibles consecuencias del cambio climático en el largo plazo en este sentido (Keyvanshokouhi et al., 2016), los cambios observados y esperables en el clima pueden afectar a procesos de degradación rápidos como la erosión o la mineralización de la materia orgánica.

El conocimiento del suelo en relación al cambio climático es así necesario, y tiene especial relevancia tanto en relación a la **mitigación**, como a sus **consecuencias** en los sistemas terrestres, y a las posibles medidas de **adaptación** (FAO, 2013).

1.1 Mitigación

El avance del conocimiento sobre las relaciones entre el manejo del suelo, y su potencial en la mitigación del cambio climático se ha incrementado notablemente en los últimos años (Paustian et al., 2016).

En los sistemas agrícolas, de manera general, se pueden resumir las estrategias entre aquellas destinadas a **reducir las emisiones de GEI**, y las encaminadas **a aumentar el potencial del suelo en la estabilización del CO_2 atmosférico** en forma de materia orgánica estabilizada (Sanz-Cobena et al., 2017). En ambas direcciones, la necesidad de conocimiento del funcionamiento del suelo es evidente. A nivel global, las emisiones de los suelos agrícolas, consideradas las emisiones por el uso de fertilizantes y en los sistemas inundados como algunos arrozales, suponen aproximadamente un 23% de las asociadas a la agricultura (Tubiello et al., 2014). Otras emisiones que se asocian a los suelos agrícolas son las relativas al manejo de residuos ganaderos. Por esta razón, **el desarrollo de sistemas agrícolas y agroganaderos capaces de sostener la producción con menores tasas de emisión** es una línea clara de trabajo en la mayoría de planes de mitigación del cambio climático a diferentes escalas. Las **características del medio edáfico** y de su manejo resultan determinantes en

este sentido, al estar condicionadas, y a su vez condicionar, gran parte de los procesos responsables de estas emisiones (Cayuela et al., 2017; Smith, 2017).

En relación al **secuestro de C atmosférico**, el potencial de los suelos agrícolas para estabilizar C fotosintetizado, y por tanto contribuir a la reducción de CO_2 en la atmósfera, depende en gran medida de las condiciones del clima y el suelo considerados. En este sentido, iniciativas como la conocida del "4per1000" (Misnany et al., 2017; Rumpel et al. 2020) han utilizado este potencial como fundamento para la promoción de estrategias que contribuyen a un incremento del contenido de C orgánico en suelos agrícolas. Un estudio en el marco de esta iniciativa (MAPAMA, 2018) concluye que el potencial para introducir C orgánico en los suelos agrícolas de España es alto. Las estrategias consideradas en este estudio incluyen **la aplicación de diferentes tipos de compost y subproductos y residuos orgánicos urbanos y agrícolas** (Torri et al. 2014), **y las técnicas de gestión del suelo como la agricultura de conservación** (Lal 2016), **la agricultura ecológica** (Altieri et al. 2015), **o la rotación de cultivos** (Land et al. 2017). Estas estrategias suponen diferentes formas de aumentar las entradas, y/o reducir las salidas de C orgánico al suelo, con el objeto de alcanzar un balance neto positivo en el medio-largo plazo.

Las respuestas que ha suscitado esta iniciativa (van Groeningen et al., 2017; Soussana et al., 2017; Poulton et al., 2018; White et al. 2018; Baveye et al. 2018), y su desarrollo en relación a la incorporación de otros criterios para determinar las estrategias de éxito (Rumpel et al. 2020), son prueba de la **necesidad de determinar con el mayor detalle posible las condiciones locales** que pueden condicionarlo. En este sentido, son necesarias evaluaciones detalladas de las emisiones y de las opciones de mitigación para ofrecer respuestas adecuadas en cada caso (FAO 2013).

En su último informe especialmente dedicado al uso de la tierra, y en particular, a la agricultura y el cambio climático (Jia et al. 2019), **el IPCC[1] explica que el potencial de respuesta para la mitigación (y la adaptación) es específico de cada contexto**. Entre estas respuestas aparece de manera específica el manejo del C orgánico del suelo, indicando que las estrategias para su recuperación y "secuestro" suelen necesitar tiempo para mostrar su efectividad, y tienen a su vez una **capacidad limitada en el tiempo y una alta vulnerabilidad** a revertirse si las condiciones de manejo (e incluso climáticas) cambian. Para un potencial de mitigación total de 0,4-8,64 Gt CO_2 año^{-1}, el propio rango indica el nivel de variabilidad esperable dependiendo del uso anterior y presente de la tierra, el tipo de suelo, la disponibilidad de recursos, las condiciones ambientales, la composición microbiana y la disponibilidad de nutrientes, entre otros.

Además, destacan la **dependencia del contexto local en la efectividad de algunas estrategias**. Así, mientras soluciones y técnicas como la cosecha de agua, la restauración de tierras degradadas, la agroforestación y otras prácticas agroecológicas parecen eficaces para la mitigación, la adaptación y combatir la desertificación, otras como la agricultura de conservación aparecen señaladas como más dependientes de las condiciones locales para resultar en un secuestro de C efectivo. El informe reconoce además que los procesos relacionados con el C orgánico y los procesos microbianos, que interaccionan con la vegetación en respuesta al clima, representan una **gran fuente de incertidumbre** para las proyecciones de los modelos climáticos.

[1] IPCC es el acrónimo en inglés del *Intergovernmental Panel on Climate Change*, el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático.

La aplicación de estas medidas de mitigación, y la evaluación de su efectividad real, debe ser evaluada por tanto a nivel local, considerando las características climáticas y las edáficas. **Algunas cuestiones** relativas al funcionamiento del suelo, aún no bien conocidas, pueden ser relevantes en este sentido, como la **sensibilidad de las diferentes fracciones de la materia orgánica del suelo a la temperatura y otros cambios** (Conant et al. 2011), el potencial máximo de almacenamiento de C orgánico, y el papel de la fracción mineral o las condiciones físico-químicas del suelo (Dignac et al., 2017; Chenu et al., 2019). La relevancia del **estudio del ciclo de la materia orgánica** cobra especial importancia en este contexto. En relación a esta última, algunas revisiones recientes (Harden et al., 2018; Churchman, 2018), ponen en evidencia que los mecanismos de estabilización de la materia orgánica en el suelo varían en función de estas condiciones, por lo que parece necesario desarrollar modelos y sistemas de medida y evaluación que consideren estos factores a la hora de realizar predicciones (Rasmussen et al., 2018).

Un aspecto final que es necesario considerar en relación a las posibles estrategias de mitigación es la necesidad de evaluar sintéticamente su efecto en el balance secuestro-emisiones, así como sus posibles consecuencias más allá de los límites de la zona donde se apliquen (Fernández-Getino et al., 2018).

1.2 Adaptación

La adaptación al cambio climático viene determinada por la necesidad de reducir los riesgos asociados a este cambio en todos los sectores (IPCC, 2014; Jia et al., 2019). Estos riesgos se entienden como el resultado de la exposición a diferentes accidentes o cambios del clima, en función de la vulnerabilidad de cada sociedad o sistema. La capacidad de adaptación determinará esta vulnerabilidad, y/o podrá reducir la exposición a diferentes fenómenos.

El sector agrícola es especialmente vulnerable, al depender en gran medida de las condiciones del clima (Iglesias et al., 2012), por lo que existe un interés creciente hacia el estudio de diferentes estrategias de adaptación (ver por ejemplo más adelante las iniciativas europeas en https://climate-adapt.eea.europa.eu/, o proyectos como Adaptaclima II (http://www.adaptaclima.eu/) o AgriAdapt (https://agriadapt.eu/).

De esta manera, las estrategias de adaptación desarrolladas a varios niveles, mencionan, de manera directa o indirecta, **aspectos relacionados con las características y la condición de los suelos agrícolas**, tanto en relación a la **vulnerabilidad de los agrosistemas**, como a su **capacidad de adaptación** a los cambios del clima presentes y futuros.

Por ejemplo, el propio IPCC expone en su último informe de síntesis (IPCC, 2014), que entre los riesgos clave en Europa, se incluyen la mayor demanda de agua y la reducción en su disponibilidad, entre otros por el regadío, y como prospectiva de adaptación, la adopción de estrategias de ahorro de agua que incluyen especies de cultivos y cambios de uso de la tierra. La evaluación de estos riesgos y de las potenciales medidas de adaptación **necesita considerar el recurso edáfico en relación a su papel en el ciclo del agua** en la agricultura.

Así, el **informe de impactos y vulnerabilidad de 2012 de la UE** (EEA, 2012) ya menciona estos aspectos (vulnerabilidad y necesidad de obtener información de calidad para identificar las medidas apropiadas de adaptación), y en particular, incluye **la relevancia del suelo** en tres puntos: su papel en la provisión de servicios ecosistémicos relacionados con la regulación del

clima; **la necesidad (y dificultad) de considerar indicadores de suelo** en relación a la mitigación y los efectos del cambio climático; y la **necesidad de establecer indicadores de suelo que permitan a los responsables políticos tomar medidas adecuadas de adaptación**.

El informe específico del IPCC dedicado a las estrategias de mitigación y adaptación relacionadas con el uso de la tierra (Cosgrove and Curtis 2018; Lead et al. 2018; Jia et al. 2019) indica, por un lado, que es **posible mejorar la adaptación y adaptabilidad de los agrosistemas a partir de estrategias de manejo del suelo**, y en particular del C orgánico del suelo, y por otro, que existen aún fuentes de incertidumbre importantes sobre las consecuencias (y el funcionamiento) de estas estrategias. Así, se describen, en relación al suelo, **cuatro acciones** con diferente potencial para la adaptación: el aumento del **contenido en C orgánico** (con un potencial alto para la mitigación también), el **control de la erosión**, de la **salinización** y de la **compactación**, estos dos últimos con un potencial más reducido. El **nivel de confianza** que se adjudica sin embargo a estas cuatro medidas en relación a la adaptación es **bajo**, por la **alta variabilidad** observada en la respuesta, y las **incertidumbres** existentes (Figura 1).

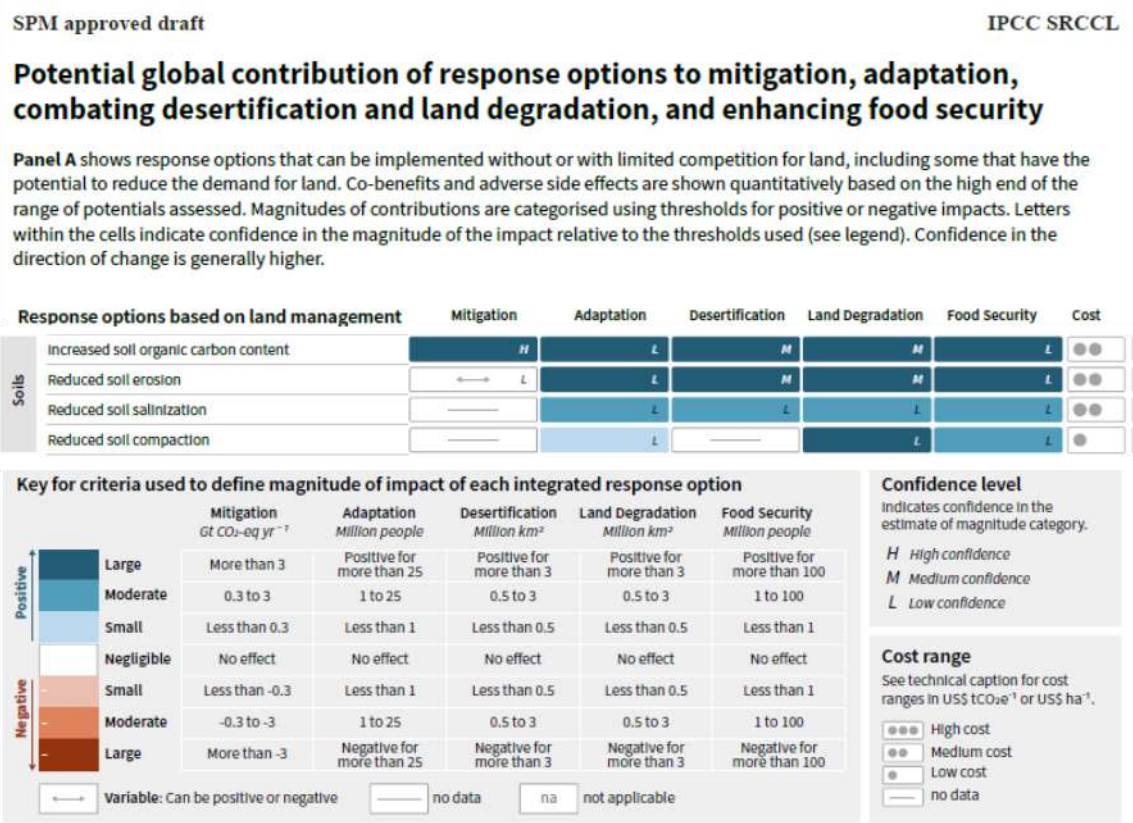


Figura 1 Contribución potencial de algunas opciones de respuesta para la mitigación, adaptación, reducción de la desertificación y la degradación de la tierra, y la seguridad alimentaria. Extracto de Odoemene (2019).

De las cuatro acciones descritas, el informe describe con especial relevancia la coyuntura de las relacionadas con **el C orgánico del suelo**, y plantea que algunos de los aspectos que aportan incertidumbre a las proyecciones de efectividad de algunas respuestas, y a la respuesta de los agrosistemas al cambio climático, incluyen la respuesta del sistema suelo-planta-atmósfera a los cambios del clima, su sensibilidad a la humedad y temperatura, la distribución del C orgánico en el perfil del suelo, la **relación con la fracción mineral** y su respuesta a los cambios en las entradas de C orgánico de las plantas (naturales o cultivadas).

En este contexto, la consideración del papel del suelo en estrategias directas de adaptación es variable, encontrándose en ocasiones de manera indirecta en relación a otras medidas y estrategias.

La Estrategia Europea de Adaptación al Cambio Climático se basa en tres pilares: (i) fomentar la actuación de los Estados miembros, (ii) desarrollar medidas a nivel de la UE para seguir promoviendo la adaptación en sectores vulnerables clave como la agricultura (*climate-proofing*), y (iii) la toma de decisiones informadas, abordando lagunas de conocimiento en materia de adaptación y el desarrollo de la Plataforma europea de adaptación al cambio climático (Climate-ADAPT, https://climate-adapt.eea.europa.eu/).

En relación al término "suelo", la plataforma Climate-ADAPT contiene, hasta la fecha (diciembre de 2019), información relativa a 16 publicaciones e informes, 4 portales de información, 2 indicadores, 4 herramientas, 36 proyectos de investigación, 17 opciones de adaptación, 28 casos de estudio y 2 organizaciones.

La Tabla 1-1 recoge un resumen de algunos de estos ítems, y su relación con propiedades y funciones del suelo identificables a partir de los descriptores incluidos en la plataforma.

Tabla 1-1 Resumen de ítems y su relación con las propiedades, información y otros aspectos relacionados con las funciones del suelo en el portal Climate-ADAPT de la UE.

Fuente: https://climate-adapt.eea.europa.eu/data-and-downloads?SearchableText=Soil#SearchableText=Soil&b_start=0

	Publicaciones	Portales	Indicadores	Herramientas	Opciones adaptación
Materia orgánica			1	1	1
Agua del suelo			1		7
Información de suelos	1	2		1	
Manejo de suelo	3		1	1	
Agroecología / Agroforestry	1	1			1
Cambio climático	4	1			
Adaptación	3				

En este contexto, los conceptos más recurrentes en relación al papel del suelo en la adaptación incluyen los relacionados con **el ciclo del agua**, como la mejora de la retención de agua en zonas agrícolas (https://climate-adapt.eea.europa.eu/metadata/adaptation-options/improved-water-retention-in-agricultural-areas), y con **la materia orgánica**. El informe de la FAO sobre agricultura climáticamente inteligente (*climate-smart*), también establece la relevancia de estos dos aspectos, indicando que el aumento del contenido en materia orgánica no debe considerarse únicamente desde la perspectiva de la mitigación, sino como una herramienta que **aumenta la resiliencia** de los agrosistemas y permite mantener los servicios ecosistémicos aportados por el suelo (FAO 2013).

El conocimiento sobre este papel es amplio, y ha generado gran interés por parte de las políticas de investigación en Europa en las últimas décadas. Sin embargo, la reciente evaluación de la implementación de esta estrategia (Comisión Europea, 2018. COM (2018) 738 final) reconoce que **existen aún lagunas de conocimiento sobre adaptación**, a pesar del muy positivo valor añadido aportado por las actividades de investigación e innovación de la UE desde 2013. Entre las áreas en las que se anima a pasar de la generación de conocimientos a su aplicación para la toma de decisiones en condiciones de incertidumbre se incluye **la agricultura en las regiones mediterráneas**.

Por ejemplo, en relación al apartado (iii) de la estrategia, existen incertidumbres en relación al funcionamiento de los suelos agrícolas en varios aspectos. En relación al almacenamiento de C orgánico en los suelos agrícolas, y de las políticas que pueden conducir a su manejo como estrategia de adaptación por su vinculación con la fertilidad química, física y biológica, y con su papel en el ciclo del agua, (Chenu et al. 2019) establecen limitaciones de conocimiento a dos niveles. Por un lado, en el **conocimiento de los mecanismos edáficos y de los agrosistemas, que permita explicar y modelizar los procesos de estabilización de materia orgánica** entre dos estados en equilibrio (ej. situación actual *vs.* situación futura). Por otro lado, las mayores dificultades encontradas a la hora de realizar predicciones a la escala local, incluyen **el conocimiento del contenido inicial de C del suelo**, la dificultad para **ajustar adecuadamente el tamaño de los diferentes pools de C orgánico**, la **estimación de las entradas reales de C** orgánico al suelo en las diferentes estrategias propuestas, la poca consideración que se realiza de la **tipología de suelo**, el impacto de diferentes manejos en las **tasas de pérdida de C orgánico** y la falta de consideración de los **horizontes profundos** del suelo.

Un esfuerzo reciente en intentar avanzar hacia un conocimiento más avanzado e integral de los mecanismos y factores que determinan el almacenamiento de materia orgánica en los suelos de Europa es el grupo focal (*Focus Group 26: Moving from source to sink in arable farming*), constituido recientemente dentro de EIP-AGRI. A pesar de que el propio apelativo del grupo indica que en su creación se considera el papel del suelo agrícola en la mitigación, la realidad es que el almacenamiento de materia orgánica, como se ha visto, es también una estrategia crucial en las técnicas de adaptación. Entre los aspectos clave en los que ha intentado ahondar el grupo se encuentran: la necesidad de desarrollar criterios de adaptación local de las posibles estrategias desarrolladas, el papel de la agricultura de conservación, las técnicas eficaces de retorno de la biomasa de los cultivos al suelo, el uso de enmiendas orgánicas, el desarrollo de herramientas para juzgar la eficacia de diferentes sistemas agrícolas en el almacenamiento efectivo de carbono y, la identificación de indicadores del nivel

de C orgánico en los suelos, y sus consecuencias en relación a otras propiedades del suelo. La importancia del factor suelo, y de las condiciones locales, en estas medidas es relevante (Costantini et al. 2020).

En línea con los expuesto hasta ahora, entre las medidas, actividades y líneas de trabajo para la evaluación de impactos, vulnerabilidad y adaptación relativas al sector agrícola que se llevarán a cabo en el desarrollo dentro del **Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático** (PNACC), pueden señalarse las siguientes: modificaciones en las zonas agroclimáticas, desarrollo de modelos de simulación de los ciclos de cultivo (incluyendo balances de agua y nutrientes), desarrollo de modelos de comportamiento de agentes patógenos, evaluación de las demandas de riego, identificación de estrategias de adaptación al cambio climático a corto y largo plazo (en base a estrategias sencillas tales como prácticas agrícolas relacionadas con cambios en las fechas de siembra, rotaciones de cultivos, las variedades utilizadas, etc.), y otras medidas en el sector ganadero (MAPAMA, 2006).

En el marco del proyecto LIFE-IP NAdapta-CC, se ha intentado considerar estos aspectos a diferentes niveles: en la determinación del sistema de diagnóstico de los suelos de Navarra (que incluye indicadores relacionados con la tipología de suelo), en la selección de las prácticas propuestas para su seguimiento (que incluyen manejos bien caracterizados) y en los criterios de selección de las parcelas de la red de control (que intentan abarcar información del suelo, de la situación de partida, y de la evolución en tiempo real de este parámetro).

Muchas de las líneas anteriores están directamente relacionadas con el conocimiento del suelo, y de su manejo agrícola, por ejemplo, en relación a la retención y movimiento del agua. Además, el PNACC señala las principales amenazas del cambio climático en los suelos españoles, destacando la degradación asociada a la desertificación, la pérdida de C orgánico, que se reconoce afectada por las características propias del suelo y sus usos, la erosión y la pérdida de fertilidad en suelos de regadío por salinización.

Las líneas de actuación para la adaptación incluyen: la cartografía de las zonas más vulnerables, la modelización erosión en diferentes escenarios, la evaluación de reforestación y la agricultura orientada a la conservación del suelo en el contenido de C orgánico y la mejora de la fertilidad, y la monitorización de las tierras degradadas y la desertificación en relación a las propiedades anteriores.

Estos aspectos se consideran en los sucesivos planes de trabajo, así como en los informes de impacto, vulnerabilidad y adaptación de los diferentes sectores, que reconocen la necesidad de realización de estudios de análisis de impactos y medidas de adaptación específicas para determinadas regiones, es decir, considerando las condiciones regionales y locales (Medina Martín, 2015; MAPAMA, 2016).

En particular, la **Hoja de Ruta de Cambio Climático en Navarra (HCCN-KLINa)** (HCCN 2017-2050; Gobierno de Navarra, 2017) contempla medidas de adaptación para el sector agrario como el refuerzo de los sistemas de monitoreo y seguimiento, el uso eficiente de los recursos

hídricos, la investigación de cultivos más tolerantes a la sequía en la agricultura de secano, y la mejora en las prácticas agrarias en relación con los suelos y prevención de la erosión.

En este contexto, nació el proyecto **LIFE-IP NAdapta-CC**, que tiene como objetivo aumentar la resiliencia de Navarra contra el cambio climático. Este proyecto aspira a integrar las diferentes políticas sectoriales, de manera que se incorpore la lucha contra cambio climático en su programación y proyectos. Es por tanto un proyecto regional, que intenta avanzar en los diferentes sectores de manera coordinada. En relación a la agricultura, el proyecto desarrolla una serie de acciones de adaptación, entre la que incluye una acción inicial de con el objetivo de implementar técnicas innovadoras para la adaptación al cambio climático de los suelos agrícolas, el uso de agua de riego y los pastos, que permitan avanzar hacia manejos adecuados para garantizar la calidad de la agricultura y la salud animal.

La aproximación metodológica para este trabajo se realiza siguiendo la idea de que las evaluaciones de vulnerabilidad miren más allá de la exposición climática y la sensibilidad económica, para enfatizar oportunidades que implementen prácticas de adaptación que desarrollen la resiliencia de los agrosistemas, minimizando la dependencia excesiva en respuestas a corto plazo (Steiner et al. 2018). Para ello, se considera el factor suelo en varios aspectos. En primer lugar, como criterio esencial para la evaluación de usos y vulnerabilidades de los agrosistemas (presente informe).

Además, se propone la incorporación de indicadores edáficos de vulnerabilidad y de resiliencia, que sirvan para encuadrar las posibles medidas de adaptación, y que se usarán en la monitorización de más de 150 parcelas agrícolas en las diferentes zonas. Finalmente, se plantea realizar una propuesta de evaluación de tres estrategias de adaptación de entre las señaladas en el PNACC (manejo de la materia orgánica, agricultura de conservación y rotaciones), así como la gestión innovadora de pastos, mediante indicadores de vulnerabilidad y resiliencia ligados a las características y usos de los suelos.

En resumen, dentro de la acción C.4.1, es necesario realizar un diagnóstico de las características de los suelos de Navarra desde el punto de vista de su vulnerabilidad y potencial de respuesta a las medidas de adaptación.

Los siguientes apartados de este documento describen los criterios y el proceso utilizados para este trabajo.

2. ZONIFICACIÓN

2.1 Antecedentes

La necesidad de realizar una zonificación del territorio de Navarra en el marco de la acción C.4.1 del Proyecto LIFE-IP NAdapta-CC (*Optimización de la adaptabilidad de los agrosistemas al cambio climático mediante estrategias de manejo de la materia orgánica, de los cultivos y del suelo*), y más en general, de la acción C.4 (Agricultura), queda determinada por los aspectos expuestos en el punto 1.2.

De lo allí expuesto se puede deducir que, para la evaluación de la vulnerabilidad y resiliencia de los suelos agrícolas, es necesario considerar que sus características intrínsecas o genéticas presentan una variabilidad espacial. Esta variabilidad no es ajena a la variabilidad del clima, la geología, la geomorfología, y la vegetación natural. Además, los usos actuales y pasados del suelo pueden modificar algunas de estas características.

Considerando que este trabajo se realiza en el contexto de un proyecto de adaptación al cambio climático, se han considerado los siguientes aspectos a la hora de avanzar hacia una zonificación que permita evaluar de manera sintética los suelos de Navarra en función de parámetros relacionados con la vulnerabilidad y la adaptabilidad al cambio climático:

(i) La **relación directa de la variabilidad del suelo con otras características del territorio**.

(ii) La **información existente sobre las variaciones** ya ocurridas en el clima de Navarra en el último siglo, como indicadoras de la evolución esperable, así como las predicciones aceptadas en LIFE-IP NAdapta-CC, y, en línea con otras acciones del Proyecto, la estimación de los factores edáficos potencialmente más adecuados para evaluar el efecto de estos cambios en los agrosistemas de la región, según el criterio de cadenas de impacto aceptado para el sector Agricultura (C.4) (ver más adelante epígrafe 2.2.).

(iii) **Las medidas de adaptación consideradas en el marco del proyecto**, y sus consecuencias potenciales en la calidad de los suelos agrícolas, especialmente en relación a indicadores de vulnerabilidad y adaptabilidad a los cambios citados más arriba.

Considerando estos tres aspectos, se ha realizado un proceso de determinación de zonas homogéneas que consideran aspectos directamente relacionados con el recurso edáfico (series de vegetación), y que correspondan con criterios de zonificaciones agroclimáticas para, en un segundo paso, analizar la variabilidad natural de los suelos existentes dentro de cada una de ellas (criterio i).

En este diagnóstico, se consideran especialmente las características del suelo relacionadas con su comportamiento frente a los "drivers climáticos" considerados en este proyecto (cadenas de impacto en acción C1.1, criterio ii), y las relacionadas con los cambios que el manejo según los sistemas considerados en el proyecto (criterio iii).

Así, se han escogido como "nivel de entrada" las regiones bioclimáticas y las series de vegetación, por ser la expresión (especialmente las segundas) de la distribución geográfica de las condiciones para el desarrollo de la vegetación. En las condiciones de Navarra, los dos aspectos más determinantes en este sentido son el clima y la tipología de suelos (especialmente en relación a la disponibilidad de agua para las plantas (ver más adelante)). Como segundo nivel, se ha cotejado la información existente en relación al clima para la agricultura y otras características particulares que puedan tener relación con los criterios clima y suelo.

Una vez determinadas las zonas de comportamiento homogéneo según estos criterios, se desarrolla más adelante su caracterización en relación a los principales elementos del medio, y en particular, el suelo.

2.1.1 Estudio de la variación de indicadores climáticos en Navarra

El estudio elaborado por la **Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) en el marco de la Hoja de Ruta Cambio Climático de Navarra 2017-2030-2050 (HCCN 2017-2030-2050)** (AMEIT, 2017) permitió conocer la evolución estadística observada durante las dos mitades del siglo XX, en relación a dos de los elementos del clima más relevantes para la agricultura (temperatura y precipitaciones), a partir de las series de datos generadas en algunas estaciones meteorológicas existentes en la Navarra. En particular, se describe en él la evolución de distintos indicadores climáticos como la media mensual de las temperaturas máximas y mínimas, la distribución temporal de la precipitación, o la variación de otros indicadores como el número de días de helada, número de noches y días cálidos y la duración de las olas de calor en el periodo 1954-2016.

En relación a la **evolución de las temperaturas**, el estudio concluye que, en el periodo estudiado:

- Se observa un aumento generalizado y similar de las temperaturas medias máximas (+0.150ºC/década) y mínimas (+0.147ºC/década). Esta tendencia de calentamiento es coincidente con estudios realizados en regiones vecinas y en Europa Occidental.
- La distribución espacial de la tendencia no es homogénea: se observa un mayor calentamiento de las temperaturas máximas en la zona norte de Navarra (especialmente la vertiente cantábrica, valles pirenaicos, valles al sur de la divisoria cantábrico-mediterránea y cuenca de Pamplona). El comportamiento de las mínimas es más homogéneo espacialmente, con un gradiente norte-sur más débil que en el caso de las máximas.
- En particular, en la Cuenca de Pamplona se ha observado un descenso del número de días de helada desde la década de los 90, un aumento de días cálidos a partir de 1980, y registros más frecuentes de olas de calor.

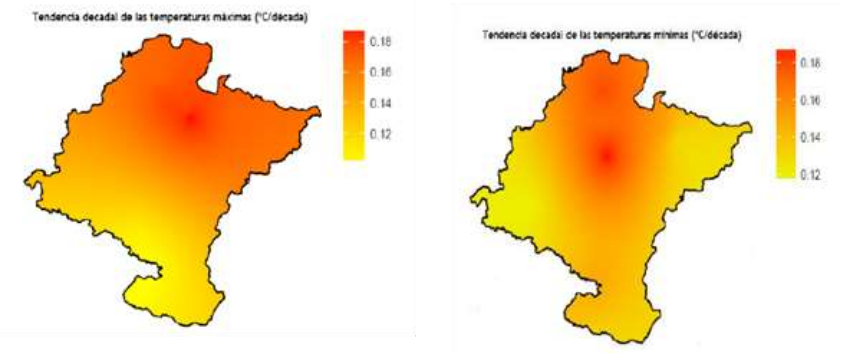


Figura 2 Tendencia decadal de las temperaturas máximas (izda). y mínimas (dcha.), en ºC/década, entre 1954 y 2016 en Navarra.

Fuente: Evolución de indicadores climáticos en Navarra (AEMET, 2017).

En relación a las **series de precipitación**, se ha observado, en el periodo 1954-2016:

- Que las precipitaciones se mantienen aproximadamente constantes o han disminuido ligeramente (5-10%).
- La distribución anual de las precipitaciones ha variado entre los periodos 1954-1983 y 1987-2016: disminuye la precipitación en el trimestre invernal sobre todo en las estaciones de la vertiente cantábrica y Ribera, las precipitaciones otoñales no varían, pero se convierten en las dominantes frente a las invernales en el pirineo oriental de Navarra, y disminuye la precipitación estival en la vertiente cantábrica y el Pirineo.
- La variabilidad interanual ha aumentado en invierno, y se ha reducido en otoño, especialmente en el sur de Navarra.

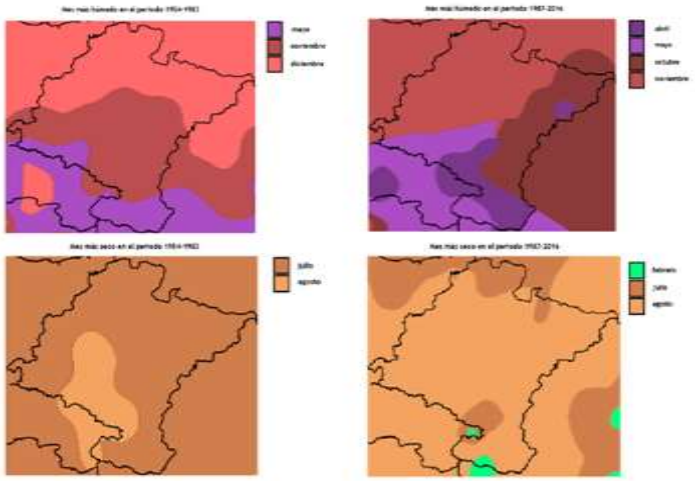


Figura 3 Distribución espacial del mes más húmedo (arriba) y el mes más seco (abajo), en los periodos 1954-1983 (izda.) y 1987-2016 (dcha.).

Fuente: Evolución de indicadores climáticos en Navarra (AEMET, 2017).

Respecto a **las predicciones** para la evolución del clima en Navarra, los modelos propuestos por AEMET, en la plataforma AdapteCCa[2] indican, de media en función de los escenarios considerados, para la Comunidad Foral de Navarra un aumento de la temperatura máxima de 1,5-2ºC, con una aumento más acusado en el norte y el sur de la Comunidad, y un cambio en la distribución de las precipitaciones para el escenario más lejano considerado (2071-2100).

Tras este primer estudio, y en el marco del presente proyecto LIFE-IP NAdapta-CC, se ha elaborado un **ESTUDIO DE VARIABILIDAD CLIMÁTICA** en Navarra (entregable 6.2.1 de la acción 6.2), que contempla tanto la distribución geográfica de los principales elementos del clima, y algunos índices e indicadores derivados de ellos, registrados en el pasado y en diferentes escenarios de proyección en el futuro. Este informe *sobre las áreas climáticas de Navarra y las condiciones generales del clima previsto en Navarra* ha permitido complementar el estudio anterior en relación a las variaciones previstas según el escenario RCP 8.5 definido por el IPCC. Al comparar estas predicciones con el periodo de referencia 1961-1990, y proponer tanto datos correspondientes a 6 estaciones seleccionadas en la red de Navarra como a las predicciones en rejilla propuestas por AdapteCCa, las proyecciones del estudio ofrecen una perspectiva de gran relevancia por su concreción en la distribución geográfica de estos parámetros.

Por su relevancia en las cadenas de impacto asociadas a la acción C4 (agricultura) en este proyecto, se destacan las referidas a las **temperaturas, los índices de aridez, y los balances hídricos** en el suelo según la metodología Thornthwaite para una reserva máxima de 200 mm.

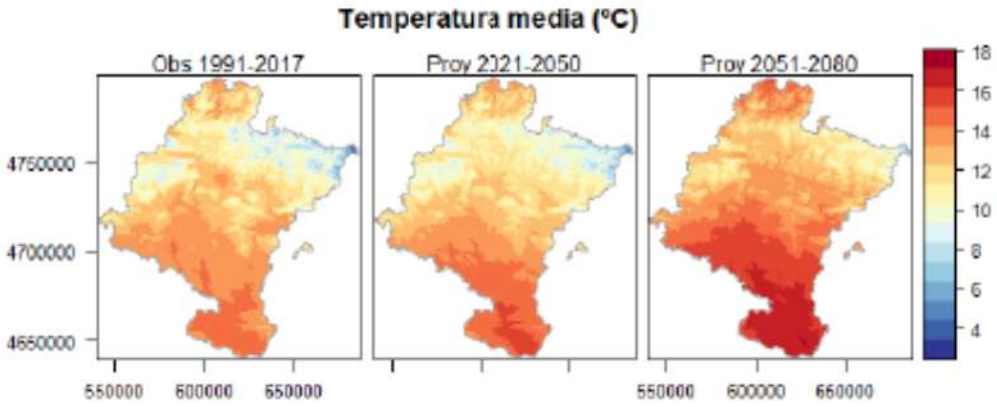


Figura 4 Mapas de temperatura media del periodo normal observado 1991-2017 y proyectados 2021-2050, 2051-2080.

Fuente: Estudio de variabilidad climática en Navarra (entregable 6.2.1_v1 de la acción 6.2).

[2] http://escenarios.adaptecca.es

En relación a las primeras, el estudio determina, en concordancia con el estudio anteriormente citado de AEMET, según los basados en estaciones, la diferencia entre el periodo 1991-2017 y 2021-2050 se acerca a 1ºC, y se acrecentaría notablemente respecto a 2051-2080, al ser ésta de unos 2.5ºC.

Respecto a la aridez, el estudio ofrece resultados de datos del pasado y de proyecciones para 2021-2050 y 2050-2080 de varios índices. En general, se observa una interferencia de la topografía, y una predicción hacia valores de mayor aridez en prácticamente todo el territorio en el periodo 2051-2080.

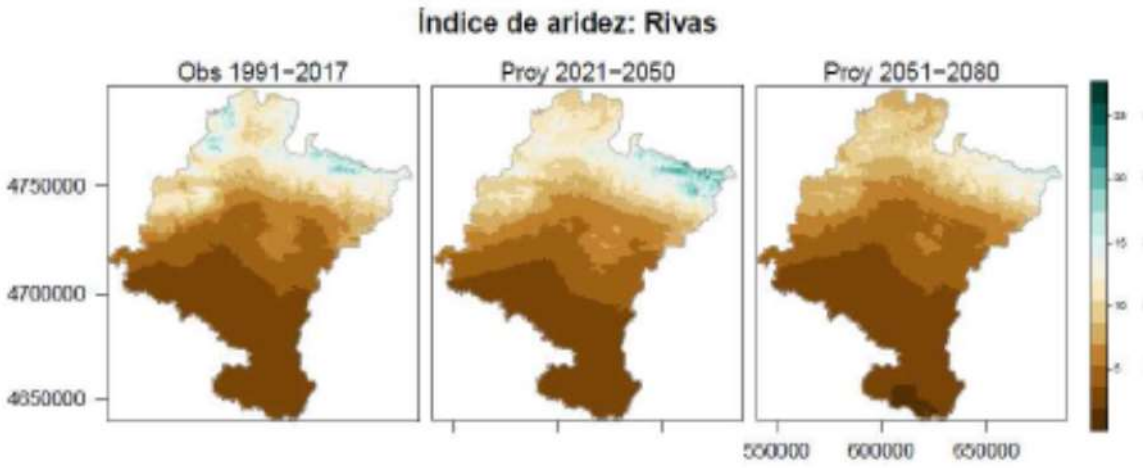


Figura 5 Mapas del índice de aridez de Rivas-Martínez del periodo normal observado 1991-2017 y proyectados 2021-2050, 2051-2080.

Fuente: Estudio de variabilidad climática en Navarra (entregable 6.2.1_v1 de la acción 6.2).

Estos índices se calculan generalmente a partir de datos de temperatura y precipitaciones, por lo que resultan de interés en climatología, pero no representan necesariamente las verdaderas limitaciones de agua para el desarrollo de la vegetación, al no considerar las características del suelo y su capacidad de retención de agua. El estudio de balances hídricos puede aportar información más pertinente en estos casos, aunque es necesario conocer o estimar la capacidad máxima de cada suelo de almacenar agua (reserva máxima) para realizar estimaciones cercanas.

En ausencia de esta información, en el estudio se realizaron balances hídricos para algunas estaciones de referencia para una reserva supuesta de 200 mm. En estos balances se puede observar una tendencia clara hacia una prolongación del periodo de déficit de agua (en Pamplona o Buñuel), o el comienzo de aparición de este déficit en lugares donde hasta la fecha no se llegaban a dar (Arizkun).

Finalmente, otra información relevante en relación a las variaciones esperables del clima y sus efectos en la agricultura, es la relativa a la intensidad y **erosividad de las precipitaciones**. Si bien no existen predicciones particulares para esta región, algunos estudios realizados a nivel europeo permiten observar cambios en el tiempo, según los modelos considerados (Panagos et al., 2012; Panagos et al.., 2017).

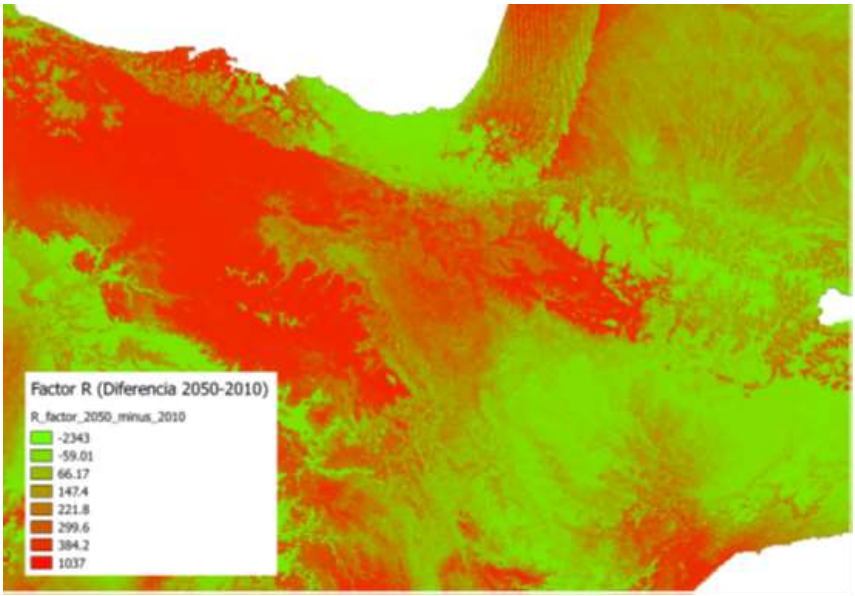


Figura 6 Distribución de la variación del factor R de erosividad de las precipitaciones observado en 2010 y modelizado para 2050 en el Valle del Ebro.

Fuente: Elaboración propia a partir de datos en Panagos et al., 2012, Panagos et al., 217 y ESDAC (https://esdac.jrc.ec.europa.eu/themes/rainfall-erosivity-europe).

En el marco de este proyecto, y en particular de las acciones C.4 y C.4.1., la evolución observada y esperada de temperaturas y precipitaciones en Navarra deben considerarse, junto a las predicciones aceptadas para el proyecto, al considerar los efectos esperables del cambio climático en relación a los agrosistemas de Navarra. **En el marco concreto de los indicadores edáficos, al estar estos parámetros directamente relacionados con el balance hídrico en el suelo (precipitación y evapotranspiración), las propiedades de los suelos que modulan estos balances parecen especialmente relevantes**. En el apartado 2.1.2 se detalla qué variaciones de estas propiedades se consideran específicamente como "drivers" de cambio en relación a la agricultura.

El desarrollo, en otras acciones del proyecto (acción 6.2), de nuevas caracterizaciones del clima en Navarra, y de su potencial evolución en el futuro, permitirá determinar, en la siguiente fase del proyecto, la necesidad de reevaluar estas predicciones, y en el marco de esta acción, sus posibles consecuencias en los agrosistemas navarros.

2.1.2 Cadenas de impacto en LIFE-IP NAdapta-CC

En el marco del proyecto LIFE-IP NAdapta-CC, se ha realizado un esfuerzo, reflejado en el desarrollo de la acción C1.1 (Sistema de indicadores de seguimiento de los efectos del cambio climático en Navarra), por parte de la Agencia Navarra del Territorio y la Sostenibilidad LURSAREA (NASUVINSA), con el objeto de diseñar y desarrollar un cuadro de mando para evaluar el impacto territorial de los efectos del cambio climático en Navarra.

Según su objetivo declarado, este cuadro de mando mostrará la situación y evolución de Navarra en relación al cambio climático y permitirá la identificación del efecto producido por las soluciones y transformaciones adaptativas implementadas dentro del marco del proyecto.

Su elaboración parte de la evaluación y gestión de los riesgos del cambio climático que define el IPCC: "El riesgo de los impactos conexos al clima se deriva de la interacción de los peligros conexos al clima (incluidos episodios y tendencias peligrosos) con la vulnerabilidad y la exposición de los sistemas humanos y naturales. Los cambios en el sistema climático y los procesos socioeconómicos, incluidas la adaptación y mitigación, son impulsores de peligros, exposición y vulnerabilidad".

En este contexto, el análisis del riesgo asociado a cada área temática se realiza a partir de **cadenas de impacto** asociadas a factores de riesgo del cambio climático, que se relacionan con el análisis de las diferentes variables climáticas. Estas cadenas de impacto se dividen en 6 subapartados que coinciden con los sectores del proyecto (gestión adaptativa del medio local, agua, bosques, agricultura, salud e infraestructuras y ordenación del territorio).

Figura 7 Mapa conceptual basado en cadenas de impacto.

Fuente: Elaboración propia de Lursarea (NASUVINSA) a partir de IPCC, entregable acción C4.1.

Así, a la hora de monitorizar los efectos del cambio climático dentro del ámbito del proyecto LIFE-IP NAdapta-CC, y en concreto de la acción C1.1. (Sistema de indicadores de seguimiento de los efectos del cambio climático en Navarra), se ha organizado el sistema de indicadores en torno a cadenas de impacto asociadas a distintas amenazas climáticas que afectan a cada una de las áreas del proyecto.

Para cada una de estas secciones, Lursarea (NASUVINSA) ha realizado un diagnóstico de los principales "peligros" (*Hazards*) recogidos en el Plan Nacional del Cambio Climático, la Hoja de Ruta de Cambio Climático en Navarra, en relación a las diferentes acciones del proyecto. En particular, para la acción C4 (Agricultura), se han señalado como principales peligros, los siguientes:

- Incremento de la frecuencia e intensidad de inundación fluvial.
- Aumento de la frecuencia e intensidad de sequía.
- Aumento de la frecuencia e intensidad de eventos de precipitación extrema.
- Aumento de la frecuencia e intensidad de incendios forestales.
- Pérdida de biodiversidad.
- Cambios en distribución y magnitud de plagas y enfermedades.
- Cambios fenológicos y ciclo vital.
- Incremento de erosión suelo.
- Riesgo de desertificación.
- Pérdida de productividad agrícola / forestal.
- Enfermedades de transmisión vectorial.

El desarrollo de **cadenas de impacto individualizadas en el sector agrícola no es sencillo**, ya que, en muchos casos, no es posible separar los distintos factores de riesgo asociados al cambio climático en cadenas de impacto separadas ya que distintos *drivers* ocasionan diversos impactos, estrechamente relacionados entre sí en muchos casos.

Es por ello que en el caso de la acción C4 (Agricultura), se ha optado por seguir un modelo similar al desarrollado en la Estrategia de Cambio Climático 2050 del País Vasco (Eusko Jaurlaritza - Gobierno Vasco, 2015). Así, el marco de trabajo para el estudio de los riesgos y medidas de adaptación al cambio climático en el sector agrario de Navarra, según este documento, queda resumido en la Figura 8.

Según este esquema, los impactos intermedios producidos por los drivers climáticos producen a su vez una serie de impactos principales, definidos con letras en la figura, que afectan a una serie de receptores. La figura recoge que los *drivers* climáticos considerados en este ámbito en relación a los *principales impactos*, son (de los de la lista anterior), los siguientes:

- Aumento gradual de la temperatura y olas de calor.
- Cambio en los patrones de precipitación, eventos extremos y granizo.

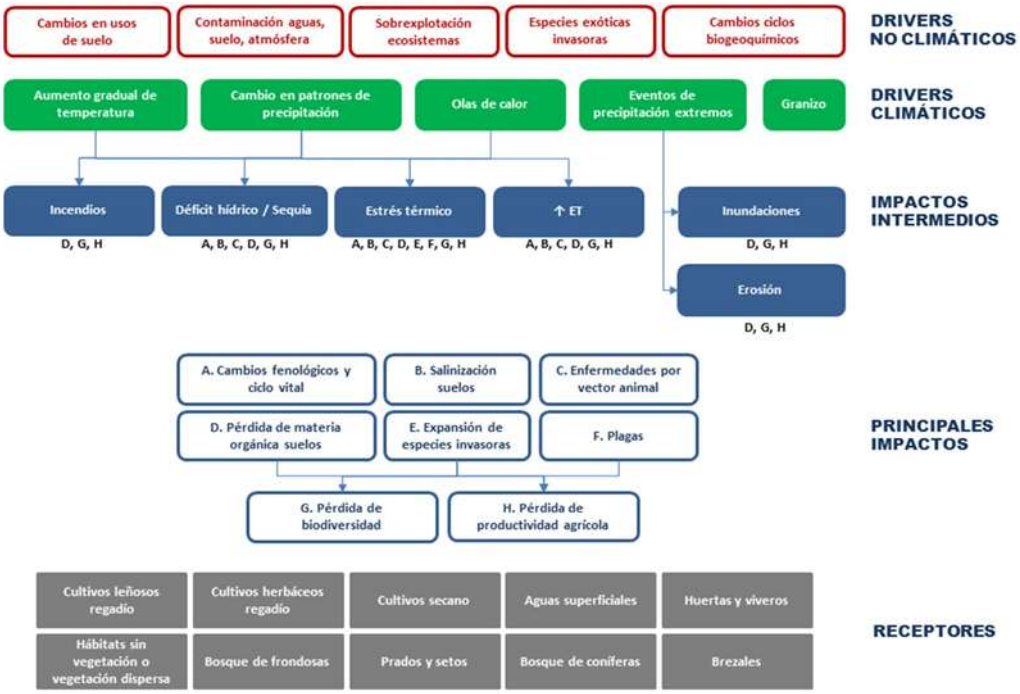


Figura 8 Mapa de peligros, impactos y receptores en el sector agrario según la acción C1.1 del proyecto LIFE-IP NAdapta-CC.

Fuente: Elaboración propia por Lursarea (NASUVINSA) a partir de Estrategia de Cambio Climático 2050 del País Vasco (Eusko Jaurlaritza-Gobierno Vasco, 2015)).

En relación a la acción C4.1., se consideran, según lo visto hasta ahora, especialmente relevantes los impactos relacionados con los agrosistemas desde el punto de vista del recurso suelo. Estos son los correspondientes a las letras B (**salinización**), D (**pérdida de materia orgánica de suelos**) y H (**pérdida de productividad agrícola**).

Según puede observarse en el esquema, estos impactos están relacionados con algunos impactos intermedios. Por su relevancia al vincularse a los tres impactos principales, destacan el **déficit hídrico/sequía**, el **estrés térmico** y el **aumento de la evapotranspiración**.

Relacionados con la pérdida de materia orgánica (D) y de productividad (H) aparecen los incendios, las inundaciones y **la erosión**, vinculada directamente con los eventos de precipitación extremos.

Estos impactos coinciden, en líneas generales, con los cambios observados y esperados en el clima de Navarra, según se ha descrito en el apartado anterior.

Estos serán, por lo tanto, los **principales impactos considerados al determinar la vulnerabilidad, y el potencial de adaptación de los agrosistemas dentro de la acción C4.1.**

2.1.3 Medidas contempladas en el marco del proyecto LIFE-IP NAdapta-CC

La acción C4.1 (*Optimización de la adaptabilidad de los agrosistemas al cambio climático mediante estrategias de manejo de la materia orgánica, de los cultivos y del suelo*) del proyecto LIFE-IP NAdapta-CC tiene como objetivo general aumentar la resiliencia de los agrosistemas navarros, en especial en relación a uno de los factores más relevantes de producción: los suelos agrícolas.

En este contexto, el propósito de la acción es aumentar la adaptabilidad de los agrosistemas mediante el uso de estrategias que permitan mejorar su resiliencia, acercándose a su *estado óptimo*, considerando tanto el estado del suelo como la tipología de cultivos. En particular, la acción, que se alinea con las estrategias de adaptación propuestas en la Hoja de Ruta de Cambio Climático de Navarra (la mejora en las prácticas agrarias en relación con los suelos y prevención de la erosión), intenta avanzar en esta adaptación en tres direcciones: **manejo de fuentes exógenas de materia orgánica, diversificación y rotación de cultivos, técnicas de agricultura de conservación**. Se añaden a éstas algunas estrategias específicas para el manejo de pastos.

Dentro de la acción C4.1, la subacción 2 (*Demostración de buenas prácticas para mejorar la resiliencia del suelo*), incluye el desarrollo de **ensayos de largo plazo** de aplicación de diferentes materiales orgánicos, de rotaciones en sistemas de cereal de secano, y de sistemas de laboreo de conservación.

Estas acciones corresponden, y tienen el objetivo de contribuir a responder, a los grandes ejes en relación a la adaptación de la agricultura al cambio climático derivados de los planes europeos y nacionales, además de la Hoja de Ruta de Cambio Climático de Navarra. En este proyecto, son la base para el estudio de su efectividad en relación a la adaptabilidad, tanto a nivel del comportamiento de los cultivos, como del suelo. El seguimiento de estas acciones en relación a la calidad del suelo, junto con la **evaluación de las demás parcelas de la red seleccionada con este fin** (y que contempla en gran medida los efectos de acciones similares en diferentes zonas) servirá para calibrar los indicadores determinados en esta primera subacción de diagnóstico.

2.2 Información disponible

Para la realización de la zonificación se han utilizado los siguientes insumos como referencia:

- Cartografía de vegetación potencial o de series de vegetación de Navarra a escala 1:25.000:
  - Mapa de vegetación potencial de Navarra 1:25.000 http://www.cfnavarra.es/agricultura/informacion_agraria/mapacultivos/htm/mapa.htm.
  - Mapa de Biogeografía (sectores y subsectores) de Navarra http://www.cfnavarra.es/agricultura/informacion_agraria/mapacultivos/htm/biogeografia.htm.
  - Manual de Hábitats de Navarra (PERALTA & al. 2009).
- Informaciones climáticas y agroclimáticas:
  - Clasificación de Papadakis para Navarra http://meteo.navarra.es/definiciones/papadakis.cfm.
  - Clasificación agroclimática correspondiente a las necesidades del trigo (secano) http://www.genvce.org/.
- Características del paisaje y planes de ordenación del territorio:
  - El Atlas de los Paisajes de España.
- Información cartográfica de suelos en Navarra.

En Navarra desde hace años se hizo un esfuerzo en realizar cartografía edafológica: son dos principalmente los trabajos realizados:

- Por un lado, la cartografía de suelos escala 1:50.000 realizada entre los años 1982 y 1992. El mapa cubre todo el territorio navarro, y se realizaron 171 observaciones.

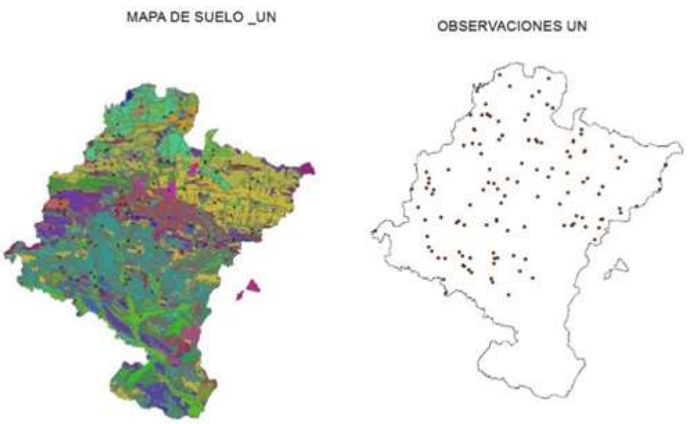


Figura 9 Mapa de suelo 1:50.000 y observaciones realizadas.

- Por otro lado, el Departamento de Agricultura, Ganadería y Alimentación viene realizando desde 1981 el estudio de los suelos a escala el 1:25.000. Actualmente se tiene la información con leyenda única del 24% de la superficie de Navarra.

Junto al mapa existe un **banco de suelos** con 16.481 observaciones.

Los objetivos principales de este trabajo realizado por el Gobierno de Navarra son inventariar y evaluar los suelos de Navarra por ser uno de sus recursos naturales básicos, ya que esta información es de gran interés para la planificación, el diseño y seguimiento de los planes, proyectos y actividades relacionadas con el uso y el manejo del territorio.

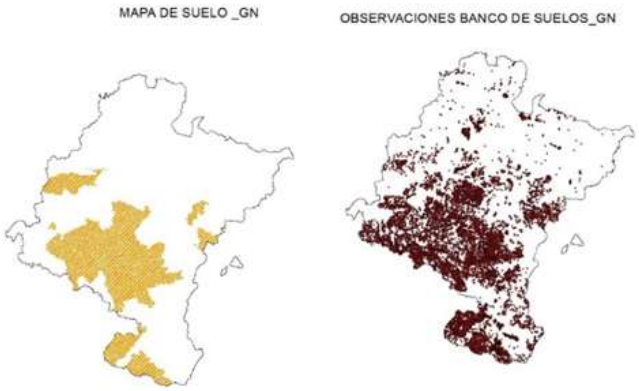


Figura 10 Mapa de suelo 1:25.000 y observaciones realizadas.

2.3 Desarrollo de la zonificación

2.3.1 Zonas y subzonas biogeoclimáticas y series de vegetación

La biogeografía es la ciencia que estudia la distribución de especies, comunidades, hábitats, biocenosis y ecosistemas naturales en la Tierra, así como las relaciones entre ellos. Tiene en cuenta las áreas de distribución de taxones y sintaxis (corología), además de información de otras ciencias naturales (geografía, botánica, zoología, ciencias del suelo, bioclimatología, geología, etc.), intentando establecer **unidades biogeográficas**.

Figura 11 Regiones biogeográficas de Navarra.

Fuente: Manual de Hábitats de Navarra (Peralta et al., 2013).

Las **unidades biogeográficas** comprenden territorios que albergan especies y comunidades vegetales propias, y por lo tanto están relacionadas con factores ecológicos e históricos del medio. Como plantea el *Manual de hábitats de Navarra* (Peralta et al. 2013), estas unidades se organizan de modo jerárquico: reino, región, provincia, sector y subsector.

Según este manual, Navarra divide su territorio entre dos grandes regiones biogeográficas, la Eurosiberiana y la Mediterránea, caracterizadas cada una por la flora, la vegetación y el clima.

- La **región Mediterránea** se caracteriza por un clima mediterráneo, con un período de sequía estival; especies típicamente mediterráneas son la carrasca (*Quercus rotundifolia*) o la coscoja (*Q. coccifera*), que forman respectivamente carrascales y cascajares.

- En la **región Eurosiberiana** no hay sequía estival o está atenuada; especies eurosiberianas son el haya (*Fagus sylvatica*) o el roble peloso (*Quercus pubescens*), que forman hayedos y robledales de roble peloso.

Según se establece en el Mapa de Vegetación Potencial de Navarra 1:25.000 (http://www.cfnavarra.es/agricultura/informacion_agraria/mapacultivos/htm/biogeografia.htm), estas regiones se pueden dividir en **sectores y subsectores**, que tienen especial relevancia en las zonas de transición entre regiones, donde los cambios pueden ser graduales. En la Figura 12 se definen las unidades biogeográficas o bioregiones presentes en las dos regiones biogeográficas de Navarra, junto a los tipos de vegetación que los caracterizan.

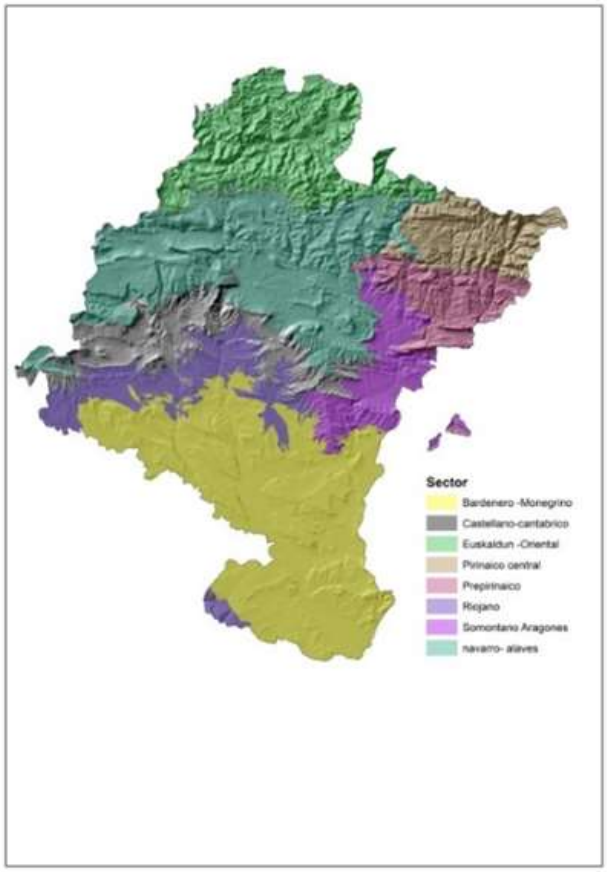


Figura 12 Unidades biogeográficas o bioregiones en Navarra..

Fuente: Elaboración propia a partir de Mapa de Vegetación Potencial de Navarra 1:25000.

Estas unidades son:

- Sector Cántabro-Euskaldun.
    - Subsector Euskaldun oriental (fresnedas cantábricas).
    - Subsector Navarro –Alavés (robledales de roble pedunculado neutrófilos).
- Sector pirenaico central (hayedo-abetales, abetales, pinares de pino negro, pinares de pino royo.
- Sector Prepirinaico.
- Sector Bardenero (Monegrino matorrales de asnallo, matorrales de sosa).
- Sector Riojano (carrascales y tomillares riojanos).
- Sector Castellano–Cantábrico (carrascales, quejigales y matorrales de Otabera castellano-cantábricos).
- Sector Somontano-Aragonés (quejigales y tomillares somontano-aragoneses).

Tras identificar las especies vegetales características de cada región, se determina que existe una coherencia entre las unidades biogeográficas planteadas, y las series de vegetación potencial de Navarra, tal y como aparecen en la Figura 13. Esto es así puesto que, según se define en el Mapa de Vegetación Potencial de Navarra 1:25.000, el concepto de serie de vegetación integra información tanto de la vegetación potencial como de la actual, y permite cartografiar territorios ecológicamente homogéneos.

Así, cada serie se relaciona con unas condiciones determinadas de clima, suelo, y relieve, y en ocasiones, de manejo tradicional, de manera que puede suponerse que en territorios con una vegetación similar las características ecológicas serán semejantes. **Por ello, la cartografía de series de vegetación puede ser utilizada como un elemento integrador de información de los rasgos ecológicos del territorio.**

En este trabajo se plantea, por lo tanto, **utilizar estas unidades biogeográficas como punto de partida para la zonificación necesaria para el diagnóstico de los recursos edáficos**. Considerando la relación existente entre las series de vegetación del territorio y sus potencialidades y limitaciones en los factores abióticos para el desarrollo de las plantas, esta aproximación parece adecuada para entender más adelante las tipologías de suelos asociados a cada una de ellas.

Además, el establecimiento de esta zonificación previa permite realizar un análisis comparativo de cada una de las zonas con las características de los factores abióticos relacionados con la génesis y la conservación del suelo, que permitan más adelante realizar un diagnóstico asociado a las cadenas de impacto explicadas anteriormente.

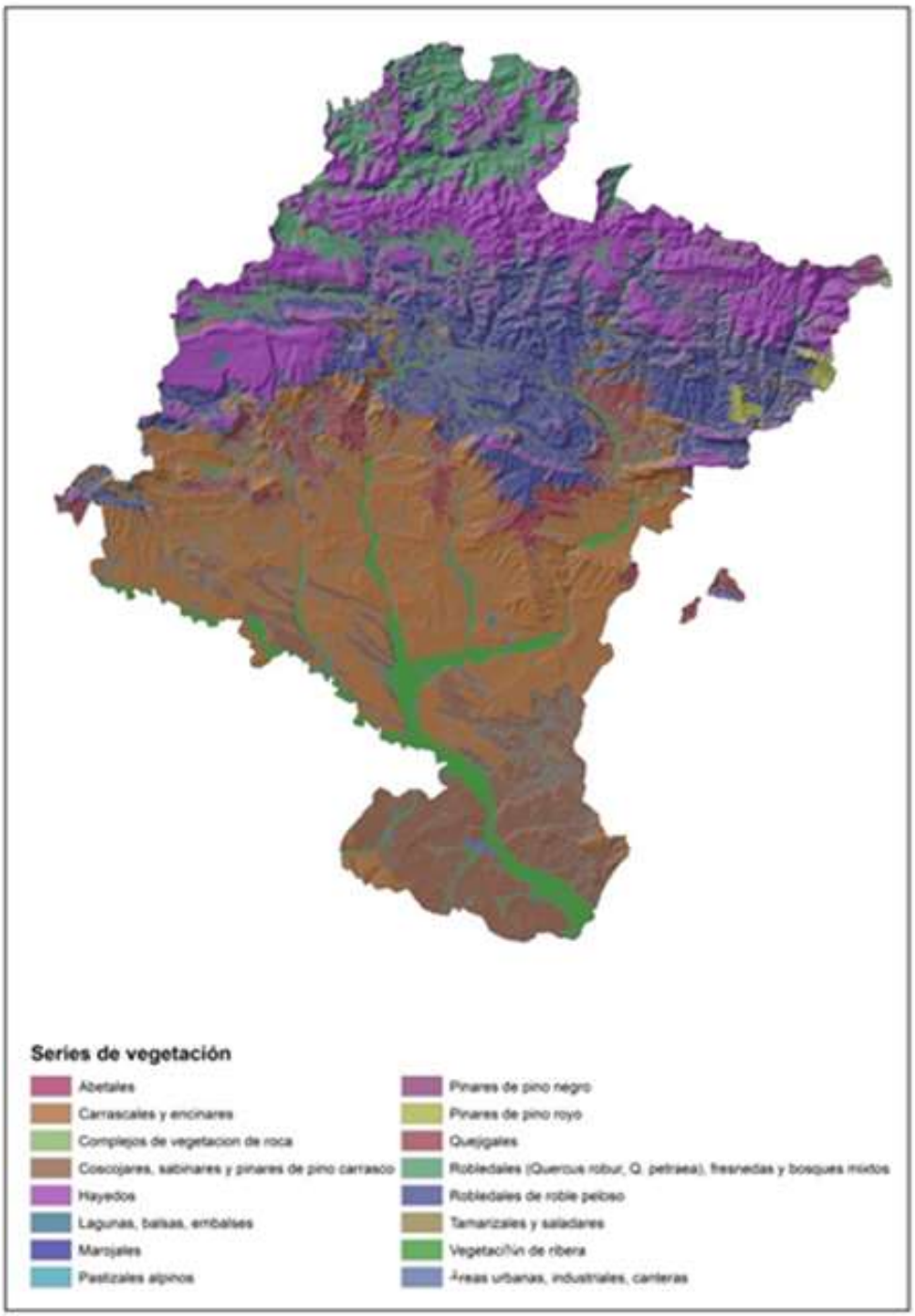


Figura 13 Series de vegetación en Navarra.

Fuente: elaboración propia a partir de Mapa de Vegetación Potencial de Navarra 1:25000.

2.3.2 Características climáticas y agroclimáticas

Una vez determinada la zonificación inicial, revisaremos la coherencia de esta división con otras características del territorio relacionadas con el recurso edáfico. Para ello, de entre los recursos disponibles, se ha realizado, en primer lugar, un análisis de los correspondientes al clima.

En relación al clima, existe información sobre diferentes zonificaciones correspondientes a clasificaciones elaboradas a partir de los datos generados en la red de estaciones meteorológicas del territorio, y las necesidades de los agrosistemas. Considerando que este trabajo tiene como objeto realizar un diagnóstico del recurso edáfico en las zonas de uso agrícola, estas clasificaciones se consideran las más relevantes.

2.3.2.1 La clasificación climática de Papadakis

En primer lugar, la clasificación climática de Papadakis (1955) clasifica los climas en función de la aptitud para el desarrollo de diferentes cultivos. Para ello, tiene en cuenta factores térmicos, como la severidad de los inviernos y los regímenes de helada, y la duración y el calor de los veranos. El clima se clasifica a partir del tipo de invierno, el tipo de verano y el régimen hídrico, a partir de datos de temperatura, precipitación y evapotranspiración potencial.

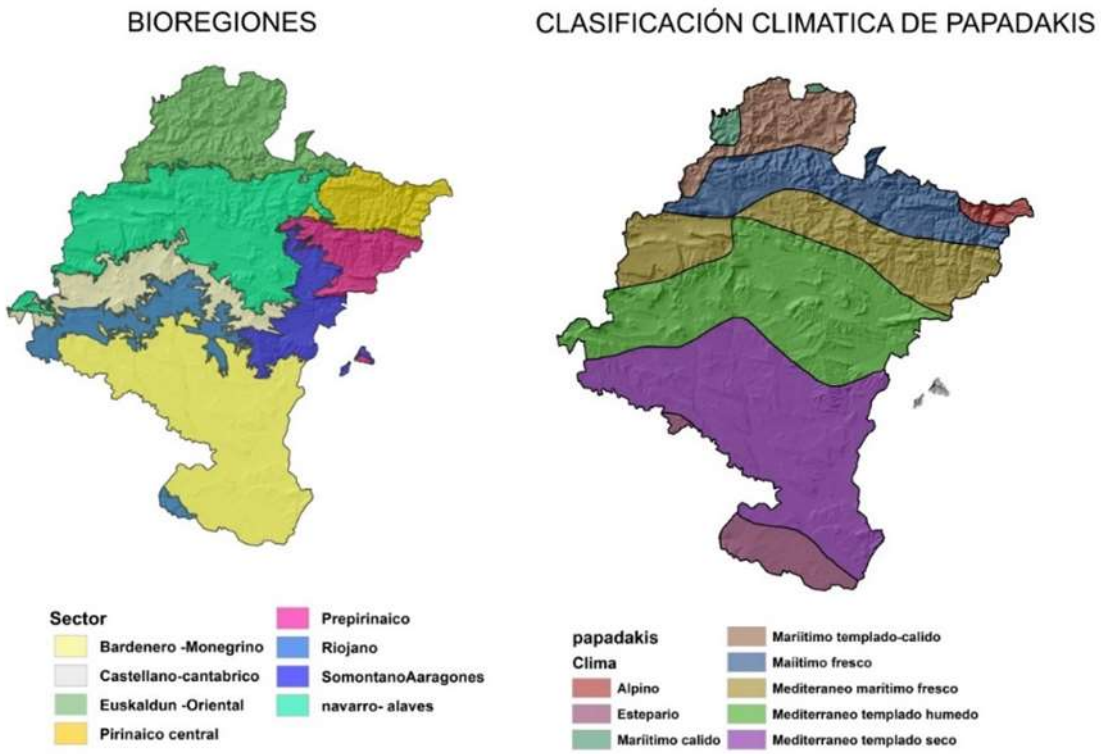


Figura 14 Comparación de las unidades biogeográficas con la zonificación climática de Papadakis.

Fuente: Elaboración propia a partir de información del Departamento de Desarrollo Rural, Medio Ambiente y Administración Local del Gobierno de Navarra ((http://meteo.navarra.es/definiciones/papadakis.cfm).

El contraste de las Bioregiones definidas anteriormente con la zonificación correspondiente a la clasificación agroclimática de Papadakis, presenta una alta coherencia, especialmente en la zona media y sur, y en las divisiones al norte de Navarra. Así, el sector llamado Bardenero-Monegrino en el sur y la zona de transición riojana se correspondería con el **clima mediterráneo templado seco** (desde Los Arcos, Puente la Reina, Tafalla y Sierra de San Pedro en Cáseda al norte, hasta Tudela)

En el sector llamado navarro-alavés, se observa una división correspondiente a un clima de Papadakis **marítimo fresco** en la región más occidental (valle del Arakil, Sierras de Urbasa, Andía y Lóquiz) y el norte de la oriental (valles al norte de la cuenca de Pamplona y tramo bajo de los valles pirenaicos), mientras la Cuenca de Pamplona quedaría incluida en la zona correspondiente al **clima mediterráneo templado húmedo**, que se extiende a los sectores castellano-cantábrico y la mayor parte de la zona somontano-aragonesa.

Al norte de la zona anterior existe una franja de clima **marítimo fresco** (desde Aralar en el oeste hasta el Pirineo en el este, tramo alto de los valles pirenaicos), que agrupa el sector pirenaico-central con la zona sur del sector Euskaldun Oriental.

En el límite norte de navarra el sector Euskaldun Oriental, en la frontera con la vertiente cantábrica corresponde un **clima marítimo templado-cálido**.

Según la información proporcionada por el Servicio de Meteorología y Climatología del Gobierno de Navarra (http://meteo.navarra.es/definiciones/papadakis.cfm) estos climas reúnen las siguientes características:

El **clima mediterráneo templado** corresponde con un clima templado con veranos secos y más cálidos que el Mediterráneo marítimo fresco, suficientemente cálido para cultivar arroz, pero no para cultivar algodón.

El promedio de las máximas medias de los 6 meses más cálidos superior a 21ºC y la media de las mínimas absolutas superior a 7ºC durante más de 3.5 meses. Máxima media del mes más cálido superior a 25ºC. Promedio de las máximas medias de los 6 meses más cálidos inferior a 25ºC y/ o media de las mínimas absolutas superior a 7ºC durante menos de 4.5 meses y los inviernos suficientemente suaves para plantar avena en otoño, pero demasiado frío para cultivar cítricos, La Media de las temperaturas mínimas absolutas del mes más frío superior a -10ºC, pero inferior a -2.5ºC.

Respecto al régimen hídrico será **mediterráneo húmedo** (el excedente estacional de lluvia supera el 25% de la ETP anual) **o mediterráneo seco** (el excedente estacional de lluvia supera el 25% de la ETP anual).

El **clima mediterráneo marítimo** corresponde con un clima templado húmedo con veranos frescos, suficientemente cálido para cultivar trigo, pero no para cultivar maíz. El promedio de las máximas medias de los 4 meses más cálidos superior a 17ºC. La media de mínimas absolutas superior a 2ºC durante más de 2.5 y menos de 4.5 meses.

El invierno es suficientemente suave para plantar avena en otoño, pero demasiado frío para cultivar cítricos. Media de las temperaturas mínimas absolutas del mes más frío superior a -10ºC, pero inferior a -2.5ºC.

El régimen hídrico es mediterráneo húmedo (Excedente estacional de lluvia supera el 25% de la ETP anual).

El **clima marítimo fresco** es un clima templado húmedo con baja amplitud térmica.

Inviernos más fríos que los otros climas marítimos (cálido y templado cálido), suficientemente suave para plantar avena en otoño, pero demasiado frío para cultivar cítricos. La Media de las temperaturas mínimas absolutas del mes más frío superior a -10ºC, pero inferior a -2.5ºC.

Los veranos son frescos, suficientemente cálidos para cultivar trigo, pero no para cultivar maíz. Con un promedio de las máximas medias de los 4 meses más cálidos superior a 17ºC. y la media de mínimas absolutas superior a 2ºC durante más de 2.5 y menos de 4.5 meses.

El régimen hídrico es siempre húmedo (HU) en el oeste, y húmedo en el este, a partir de Aribe.

El clima marítimo templado-cálido es un clima templado húmedo con baja amplitud térmica. Los inviernos son menos benignos que el marítimo cálido, y suficientemente suaves para plantar avena en otoño, pero demasiado frío para cultivar cítricos. La media de las temperaturas mínimas absolutas del mes más frío superior a -10ºC, pero inferior a -2.5ºC.

Los veranos son suficientemente cálidos para poder cultivar arroz, pero no para cultivar algodón. El promedio de las máximas medias de los 6 meses más cálidos superior a 21ºC. y la Media de las mínimas absolutas superior a 7ºC durante más de 3.5 meses.

El régimen hídrico siempre es húmedo.

Tres climas que completarían la geografía navarra, pero representan poca superficie, son:

- El **clima estepario**, en los alrededores de Sartaguda y extremo sur de la Ribera, a partir de Tudela, es un clima templado con precipitaciones escasas durante todo el año.
- El **clima alpino**, en los puntos más altos del Pirineo navarro (Larra, Mesa de los Tres Reyes). Es un clima de alta montaña, con inviernos muy fríos y largos y veranos frescos.
- El **clima marítimo** cálido aparece en los alrededores de Goizueta y de Zugarramurdi.

2.3.2.2 La clasificación agroclimática correspondiente a las necesidades del trigo

En segundo lugar, la **clasificación agroclimática correspondiente a las necesidades del trigo** (secano), utilizada en proyectos anteriores como criterio general para los cultivos de invierno (GENVCE), divide el territorio navarro en varias zonas según su pluviometría y temperatura en el mes de abril.

Así, se distinguen tres zonas según la precipitación media anual (árido y semiárido, subhúmedo y húmedo), divididas a su vez en subzonas fría, templada y cálida. De estas, las correspondientes a temperaturas "cálidas" (Tª mes de abril >13ºC), no existen en Navarra.

La observación de la distribución de esta zonificación presenta una similitud elevada con las bioregiones determinadas para la zona Media y la Ribera, pero no así para las zonas situadas más al norte, que quedarían englobadas de manera general en la denominada zona fría y húmeda para cultivos de invierno, excepto los alrededores de los ríos Baztán-Bidasoa.

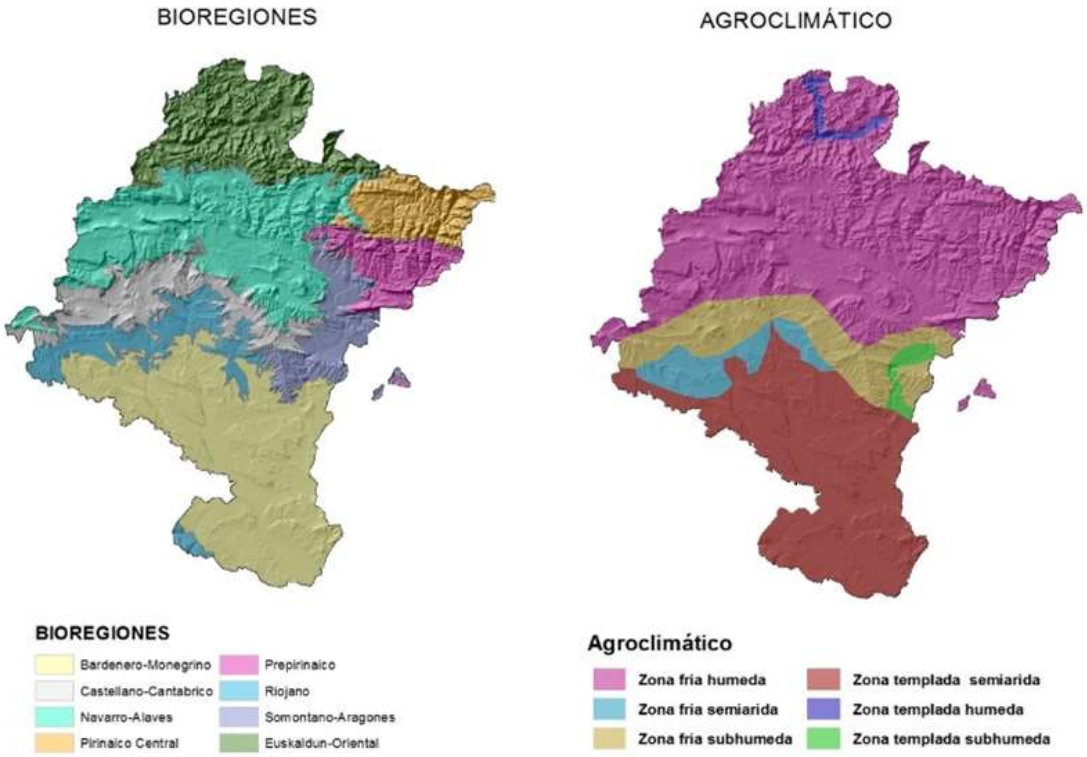


Figura 15 Comparación de las unidades biogeográficas con la zonificación climática del mapa agroclimático para el trigo de secano.

Fuente: GENVCE (http://www.genvce.org/).

2.3.3 Otras consideraciones

Según lo descrito anteriormente, la zona de mayor variabilidad según criterios climáticos es el sector navarro-alavés, por lo que se ha planteado la necesidad de dividir este sector en varias zonas, respondiendo a las características climáticas y de tipos de vegetación potencial:

- Por un lado, la **cuenca de Pamplona**, con un clima Mediterráneo templado húmedo, quedaría naturalmente segregada de las otras dos subzonas que comprenden este sector: la zona más al oeste del sector que comprende Urbasa, Andía y Aralar, y la zona al noreste de la Cuenca, correspondiente a los valles al norte de la cuenca de Pamplona, también con clima mediterráneo marítimo fresco.

Aunque los criterios para esta división sean climáticos, también coinciden con criterios geomorfológicos, litológicos y de series de vegetación.

- Por otro lado, en relación a las series de vegetación, al contrastar con el Mapa de Vegetación Potencial de Navarra 1:25.000 las series planteadas con las unidades biogeográficas (Peralta et al. 2013), se identifican algunas características que sería interesante remarcar en el sector navarro-alavés:

Por un lado, existen dos zonas diferenciadas que coinciden con las propuestas en el punto anterior por criterios climáticos, ya que en la en la Cuenca de Pamplona predomina el roble peloso, frente al resto de este sector.

Por otro lado, existe un clivaje entre la zona de Urbasa, Andía y Aralar, donde predominan los hayedos en las zonas altas, y en las zonas más bajas de los valles aparecen robledales y fresnos y bosques mixtos al acercarse al río Arakil. En los **valles al Norte de la Cuenca de Pamplona**, existe una distribución más dendrificada de las zonas de hayas, de roble y de marojales, por lo que la diferenciación de las dos subzonas señaladas (Urbasa-Andía-Aralar, y valles al norte de la Cuenca de Pamplona), parece adecuada. Además, en la zona Urbasa-Andía-Aralar, puede aplicarse una segunda subdivisión correspondiente al **corredor del Arakil**.

Finalmente, al revisar el sector bardenero–monegrino, que es muy homogéneo según otros criterios, diferenciamos principalmente carrascales y encinares en la mayoría del territorio, excepto en las **zonas de influencia del río Ebro y sus afluentes**, caracterizados por la presencia de vegetación de ribera que debido a su tamaño y diferenciación debería quedar retratado en la zonificación.

En este mismo sector existen **zonas salinas y zonas de yesos dispersas**. Esta dispersión hace que, a pesar de su importancia en relación a los objetivos de este trabajo (zonificación para la evaluación de la vulnerabilidad edáfica en relación a la agricultura), no sea posible definir una zona específica. Por ello, se tendrá en cuenta la existencia y distribución de este tipo de zonas a la hora de definir las parcelas de la red de monitorización en las siguientes fases de la acción.

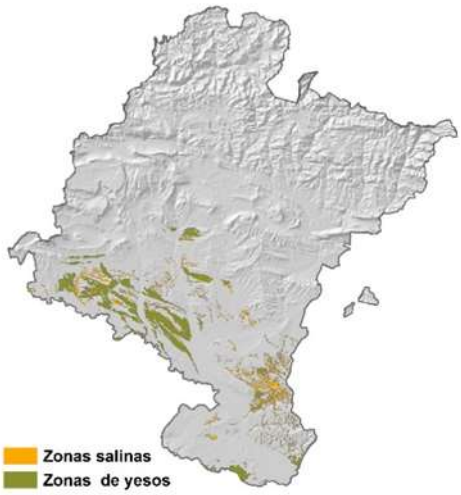


Figura 16 Zonas salinas y zonas de yesos.

Fuente: Elaboración propia a partir de Mapa de Vegetación Potencial de Navarra 1:25000.

En resumen, se propondría según criterios climáticos dividir el sector navarro-alavés en varias zonas: Urbasa-Andía-Aralar, la Cuenca de Pamplona y los valles al norte de la Cuenca de Pamplona (dese Basaburua hasta Erro), y, teniendo en cuenta las series de vegetación, separar

el corredor del Arakil de Urbasa-Andía-Aralar, y la vegetación de ribera el sector bardenero-monegrino.

2.3.4 Zonificación

Según lo explicado, el resultado de la zonificación para este trabajo sería la siguiente:

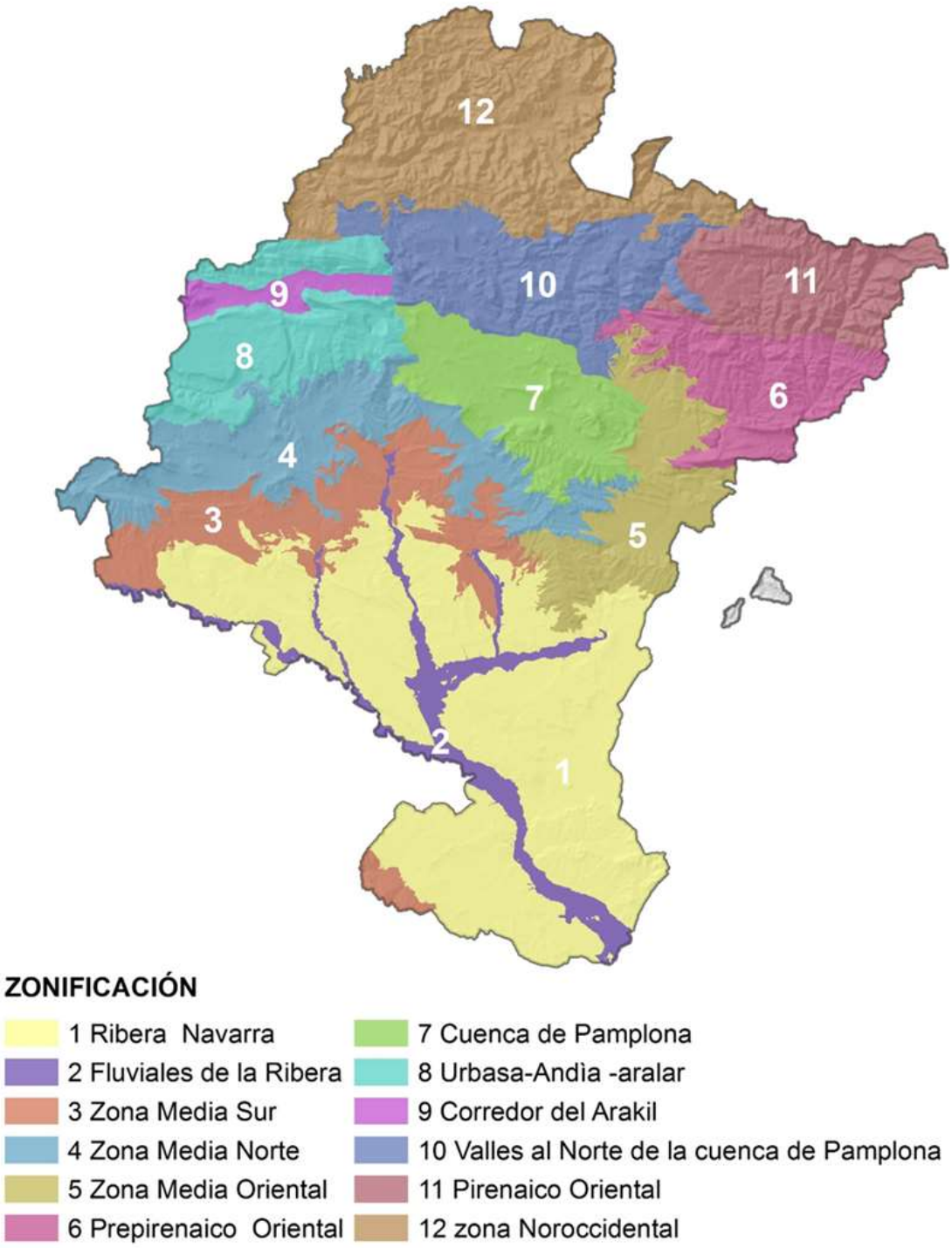


Figura 17 Zonificación en base a los criterios de esta acción.

Fuente: elaboración propia.

2.3.4.1 Ribera navarra

Esta zona incluye la Ribera Baja, desde Mendavia hasta Tudela y Las Bardenas. La zona más al sur (Alrededores de Sartaguda y extremo sur de la Ribera de Navarra, a partir de Tudela) tiene clima estepario templado con precipitaciones escasas durante todo el año y en el resto de la zona clima mediterráneo templado seco (clima templado con veranos secos y cálidos).

Es importante mencionar que la presencia de yesos en algunas zonas genera una sensación de aridez que no corresponde con los valores climáticos (http://meteo.navarra.es/definiciones/papadakis.cfm).

Respecto a la vegetación, las formaciones arbóreas más comunes son los pinares de *Pinus halepensis* la mayor parte repoblados, matorrales como coscojas y sabinas, pastizales xerófilos y en los terrenos con menor pendiente espartales de *Lygeum spartum* (Peralta et al. 2013).

Desde el punto de vista geológico y litológico, en esta zona afloran materiales del Terciario continental y Cuaternario (en las zonas que corresponden a los cauces fluviales del Ebro y afluentes). Se trata de rocas sedimentarias detríticas como los conglomerados, arenas, limos, arcillas y también rocas evaporíticas. En líneas generales, la distribución de los materiales es en función de la cercanía a las áreas de procedencia, de tal forma que en las áreas de borde se disponen los conglomerados y areniscas, hacia zonas más alejadas de la cuenca las areniscas, limos y arcillas y, por último, en las zonas centrales las facies carbonatadas de arcillas calcáreas y las facies evaporitas con yesos, margas yesíferas y sales solubles. Son rocas poco plegadas con estructuras suaves y paisajes con relieves en cuesta. En la geomorfología se observa una amplia representación de glacis (Castiella et al. 1982).

En los planes de ordenamiento territorial (POT, (https://www.navarra.es/home_es/Temas/Territorio/Urbanismo/Instrumentos/Instrumentos+OT/POT/) la mayoría de la superficie la Ribera Navarra se encuentra del POT 5, menos al norte la zona más cercana a la Zona Media que se integra en el POT 4 (Figura 18).

La superficie de esta zona es de 254.059 hectáreas (Has.), de estas el 54% son tierras arables, el 20% pasto arbustivo y el 6% tierra forestal (https://catastro.navarra.es/).

2.3.4.2 Fluviales de la Ribera

Esta zona atraviesa la Ribera navarra de N a S y de O a E, y comprende las zonas alrededor del curso de los ríos Arga, Ega y Aragón, como en la mayoría de la zona de Ribera navarra el clima es mediterráneo templado seco, clima templado con veranos secos y cálidos (http://meteo.navarra.es/definiciones/papadakis.cfm).

Alrededor de estos ríos se abren amplias llanuras aluviales que se dedican al cultivo de regadío y choperas de *Populus nigra*, alamedas de *Populus alba* o por olmedas de *Ulmus minor* (Peralta et al. 2013).

Respecto a la geología y la litología, nos encontramos mayoritariamente con materiales del Cuaternario, en el que se observa un complejo sistema de terrazas, entre las que destaca por

su gran importancia llanura de inundación actual, la terraza baja, y a veces la inmediatamente superior. Las alturas de estas terrazas sobre el río son de 0-5 metros, de 5-10 metros y de 10-20 metros, respectivamente.

Los depósitos aluviales presentan una secuencia vertical que va desde gravas y arenas gruesas en el fondo hasta limos y arcillas en la parte superior. Además, abundan los restos de antiguos cauces abandonados rellenos de limos y arcillas (Castiella et al. 1982).

En los POT la mayoría de la superficie de los fluviales de la Ribera se encuentra del POT 5, menos las partes que cruzan la Zona Media de Navarra que son parte del POT 4 (Figura 18).

La superficie de esta zona es de 39.471 Has., de estas el 65% son tierras arables, 7% tierra forestal y 4% pasto arbustivo (https://catastro.navarra.es/). Esta es la zona de Navarra con mayor proporción de tierra arable.

2.3.4.3 Zona Media Norte

Es una zona transicional en muchos aspectos. Se extiende desde las estribaciones de la sierra de Codés por La Berrueza, Valdega y Montejurra hasta la comarca del Romanzado (Lumbier) (Peralta et al. 2013).

Respecto al clima, tiene un clima mediterráneo húmedo al límite con el mediterráneo templado seco que tiene al sur, clima templado con veranos secos y cálidos. Su diferencia principal con el templado seco es un régimen de humedad mediterráneo húmedo frente a un mediterráneo seco (http://meteo.navarra.es/definiciones/papadakis.cfm).

La vegetación forestal está dominada por quejigares y carrascales, ordenados en un patrón característico, donde los primeros ocupan los suelos menos profundos, con frecuencia sobre margas, y los segundos los más secos y someros, a menudo sobre calizas duras. El uso agrícola se concentra en cereales de secano (Loidi, 2013).

Geológicamente seguimos en una zona de transición hacia los materiales del Terciario continental de la depresión del Ebro. Como principales accidentes geográficos nos encontramos con la Sierra del Codés (que corresponde desde un punto de vista hidrogeológico a la unidad de la Sierra de Lóquiz), tierra Estella, el valle de Amescoa, y valle de Yerri (Castiella et al. 1982).

En los POT esta zona quedaría dividida entre el POT 3 (zona más cercana a la cuenca del Pamplona) y el POT 4 (Figura 18).

La superficie de esta zona es de 95.590 Has., de estas el 34% son tierras arables, 38% tierra forestal y 18% pasto arbustivo (https://catastro.navarra.es/).

2.3.4.4 Zona Media Oriental

Abarca de S a N la zona de Sangüesa regada por el Aragón entre la sierra de Leire, Peña y los altos de Ujué y al norte Lumbier hasta Aoiz (Loidi, 2013). Con un clima mayoritariamente

Mediterráneo húmedo, siendo este un clima templado con veranos secos y cálidos (http://meteo.navarra.es/definiciones/papadakis.cfm).

Esta zona está influenciada por la flora y vegetación del mundo somontano, bojearles, tomillares, aliagares y romerales (Peralta et al. 2013).

Respecto a la geología y litología, al N se sitúa la parte oriental de la cuenca de Lumbier-Aoiz, donde predominan las margas, y al S predominan materiales detríticos del Terciario continental como las areniscas (con paleocanales), alternando con lutitas presentes en la Sierra de Ujué y los conglomerados que forman la Sierra de Peña (Floristán 1995).

En los POT, esta zona quedaría dividida entre dos: la parte norte corresponde al POT 1, y la parte sur al POT 4 (Figura 18).

La superficie de esta zona es de 64.721 Has., de estas el 34% son tierras arables, 27% pasto arbustivo y 25% tierra forestal (https://catastro.navarra.es/).

2.3.4.5 Prepirenaico Oriental

Abarca las zonas prepirenaicas, por el N desde el valle del Irati aguas arriba del embalse de Itoiz, la parte más baja del valle de Salazar hasta Sarries, y el de Roncal hasta Urzainki en el O.

Por el sur, con la mediterraneización de estos valles, este distrito se agota cuando se desciende hacia el Romanzado, un poco más al sur de Navascués y Epároz. La sierra de Leire marca una frontera neta con el mundo mediterráneo, así como la foz de Burgui, que da paso a Salvatierra de Esca (Peralta et al. 2013).

Tiene clima mediterráneo marítimo fresco, templado y húmedo con veranos frescos. Hay uno o dos meses secos en verano (http://meteo.navarra.es/definiciones/papadakis.cfm).

En contraste con las partes altas en esta zona, a medida que se desciende por los valles, se observa un fuerte desecamiento del clima, y una mediterraneización relativamente rápida, con la aparición de roble peloso que desplazan a los hayedos, e incluso poblaciones de carrascas (Peralta et al. 2013).

Los materiales presentes en estas dos zonas corresponden con parte de la unidad hidrogeológica de Pamplona-Ochagavía, la unidad del macizo de Larra y la sierra de Leire.

Los materiales más característicos en las zonas bajas de valles Roncal y Salazar son los flysch con intercalaciones de barras calcáreas y margas del Eoceno. La presencia de estos niveles calcáreos intercalando con las margas permite observar la dirección pirenaica E-O.

La sierra de Leire, se sitúa en el extremo oriental de Navarra al sur de la zona, se caracteriza por la presencia de materiales carbonatados de edad Cretácico (calizas y dolomías muy arenosas con niveles margoso) y Terciario (dolomías y calizas del Paleoceno y calcarenitas, margas y flysch del Eoceno). Los materiales se disponen en estructuras complejas con dirección E-O y vigencia hacia el S (Castiella, 1982).

En los POT quedaría dentro del POT 1 (Figura 18).

La superficie de esta zona es de 56.693 Has., de estas el 60% tierra forestal, 16% pasto con arbolado, 16% pasto arbustivo y 3% de tierras arables (https://catastro.navarra.es/).

2.3.4.6 Cuenca de Pamplona

Abarca la zona de la cuenca de Pamplona hasta Esteribar, incluyendo las sierras de Alaiz, Peña de Izaga y parte occidental de la cuenca de Aoiz-Lumbier (Peralta et al. 2013).

Tiene un clima mediterráneo templado húmedo, con veranos secos.

Predomina el roble peloso y es una zona de gran producción agrícola.

Desde el punto de vista de la litología, la cuenca de Pamplona es una zona situada entre la zona pirenaica y la zona vasco-cantábrica, por lo que es una zona de transición que presenta principalmente margas y otros materiales sedimentarios. La mayor diferencia se produce a partir del Priaboniense, en el que se depositan al sur de Pamplona sales, que fueron explotadas.

La Sierra de Alaiz se extiende al S de la cuenca de Pamplona siguiendo una dirección NE-SO, ligeramente arqueada. Está formada por calizas y dolomías arenosas, con niveles margosos intercalados del Cretácico Superior, dolomías y calizas del Paleoceno y calizas y calcarenitas, con intercalaciones margosas hacia techo, del Eoceno. Es una estructura tectónica que corresponde con un anticlinal cabalgante sobre los depósitos detríticos de la depresión del Ebro.

La Peña Izaga está formada por materiales resultantes de la sedimentación de rocas detríticas de tipo areniscas y conglomerados, que se disponen discordantes sobre las unidades infrayacentes y dan lugar a relieves elevados. Estos materiales de la Peña Izaga se depositan en una cuenca trasladada hacia el sur por los cabalgamientos situados en el frente Surpirenaico.

Por último, la parte occidental de la cuenca de Lumbier-Aoiz corresponde con una cuenca prepirenaica, una zona de transición que limita al N con los valles pirenaicos, al O con la cuenca de Pamplona y la Sierra de Tajonar, al S con las sierras de Alaiz e Izco y al E con las de Illón y Leire. Se trata de un territorio de baja altura y suaves relieves modelados en rocas poco resistentes a la erosión, las margas (Castiella et al. 1982).

En los POT, la cuenca de Pamplona estaría dentro del POT 3 (Figura 18).

La superficie de esta zona es de 67.857 Has., de estas el 43% son tierras arables, 22% tierra forestal y 14% pasto arbustivo (https://catastro.navarra.es/).

2.3.4.7 Urbasa-Andía-Aralar

Urbasa y Andía se encuentran al S de esta zona, y son macizos medios que forman una barrera geográfica entre las dos grandes zonas señaladas anteriormente (Eurosiberiana de influencia atlántica al N y Mediterránea al S). Al N esta la sierra de Aralar, y dividiendo a estos la Sakana (Peralta et al. 2013).

Tiene un clima mediterráneo marítimo fresco: este es un clima templado húmedo con veranos frescos. Hay uno o dos meses secos en verano.

La vegetación más característica son los hayedos ombrófilos cantábricos y los pastizales mesoxerófilos (Peralta et al. 2013).

Desde un punto de vista geológico, la zona de Urbasa-Andía está constituida por una potente serie carbonatada del Paleoceno-Eoceno Medio, de espesor variable (800 metros en la zona Norte a 400 metros en la zona Sur). Estos materiales se depositan sobre una formación margosa del Cretácico, sobre la que se ha modelado la Sakana, también nombrada como Barranca-Burunda que engloba el valle del Arakil. La sierra de Urbasa corresponde con un suave sinclinal colgado, con los bordes elevados y la zona central deprimida. La sierra de Andía, presenta una zona más compleja desde un punto de vista tectónico, existe una serie de pliegues con una dirección E-O: sinclinal de San Donato, el anticlinal de Ergoyena, el sinclinal de Andía y el anticlinal de Ulanz-Sarvil. Ambas sierras están afectadas por dos familias de fallas, una de desgarre con dirección NNE-SSO y otra de fallas normales con dirección NE-SO. Otro rasgo geológico importante es la presencia de diapiros salinos: Anoz, Ollo y Salinas de Oro (Castiella, 1982).

Por otro lado, la zona de Aralar, está constituida por una serie de depósitos que abarcan desde el Triásico Superior (Keuper) hasta el Cretácico Superior. Se diferencian tres zonas:

- Jurásico inferior (Lías): dolomías, calizas dolomíticas y calizas
- Jurásico Medio-Superior (Dogger-Malm): calizas a veces con nódulos de sílex, calizas arrecifales y calizas lacustres
- Cretácico inferior: calizas arrecifales.

Estos tramos se encuentran alternando con tramos margo-arcillosos del Keuper, Lías medio-Superior, Jurásico terminal- Cretácico basal y Cretácico superior.

Desde un punto de vista estructural, la sierra de Aralar es un anticlinal que de O a E evoluciona a anticlinal volcado y posteriormente a cabalgamiento, con la desaparición del flanco Norte.

Por último, la Sierra de Lóquiz, se ubica en la Navarra Media occidental y se caracteriza por la presencia de calcarenitas y calizas del Cretácico Superior, presentando una transición de facies más margosas al norte a facies más arenosas al sur, lo que representa un cambio de medio de plataforma a sedimentos más costeros. Es una unidad estructural con dirección E-O (Castiella et al. 1982; Floristán 1995).

En los POT esta zona se divide entre varios: Aralar estaría en el POT 2, Urbasa quedaría fuera de ordenación territorial, las laderas sur de Urbasa en el POT 4 y Andía y sus alrededores en el POT 3 (Figura 18).

La superficie de esta zona es de 69.001 Has., de estas el 60% tierra forestal, 14% pastizal, 11% pasto arbustivo y 5% de tierras arables (https://catastro.navarra.es/).

2.3.4.8 Corredor de Arakil

Es la zona más pequeña de esta zonificación y abarca la Sakana. Es un corredor que abarca el valle formado por el río Arakil, y que une Navarra con la llanada alavesa. Se trata de un valle amplio que tiene al sur Urbasa-Andía y al norte la sierra de Aralar.

El clima es mediterráneo marítimo fresco, templado y húmedo con veranos frescos y dos meses secos en verano (http:/meteo.navarra.es/definiciones/papadakis.cfm).

Desde un punto de vista geológico, como se ha comentado, la zona de Urbasa-Andía está constituida por una potente serie carbonatada del Paleoceno-Eoceno Medio, de espesor variable (800 metros en la zona Norte a 400 metros en la zona Sur). Estos materiales se depositan sobre una formación margosa del Cretácico, sobre la que se ha modelado la Sakana, también nombrada como Barranca-Burunda que engloba el valle del Arakil (Floristán 1995).

Todo este corredor entraría dentro del POT 2 (Figura 18).

La superficie de esta zona es de 13.444 Has., de estas el 34% tierra forestal, 29% pastizal y 14% de tierras arables (https://catastro.navarra.es/).

2.3.4.9 Valles al Norte de la Cuenca de Pamplona

Esta zona abarca los valles que van desde Basaburua hasta el valle de Erro, pasando por Ultzama y Esteribar Comprende los tramos superiores y medios de las cuencas de los ríos Ultzama, Arga y Erro, por lo que la totalidad de las aguas de este distrito vierten al Ebro.

Respecto a la vegetación, en las laderas de los valles se encuentran hayedos y en las partes bajas robles y majorales, según se establece en el Mapa de Vegetación Potencial de Navarra 1:25.000 (http://www.cfnavarra.es/agricultura/informacion_agraria/mapacultivos/htm/biogeografia.htm).

El clima es en su mayoría mediterráneo marítimo fresco: un clima templado húmedo con veranos frescos y uno o dos meses secos en verano (http:/meteo.navarra.es/definiciones/papadakis.cfm).

En los valles de Basaburua, Ultzama, Esteribar y Erro se encuentran principalmente lutitas con turbiditas calizas (*flysch* calizo) y margas de edad Eoceno. Sin embargo, materiales mucho más antiguos se sitúan en el macizo de Oroz-Betelu, el que corresponde junto con los macizos de Cinco Villas y Quinto Real, al conjunto de macizos Paleozoicos presentes en Navarra. Los materiales que bordean este macizo Paleozoico se conocen con el nombre del sistema de Arrieta-Garralda que está formado por calizas del Cretácico Superior (Castiella et al. 1982; Floristán 1995). La mayoría de esta zona entraría dentro del POT 10 aunque la parte más oriental es parte del POT 1 y una pequeña parte al oeste POT2 (Figura 18).

La superficie de esta zona es de 87.670 Has., de estas el 57% tierra forestal, 16% pastizal, 10 % de pasto arbustivo y 7% de tierras arables (https://catastro.navarra.es/).

2.3.4.10 Zona Pirenaico Oriental

Abarca la Navarra pirenaica y acoge la parte superior de las cuencas de los ríos Eska (Roncal) y Salazar, y el tramo más alto del Irati. Aquí se encuentran las cimas más altas del Pirineo Navarro: Mesa de los Tres Reyes, Ori, Otsogorrigaina, Lakartxela y Ezkaurr (Peralta et al. 2013).

La mayoría del Pirineo Oriental se encuentra en clima marítimo fresco, templado húmedo con baja amplitud térmica, inviernos más fríos que en el marítimo cálido y el marítimo templado cálido y veranos frescos. Las cimas más altas del NO presentan clima subalpino, de alta montaña con inviernos muy fríos y largos y veranos frescos (http:/meteo.navarra.es/definiciones/papadakis.cfm).

Los materiales presentes en estas dos zonas corresponden con parte de la unidad hidrogeológica de Pamplona-Ochagavía y la unidad del macizo de Larra. Los materiales más característicos son los flysch con intercalaciones de barras calcáreas y margas del Eoceno. La presencia de estos niveles calcáreos intercalando con las margas permite observar la dirección pirenaica E-O. En la zona que corresponde con la zona N de los valles del Salazar y el Roncal y zona oriental del valle de la Aezcoa (río Irati) cabe mencionar el sistema de las sierras de Abodi-Berrendi (con pliegues anticlinales y sinclinales de dirección E-O que afectan a materiales del Paleoceno) y la Peña Ezkaurre (estructura compleja que afecta también a los materiales del Paleoceno y que queda separado del sistema de sierras anterior por un gran paquete de flysch).

Finalmente, el macizo de Larra está formado por materiales del Cretácico Superior, calizas, calizas con nódulos de sílex y flysch y en la zona de Lakora, afloran también conglomerados y brechas. Estos materiales se depositan sobre un zócalo Paleozoico y Triásico y sobre ellos se ha desarrollado un importante karst (Castiella et al. 1982; Floristán 1995).

En las zonas más altas de esta zona se aloja una nutrida flora y vegetación de alta montaña en los pisos subalpino y alpino. Con algunas excepciones, los sustratos son ricos en bases (calizas y flysch con abundancia de margas y margocalizas), por lo que predomina la vegetación basófila, y sólo existen algunas zonas de arenisca con hábitats silicícolas. El Pirineo occidental navarro presenta una fuerte oceaneidad, que implica una alta pluviosidad. En estas condiciones, los tramos altos de estos valles están poblados de hayedos y hay incluso algunos abetales (Peralta et al. 2013).

Toda esta zona entraría dentro del POT 1 (Figura 18).

La superficie de esta zona es de 62.946 Has., de estas el 63% tierra forestal, 15% pastizal y 7% de tierras arables (https://catastro.navarra.es/).

2.3.4.11 Zona Noroccidental

Es la zona más húmeda y oceánica de las planteadas, ocupa el extremo noroccidental de Navarra, en las comarcas que limitan con Guipúzcoa y el País Vasco francés: Labourd y Baja Navarra. Abarca los valles del Bidasoa, Urumea, Leitzaran y Araxes, así como las regatas de Orabidea, Aritzakun, Urritzate y Luzaide. Todas sus aguas vierten al Cantábrico, que condiciona el clima de esta zona (Peralta et al. 2013).

La franja más al S de la zona tiene clima marítimo fresco, húmedo con baja amplitud térmica con inviernos fríos y veranos frescos y al norte un clima marítimo templado-cálido, templado húmedo con baja amplitud térmica, y con inviernos más suaves que el anterior. En Goizueta y Zugarramurdi existe un clima marítimo cálido, húmedo y templado, con temperaturas mínimas muy suaves en invierno y baja amplitud térmica (http:/meteo.navarra.es/definiciones/papadakis.cfm).

Desde un punto de vista geológico, está formada por materiales paleozoicos y triásicos, que forman los macizos de Cinco Villas y Quinto Real, que se caracterizan por la presencia de materiales metamórficos como esquistos, pizarras y cuarcitas, existiendo también tramos de calizas, dolomías y grauvacas. En esta zona también se incluyen los granitos de Peñas de Aia y ofitas, basaltos y diabasas. Estos materiales fueron afectados por las orogenias Hercínica y Alpina, por lo que son desde un punto de vista estructural, son muy complejos. Por otro lado, la zona comprendida entre los macizos de Cinco Villas y Quinto Real y la sierra de Aralar, presenta depósitos carbonatados que abarcan desde el Triásico Superior hasta el Cretácico Superior, muy similares a los que afloran en la Sierra de Aralar (Castiella et al. 1982; Floristán 1995).

Sobre los materiales silíceos la vegetación mayoritaria es Oligotrofia y además los relieves abruptos y la altitud de muchas montañas permite el desarrollo del piso montano. En las laderas y en las zonas más bajas de los valles son característicos los robledales de *Quercus robur*, pero la mayoría de esas zonas están ocupadas por cultivos madereros de pinos principalmente *Pinus radiata* y matorrales de sustitución y la mayoría de los fondos de valle están dedicados a actividades ganaderas (praderío atlántico). El piso montano aparece dominado por las series de los hayedos cantábricos, aunque estos hayedos se encuentran en parte sustituidos por cultivos madereros de alerce japonés (*Larix kaempferi*) (Peralta et al. 2013).

La mayor parte de esta zona entraría dentro del POT 2 (Figura 18).

La superficie de esta zona es de 144.255 Has., de estas el 59% tierra forestal, 24% pastizal y 9% de pasto arbustivo (https://catastro.navarra.es/).

Figura 18 POT sobre zonificación final.

Fuente: elaboración propia.

2.4 Características edáficas

2.4.1 Descripción general

La información edáfica utilizada de entrada para el estudio general, se ha obtenido del Mapa de Suelos de Navarra 1:50.000 que el Departamento de Edafología de la Universidad de Navarra publicó entre los años 1982-1992 y que fue subvencionado por la CAYCIT (Comisión Asesora de Investigación Científica y Técnica) con el Proyecto de Investigación nº 2191/83: "**Mapa de Suelos de Navarra, escala 1:50.000**".

En este proyecto se cartografiaron los distintos tipos de suelos de la práctica totalidad del territorio de la Comunidad Foral de Navarra (unos 10.400 km2) lo que se plasmó en 22 memorias y 23 cartografías que incluyen 36 de las 37 hojas a escala 1:50.000 que incluyen territorio navarro, cuya base es la realizada por el Instituto Geológico y Minero de España (IGME). La hoja número 208 (UNCASTILLO) contiene unos pocos kilómetros cuadrados pertenecientes a la Comunidad Foral de Navarra (municipio de Petilla de Aragón) pero que se podrían calificar como una pequeña isla dentro de territorio aragonés y, por ello, no fueron incluidos en el trabajo. En el total de las 22 memorias se describen y analizan un total de 159 calicatas.

Sería preciso hacer constar que uno de los investigadores que participa en el proyecto de LIFE-IP NAdapta-CC, lo hizo también en el proyecto "Mapa de Suelos de Navarra, Escala 1:50.000", lo que validaría la utilización de esta información.

Para este trabajo, se ha examinado en detalle cada una de las **22 memorias** para extraer toda la información que se considera, inicialmente, relevante para seleccionar los indicadores de vulnerabilidad y resiliencia. Mucha de esta información, sobre todo la relativa a datos analíticos de laboratorio y que figuran en la descripción de las calicatas, se ha respetado por ser la que se utilizó para la realización del mapa. Esta información sería la correspondiente al **régimen de humedad del suelo** de acuerdo a los criterios de Soil Taxonomy – U.S.D.A (United States Department of Agriculture, 1975) y a **datos analíticos de composición granulométrica de la tierra fina** (suelo tamizado a 2 mm), **profundidad efectiva** de los diferentes horizontes de cada perfil, contenido en materia orgánica, **pedregosidad**, **conductividad eléctrica** del extracto de pasta saturada, razón de adsorción de sodio (S.A.R.), porcentaje de sodio de cambio (E.S.P.) y contenido en carbonatos y en yeso. Se ha utilizado también el dato de saturación en bases del complejo de cambio para tener en cuenta la limitación que puede suponer una acidez excesiva en el suelo.

Dado que la realización de los mapas se hizo entre los años 1982 - 1992, hemos creído necesario, puesto que reflejaría la existencia de superficies de suelo con similares características, proceder a una **actualización lo más aproximada posible**, por la falta de algunos datos, **de la clasificación** de las unidades de suelos. Para ello se han utilizado las "Claves para la Taxonomía de Suelos, 11ª edición, (Soil Survey Staff, (S.S.S.), 2014)"

El resto de la información que se considera necesaria pero no estaba disponible por falta de datos, ha tenido que ser **obtenida por métodos empíricos**, métodos aceptados por la comunidad edafológica internacional.

Así, los datos de **densidad aparente** se han estimado a partir de los datos de granulometría, de acuerdo a lo propuesto por Israelson & Hanson (1962). Los datos de composición granulométrica han sido utilizados, además, para la estimación de los **contenidos de retención de agua** por el suelo en condiciones de capacidad de campo (retención a -33 kPa) y en condiciones de punto de marchitez (retención a -1.500 kPa) de acuerdo a las expresiones propuestas por Gómez-Miguel (1985).

A partir de estos datos (densidad aparente y retención de agua a capacidad de campo y punto de marchitez), se ha calculado la **capacidad de retención de agua disponible** para los cultivos (CRAD).

Los **regímenes hídricos** de los suelos se deben determinar teniendo en cuenta la realización de un balance hídrico en la llamada sección control de humedad del suelo, tal y como propugna Soil Taxonomy. Para ello hay que realizar pruebas con el infiltrómetro de doble anillo para poder definir dicha sección. A falta de estas medidas directas, y como límites orientativos se pueden tomar las secciones de 10 a 30 cm de profundidad para suelos de textura fina, de 30 a 90 cm de profundidad para suelos de textura gruesa y de 20 a 60 cm para suelos de textura intermedia. En los casos en los que la textura se encontraba cerca de la frontera entre los suelos de textura fina e intermedia se han tomado los límites entre 15 y 45 cm y para aquellos que se encontraban entre los de textura intermedia y gruesa se han tomado los límites entre 25 y 75 cm.

En este proyecto se han utilizado estos límites orientativos y, con ellos, se ha determinado la capacidad de retención de agua disponible para los cultivos (CRAD) de **la sección control**.

La información así obtenida permite realizar un **diagnóstico general de las características y principales limitaciones de los suelos de las zonas delimitadas**. Es importante resaltar, que al haber realizado durante el proceso de revisión de los mapas, una selección de perfiles relevantes, una reclasificación y algunas estimaciones, **no puede entenderse el resultado como un mapa con la misma escala que el original, sino un mapa con información general**, adecuada para una aproximación regional, pero seguramente no para un estudio detallado del suelo de cada una de las zonas estudiadas.

Tal y como se describe más adelante, la información cartográfica disponible a Escala **1:25.000** se ha utilizado, por un lado, para la verificación de la información obtenida en esta primera fase, y por otro, para la **selección de parcelas en la red de control**. Como se ha comentado, esta información es geográficamente incompleta (se encuentra cartografiado aproximadamente un 40% del territorio a dicha escala).

2.4.2 Tipologías y limitaciones de suelo por zonas

El resultado del trabajo anterior de recopilación y actualización de la información cartográfica existente a la escala 1:50.000, permitió realizar un **diagnóstico general de las principales características asociadas a los suelos de cada una de las zonas de estudio**.

Así, de las descripciones pormenorizadas de las distintas unidades se seleccionaron además las limitaciones más importantes que pueden presentar los suelos como son **sequía, profundidad, acidez, pendiente, carbonatos, erosión, pedregosidad, salinidad y retención de agua**, las cuales, según sea existencia o ausencia, podrán emplearse más adelante como indicadores de vulnerabilidad en las cadenas de impacto consideradas en este estudio.

2.4.2.1 Ribera navarra

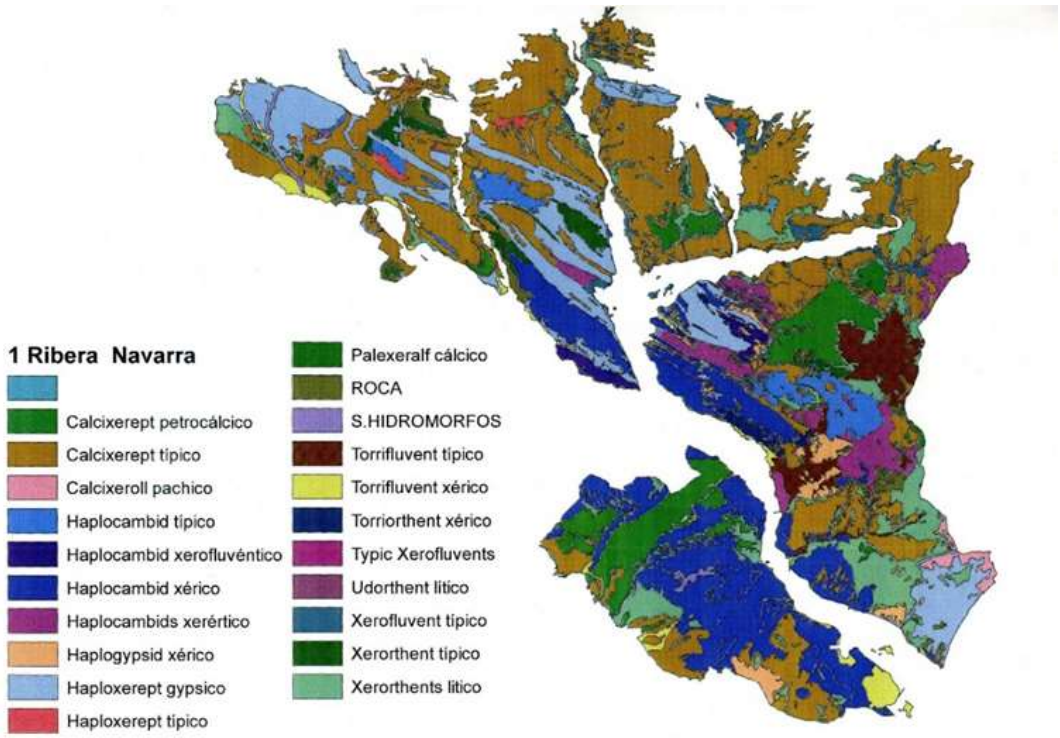


Figura 19 Tipologías de suelos dominantes en la zona 1.

Fuente: Elaboración propia a partir del Mapa de Suelos de Navarra 1:50.00

2.4.2.1.1 Descripción edáfica general

Predominan suelos pertenecientes a los órdenes ARIDISOLES y ENTISOLES.

Los primeros se caracterizan, principalmente, por presentar un régimen de humedad de tipo arídico, que significa que, al menos la mitad del tiempo acumulado, presenta un déficit hídrico

que, salvo que exista regadío, supone un fuerte limitante para el desarrollo de los cultivos. Además de presentar este régimen de humedad tienen que presentar un horizonte B de alteración (cámbico), un horizonte de acumulación de yeso edáfico (gypsico), un horizonte de acumulación de carbonato cálcico, cementado (petrocálcico) o no (cálcico), entre otros.

Los suelos que pertenecen al orden de los Entisoles se encuadran aquí porque, o bien tienen régimen de humedad arídico pero carecen de los horizontes antes mencionados (cámbico, gypsico, cálcico, petrocálcico....) o bien presentan un régimen de humedad algo más húmedo, de tipo xérico. Son en general poco profundos (exceptuando algunos Fluvents) y tienen perfil de tipo AC, AR o ACR.

Menos abundantes son los pertenecientes al orden de los INCEPTISOLES (orden extraordinariamente heterogéneo en cuanto a propiedades y caracterización edáfica).

Por último, como suelos "azonales" (suelos que no se corresponden con las características climáticas de la zona) encontramos pequeñas extensiones de MOLLISOLES (con abundante materia orgánica en el horizonte superficial) y ALFISOLES (con horizonte de acumulación de arcilla iluvial, argílico). Estos Alfisoles se han tenido que formar, necesariamente, en épocas antiguas, dada la escasa precipitación actual en la zona y, por tanto, la dificultad para que se produzca la emigración de las arcillas.

2.4.2.1.2 Limitaciones

La principal limitación que van a presentar estos suelos es, sin duda, la del *déficit hídrico*. Se trata de una zona en la que la precipitación media es escasa (frecuentemente por debajo de los 400 mm anuales) lo que, como se señalaba antes, lleva a la existencia de régimen hídrico de tipo arídico o xérico limitante con arídico. Esto supone que, aunque la CRAD (Capacidad de Retención de Agua Disponible) sea potencialmente alta en aquellos suelos que son relativamente profundos (podríamos definir una CRAD potencial), la disponibilidad de agua real para los cultivos será baja al no existir suficiente agua de precipitación como para satisfacer el llenado de la reserva potencial del suelo durante el periodo húmedo.

Consecuencia de este déficit hídrico es la presencia de *horizontes con acumulación de yeso, carbonato cálcico e incluso sales más solubles que el yeso*, que, aunque su porcentaje no llegue para el diagnóstico de horizontes sálicos, sí que puede suponer una limitación importante para el desarrollo de cultivos. Que la presencia de yeso o de carbonato cálcico suponga limitación importante va a depender de los porcentajes con que cada especie química se encuentre en el suelo y/o de su cementación por estos materiales.

La otra limitación importante que puede ocurrir en zonas amplias de este territorio es la de la *profundidad* (suelos del orden de los Entisoles).

Otra posible limitación (sin poder concretar en qué tipo de suelo la encontramos al ser muy variable) es la de la *pedregosidad en superficie*, en ocasiones muy elevada.

En general, se trata además de suelos con *escasa cantidad de materia orgánica*, incluso en los horizontes superficiales.

2.4.2.2 Fluviales de la Ribera

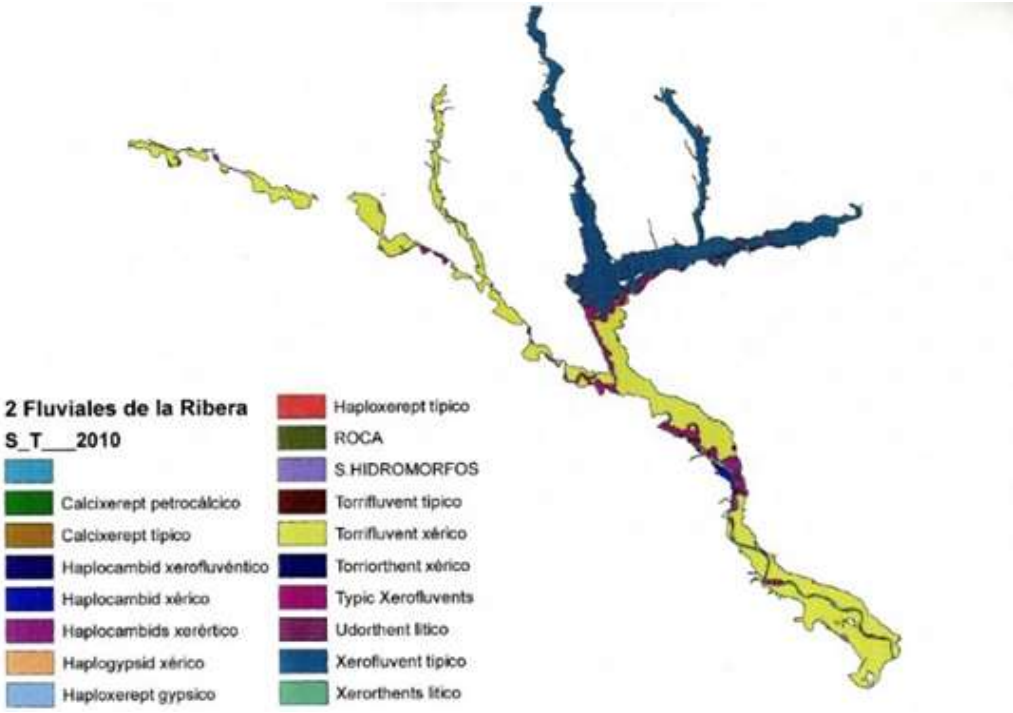


Figura 20 Tipologías de suelos dominantes en la zona 2.

Fuente: Elaboración propia a partir del Mapa de Suelos de Navarra 1:50.00

2.4.2.2.1 Descripción edáfica general

Muy similar a la de la Zona 1 (Ribera Navarra), predominando suelos pertenecientes a los órdenes ARIDISOLES y ENTISOLES, si bien ahora son más abundantes los Entisoles que los Aridisoles.

Otro orden representado en la zona (aunque escasamente al igual que en la denominada Ribera Navarra) es el de los INCEPTISOLES. Por su especial relación con los sistemas aluviales y de terrazas, destacan los suelos de tupo *Fluvent*, o entisoles fluvénticos, con perfiles poco desarrollados y alternantes en profundidad, correspondientes al efecto de las dinámicas de crecidas y reorganización de cursos de los ríos.

Las características edáficas de estos suelos serán, por tanto, similares a las observadas en la Zona 1 para estos órdenes.

2.4.2.2.2 Limitaciones

Las limitaciones observadas para la zona 1 corresponden también a estos suelos, con una mayor relevancia del factor *pedregosidad*, por la posición de esta zona en el paisaje y el tipo de materiales de partida.

2.4.2.3 Zona Media Sur

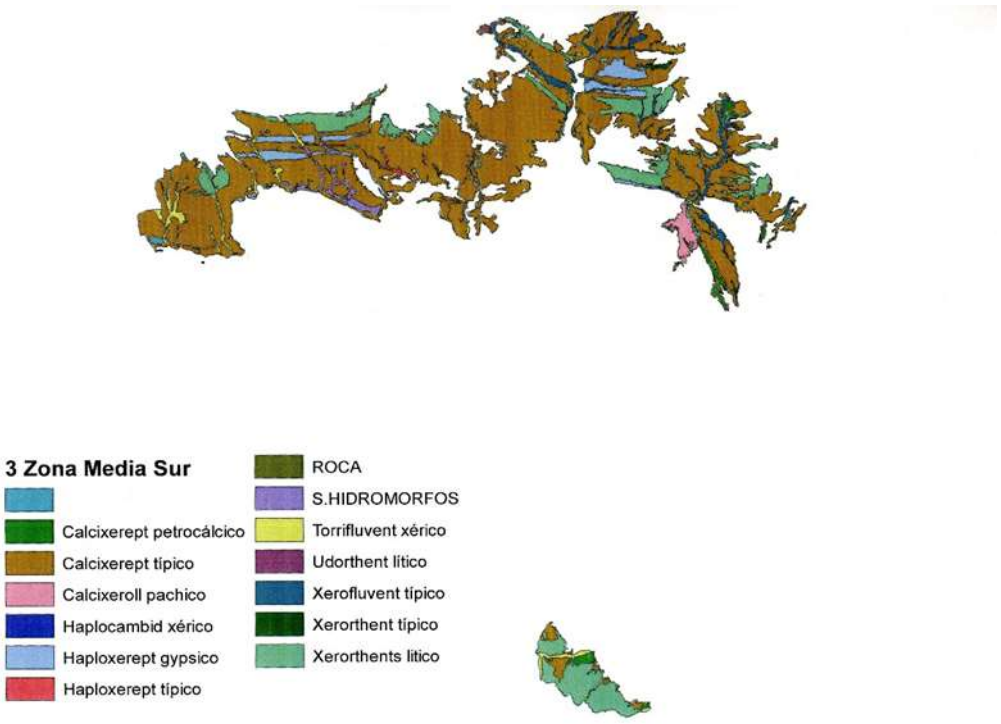


Figura 21 Tipologías de suelos dominantes en la zona 3.

Fuente: Elaboración propia a partir del Mapa de Suelos de Navarra 1:50.00

2.4.2.3.1 Descripción edáfica general

En esta zona predominan (en cuanto a extensión) los suelos pertenecientes al orden de los INCEPTISOLES. En cuanto a variedad, predominan los ENTISOLES.

En general el régimen hídrico de la zona es de tipo xérico por lo que, al contrario que en las zonas anteriores (1 y 2), no existe un claro déficit hídrico, pero tampoco la suficiente pluviometría como para que los horizontes de acumulación de yeso y/o carbonato cálcico desaparezcan. Por ello es frecuente encontrar horizontes cálcicos (en ocasiones petrocálcico) y/o gypsicos. La presencia de elevadas cantidades de sales es más esporádica.

En lugares muy puntuales y lindando con las zonas 1 y 2, encontramos pequeñas extensiones de ARIDISOLES.

También aparecen pequeñas extensiones de MOLLISOLES, fundamentalmente en aquellos lugares que presentan una mayor altitud y que se corresponden con las denominadas "Planas", plataformas que corresponden a terrazas fluviales antiguas más o menos deformadas y antropizadas.

2.4.2.3.2 Limitaciones

La presencia de *yeso y/o de carbonato cálcico* puede suponer limitación importante siempre y cuando los porcentajes sean elevados. Caso de existir *cementación* por carbonato cálcico (petrocálcico) la limitación será importante cuando el límite superior de dicho horizonte se encuentre cercano a la superficie.

Otra limitación importante que puede ocurrir en zonas amplias de este territorio es la de la *profundidad* (suelos del orden de los Entisoles, excepto en algunos Fluvents).

Posible limitación (sin poder concretar en qué tipo de suelo la encontramos al ser muy variable) es la de la *pedregosidad en superficie*, en ocasiones muy elevada.

En general y salvo las excepciones mencionadas, suelos *con escasa cantidad de materia orgánica*, incluso en los horizontes superficiales.

2.4.2.4 Zona Media Norte

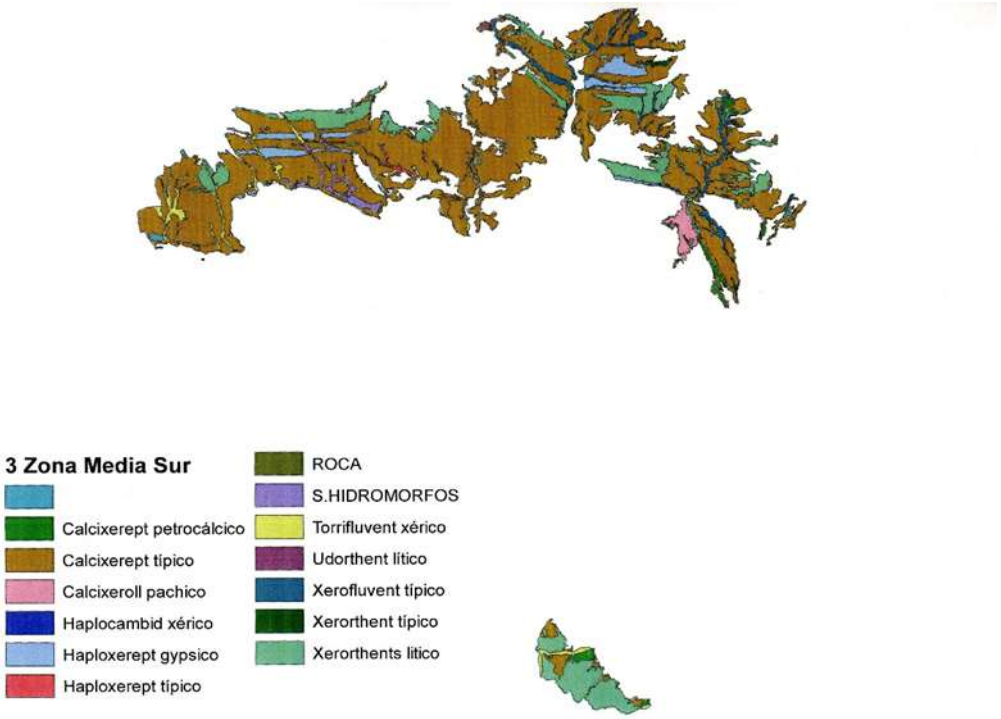


Figura 22 Tipologías de suelos dominantes en la zona 4.

Fuente: Elaboración propia a partir del Mapa de Suelos de Navarra 1:50.00

2.4.2.4.1 Descripción edáfica general

La mayor parte de esta zona presenta un régimen de humedad de tipo xérico, que significa una cierta limitación de agua pero que, en general, existe suficiente agua para el correcto desarrollo de los cultivos. Además, hay pequeñas extensiones con régimen arídico y en zonas de altitud superior a los 800 metros aproximadamente (a partir de esta altitud en general los carbonatos ya se han lavado del perfil), régimen de tipo údico en el cual apenas hay periodo de déficit.

Predominan los suelos pertenecientes a los órdenes INCEPTISOLES y ENTISOLES, en ocasiones con horizontes de ligera acumulación de carbonato cálcico (horizonte cálcico o petrocálcico) y acumulación de yeso (gypsico) en las zonas de regímenes hídricos más secos.

Por último, aparecen suelos del orden de los ALFISOLES (con horizonte de acumulación de arcilla iluvial, horizonte argílico). Estos suelos en estas zonas de humedad limitada se circunscriben a terrazas antiguas de ríos importantes (Palexeralf) y, por ello, en general presentan una cierta pedregosidad de cantos rodados.

2.4.2.4.2 Limitaciones

Los Entisoles (tipo de perfil AC, AR o ACR) tendrán como limitación más importante *la falta de profundidad* y, como consecuencia, una CRAD de media a baja. Que la *presencia de yeso o de carbonato cálcico* suponga limitación importante va a depender de los porcentajes con que cada especie química se encuentre en el suelo y/o de su cementación por estos materiales. La posible limitación por carbonato cálcico podrá verse acrecentada en aquellas ocasiones en que exista horizonte petrocálcico (horizonte de acumulación de carbonato cálcico cementado) dependiendo de la profundidad a la que se encuentre este horizonte.

No existirán problemas o limitaciones debido a la presencia de salinidad. Como ya se ha comentado al hablar de la existencia de los *Palexeralf* (en terrazas antiguas de ríos) puede existir la limitación de una abundante *pedregosidad*.

2.4.2.5 Zona Media Oriental

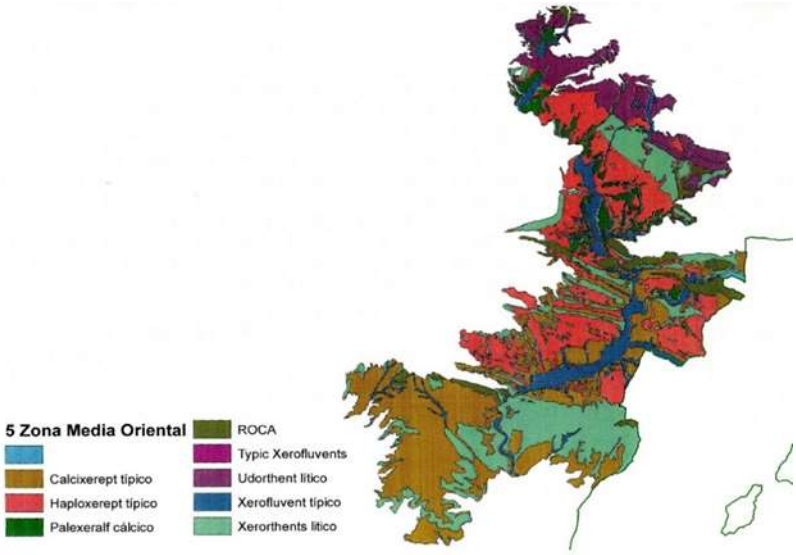


Figura 23 Tipologías de suelos dominantes en la zona 5.

Fuente: Elaboración propia a partir del Mapa de Suelos de Navarra 1:50.00

2.4.2.5.1 Descripción edáfica general

Los suelos más abundantes en esta zona, en cuanto a extensión, pertenecen al orden de los INCEPTISOLES, orden extraordinariamente heterogéneo aunque aquí se ciñen a los grandes grupos Calcixerept (Inceptisoles con régimen hídrico xérico y horizonte de acumulación de carbonato cálcico) y Haploxerept (Inceptisoles con régimen hídrico xérico y ausencia de horizontes o de propiedades de diagnóstico relevantes).

Los ENTISOLES también ocupan extensiones importantes teniendo la mayoría de ellos un régimen de humedad de tipo xérico. En aquellas zonas de una mayor altitud el régimen de humedad cambia a údico.

Por último, aparecen suelos del orden de los ALFISOLES (con horizonte de acumulación de arcilla iluvial, horizonte argílico). Estos suelos en estas zonas de humedad limitada se circunscriben a terrazas antiguas de ríos importantes (Palexeralf) y, por ello, en general presentan una cierta pedregosidad de cantos rodados.

2.4.2.5.2 Limitaciones

Las limitaciones más importantes irán ligadas, necesariamente, al tipo de suelo de referencia. Así los Inceptisoles y Entisoles con régimen de humedad xérico tendrán una *cierta limitación de agua* pero que, en general, existe suficiente agua para el correcto desarrollo de los cultivos.

Que la *presencia de carbonato cálcico* suponga limitación importante va a depender del porcentaje con que se encuentre en el suelo. En principio, en esta zona, no hay limitación por cementación por carbonato cálcico.

Otras limitaciones puntuales serán la elevada *pedregosidad* (Palexeralfs), la baja Capacidad de Retención de Agua Disponible en aquellos suelos *de profundidad limitada* (sobre todo en Entisoles) y, en ocasiones, *fuertes pendientes* debido, ya, a la cercanía de las cuencas prepirenaicas. *En ocasiones, suelos con escasa cantidad de materia orgánica*, incluso en los horizontes superficiales.

2.4.2.6 Prepirineo Oriental

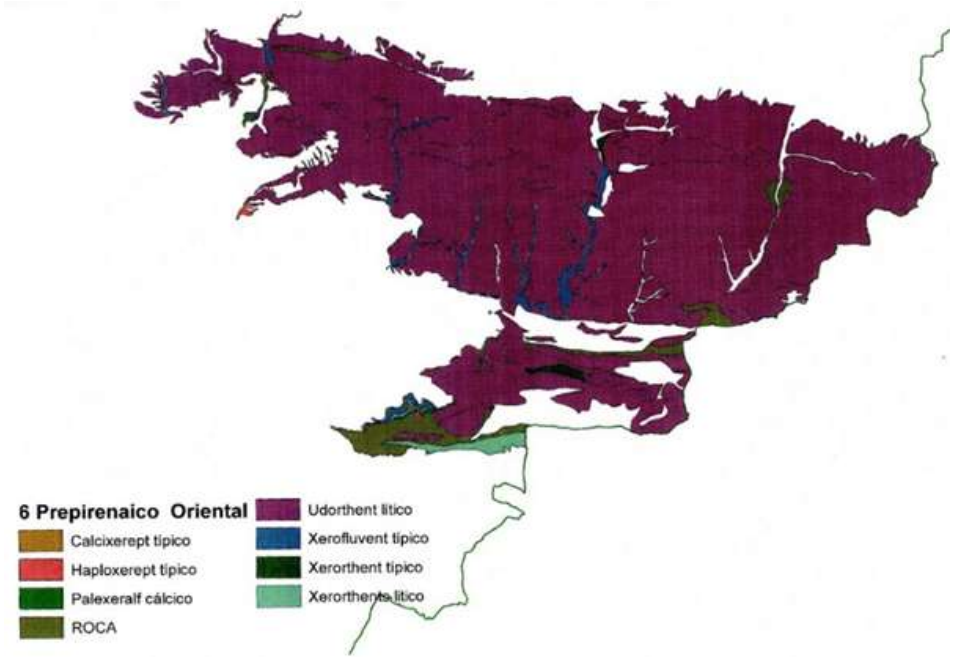


Figura 24 Tipologías de suelos dominantes en la zona 6.

Fuente: Elaboración propia a partir del Mapa de Suelos de Navarra 1:50.00

2.4.2.6.1 Descripción edáfica general

Zona muy homogénea en cuanto a la tipología de suelos según la información disponible. Prácticamente la totalidad de los suelos pertenecen al orden de los ENTISOLES, más concretamente al gran grupo de los Udorthent (Entisoles sin características especiales de diagnóstico y con régimen de humedad údico).

En la zona sur (zona cercana a la denominada Zona Media Oriental, vista anteriormente) este tipo de suelos pasarían a pertenecer al gran grupo de los Xerorthent debido a la existencia de régimen hídrico algo más seco (de tipo xérico). En ambas ocasiones se trata del subgrupo lítico lo que indica una fuerte limitación por profundidad. En las zonas cercanas a los cauces fluviales

predominan los suelos de tipo Xerofluvent, Entisoles formados a partir de depósitos dejados por los ríos y con régimen de humedad xérico.

Al encontrarnos en la zona prepirenaica empiezan a ser relativamente importantes los afloramientos rocosos, aunque muy localizados.

Aparecen pequeñas extensiones de ALFISOLES pertenecientes al gran grupo de los Palexeralf (ver zonas 4 y 5)

2.4.2.6.2 Limitaciones

La principal limitación que se va a presentar en esta zona es la de la *escasa profundidad* (subgrupo lítico) y, por tanto, escasa CRAD a pesar de tratarse de zonas con una cierta pluviosidad, al menos en los meses de invierno.

Eventualmente también puede existir limitación debido a la orografía, en concreto *pendientes más o menos acusadas*. En general no habrá limitaciones por acumulación de cantidades importantes de carbonato cálcico.

2.4.2.7 Cuenca de Pamplona

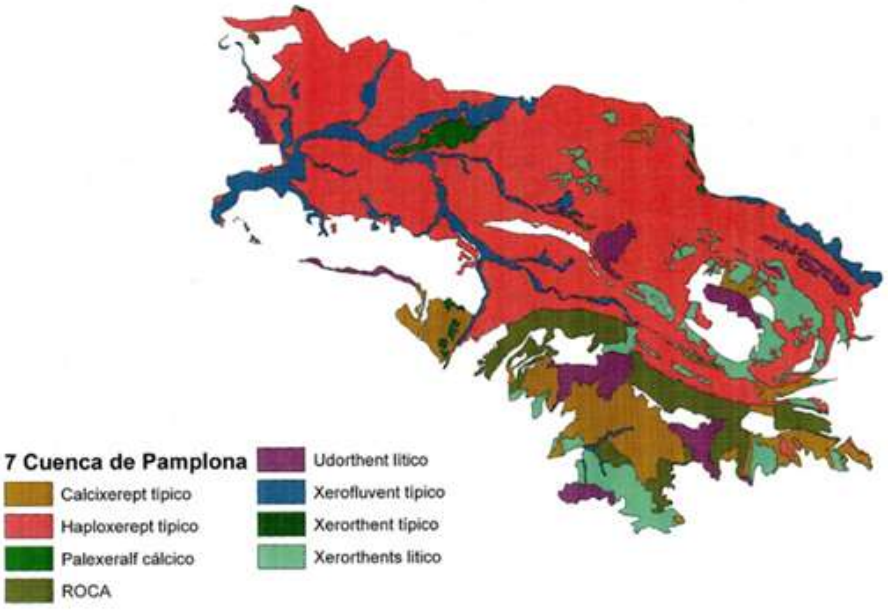


Figura 25 Tipologías de suelos dominantes en la zona 7.

Fuente: Elaboración propia a partir del Mapa de Suelos de Navarra 1:50.00

2.4.2.7.1 Descripción edáfica general

La Cuenca de Pamplona abarca una amplia zona de régimen hídrico de tipo xérico coincidente con un tipo de roca también muy homogéneo (con excepción de los montes colindantes calizos), que corresponde con las margas grises azuladas del biarritzciense.

Prácticamente la totalidad de la zona corresponde con suelos del orden de los INCEPTISOLES (grandes grupos Haploxerept, los más abundantes, y Calcixerept). Los Inceptisoles de la Cuenca de Pamplona suelen ser profundos y, a pesar del régimen hídrico de tipo xérico, siempre existe agua disponible cuando el cultivo lo necesita. El cultivo tradicional es el de cereal de secano (fundamentalmente trigo), presentando unos rendimientos muy elevados.

En el cinturón de los montes calizos colindantes predominan los ENTISOLES, siendo los más abundantes en cuanto a extensión los pertenecientes a los subgrupos líticos (Udorthent y Xerorthent). Son también importantes los desarrollados sobre los depósitos aluviales del río Arga y de sus afluentes (Xerofluvent). En las terrazas antiguas del río Arga a su paso por Pamplona aparecen ALFISOLES semejantes a los descritos en zonas anteriores (Palexeralf).

Por último, en las zonas de los montes colindantes mencionados aparecen extensiones relativamente importantes de roca desnuda (generalmente caliza).

2.4.2.7.2 Limitaciones

Las más importantes las encontraremos en los Entisoles, esto es, en general *escasa profundidad y baja CRAD*.

En los Palexeralf, tal y como se ha descrito para otras zonas, hay con frecuencia abundancia de *elementos gruesos*.

En los suelos desarrollados a partir de las margas grises azuladas del biarritzciense (que corresponden en general con los Inceptisoles) puede ocurrir, dado el elevado contenido en arcillas, una cierta limitación por *hidromorfía o falta drenaje*, al menos en profundidad.

2.4.2.8 Urbasa-Andía-Aralar

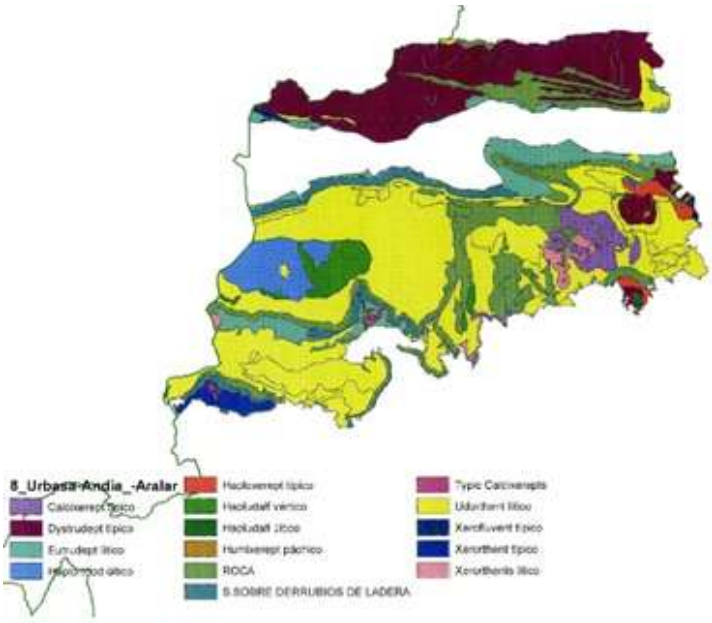


Figura 26 Tipologías de suelos dominantes en la zona 8.

Fuente: Elaboración propia a partir del Mapa de Suelos de Navarra 1:50.00

2.4.2.8.1 Descripción edáfica general

En esta zona se diferencian claramente dos sub-zonas, la primera situada al norte del "corredor del rio Arakil", y la segunda la situada al sur de la misma. En ambos casos el material que predomina como roca sobre la que se desarrollan los suelos son las calizas del Cretácico y Jurásico. En la mayoría de las ocasiones y dada las altitudes a las que nos encontramos, siempre superior a los 800 metros y pudiendo llegar hasta casi los 1.500, los suelos presentarán régimen hídrico de tipo údico, si bien en la parte colindante con la zona 4 (Zona Media Norte) pasará a ser de tipo xérico.

La sub-zona situada al norte corresponde con la Sierra de Aralar, donde encontramos, fundamentalmente, INCEPTISOLES pertenecientes al gran grupo de los *Dystrudept*. Estos se caracterizan por presentar, como ya se ha apuntado, un régimen de humedad de tipo údico, lo que conlleva un fuerte lavado de los suelos, con decarbonatación total a pesar de desarrollarse sobre roca madre caliza, pH muy ácidos y muy baja saturación en el complejo de cambio. Aparecen zonas relativamente amplias de roca desnuda y en la parte oriental ENTISOLES de muy escaso desarrollo (Udorthent lítico).

La zona situada al sur del corredor del rio Arakil es más compleja. Corresponde a los macizos de Urbasa y Andía. Los suelos más representativos son similares a los de la parte oriental de la sierra de Aralar mencionados en el párrafo anterior (Udorthent lítico) habiendo, también, amplias zonas de roca desnuda.

Mención especial merecen los suelos desarrollados en el llamado "Raso de Urbasa". Estos suelos se han desarrollado sobre la decalcificación de una calcarenita con abundante cuarcita y distinguimos los pertenecientes a dos órdenes distintos de la Soil Taxonomy: ESPODOSOLES y ALFISOLES.

Los Espodosoles se pueden considerar suelos "azonales" que se han desarrollado gracias a unas condiciones climáticas excepcionales y muy locales (fuerte humedad y temperaturas medias más o menos bajas) y a un material original muy percolante como lo es el residuo procedente de la decalcificación antes mencionada. En estas condiciones se forma un horizonte blanco de acumulación residual de cuarzo (horizonte álbico) del que se han lavado todos los coloides (arcilla y humus principalmente) que han terminado por acumularse en el horizonte B spódico. La clase textural de estos suelos es siempre gruesa, de tipo franco-arenosa lo que podrá causar una serie de limitaciones.

Los Alfisoles, ya mencionados en otras zonas, son suelos de acumulación de arcilla iluvial gracias al régimen percolante existente, pero no lo suficiente como para el desarrollo de horizontes spódicos.

Finalmente, en la zona oriental de estos macizos y a más baja altitud encontramos pequeñas extensiones de INCEPTISOLES en los que el régimen de humedad pasa a ser xérico, pudiéndonos encontrar horizontes de acumulación de carbonato cálcico (Calcixerept típico).

2.4.2.8.2 Limitaciones

Las posibles limitaciones de cualquiera de estos suelos van a ser, principalmente, aunque no siempre:

- La elevada acidez general (para cualquier tipo de suelos) consecuencia del régimen hídrico de tipo údico. Ello es así debido a la baja saturación de bases en el complejo de cambio y, por ende, a un elevado porcentaje de aluminio y/o protones en el mismo.
- En los Entisoles poca profundidad efectiva y, en consecuencia, baja CRAD.
- En los Espodosoles y Alfisoles desarrollados sobre la decalcificación de calcarenitas, de texturas gruesas, si bien los suelos suelen ser más o menos profundos y hay abundante humedad, la CRAD será baja.
- En gran parte de la zona y para cualquier tipo de suelo, fuertes pendientes.
- No es previsible que en aquellos suelos que tienen horizontes de acumulación de carbonato cálcico (Calcixerept típico), no muy abundantes, sea tan elevada como para que suponga una seria limitación.

2.4.2.9 Corredor de Arakil

Figura 27 Tipologías de suelos dominantes en la zona 9.

Fuente: Elaboración propia a partir del Mapa de Suelos de Navarra 1:50.00

2.4.2.9.1 Descripción edáfica general

De escasa pendiente como corresponde a la zona de influencia de un río importante como es el Arakil.

Los tipos de suelos se corresponden con los pertenecientes a los órdenes INCEPTISOLES y ENTISOLES, la mayoría de ellos bajo régimen de humedad de tipo údico.

Como ya se ha descrito anteriormente, esta zona se encuentra entre los macizos calizos de Aralar y de Urbasa-Andía por lo que es frecuente que, en la parte de contacto, encontremos suelos sobre derrubios de ladera, aunque en pequeñas extensiones.

En la parte oriental existen pequeñas extensiones de Inceptisoles con régimen de humedad xérico y horizontes de acumulación de carbonato cálcico (Calcixerept típico).

2.4.2.9.2 Limitaciones

Al tratarse de suelos desarrollados sobre depósitos fluviales, es previsible una *elevada pedregosidad*, independientemente del tipo de suelo.

En general van a ser suelos profundos, excepto aquellos Entisoles que sean de los subgrupos líticos.

2.4.2.10 Valles al Norte de la Cuenca de Pamplona

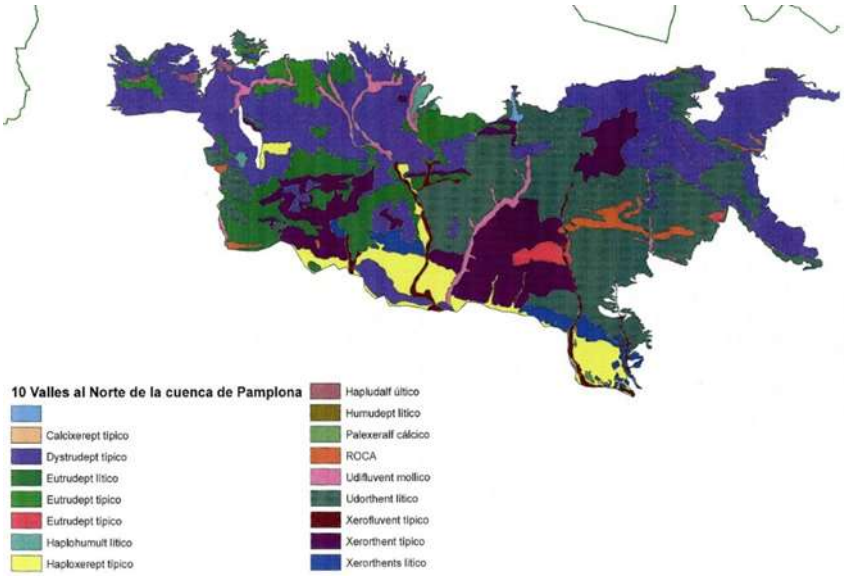


Figura 28 Tipologías de suelos dominantes en la zona 10.

Fuente: Elaboración propia a partir del Mapa de Suelos de Navarra 1:50.00

2.4.2.10.1 Descripción edáfica general

Zona extraordinariamente heterogénea en cuanto a la caracterización edafológica debido a que es la zona de transición entre los suelos con régimen de humedad xérico (los de la parte sur, más cercana a Pamplona) y los suelos con régimen de humedad údico, los colindantes con la zona 12 (zona Noroccidental).

En cualquier caso, predominan los pertenecientes a los órdenes INCEPTISOLES y ENTISOLES en un claro mosaico en función, fundamentalmente de la secuencia del perfil, del tipo de horizontes diagnóstico, del régimen de humedad y de la profundidad efectiva, de ahí que la clasificación a nivel, incluso de gran grupo, sea muy variada.

Hay muy escasos suelos con horizontes de acumulación de carbonato cálcico, los ya comentados en otras zonas en terrazas antiguas de ríos importantes (Palexeralf cálcico, dentro de los ALFISOLES y Calcixerept típico dentro de los Inceptisoles).

En aquellas zonas donde la precipitación es mayor y, por tanto, el lavado de los suelos es más pronunciado, los Alfisoles pasan a ser ULTISOLES. Tanto unos como otros se caracterizan por tener horizontes de acumulación de arcilla iluvial, pero se diferencian por la saturación de bases en el complejo de cambio del horizonte de acumulación de arcilla (argílico), que es mayor en los Alfisoles.

La elevada, en general, cantidad de materia orgánica nos lleva a la aparición de suelos de los grandes grupos Haplohumult (Ultisoles) y Humudept (Inceptisoles), sin olvidarnos de los Udifluvent (Entisoles) móllicos.

2.4.2.10.2 Limitaciones

De forma general se podría hablar de suelos con *pH de ácido a muy ácido*, a excepción de la parte sur de la zona que linda con la Cuenca de Pamplona (zona 7).

Otra limitación frecuente es la de *pendientes pronunciadas y escasa profundidad* ya que hay muchos subgrupos de tipo lítico dentro de los Eutrudept y Humudept (Inceptisoles), Haplohumult (Ultisoles), Udorthent y Xerorthent (Entisoles), etc. Por ello y a pesar de ser suelos donde existe una elevada precipitación la CRAD tenderá a ser baja.

La existencia de horizontes con acumulación de carbonato cálcico (horizontes cálcicos) no es de esperar que suponga una limitación apreciable.

2.4.2.11 Zona Pirenaica Oriental

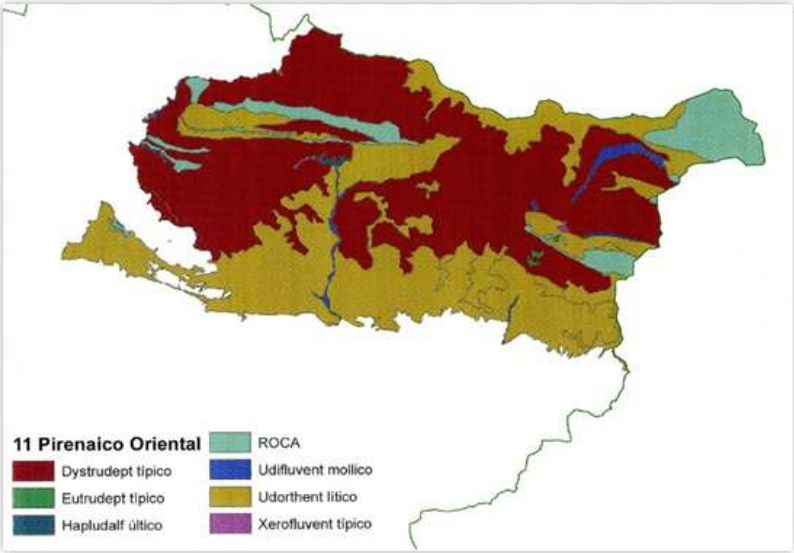


Figura 29 Tipologías de suelos dominantes en la zona 11.

Fuente: Elaboración propia a partir del Mapa de Suelos de Navarra 1:50.00

2.4.2.11.1 Descripción edáfica general

Zona muy uniforme donde predominan dos tipos de suelos INCEPTISOLES y ENTISOLES todos ellos caracterizados por presentar un régimen de humedad de tipo údico.

Los primeros pertenecen al subgrupo de los Dystrudept típico mientras que los segundos encajarían en los Udorthent lítico.

En pequeñas extensiones (Rincón de Belagua y otras) aparecen Entisoles caracterizados como Udifluvent mollico. Un poco más al sur encontramos también Entisoles tipo Xerofluvent típico.

Hay extensiones relativamente amplias de roca desnuda, sobre todo en la zona más nororiental, donde encontraríamos el macizo kárstico de Larra.

2.4.2.11.2 Limitaciones

De forma general se podría hablar de *suelos con pH de ácido* a muy ácido (Dystrudept).

Otra limitación frecuente es la de *pendientes pronunciadas y escasa profundidad*, así como extensiones más o menos amplias de roca desnuda. Por ello y a pesar de ser suelos donde existe una elevada precipitación la CRAD tenderá a ser baja.

2.4.2.12 Zona Noroccidental

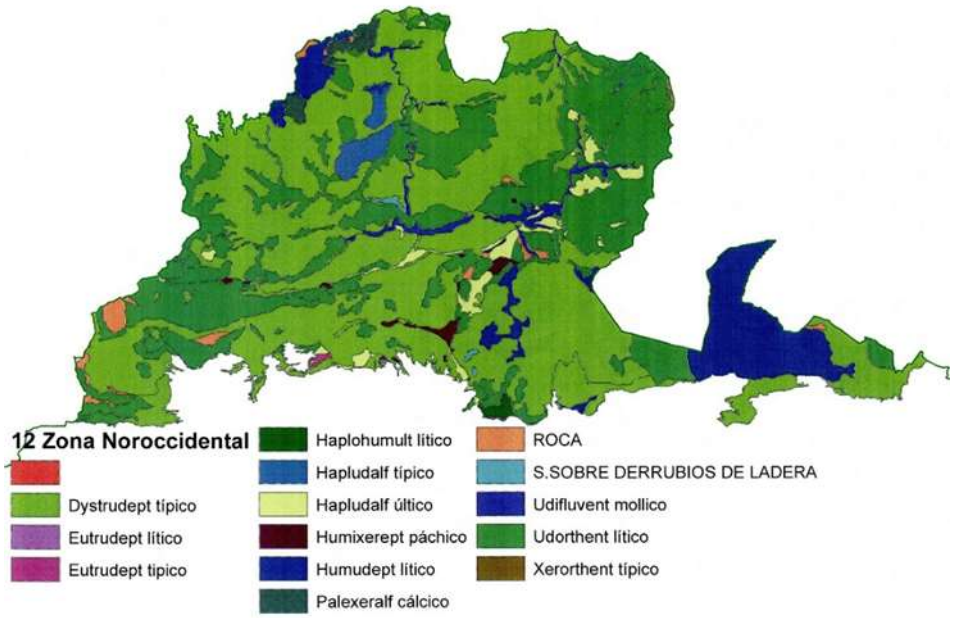


Figura 30 Tipologías de suelos dominantes en la zona 12.

Fuente: Elaboración propia a partir del Mapa de Suelos de Navarra 1:50.00

2.4.2.12.1 Descripción edáfica general

Zona con predominio de régimen hídrico de tipo údico, muy accidentada orográficamente hablando (sobre todo en la frontera con Francia) y por ello con predominio de suelos poco

profundos. En el contacto con la zona 10 (Valles al Norte de la Cuenca de Pamplona) aparecen pequeñas intercalaciones de suelos con régimen xérico.

Como en la mayor parte de Navarra, van a predominar los INCEPTISOLES y ENTISOLES con las mismas características ya mencionadas para otras zonas. Además, al tratarse de zonas con elevada pluviometría existirán extensiones más o menos amplias de suelos con desarrollo de horizontes de acumulación de arcilla iluvial (argílicos) tales como ALFISOLES y ULTISOLES en función del grado de saturación de bases en el horizonte de acumulación de arcilla.

Los suelos con acumulación de carbonato cálcico son muy poco relevantes, casi residuales.

2.4.2.12.2 Limitaciones

De forma general se podría hablar de suelos con *pH de ácido a muy ácido* siendo, por tanto, una limitación a tener en cuenta en aquellas zonas agrícolas, de pastos generalmente.

Otra limitación frecuente es la de *pendientes pronunciadas y escasa profundidad* ya que hay muchos subgrupos de tipo lítico dentro de los Eutrudept y Humudept (Inceptisoles), Haplohumult (Ultisoles), y Udorthent (Entisoles), etc. Por ello y a pesar de ser suelos donde existe una elevada precipitación la CRAD tenderá a ser baja.

La existencia de horizontes con acumulación de carbonato cálcico (horizontes cálcicos) no es de esperar que suponga una limitación apreciable.

3. DIAGNÓSTICO DE VULNERABILIDAD Y RESILIENCIA

3.1 Indicadores de vulnerabilidad y resiliencia

Según se ha explicado anteriormente, en el marco de trabajo para el estudio de los riesgos y medidas de adaptación al cambio climático en el sector agrario de Navarra, **los principales *drivers* climáticos considerados en este ámbito son el *aumento gradual de la temperatura* y olas de calor, y los *cambios en los patrones de precipitación, eventos extremos y granizo***.

En relación a la acción C4.1., se consideran por lo tanto especialmente relevantes los **impactos** directos asociados a estos cambios en el clima y relacionados con los agrosistemas. **Desde el punto de vista del recurso suelo, estos son los correspondientes a la *pérdida de materia orgánica de suelos*, la *pérdida de productividad agrícola*, y la *salinización***. Según se observa en la figura 8, estos impactos están relacionados con algunos **impactos intermedios**. Por su relevancia al vincularse a los tres impactos principales, **destacan el *déficit hídrico/sequía*, el *estrés térmico* y el *aumento de la evapotranspiración***. Relacionados con los eventos extremos aparecen otros elementos como los incendios, las inundaciones y ***la erosión***.

Estos impactos coinciden, en líneas generales, con los cambios observados y esperados en el clima de Navarra, según se ha descrito anteriormente, y serían por lo tanto los principales impactos considerados al determinar la vulnerabilidad, y el potencial de adaptación de los agrosistemas dentro de la acción C4.1.

En este contexto, según se expone en la memoria del proyecto LIFE-IP NAdapta-CC, en esta sección se pretende realizar una **evaluación de los indicadores edáficos más adecuados para determinar y monitorizar tanto la vulnerabilidad de los agrosistemas navarros como la implementación de estrategias encaminadas a aumentar su resiliencia y adaptabilidad**. Estos indicadores se analizarán en función de las principales características y limitaciones de los suelos de las diferentes zonas establecidas, según se describen en el apartado anterior.

Según se ha comentado en la introducción, existen antecedentes en las recomendaciones del IPCC, así como en los planes de adaptación a la escala internacional y nacional que señalan algunas propiedades del suelo como de especial relevancia en este campo (ver apartado 1.2).

Entre estas propiedades, se encuentran las relacionadas con la **retención de agua**, la **materia orgánica y la fertilidad**, la **estabilidad frente a la erosión**, y los **cambios en la composición química**, especialmente en relación a la salinización.

Tomando como punto de partida el análisis de algunos trabajos y proyectos de temática similar, y sobre el estado del suelo a diferentes escalas, es posible comprender qué propiedades y procesos del suelo pueden ser de interés en este sentido.

3.1.1 Indicadores de calidad del suelo

A nivel genérico, varios proyectos y estrategias europeas han permitido identificar algunos procesos y propiedades claves del suelo en relación al mantenimiento de su calidad.

La revisión realizada en Virto et al. (2015) sobre el estado de los suelos de Europa Occidental incluye una descripción de los principales problemas de degradación del suelo en el continente, así como de los indicadores utilizados en varias iniciativas para evaluar la calidad de los suelos de los agrosistemas europeos frente a diferentes riesgos. Entre estas propiedades, y en relación con los impactos considerados en el proyecto LIFE-IP NAdapta-CC para suelos agrícolas descritos más arriba, se pueden citar las referidas a la *pérdida de materia orgánica*, la *pérdida de suelo*, la *salinización* y otros aspectos relacionados indirectamente con la *retención de agua*.

La ***pérdida de materia orgánica*** se ha relacionado con el manejo agrícola (conversión de tierras para el cultivo, laboreo intenso, sobrefertilización, drenaje, encalado o rotaciones intensivas) y otros procesos relacionados con las cadenas de impacto descritas más arriba, como los incendios y la erosión (Kibblewhite et al., 2008), de especial importancia en las regiones mediterráneas. Algunas de las actividades agrícolas citadas se contemplan especialmente en el marco de esta acción C4.1.

La ***pérdida de suelo*** por erosión u otros procesos ha sido objeto de numerosos estudios y es uno de los principales temas de preocupación a nivel europeo desde hace tiempo (Van-Camp et al., 2004). El continuo desarrollo de estudios a escala local, regional y continental (Panagos et al., 2015; Panagos et al., 2018) permite conocer los principales factores que explican este proceso, y su relación con las propiedades del suelo y el clima.

En relación a la ***salinización***, es de especial importancia en la región mediterránea, donde aparece relacionada con el uso inadecuado del regadío, incluyendo el uso de aguas de poca calidad y limitaciones en el drenaje (EEA, 2003). En el marco del presente proyecto, los cambios proyectados en los balances hídricos de varias zonas de Navarra, y la existencia de zonas naturalmente salinas se deben añadir como factor de vulnerabilidad edáfica.

Otros problemas de degradación de suelos observados a la escala continental, y que deben ser considerados en el marco de las cadenas de impacto mencionadas son la ***pérdida de estabilidad estructural*** y la contaminación por *el uso inadecuado de determinadas enmiendas orgánicas* (Virto et al., 2015). En el primer caso, debe considerarse su relevancia en relación a la erosión y a la reducción de porosidad efectiva, relacionada con la formación de costras y la retención de agua. En el caso del uso de enmiendas orgánicas con contenidos en contaminantes reconocidos o potenciales, a pesar de la existencia de una normativa regulatoria, existen evidencias de acumulaciones de metales pesados y otros elementos no naturales en algunos suelos (e.g. Miró et al., 2006; Hurley and Nizzetto, 2018). Este impacto secundario no aparece considerado en el marco de la primera fase del proyecto LIFE-IP NAdapta-CC, pero podría incorporarse más adelante en relación al seguimiento de las parcelas de la red que se establezca para la monitorización.

Un aspecto clave a la hora de cuantificar las variaciones en las propiedades del suelo relacionadas con su vulnerabilidad y resiliencia, es la **selección de indicadores adecuados** para su monitorización. La selección de indicadores de calidad del suelo ha sido objeto de reflexión desde la definición del concepto (Karlen et al., 1997). A partir del trabajo realizado en ecosistemas y agrosistemas diferentes, se han propuesto muy diferentes indicadores (Bünemann et al., 2018). Existe consenso en la necesidad de que estos indicadores reúnan una serie de características, y sean capaces de evaluar el estado del suelo en relación a su capacidad para cubrir las funciones que le corresponden en el (agro)ecosistema y en la provisión de los servicios ecosistémicos considerados (Comeford et al., 2013; Adhikari & Hartemink, 2016; Drobnik et al., 2018; Pereira et al., 2019; Rinot et al., 2019).

Respecto a las características de **los indicadores, además de correlacionar adecuadamente con las funciones del suelo evaluadas, deben tener la mayor sensibilidad posible a los cambios en dichas funciones, así como en el manejo y el clima**, ser accesibles al mayor número posible de usuarios, y, si es posible, disponibles en bases de datos existentes (Andrews et al., 2004).

Así, en relación a los **indicadores seleccionados para la evaluación de la vulnerabilidad y el estado de los suelos frente a las amenazas descritas más arriba**, si bien no existe una normativa específica, **se han identificado varias iniciativas y estrategias europeas que proponen diferentes indicadores**. Si bien el objetivo de este trabajo no es realizar una revisión exhaustiva de estas iniciativas, se pueden destacar algunas de ellas por su representatividad en relación a las cadenas de impacto consideradas para la acción C.4 (Agricultura).

De esta manera, uno de los primeros esfuerzos establecidos oficialmente por la Comisión Europea para la protección de los suelos incluye la Comunicación sobre el desarrollo de indicadores agroambientales para monitorizar la integración de la problemática ambiental en la política agraria común (PAC, COM (2006) 508 final). Esta comunicación estableció la necesidad de desarrollar una serie de indicadores de calidad del suelo. El desarrollo inicial de esta serie de indicadores buscó describir cuatro aspectos fundamentales: la capacidad de producción primaria, la eficiencia en el uso de fertilizantes y enmiendas, *la respuesta de los suelos a la variabilidad climática*, y el nivel de cumplimiento de diversos servicios ecosistémicos, reflejados en la capacidad de almacenar carbono orgánico, de infiltración y de amortiguación del efecto de posibles contaminantes. Esta aproximación no se desarrolló en su totalidad, y el indicador agro-ambiental *Soil Quality* no aparece en la actualidad entre los desarrollados por Eurostat. Sin embargo, la iniciativa da idea de la necesidad de búsqueda de indicadores adecuados frente a la vulnerabilidad asociada al cambio climático.

Otros proyectos de financiación europea han avanzado en más detalle en la búsqueda de indicadores edáficos para la evaluación de la calidad de suelos agrícolas. Los proyectos **ENVASSO** (*Environmental Assessment of Soil for Monitoring*, https://esdac.jrc.ec.europa.eu/projects/envasso) e **iSQAPER** (*Interactive soil quality assessment in Europe and China for Agricultural Productivity and Environmental Resilience*, http://www.isqaper-project.eu/) destacan entre los más relevantes en este sentido.

Los dos proyectos proponen revisiones exhaustivas de indicadores existentes y emergentes para la evaluación de diferentes aspectos del estado de los suelos. Muchos de estos aspectos pueden relacionarse con procesos de degradación como los mencionados más arriba, o con la evaluación de diferentes servicios ecosistémicos. Según lo establecido en ambos proyectos, el objetivo de desarrollar estas listas de indicadores es el establecimiento de redes de monitorización en los que puedan controlarse periódicamente los cambios en estos indicadores, tal y como plantea el proyecto LIFE-IP NAdapta-CC.

En el marco del proyecto LIFE-IP NAdapta-CC, y con el ánimo de intentar sintetizar la abundante información existente manteniendo la perspectiva utilizada en este proyecto en cadenas de impacto, en la Tabla 3-1 se han resumido los indicadores más relevantes identificados en los proyectos ENVASSO e iSQAPER y referidos a aspectos del suelo asociados con los impactos identificados para la acción C4.1 (Figura 8).

Por la complejidad de las interacciones entre diferentes propiedades del suelo y su funcionamiento en los agrosistemas, la selección de indicadores recogida en la Tabla 3-1, especialmente en lo referente a algunos impactos como la pérdida de productividad, se ha realizado considerando los *drivers* climáticos descritos en la Figura 8 para el sector agrícola (aumento gradual de la temperatura y olas de calor, cambio en los patrones de precipitación, eventos extremos). Otros indicadores aparentemente más relacionados con *drivers* no climáticos o procesos de degradación inducida por otras actividades humanas, se han considerado menos relevantes en esta selección.

De la misma manera, hay indicadores que podrían repetirse como asociados a varios impactos.

Tabla 3-1 Indicadores edáficos seleccionados de las bases de datos de los proyectos ENVASSO e iSQAPER

Drivers climáticos	Impactos Nadapta		Propiedades edáficas	Indicadores ENVASSO*	Indicadores iSQAPER
	Intermedios	Directos (suelos)			
- Aumento temperatura - Cambio precipitaciones - Olas de calor	- Estrés térmico - Aumento de la evapotranspiración - Déficit hídrico/sequía	D: Pérdida de materia orgánica	Almacenamiento y distribución de carbono orgánico en el perfil	*C orgánico en el horizonte superior* *Stock de C orgánico* *Stock de turberas* Ratio C/N en el horizonte superior	*Materia orgánica total:* C orgánico total, color del suelo, olor del suelo *Materia orgánica lábil:* C lábil, C active, MO particulada, C oxidable, C extraíble con $KMnO_4$, fracción ligera, C extraíble con agua.
		B: Salinización	Presencia y distribución de sales solubles en el perfil	*Perfil salino* *Porcentaje de sodio de cambio (PSI)*	*Sodicidad/salinidad:* sodicidad, sodio de cambio (PSI), relación de adsorción de sodio, salinidad (CE).
		H: Pérdida de productividad	Disponibilidad de los factores de crecimiento: agua y nutrientes	*Densidad (aparente, de empaquetamiento y total)* *Volumen ocupado por aire a diferentes succiones* Permeabilidad Resistencia mecánica Drenaje Estrés de precompresión	*Almacén y movimiento agua:* capacidad de retención de agua, contenido de agua, capacidad de adsorción, volumen de poros ocupado por agua, capacidad de campo, punto de marchitez, agua disponible para las plantas, , K_{sat} *Profundidad de suelo* *Pedregosidad* *Textura* *Mineralogía:* de arcillas, contenido en carbonatos, etc. *Densidad aparente* *Nutrientes:* N total, N,P, K disponibles
- Eventos extremos precipitación	- Erosión			*Estado de la estructura* *Pérdida de suelo estimada y osbervada*	*Textura* *Materia orgánica tota* *Mineralogía:* de arcillas, contenido en carbonatos, etc. *Sodicidad/salinidad* *Estabilidad estructural:* estabilidad de agregados, resistencia esfuerzo cortante, friabilidad, estructura, consistencia, test de estallido.

) * El proyecto ENVASSO seleccionó como más relevantes algunos indicadores. Aparecen en cursiva en esta columna.

De los indicadores seleccionados en la tabla anterior, el trabajo de revisión desarrollado en el proyecto iSQAPER (Bünemann et al., 2018 y http://www.isqaper-is.eu/assessment/concepts-of-soil-quality-indicators/151-frequently-proposed-soil-quality-indicators), señala los más frecuentemente utilizados en los 65 sistemas de evaluación de la calidad de los suelos evaluados. Según la agrupación por tipos, **la materia orgánica y el pH resultan los más** propuestos dentro de los llamados "químicos", junto con el **estado de los nutrientes esenciales, la conductividad eléctrica, y la capacidad de intercambio catiónico**. Los indicadores "físicos", especialmente los relacionados con el almacenamiento de agua son frecuentemente propuestos en los últimos años (Bünemann et al., 2018).

3.1.1.1 Proyectos LIFE

En proyectos financiados por el programa LIFE en el ámbito de la adaptación y la agricultura en el ámbito mediterráneo, existen igualmente algunas propuestas de indicadores relacionados con las propiedades del suelo. Algunos ejemplos son los siguientes:

- El proyecto AMDRYC4 (LIFE16CCA/ES/000123, http://lifeamdryc4.eu/), desarrollado en la Región de Murcia, propone una línea específica de seguimiento de iniciativas dentro del programa 4por1000 (https://www.4p1000.org/). En ella, se indica que a través de diferentes medidas de manejo de agrosistemas de secano en el área mediterránea se espera obtener una mejora en la adaptabilidad, que se pueda contabilizar en base a indicadores específicos como la disminución de las tasas de erosión, el aumento del C orgánico del suelo, el mantenimiento o disminución de la salinización y alcalinización, el aumento de la fertilidad y de la biodiversidad edáfica.

- El proyecto LIFE AdaptaMed (LIFE14 CCA/ES/000612, https://www.lifeadaptamed.eu/), aunque centrado sobre todo en el manejo forestal en espacios protegidos en Andalucía, contempla una acción específica sobre conservación de suelo y manejo agrario en ecosistemas semiáridos en Cabo de Gata. En esta acción, se considera el suelo en relación al almacenamiento de agua, el mantenimiento de la fertilidad y el secuestro de carbono.

- El proyecto LIFE Desert Adapt (LIFE16 CCA/IT/000011, http://www.desert-adapt.it/index.php/en), centrado en medidas de adaptación zonas con riesgo de desertificación, desarrolla una acción específica sobre la adopción de un manejo integrativo del suelo. En esta acción, en la que se realiza una aproximación similar a la de la acción C4.1 de LIFE-IP NAdapta-CC, a partir de la evaluación de diferentes sistemas de manejo de suelo, se propone evaluar su eficiencia a partir de su impacto sobre la calidad del suelo. Para ellos, se propone monitorizar el estado inicial (*baseline*) y final (tras 5 años) del suelo a partir de varios indicadores físicos (porosidad, densidad aparente, estabilidad estructural), químicos (capacidad de intercambio catiónico, nitrógeno total, pH), de la fracción orgánica (C orgánico total y lábil) y biológicos (diversidad funcional).

- En una zona geográfica similar (dehesas de Extremadura y Portugal), el proyecto LIFE Montado-Adapt (LIFE15 CCA/PT/000043, https://lifemontadoadapt.com/?l=ES), incluye una línea específica sobre la mejora de la fertilidad del suelo a través de diferentes estrategias (fertilizantes verdes, micorrización, etc).

- El proyecto AgriAdapt (LIFE15 CCA/DE/000072, http://agriadapt.eu) tiene como objetivo desarrollar medidas de adaptación que mantienen o mejoran la competitividad de la explotación aumentando la resiliencia ante el cambio climático en las cuatro grandes zonas agroclimáticas de Europa. Este proyecto identifica vulnerabilidades para diferentes agrosistemas en cada una de ellas. Si bien la mayoría de indicadores se refieren a características de los cultivos, en los correspondientes a la región meridional, se señala la reducción de la disponibilidad de agua en el suelo como uno de los principales impactos

3.1.2 Selección de indicadores LIFE-IP NAdapta-CC

A partir de la información anterior sobre indicadores edáficos en relación a los impactos previstos para la acción C4 (Agricultura) del proyecto LIFE-IP NAdapta-CC, puede realizarse **una pre-selección de indicadores edáficos en el marco de la acción C4.1.**

Esta selección debe considerar también, en la línea de otros estudios recientes sobre la monitorización de la calidad del suelo en agrosistemas europeos (Bai et al., 2018), las tres estrategias seleccionadas en LIFE-IP NAdapta-CC para el aumento de la resiliencia de los agrosistemas: adición de materia orgánica, agricultura de conservación y la rotación de cultivos. En algunos casos, se han considerado manejos ecológicos, especialmente en relación al uso de fertilizantes y enmiendas orgánicas, así como las estrategias de manejo de pastos.

Como se ha comentado, estos indicadores deben seleccionarse a **dos niveles**: los utilizados para determinar la ***vulnerabilidad de los suelos*** de las diferentes zonas identificadas en el apartado anterior, y los de interés para ***monitorizar el estado y la evolución del suelo***, **que pueden evaluar la resiliencia del agrosistema**, en relación a esta vulnerabilidad en las parcelas de la red de control y los ensayos específicos de esta acción.

Como se ha descrito más arriba, existe consenso en la comunidad científica en que esta selección de indicadores debe realizarse atendiendo a dos premisas: (i) los indicadores deben estar relacionados con funciones del suelo que sean de relevancia según el objeto del estudio, y (ii) es necesario adaptar la selección y evaluación de indicadores al contexto local y regional donde se utilicen (e.g. Salomé et al., 2016).

Esta necesidad de consideración de las condiciones y funciones evaluadas localmente fue puesta en evidencia por ejemplo en los primeros intentos de crear un marco normalizado de evaluación de la calidad del suelo en Europa (Eckelmann et al., 2006; Tòth et al., 2007). Por su lado, Bünemann et al. (2018), en la revisión sobre el tema, destacan la necesidad de definir con precisión la función o funciones del suelo para los que se consideran.

Esta observación está en línea con las indicaciones del propio Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático, que destaca que la selección y, especialmente, la evaluación de estos indicadores, deben ser considerada en base a las condiciones locales.

En el marco del proyecto LIFE-IP NAdapta-CC, las dos premisas se han adoptado al (i) buscar indicadores de vulnerabilidad y adaptabilidad asociados a impactos concretos del cambio climático proyectado, y (ii) realizarse una aproximación regional y zonal al estudio de estas vulnerabilidades.

Esta aproximación permite además integrar los diferentes tipos de indicadores descritos. Según se observa en la Tabla 3-1 (ENVASSO y iSQAPER), los principales indicadores seleccionados pueden categorizarse en **dos grandes grupos: los relacionados con las características intrínsecas del perfil, y los potencialmente modificables por el manejo**. En la clasificación tradicional de indicadores de suelo, estos dos grupos podrían asimilarse a los indicadores llamados *intrínsecos* y *dinámicos*. **Ambos tipos pueden informar de la vulnerabilidad del suelo, pero los segundos, por su capacidad de reaccionar al manejo, indicarán con mayor precisión y capacidad de respuesta, la resiliencia del agrosistema en diferentes condiciones de manejo**.

En el marco del proyecto LIFE-IP NAdapta-CC, la aproximación seguida permite incorporar esta categorización a partir de los trabajos de zonificación y caracterización de los suelos de cada zona (que permiten identificar a grandes rasgos las principales características genéticas o intrínsecas de los suelos de cada zona, y definir su ***vulnerabilidad según sus características y limitaciones*** (sección 2.4.2), y los de monitorización de indicadores en las parcelas experimentales y en la red de parcelas seleccionada, que permite realizar una ***evaluación de los niveles de referencia*** (***baseline***) ***y la variabilidad asociada a los indicadores dinámicos*** **según los tipos de manejo considerados**.

Esta aproximación se ha realizado así, en este caso, **en dos fases**:

- Por un lado, según la descripción de las diferentes limitaciones realizada en la sección 2.4.2, se ha identificado la distribución geográfica de los diferentes niveles de indicadores intrínsecos para cada una de las 12 zonas identificadas. Estos indicadores son: la pedregosidad, la pendiente, la capacidad de retención de agua estimada en la sección control, y parámetros específicos como el riesgo de salinización o la presencia de carbonatos alcalinotérreos en superficie.

  Para cada uno de estos indicadores, se ha realizado una cartografía específica en las 12 zonas determinadas. Un ejemplo de esta cartografía, para la zona 1 (Ribera navarra), se incluye en la Figura 31.

  Con esta primera distribución, se puede afianzar el desarrollo de la red de parcelas en las que van a monitorizarse los posibles cambios, al conocer de antemano las características más limitantes de cada zona en relación a los drivers e impactos identificados en LIFE-IP NAdapta-CC. Esto permite realizar un diagnóstico previo de la

vulnerabilidad debida a las características intrínsecas del perfil, como se recoge en la Tabla 3-1.

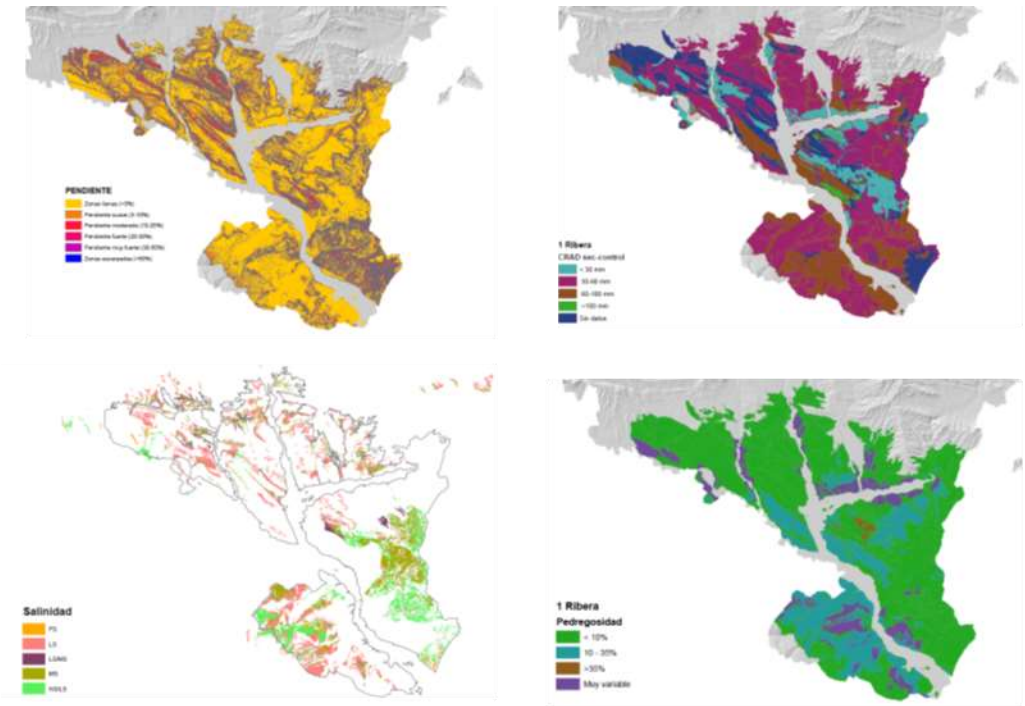


Figura 31 Distribución de los indicadores de vulnerabilidad asociados a las características del perfil en la Zona 1. Pendiente, Capacidad de retención de agua disponible en la sección control, salinidad, pedregosidad.

Fuente: Elaboración propia a partir del Mapa de Suelos de Navarra 1:50.000.

- Por otro lado, para los impactos esperados, y considerando las tres estrategias de LIFE-IP NAdapta-CC, es posible seleccionar indicadores dinámicos, que permitan conocer el estado inicial y la evolución en el tiempo de los indicadores dinámicos (que pueden cambiar con el manejo), seleccionados para cada uno de los drivers e impactos definidos. Estos indicadores se refieren esencialmente al horizonte de superficie, y se recogen en la Tabla 3-2.

Tabla 3-2 Estrategias e indicadores edáficos de diagnóstico de vulnerabilidad y resiliencia.

Drivers climáticos	Impactos NADAPTA		Diagnóstico de la vulnerabilidad/resiliencia	Indicadores para la evaluación
	Directos (suelos)	Directos (suelos)		
- Aumento temperatura **- Cambio precipitaciones** **- Olas de calor**	- Estrés térmico - Aumento de la evapotranspiración - Déficit hídrico/sequía	D: Pérdida de materia orgánica	Asociada especialmente al horizonte superficial y muy dependiente del manejo, lo que requiere una evaluación local.	***C orgánico total horizonte labrado.*** (0-15 cm para homogeneización)
		B: Salinización	A partir de la información existente sobre salinidad de suelos.	***Conductividad eléctrica*** horizonte superficial. ***Estabilidad estructural.***
		H: Pérdida de productividad	Asociada tanto a propiedades intrínsecas (textura, pedregosidad, profundidad de suelo, etc) como dinámicas (estructura, retención de agua, etc.)	***Capacidad de retención de agua disponible para las plantas*** (CRAD) en horizonte labrado. ***Densidad aparente.***
- Eventos extremos precipitación	- Erosión		Asociada a la morfología del terreno, el manejo, las propiedades intrínsecas del suelo y las propiedades dinámicas del horizonte superficial.	***Estabilidad estructural.***

Los **indicadores seleccionados** incluyen el **C orgánico en el horizonte superficial, la capacidad de retención de agua disponible para las plantas en este mismo horizonte, la densidad aparente y la estabilidad estructural como indicadores físicos, y la conductividad eléctrica y el pH**.

La ***materia orgánica del suelo***, como se ha explicado anteriormente, aparece como un indicador de vulnerabilidad frente a numerosos riesgos (Poeplau et al. 2018; Chenu et al. 2019; Lorenz et al. 2019). Además de su relevancia en el marco de este proyecto, es uno de los indicadores de suelo ya señalados en la revisión de Allen, Singh, and Dalal (2011) como muy frecuente y apropiado al ser familiar, directo, relacionado con el desempeño de las funciones de los ecosistemas, y tener "memoria". El contenido total, si bien puede ser matizado como indicador en función de los objetivos de estudio concretos sobre diferentes funciones del suelo (Poeplau et al. 2018), es el indicador de referencia más extendido para evaluar el estado de los agrosistemas a la escala regional y global (Lorenz et al. 2019).

El carácter universal, y a la vez de valor local, del almacenamiento de materia orgánica del suelo como indicador para la monitorización de procesos de degradación de la tierra es ampliamente reconocido (Chenu et al., 2019; Lorenz et al., 2019). El contenido total, si bien puede ser matizado como indicador en función de los objetivos de estudio concretos sobre diferentes funciones del suelo (Bastida et al., 2008; Poeplau et al., 2018), es **el indicador de referencia**

más extendido para evaluar el estado de los agrosistemas a la escala regional y global (Lal et al., 2018; Lorenz et al., 2019).

Wiesmeier et al. (2019) han revisado recientemente los principales indicadores y factores de almacenamiento de materia orgánica en el suelo a diferentes escalas. Estos autores resultan la importancia de adoptar **aproximaciones regionales** para estimar adecuadamente la capacidad de almacenamiento de C orgánico en condiciones específicas de clima y de uso de la tierra, manejo y características de la vegetación. Para avanzar en la búsqueda de indicadores de los impactos de la gestión del territorio relacionados con la materia orgánica, se proponen ***las propiedades estructurales*** del suelo como prometedoras.

El estado de la ***estructura del suelo***, así como su relación con la ***porosidad***, se consideran de hecho propiedades de diagnóstico de los agrosistemas, al ser la expresión de la interacción de los componentes primarios del suelo con otros dependientes del manejo (Rabot et al. 2018). En la revisión de (Allen et al. 2011) aparece como un indicador edáfico útil en el contexto de cambio climático al estar involucrado en el mantenimiento de importantes funciones del ecosistema como el almacenamiento de C orgánico, la capacidad de infiltración, movimiento y almacenamiento de agua, la actividad biológica y de las raíces, y la resistencia del suelo a la erosión.

Además, la determinación de la ***densidad aparente***, una propiedad relacionada tanto con cambios asociados al manejo como a cambios en indicadores dinámicos como el contenido en sales solubles o en materia orgánica, permite obtener información adicional sobre los cambios en estos indicadores y otros relacionados con la infiltración o la aireación (Allen et al. 2011).

Los indicadores referidos a la ***disponibilidad y eficiencia en el uso del agua*** cobran especial relevancia en cadenas de impacto relacionadas con cambios en los principales factores del balance hídrico (precipitación y temperatura como reguladora de la evapotranspiración). Recientemente, Horion et al. (2019) han identificado la eficiencia del uso del agua como un indicador capaz de detectar cambios en los ecosistemas europeos como respuesta a cambios de uso de la tierra y de condiciones climáticas.

Finalmente, los indicadores referidos a la ***presencia de sales solubles*** **y la** ***acidez del suelo*** cobran especial relevancia en contextos donde los *drivers* climáticos pueden tener consecuencias en la acumulación de sales o el lavado de bases de los horizontes superficiales. En las condiciones regionales de Navarra, estas situaciones son de especial interés en las zonas con presencia de suelos salinos y/o con yesos, y en las zonas de régimen de humedad percolante. Las consecuencias de diferentes manejos sobre los suelos de estas zonas, combinadas con los cambios esperables en el balance hídrico, pueden interactuar con estas condiciones, y por tanto modificar el estado y vulnerabilidad de los suelos agrícolas en relación a estas características.

Así, el conjunto de indicadores permite por un lado **abarcar parámetros sensibles y relativamente fáciles de medir, y por otro considerar la vulnerabilidad de los suelos agrícolas de Navarra frente a las principales variaciones esperadas descritas en las cadenas de impacto para la agricultura**.

Esta aproximación está en línea con los propuesto por FAO (2013), en su *Manual de Información (Sourcebook)* para la agricultura climáticamente inteligente, indica que las propiedades y funciones del suelo más relevantes en este respecto, **y que deben considerarse**

a la escala regional, son la estructura, la textura, el contenido en materia orgánica, nutrientes, los organismos del suelo, el pH y la capacidad de intercambio catiónico. Son las propiedades que permiten al suelo cumplir sus funciones de producción, especialmente en relación a su capacidad de retener agua. Considerando que algunas de estas propiedades no son sensibles al manejo, y otras tienen un carácter más dinámico, en las medidas de evaluación del estado del suelo de cara a la adaptación, este Manual incluye: (i) el control de la erosión, (ii) la mejora de la estructura mediante el manejo de la materia orgánica, (iii) el manejo de la materia orgánica para lograr su mantenimiento y/o aumento efectivo, y (iv) la optimización del manejo de nutrientes, incluyendo la optimización del uso de abonos orgánicos.

Entre las prácticas recomendadas por el manual como de interés para la adaptación de los agrosistemas frente a manejos convencionales, se incluyen, para las regiones templadas, la agricultura de conservación (tanto en lo referido a la supresión del laboreo como a la cobertura permanente), el manejo integrado de la fertilidad, maximizando el uso de los materiales orgánicos y su efectividad mediante el mantenimiento de la calidad del suelo, y las estrategias de rotación y explotaciones mixtas normalmente asociadas al manejo ecológico.

La aproximación descrita permite, una vez definidos los impactos y las propiedades del suelo asociadas a cada uno de ellos en el marco de la acción C4.1 del proyecto LIFE-IP NAdapta-CC (Tabla 3-2), así como la descripción realizada en la sección 2.4.2. de cada una de las zonas determinadas para este trabajo, realizar un estudio de la ***vulnerabilidad edáfica*** en parcelas seleccionadas en cada una de las zonas descritas en este trabajo.

3.2 Establecimiento de parcelas experimentales

3.2.1 Localización, diseño e indicadores

Según se establece en la memoria del proyecto, se dispone de **cuatro parcelas experimentales**, diseñadas para la evaluación de los efectos a largo plazo de las estrategias adaptativas consideradas: agricultura de conservación (dos ensayos de largo plazo (> 25 años) en Ilundain), uso de enmiendas orgánicas (un ensayo en Artajona) y rotaciones (un ensayo en Sesma).

El esquema y tratamientos de cada una de las parcelas se recogen a continuación.

Parcelas Ilundain (Agricultura de Conservación)

Ensayo 1 (Ilundain Bosque)

Localización	Ilundain (Aranguren). Polígono 9. Parcela 20. Recinto 1.			
Objeto	Evaluación estrategias de manejo de suelo			
Suelo	Typic Calcixerept (ST, 2014)			
Tratamientos (n = 4)	Cereal de secano (trigo-cebada) **Factor: Sistema de laboreo**			
	No laboreo (siembra directa)	Mínimo laboreo (grada)	Laboreo reducido (chísel)	Vertedera
Indicadores	Cultivo: rendimiento, índices de cosecha, residuo incorporado			
	Suelo: Carbono orgánico, CRAD, densidad aparente y estabilidad de la estructura.			

Ensayo 2 (Ilundain Pueblo)

Localización	Ilundain (Aranguren). Polígono 9. Parcela 16. Recinto 5. 			
Objeto	Evaluación estrategias de manejo de suelo y de los restos de cultivo			
Suelo	Typic Calcixerept (ST, 2014)			
Tratamientos (n = 3)	Cereal de secano (trigo-cebada) **Factor 1: Sistema de laboreo** **Factor 2: Manejo de los residuos de cultivo (exportación vs. incorporación)**			
	F1: No laboreo (siembra directa) F2: picada/empacada	F1: Mínimo laboreo (grada) F2: Paja empacada	F1: Laboreo reducido (chísel) F2: Picada/empacada	F1: Vertedera F2: Picada/empacada
Indicadores	Cultivo: rendimiento, índices de cosecha, residuo incorporado. Suelo: Carbono orgánico, CRAD, densidad aparente y estabilidad de la estructura			

Parcela Artajona (Enmiendas orgánicas)

Localización	Artajona. Polígono 13. Parcela 1325. 					
Objeto	Evaluación estrategias de fertilización orgánica					
Suelo	Typic Calcixerept (ST, 2014) (mapa suelos de Navarra 1:25 000)					
Tratamientos (n = 4)	Maíz de regadío **Factor: Fertilización (orgánica diferentes fuentes, control mineral)**					
	Purín cerdo	Enmienda 1 (Ecofert)	Enmienda 2 (Biomendi)	Enmienda 3 (Fango, NILSA 1)	Enmienda 4 (Compost, NILSA 2)	Control (mineral)
Indicadores	Cultivo: rendimiento, índices de cosecha, residuo incorporado					
	Suelo: Suelo: Carbono orgánico, CRAD, densidad aparente y estabilidad de la estructura					

En la campaña 2021/2023, la parcela correspondiente a la evaluación de la estrategia de enmiendas orgánicas tuvo que desplazarse de su ubicación origanal en Artajone adebido a que

los ecoregímenes de la nueva PAC no permiten el monocultivo (en este caso, de maíz de regadío) durante más de 4 años seguidos. Se optó por diseñar una nueva parcela en Olóriz, con un cultivo muy representativo de su zona (el ceral de secano, 2 años de trigo y 2 de cebada). El diseño se recoge a continuación.

Localización	Olóriz. Polígono 7. Parcelas 98-99.					
Objeto	Evaluación estrategias de fertilización orgánica					
Suelo	No dopsnible					
Tratamientos (n = 4)	Cereal de secano (trigo, cebada) **Factor: Fertilización (orgánica diferentes fuentes, control mineral)**					
	Purín cerdo (fondo)	Purín cerdo (cobertera	Enmienda 1 (Ecofert)	Enmienda 2 (Fango, NILSA 1)	Enmienda 3 (CompostFORSU, NILSA 2)	Control (mineral)
Indicadores	Cultivo: rendimiento, índices de cosecha, residuo incorporado					
	Suelo: ND					

Parcela Sesma (Rotaciones)

Localización	Sesma. Polígono 4. Parcela 599.				
Objeto	Evaluación rotaciones secano				
Suelo	Fluventic Haploxerept (ST, 2014) (mapa suelos de Navarra 1:25 000)				
Tratamientos (n = 4)	Cultivos de secano **Factor: Rotación**				
Rotaciones	Rotación 1: Avena, cebada, diversificación, trigo, avena	Rotación 2: Barbecho, cebada, diversificación, trigo, Barbecho	Rotación 3: Cebada, cebada, diversificación, trigo, cebada	Rotación 4: Guisante, cebada, diversificación, trigo, guisante	Testigo: Trigo, cebada, diversificación, trigo, trigo
Indicadores	*Cultivo*: rendimiento, índices de cosecha, residuo incorporado; Suelo: Carbono orgánico, CRAD, densidad aparente y estabilidad de la estructura				

Estas parcelas son representativas de las condiciones de suelo y manejo más frecuentes en el contexto regional.

3.2.1.1 Muestreos y análisis

Las técnicas de muestreo y análisis de los indicadores seleccionados, tanto en las parcelas experimentales como en la red de parcelas, deben escogerse considerando el número elevado de analíticas necesarias, la vocación de continuidad y monitorización en el tiempo, y las características de los suelos estudiados. Esto significa que ceben ser técnicas precisas y bien estandarizadas, de ejecución lo más sencilla posible, y adaptadas a la tipología de muestras.

Así, la Tabla 3-3 recoge las metodologías de análisis establecidas para los indicadores seleccionados. El C orgánico total (COS), se corresponde con el oxidable. La retención de agua disponible para las plantas (CRAD) se establece como la presente entre la capacidad de campo (CC, equivalente a la retenida a una succión de -33 KPa) y el punto de marchitez permanente (PM, equivalente a la retenida a -1500 KPa). La estabilidad de la estructura se expresa como el porcentaje de agregados estables al agua (WSA) tras una humectación brusca y tiempo de agitación predeterminado, para las parcelas experimentales. En los ensayos en parcelas agrícolas, estas metodologías se conservan, excepto la estabilidad de la estructura, que se mide a partir de la dispersión natural de arcilla tras humectación brusca y agitación.

Tabla 3-3 Parámetros, muestras, y metodologías para el estudio de los indicadores edáficos

Indicador	Método	Referencias	Nº muestras estimado
C orgánico total horizonte labrado. **(0-30 para homogeneización)**	Oxidación húmeda (Walkley-Black)	(Tiessen and Moir 1993) (Apesteguia et al. 2018)	**Parcelas experimentales:** Ilundain (1): 4 manejos x 3 reps x 2 profs = 24 muestras Ilundain (2): 7 manejos x 3 reps x 2 profs = 42 muestras Artajona: 6 enmiendas x 3 reps x 2 profs = 36 muestras Sesma: 6 rotaciones x 3 reps x 2 profs = 36 muestras
Conductividad eléctrica **horizonte superficial.**	Solución suelo:agua 1:2,5. Si necesario, extracto saturación.	(Baize, D. 2018.) Guide des analyses en pédologie. Quae, Versailles, Francia.	
Capacidad de retención de agua disponible para las plantas **(CRAD) en horizonte labrado.** *Densidad aparente.*	Contenido gravimétrico y volumétrico en puntos característicos (-33 KPa, -1500 KPa) Anillos 100 cm^3	(Dirksen 1999)	
Estabilidad estructural.	Tamizado en húmedo (WSA) y/o arcilla naturalmente dispersa.	(Le Bissonnais et al. 2007; Bosch-Serra et al. 2017)	

3.2.2 Diagnóstico

El estudio del efecto de cada tratamiento considerado sobre los indicadores y variables evaluadas se ha realizado a través de la ratio de respuesta (RR). En este caso se ha empleado el logaritmo natural de ratio de respuesta (LRR) que tiene esta forma:

$$LRR = \ln\left(\frac{\bar{X}_R}{\bar{X}_C}\right)$$

donde $\bar{X}_R$ y $\bar{X}_C$ son los valores medios en el tratamiento experimental y en el tratamiento control, bajo manejo convencional, respectivamente. Esto representa una forma práctica de cuantificar y resumir la magnitud y dirección de los resultados. Aplicar la variante logarítmica del RR permite linealizar y normalizar la distribución del muestreo, mejorando la representatividad de los resultados (Hedges et al., 1999). La varianza de la LRR asociada a cada tratamiento se calculó siguiendo a estos autores como:

$$var(LRR) = \frac{(SD_R)^2}{n_R \bar{X}_R^2} + \frac{(SD_C)^2}{n_C \bar{X}_C^2}$$

donde *SD* y *n* indican las desviaciones estándar y el tamaño de la muestra de los tratamientos experimentales y control.

El LRR de los diferentes tratamientos está representado en forma de gráficos "de bosque", transformando previamente el valor en RR para simplificar. De esta manera, el efecto se considera significativo cuando el intervalo de confianza (IC) del 95% del RR no se superpone a uno (α= 0,05), considerándose un efecto positivo cuando el intervalo quede por encima del uno y negativo cuando quede por debajo del mismo.

3.2.2.1 Agricultura de conservación: Ensayos de Ilundain

Como se ha explicado en el apartado anterior, en Ilundain se localizan 2 ensayos centrados, en este caso, en evaluar el efecto de la agricultura de conservación sobre los indicadores edáficos de adaptabilidad definidos. El primero de los ensayos, denominado *Ilundain Bosque*, consiste en contrastar 3 sistemas de manejo diferentes asociados a la agricultura de conservación, no laboreo (1), mínimo laboreo (muelle) (2) y chísel (3), sobre el manejo convencional que en este caso se considera la vertedera.

El segundo ensayo, denominado *Ilundain Pueblo*, incorpora una nueva variable en el análisis que es la extracción o no de los restos de cultivo tras la cosecha. En este caso los sistemas de manejo evaluados son 2 tratamientos con no laboreo, uno en el que los restos son picados y dejados en la superficie (no laboreo picada (1)), y otro en el que los restos son extraídos de la parcela (no laboreo empacada (2)). El ensayo incluye, siguiendo la misma estrategia de gestión de los restos de cultivo, otros 2 tratamientos asociados al uso del chísel, chísel picada (3) y chísel empacada (4) y un tratamiento asociado al uso de la grada, en este caso con extracción de restos de cultivo, grada empacada (5). Finalmente, de cara a realizar un contraste completo, se ha incluido un último tratamiento experimental que consiste en el uso de la vertedera, pero sin extracción de restos, vertedera picada (6). Todos estos tratamientos experimentales se contrastan con el tratamiento control que, una vez más, representa el manejo convencional con la vertedera con extracción de restos.

La Figura 32 muestra los resultados del ensayo Ilundain Bosque, en el que se representa el efecto de cada uno de los tratamientos evaluados sobre los diferentes indicadores edáficos que han sido analizados. Los resultados muestran una variabilidad importante, con una tendencia observada hacia un efecto positivo de las estrategias evaluadas frente al manejo convencional.

En el caso del no laboreo, el efecto positivo es observado en el análisis volumétrico tanto de la CC como de la CRAD asociado a un aumento de la densidad aparente. El efecto observado en el resto de indicadores fue neutro, aunque se puede observar una tendencia positiva en el análisis gravimétrico de la CC y de la CRAD. En el caso del mínimo laboreo, se observa el mismo efecto positivo general en la retención de agua, de nuevo una tendencia a aumentar la densidad aparente. Finalmente, el último tratamiento, asociado al uso del chísel, muestra un efecto positivo general en los indicadores asociados a la CC, volumétrico, y CRAD tanto volumétrica como gravimétrica, y un aumento en la densidad aparente.

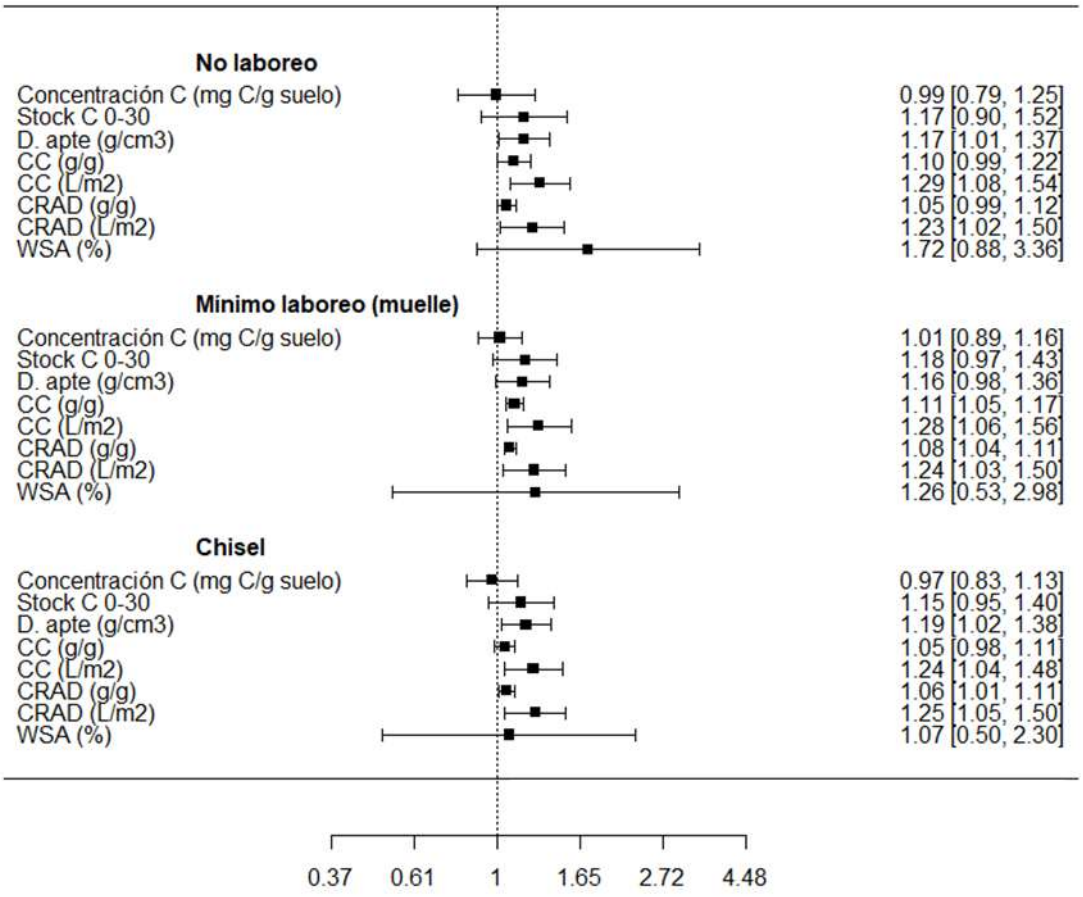


Figura 32 Gráfico "de bosque" para los ratios de respuesta (RR) frente al manejo convencional (vertedera), para los diferentes indicadores considerados en la parcela Ilundain Bosque (Agricultura de Conservación).

Estos resultados destacan, por un lado, que no se ha visto efecto positivo en los indicadores asociados al C, ni en concentración ni en stock, aunque este último parece tener una tendencia más positiva. En el resto de indicadores físicos, a excepción de la estabilidad estructural, sí que han tenido respuesta. Esto remarca que la agricultura de conservación puede presentar un efecto positivo sobre las propiedades físicas del suelo, a pesar de aumentar ligeramente la densidad aparente, y no necesariamente hacerlo simultáneamente sobre el contenido de carbono del mismo, al menos en las condiciones agroclimáticas de este ensayo. La tendencia positiva en la estabilidad estructural en los 30 cm evaluados en el no laboreo, puede reflejar que el laboreo, aunque sea mínimo, podría reducir o modular la mejora de dicho indicador de estos suelos.

Resultados indicadores NADAPTA en 2023

En la Tabla 3-4 se muestran los resultados de los indicadores de calidad en la parcela Ilundain Bosque para el año 2023. Debido a problemas con el equipo de laboratorio, por el momento, únicamente se muestran los resultados de las retenciones de agua a capacidad de campo (-33 kPa). El resto de indicadores edáficos se encuentran en el Anexo AC4.1.2c_3, dedicado a los ensayos realizados en Ilundain.

Tabla 3-4. Indicadores NADAPTA en la parcela Ilundain Bosque 2023

Manejo	Profundidad (cm)	Da corregida (g/cm3)	CC (L/m2)	Stock C (Mg/Ha)
NL	0-15	1,78 ± 0,04	58,82 ± 1,61	32,9 ± 0,49
	15-30	1,79 ± 0,04	54,38 ± 2,05	27,78 ± 0,49
MU	0-15	1,79 ± 0,03	59,8 ± 0,57	34,98 ± 0,56
	15-30	1,88 ± 0,01	54,55 ± 0,46	30,17 ± 1,16
CH	0-15	1,59 ± 0,06	54,97 ± 2,14	31,93 ± 1,6
	15-30	1,84 ± 0,03	55,86 ± 2,13	29,5 ± 1,44
VE	0-15	1,59 ± 0,04	47,95 ± 2,53	26,72 ± 1,31
	15-30	1,69 ± 0,07	54,22 ± 1,29	27,55 ± 0,3

Observando los valores obtenidos, pueden destacarse la mayor compactación existente en los primeros 15 centimetros en el no laboreo y el muelle (mínimo laboreo), en comparación con la vertedera y chisel. En el caso de la vertedera, esta menor compactación también se observa de los 15 a los 30 centimetros. Por su parte, en cuanto a la cantidad de agua que se acumula a capacidad de campo, los suelos menos laboreados son los que mejores resultados ofrecen en los primeros 15 centimetros. Aumentando la profundidad, estas diferencias desasparecen. Finalmente, observando los stocks de carbono orgánico, puede apreciarse una diferencia principal entre la vertedera y el resto de manejos, siendo esta la que peores resultados registra en las dos profundidades (sobretodo en los primeros 15 centimetros).

En la siguiente Figura 33 se muestran los resultados del ensayo Ilundain Pueblo, en el que se representa el efecto de los diferentes tratamientos evaluados sobre los indicadores edáficos que han sido analizados. En este caso, se observa una alta variabilidad en los efectos en cada indicador asociado a los diferentes tratamientos, frente al manejo convencional con vertedera y sin retorno de los restos de cultivo. Destaca el aumento en la densidad aparente observado en 3 de los 6 tratamientos (no laboreo empacada, chísel picada y grada empacada) sin guardar relación aparente con el manejo realizado de la paja. También destacan el efecto nulo observado en los indicadores asociados al C y el efecto positivo en la estabilidad estructural de los tratamientos de chísel, al contrario de lo observado en el ensayo anterior. Los indicadores

asociados a la retención de agua no parecen mostrar un patrón en base al manejo realizado de los restos de cultivo.

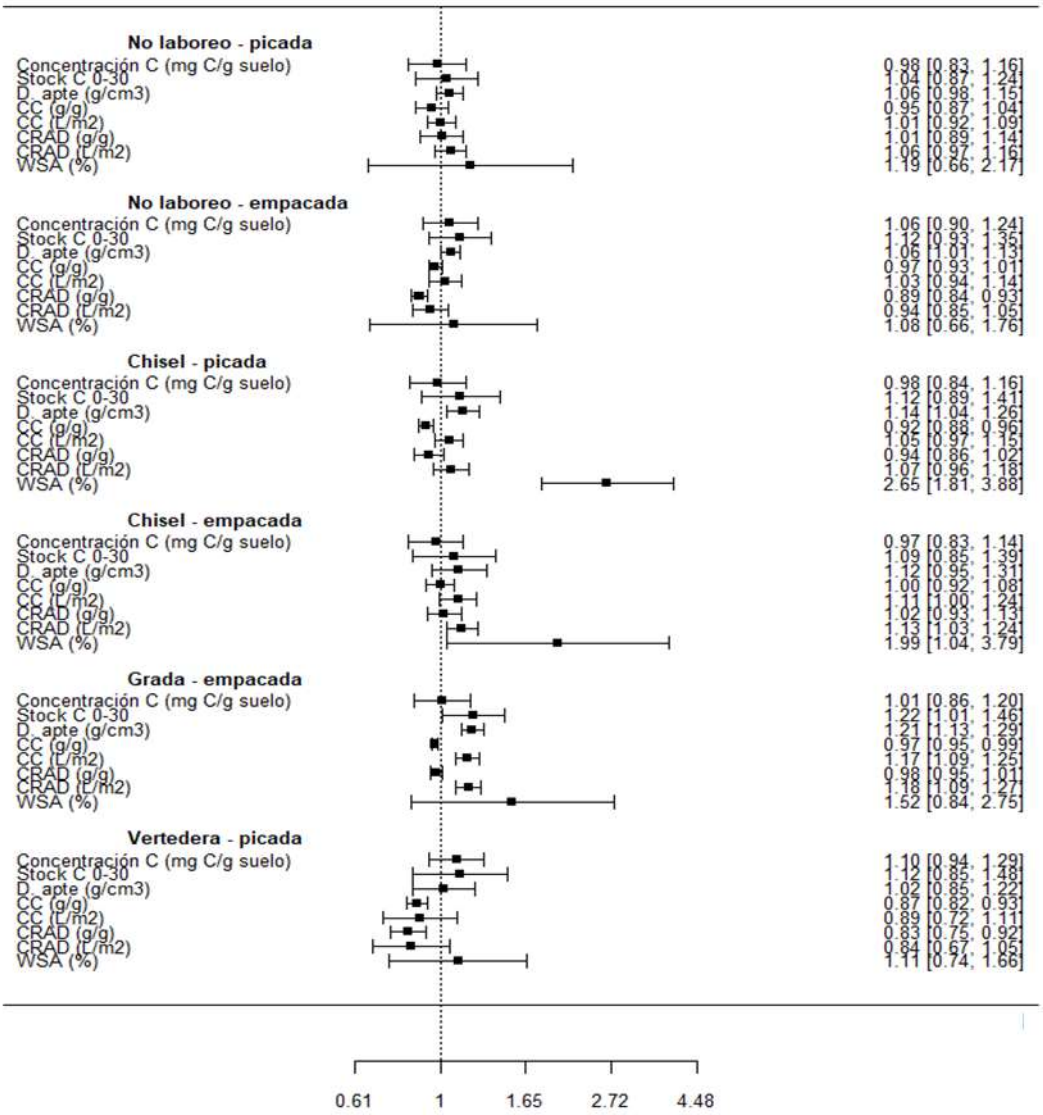


Figura 33 Gráfico "de bosque" para los ratios de respuesta (RR) frente al manejo convencional (vertedera con rastrojo empacado), para los diferentes indicadores considerados en la parcela Ilundain Pueblo (Agricultura de Conservación).

Resultados indicadores NADAPTA en 2023

En la tabla 3-5 se muestran los resultados de los indicadores de calidad para el año 2023. Debido a problemas con el equipo de laboratorio, por el momento, únicamente se muestran los resultados de las retenciones de agua a capacidad de campo (-33 kPa). El resto de indicadores edáficos se encuentran en el Anexo C4.1.2c_3, dedicado a los ensayos realizados en Ilundain.

Tabla 3-5. Indicadores NADAPTA en la parcela Ilundain Pueblo

Observando los resultados de la tabla, los manejos de chisel con paja picada, la grada con paja empacada y la siembra directa con paja empacada, son los que peores densidades presentan. Por su parte, la siembra directa con paja picada y la vertedera con paja picada han obtenido las densidades mas bajas. Es destacable la diferencia de densidad entre las dos siembras directas, siendo la única diferencia entre ellas el tipo de paja aplicada. En relación a la retención de agua a capacidad de campo, la siembra directa es la que mejores resultados presenta. Por último, se observa una marcada diferencia en el stock de carbono orgánico entre los manejos con vertedera y la siembra directa con paja picada con el resto, siendo las concentraciones en estas las más bajas. Nuevamente es reseñable el bajo resutlado obtenido en la simbra directa.

3.2.2.2 Aportes orgánicos: Ensayo de Artajona

El ensayo de Artajona, como se ha explicado, está centrado en la estrategia de uso de fertilización orgánica. Dispone de 5 tratamientos, en los que se determina el comportamiento de 5 fuentes diferentes de C orgánico: Purín de cerdo, dos enmiendas comerciales (Eco-fert, Bio-Mendi), y dos preparaciones a partir de materiales de depuración de aguas residuales (colaboración con NILSA). Como control, se dispone de un tratamiento basado en una fertilización convencional mineral, con el que cada uno de los tratamientos experimentales es contrastado, en el cultivo de maíz de regadío. En este caso se han evaluado los indicadores edáficos ya señalados, y además se ha hecho un seguimiento del contenido de nitrógeno, fosforo y potasio (N-P-K), lo que representa un control de fertilidad clásico.

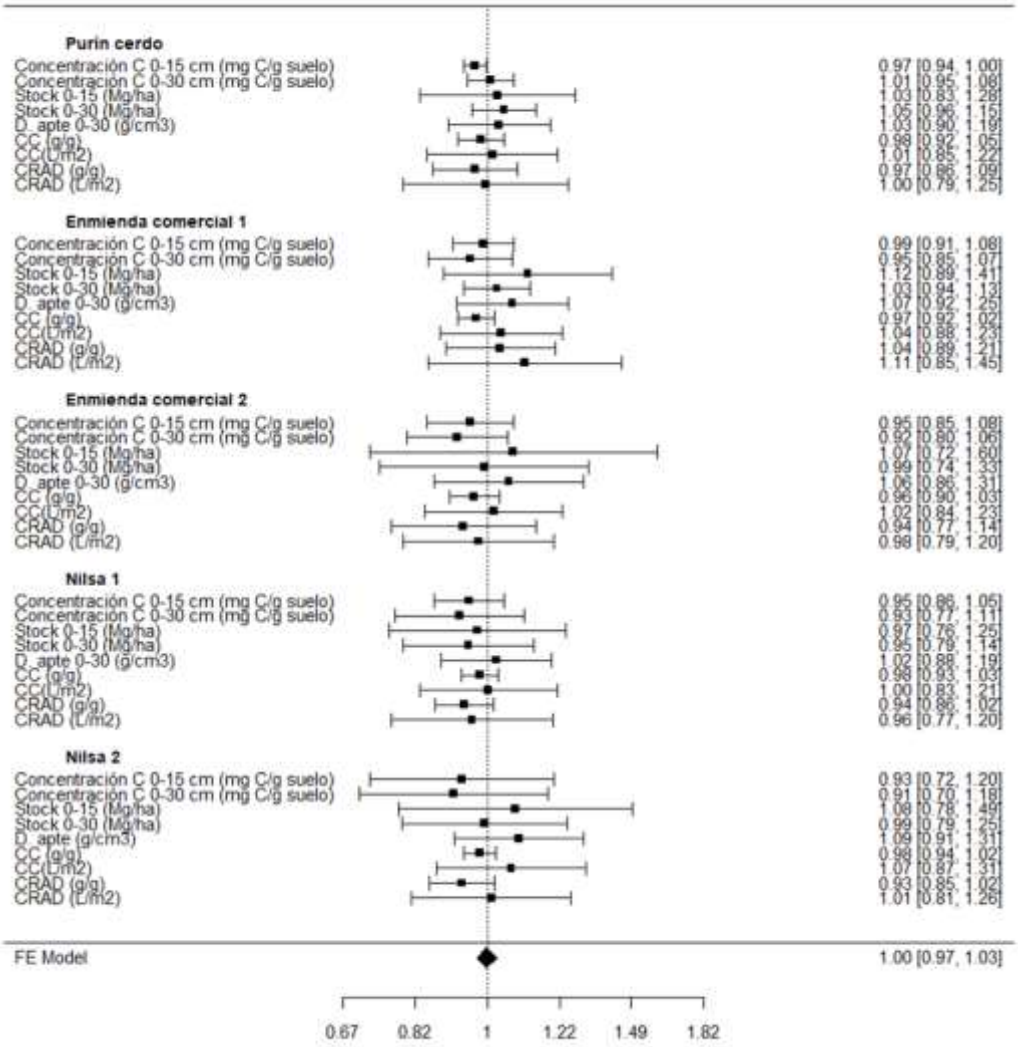


Figura 34 Gráfico "de bosque" para los ratios de respuesta (RR) frente al manejo convencional (fertilización mineral), para los diferentes indicadores considerados en la parcela Artajona (Enmiendas orgánicas).

La Figura 34 muestra los resultados del efecto de cada uno de los tratamientos evaluados sobre los diferentes indicadores edáficos analizados. Los resultados muestran una variabilidad importante, que se traduce en que todos los tratamientos evaluados presentan un efecto neutro sobre la totalidad de indicadores evaluados. Esto indica que no hay diferencias entre el tratamiento control y los tratamientos experimentales incluidos en este ensayo. Esto se puede explicar por el corto periodo de tiempo transcurrido desde la puesta en marcha del ensayo, ya que nos encontramos en su primer año. Es conocido que el efecto asociado al aporte de materia orgánica exógena en el suelo sobre los indicadores edáficos del suelo planteados tiene que ser evaluado a medio-largo plazo para observar respuesta (Trumbore 1997; Poeplau et al. 2011).

En la Figura 35 se muestran los resultados de las analíticas de fertilidad del suelo, en forma de ratio de respuesta, asociadas a cada uno de los tratamientos evaluados. En este caso solo se controlaron los tratamientos de purín de cerdo, y las dos enmiendas comerciales.

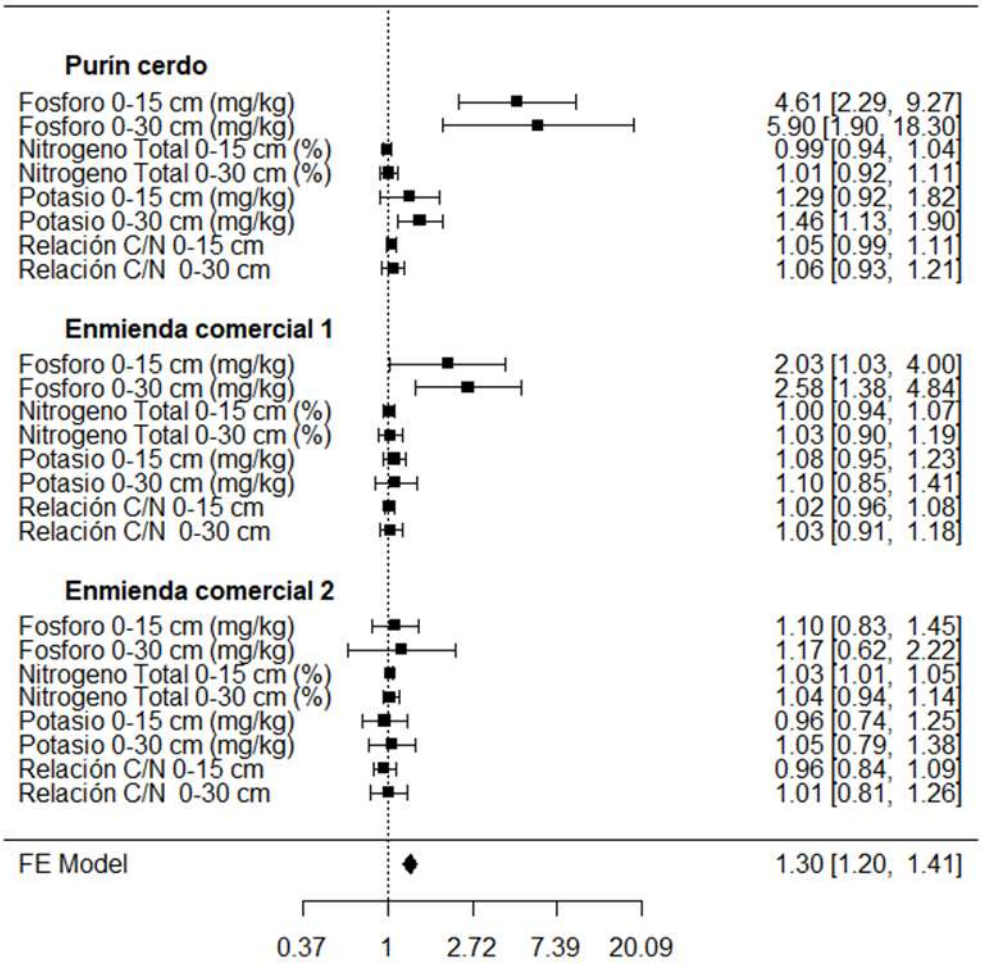


Figura 35 Gráfico "de bosque" para los ratios de respuesta (RR) frente al manejo convencional (fertilización mineral), para los diferentes indicadores de fertilidad química en la parcela Artajona (Enmiendas orgánicas).

Los resultados muestran un efecto positivo en el contenido de fósforo tanto en los primeros 15 cm como en el perfil de 0 a 30 cm asociado a los tratamientos de purín de cerdo y la primera enmienda comercial. En el caso del purín de cerdo se observa también un efecto positivo en el contenido de potasio a 0-30 cm. En el caso del tratamiento comercial 1, el resto de indicadores muestra un efecto neutro. El tratamiento comercial 2 muestra un ligero efecto positivo sobre el contenido de nitrógeno en los primeros 15 cm, siendo el resto de efectos neutro.

El origen y composición de las fuentes orgánicas de los tratamientos explica los efectos observados, sobre todo a nivel de contenido de fósforo en el caso de los dos primeros tratamientos y el efecto observado sobre el contenido de potasio en el primer tratamiento. En cualquier caso, el efecto neutro mayoritariamente observado indica que no hay diferencias en cuanto a nivel de fertilidad del suelo en ninguno de los tratamientos experimentales evaluados frente el tratamiento control, cuya fertilización se realiza en base compuestos minerales convencionales. Por lo tanto, tras un año de ensayo, los niveles de fertilidad en suelo presentan un resultado equivalente o mejor asociado a los tratamientos evaluados, en referencia al manejo tradicional de la fertilización. La evolución de este resultado en campañas sucesivas parece necesaria para determinar la viabilidad del uso de las enmiendas en relación a la fertilización.

En la campaña 2021/2022 este ensayo se desplazó a una zona de secano, para cumplir con los requistos de los ecoregímenes de la nueva PAC, que iimpiden el monocultivo durante más de 4 años seguidos. En la segunda camapa, se monitorizarion los indicadores de cultivo (Anexo AC4.1.2b_3). Los indicadores de suelo se monitorizarán en la próxima campaña, una vez bien establecido el cultivo.

3.2.2.3 Rotaciones: Ensayo de Sesma

El ensayo de Sesma está centrado en la evaluación de diferentes rotaciones de cultivo en secano. Incluye 5 tratamientos con alternativas de rotación de cultivos diferentes entre los que se encuentra el tratamiento control que, en este caso, está representado por una rotación con trigo como cultivo principal. La Figura 36 muestra los resultados obtenidos en este ensayo, contrastando cada uno de los tratamientos con el control.

Los resultados muestran bastante diversidad. En las rotaciones 1, 3 y 4, con cultivo de avena, cebada y guisante respectivamente en esta campaña, el efecto observado en todos los indicadores evaluados es neutro.

Los resultados relativos al contenido de C orgánico son bastante homogéneos. El tratamiento 2 con barbecho esta campaña presenta un efecto ligeramente inferior al resto, si bien el efecto en todas las rotaciones consideradas es neutro, lo que implica que no hay ni ganancia ni perdidas asociadas a estas rotaciones. En relación a la capacidad de retención de agua, los resultados también presentan un efecto neutro general.

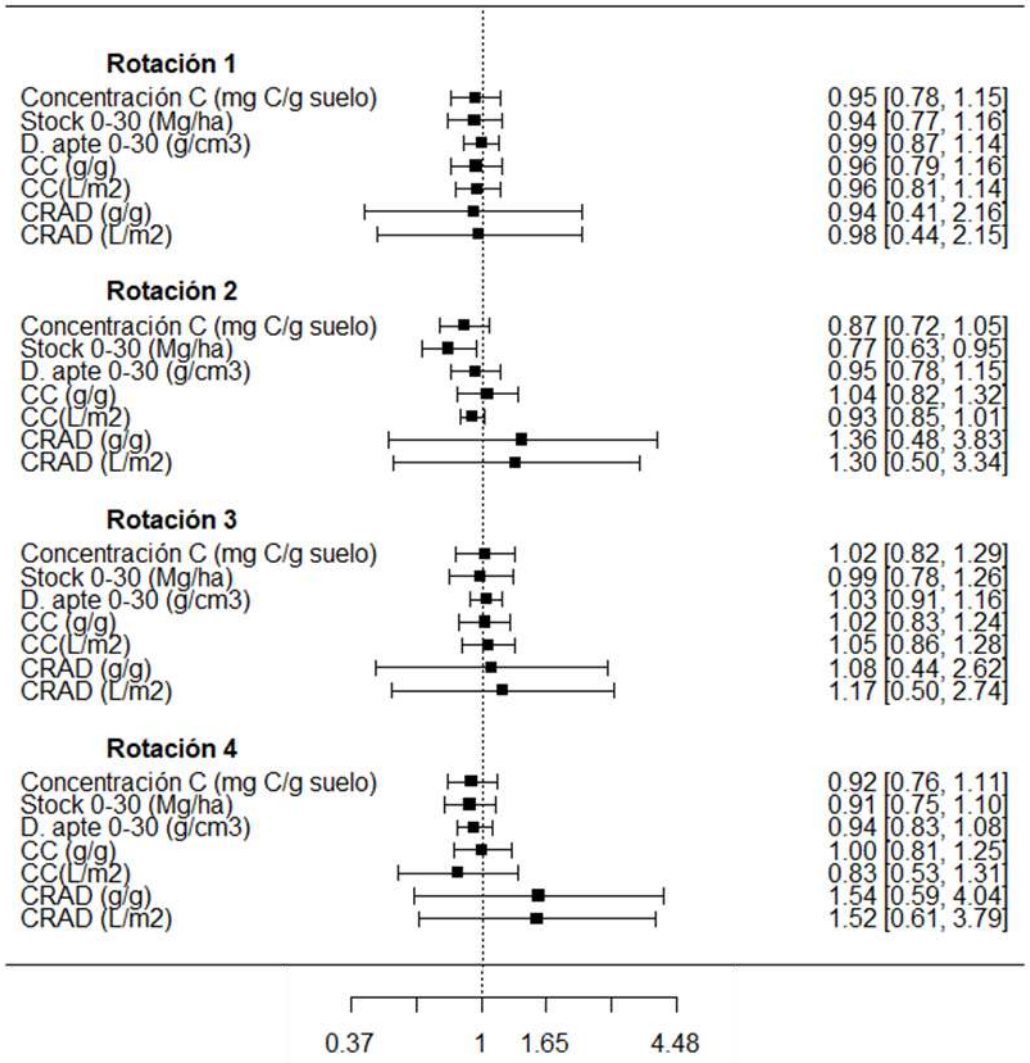


Figura 36 Gráfico "de bosque" para los ratios de respuesta (RR) frente al testigo, para los diferentes indicadores de fertilidad química en la parcela Sesma (Rotaciones).

3.3 Desarrollo de la red de parcelas LIFE-IP NAdapta-CC

3.3.1 Identificación de parcelas por zonas y diseño del muestreo

El estudio de indicadores edáficos en un contexto regional, con la finalidad de determinar la respuesta frente a diferentes agentes o manejos (en este caso la adaptabilidad al cambio climático), requiere realizar algunas consideraciones en lo relativo a:

- Necesidad de considerar el **cambio de escala**, a partir de la parcela experimental, hacia el paisaje y la región.
- Necesidad de desarrollar **estrategias de muestreo** adecuadas.
- Necesidad de aproximarse al **estudio de los datos** con el enfoque necesario para la identificación de la situación de los indicadores seleccionados a la escala regional.

En lo referente al **cambio de escala o *up-scaling***, gran número de estudios reconocen que es uno de los principales retos en estudios de calidad del suelo, o de propiedades determinadas como las relacionadas con el ciclo de la materia orgánica (FAO 2013; Paustian et al. 2016; Dignac et al. 2017; Chenu et al. 2019).

Paustian et al. (2019) reconocen así, para el C orgánico, que los principales retos para su cuantificación a la escala de la parcela y del territorio son la alta variabilidad espacial y los cambios relativamente pequeños observables en relación al stock de fondo (background). **Los métodos de alta precisión utilizados en investigación no son, según estos autores, prácticos para el despliegue de proyectos de mitigación o adaptación a gran escala o redes de monitorización a nivel de explotaciones**. Esto significa que es **necesario desarrollar esquemas de muestreo que emplean puntos de referencia georeferenciados que permitan optimizar el equilibrio entre la intensidad del muestreo y la reducción de la incertidumbre**, para reducir el coste y mejorar la precisión de las medidas.

Como se ha señalado anteriormente, Wiesmeier et al. (2019) resaltan la importancia de adoptar **aproximaciones regionales** para estimar adecuadamente la capacidad de almacenamiento de C orgánico en condiciones específicas de clima y de uso de la tierra, manejo y características de la vegetación, en concordancia con Karlen, Peterson, and Westfall (2014). Este criterio puede aplicarse a otros indicadores edáficos.

En lo referente al **diseño de muestreo**, se han considerado en este proyecto algunos aspectos a partir de las recomendaciones existentes (Aalde et al. 2006; Sanderman and Baldock 2010; FAO 2013; Jia et al. 2019) y la experiencia desarrollada en proyectos anteriores como Life Regadiox (https://life-regadiox.es/es/; Antón et al., 2019). Esto afecta tanto a la selección de indicadores, como (sobre todo) al diseño de la estrategia de muestreo.

Así, FAO (2013) determina que el estudio de las propiedades del suelo a la escala regional debe **involucrar a los usuarios de la tierra y contar con el apoyo de expertos técnicos**. Además, deben ser respaldados por pruebas de laboratorio para propiedades específicas. Se deben usar

varias **herramientas de mapeo convencionales y digitales** para extrapolar los hallazgos en una variedad de unidades de suelo y terreno, tipos de vegetación y / o zonas agroecológicas. Idealmente, la información del suelo estará disponible como mapas continuos que enfatizan los atributos del suelo. Esta descripción corresponde con la **aproximación metodológica** realizada en este proyecto, que se desarrolla en los siguientes pasos:

- Una vez realizada la zonificación y determinadas las prácticas que se quieren evaluar, **los extensionistas determinan**, para cada zona, parcelas de cultivo de referencia que correspondan con cada uno de los manejos considerados (si existen en la zona), y parcelas de contraste, que no los consideren. Estas últimas se considerarán como la situación de partida o *baseline* para el estudio de los diferentes indicadores. En el caso de los grupos correspondientes a agricultura de conservación, aportes externos y rotaciones, se trataría de parcelas con manejo agrícola convencional, que no contemplen ninguna de estas tres medidas. En el caso de los grupos de parcelas de pasto, las técnicas consideradas son más variadas (prácticas de pastoreo de baja intensidad y de pastoreo controlado), aunque en todos los casos, el manejo convencional considerado implica la exclusión de los animales y la exportación de biomasa de los campos.

- Con la información cartográfica disponible, se determinan **unidades homogéneas de suelo** en cada una de las zonas, y se evalúan las parcelas anteriores en función de su pertenencia a dichas zonas.

- Una vez seleccionadas las parcelas para el contraste, se aíslan, mediante herramientas cartográficas y/o a partir de la interpretación de la información existente (fotografía aérea, información geológica, etc), **zonas homogéneas de comparación**, que incluyan la totalidad o parte de las parcelas anteriores. Esta simplificación trata de garantizar que los posibles cambios en los indicadores edáficos evaluados sean producidos exclusivamente por las posibles diferencias en el manejo.

- Para el diseño de los puntos de muestreo, en cada una de estas zonas homogéneas, **se aplica el protocolo diseñado por Stolbovoy et al. (2007),** que garantiza la representatividad en extensión, la aleatoriedad del muestreo, y un número de muestras que permita el análisis estadístico.

- Simultáneamente, sobre cada una de las parcelas, **se recoge información sobre el manejo histórico y presente de la parcela**, mediante cuestionarios diseñados *ad hoc*.

- El muestreo se realiza finalmente para las profundidades determinadas, en los puntos indicados por el protocolo, generando muestras alteradas compuestas y muestras inalteradas, sobre las que **se analizarán los indicadores referidos anteriormente**.

Las figuras 37 y 38 recogen un ejemplo de desarrollo de este protocolo de selección y muestreo de parcelas.

Figura 37 Localización de las parcelas seleccionadas para la red de monitorización en Olite.

Izda.: en rojo, en relación al uso de enmiendas orgánicas, en azul las correspondientes a sistemas de laboreo, en amarillo, la red para rotaciones). Dcha.: ubicación sobre el mapa de suelos 1:25.000, para la selección de zonas de muestreo.

Figura 38 Diseño de las zonas y puntos de muestreo para parcelas agrícolas en diferentes zonas de Navarra.

Izda.: en rojo, la parcela de referencia para el manejo considerado. En negro, parcelas estándar y áreas de muestreo. Dcha.: Detalle de selección de zonas de muestreo sobre el mapa de suelos 1:25.000.

Como resumen de estas actividades de selección de parcelas, en la Tabla 3-6 se recoge la información correspondiente a los datos generales de uso de cada una de las 12 zonas determinadas en el proyecto, junto a los grupos de parcelas seleccionados en cada una de ellas para la evaluación de los indicadores asociados a cada manejo adaptativo.

Para cada zona, se detalla en primer lugar su superficie total de cada una de las zonas y el porcentaje de la superficie que se dedica a uso agrícola en base a la información disponible sobre del uso del suelo en la página de estadística agrícola del Gobierno de Navarra (http://www.navarra.es/home_es/Temas/Ambito+rural/Indicadores/agricultura.htm).

También se incluye una simple caracterización del uso agrícola de cada zona en forma porcentaje de la cobertura destinado a 5 grandes usos: cultivos herbáceos con riego y sin riego, cultivos leñosos con y sin riego y uso para pastos y praderas.

La misma tabla recoge las estrategias que han sido consideradas en cada zona, y el número de parcelas y grupos que componen la red de parcelas de control que se ha diseñado. Dentro de cada zona las parcelas de dividen en grupos de forma que al menos una parcela sigue una de las estrategias propuestas de cara a mejorar la adaptabilidad de los suelos agrícolas de la región, y al menos otra parcela en cada grupo mantiene un manejo convencional.

Tabla 3-6 Caracterización uso del suelo y red de parcelas.

Zona	Uso del Suelo							Estrategias de gestión y parcelas		
	Área total (ha)	Uso agrícola (%)	Cult. herbáceos (%)		Cult. leñosos (%)		Pastos y praderas	Estrategias	Grupos	Parcelas
			Regadío	Secano	Regadío	Secano				
1. Ribera de Navarra	254140	66,7	34,0	53,8	10,1	2,1	0,0	Agricultura conservación	7	14
								Fuentes exógenas de M.O.	8	26
								Rotación de cultivos	3	13
								Gestión de pastos y praderas	2	6
2. Fluviales de la Ribera	39625	81,9	89,8	0,6	8,4	1,1	0,0	-	-	-
3. Media Sur	79700	67,6	13,7	70,9	5,0	10,3	0,1	Agricultura conservación	3	9
								Fuentes exógenas de M.O.	4	13
								Rotación de cultivos	4	13
4. Media Norte	95679	39,3	6,2	87,8	0,8	4,3	1,0	Fuentes exógenas de M.O.	1	4
5. Media Oriental	64764	40,1	14,0	78,7	0,8	5,7	0,8	Fuentes exógenas de M.O.	1	5
								Gestión de pastos y praderas	1	4
6. Pre-pirenaica Oriental	56949	3,4	3,3	68,1	0,1	4,0	24,6	-	-	-
7. Cuenca de Pamplona	67857	46,5	0,9	97,1	0,4	0,4	1,1	Agricultura conservación	2	6
								Fuentes exógenas de M.O.	2	7
								Rotación de cultivos	2	6
8. Urbasa – Andia - Aralar	69165	7,5	0,3	73,0	0,1	0,5	26,1	-	-	-
9. Corredor del Arakil	13457	42,8	1,7	18,1	0,0	1,6	78,7	Rotación de cultivos	1	2
10. Valles del Norte de la Cuenca	87669	21,4	0,3	29,6	0,1	0,2	69,8	Fuentes exógenas de M.O.	1	6
								Gestión de pastos y praderas	4	10
11. Zona Pirenaica Oriental	63016	7,2	0,0	2,7	0,0	0,0	97,3	Gestión de pastos y praderas	1	5
12. Noroccidental	144324	9,8	0,0	0,4	0,2	0,6	98,7	Gestión de pastos y praderas	1	3

Un total de 168 parcelas fueron preseleccionadas en toda la región para ser consideradas en este estudio. De todas ellas 20 fueron descartadas durante el proceso de definición de los grupos y finalmente son 148 las que forman parte de la red de control.

La Figura 39 representa la distribución espacial de estas parcelas sobre el mapa de cultivos y aprovechamientos, indicando las 12 zonas determinadas en el proyecto.

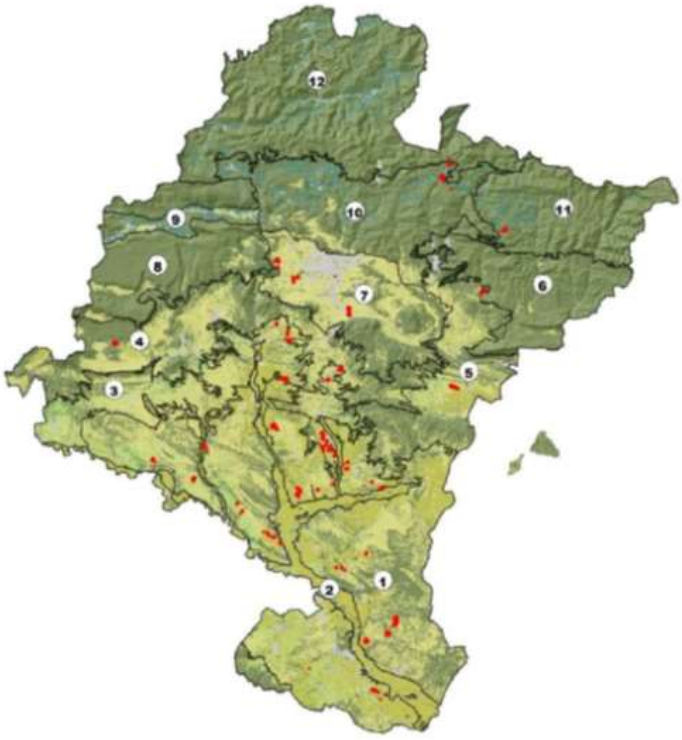


Figura 39 Red de parcelas de seguimiento y distribución en las 12 zonas definidas en el proyecto LIFE-IP NAdapta-CC. (Acción C4.1).

Como se observa en la Tabla 3-6 y la Figura 39, 9 de las 12 zonas están representadas en la red de parcelas. Estas 9 zonas representan más del 90% de la superficie agrícola de la región, y son, por lo tanto, las que mejor representar la actividad agrícola de la misma. Como se observa, debido a la gran variabilidad agroclimática de la región, no todas las estrategias están representadas en todas las zonas, destacando que en las zonas situadas al norte de la región el uso más común, y por lo tanto representado en el estudio, es el de gestión de pastos y praderas. De la misma manera, debido a su situación estratégica, así como a su tamaño, la zona 1 de la Ribera navarra, es la que presenta la mayor superficie destinada a uso agrícola. Esto lleva a que en ella estén representadas todas las estrategias de manejo propuestas en el proyecto, incluido pastos y praderas con un 0.006% de la superficie, y a que el número tanto de grupos como de parcelas sea el más elevado en esta zona.

Esta caracterización del uso agrícola de cada una de las zonas representa una aproximación a los agrosistemás más característicos de la región y su distribución en la misma. La gran heterogeneidad edafo-climática de la región y su relación directa con los agrosistemas característicos observados en cada zona, pone en relevancia la vinculación de ambos factores con el territorio y en el uso del suelo y, por lo tanto, su importancia en la evaluación de su vulnerabilidad.

3.3.2 Evaluación de la situación de partida: Definición del nivel de referencia regional

3.3.2.1 C orgánico total horizonte labrado

En la Figura 40 se muestran los stocks de carbono orgánico del suelo en la capa superior del suelo (0-20 cm) en cada una de las zonas evaluadas, en las parcelas incluidas en el manejo convencional, que pueden considerarse el **nivel de referencia o línea de base de los suelos agrícolas de la región**. Los valores oscilaron entre menos de 17 Mg de C orgánico (COS) ha^{-1} en algunos puntos de la zona 1 y más de 150 Mg SOC ha^{-1} en la zona 12, para la profundidad estudiada.

Entre las zonas seleccionadas para este estudio, las existencias de COS en las zonas 9, 10, 11 y 12 fueron significativamente mayores ($p < 0,05$) (134,7±9,5 Mg C ha^{-1}, 92,4 ± 9,8 Mg C ha^{-1}, 56,0 ± 2,7 Mg C ha^{-1} y 127.4 ±41.0 respectivamente) que en las zonas 1, 3, 5 y 7 (38,3 Mg C ha^{-1} en promedio, sin diferencias entre ellas). La zona 4 tuvo una reserva media similar a la de la zona 11, pero con una mayor variabilidad (52,4 ± 25,3 Mg C ha^{-1}).

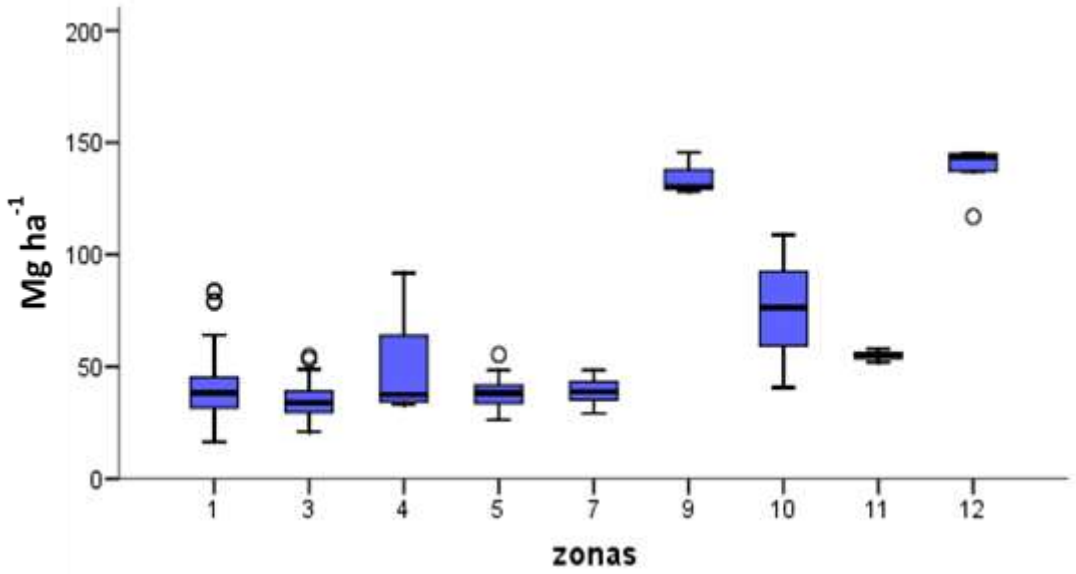


Figura 40 Stock de C orgánico (0-20 cm) en los suelos cultivados de las diferentes zonas bajo manejo convencional.

El análisis del almacenamiento de COS en la capa superior del suelo en los suelos gestionados convencionalmente reveló que las zonas más húmedas, donde el uso agrícola más común son los pastizales (zonas 10, 11 y 12 en la Fig. 35), tenían las mayores existencias de COS. Esto concuerda con las observaciones generales en Europa (de Brogniez et al. 2015) y España (Rodríguez Martín et al. 2016, 2019), y suele explicarse por un balance hídrico más favorable que permite una mayor productividad primaria, y una mejor preservación de los COS en los pastizales (normalmente no labrados y sin eliminación de residuos vegetales con la cosecha) que en las tierras de cultivo (Wiesmeier et al. 2013). En el presente estudio, ese efecto no puede determinarse en su conjunto, ya que no había tierras de cultivo en las zonas 10, 11 y 12 (Tabla 3-4).

Sin embargo, al comparar las tierras de cultivo y los pastizales presentes en la zona más árida 1, se observó que las primeras tenían existencias significativamente mayores ($p < 0,05$) (40,0 ± 9,5 Mg C ha-1) que las segundas (31,8 ± 9,4 Mg C ha-1), lo que apoya nuevamente el interés de los estudios estratificados a escala regional.

En la figura 41 se muestran además los stocks de COS en la capa superior del suelo en los diferentes tipos de suelo dentro de cada zona. Los resultados muestran diferencias sólo en las zonas 1 y 4. En la zona 1, los Xerolls mostraron los valores más altos observados (49,4 ± 9,2 Mg C ha^{-1}), mientras que los Gypsids y los Entisoles e Inceptisoles fluvénicos fueron los más bajos (24,1 ± 3,7 Mg C ha^{-1} y 28,3 ± 3,6 Mg C ha^{-1}, respectivamente). Los otros tipos de suelos encontrados en esta zona tenían valores intermedios. En la zona 4, las parcelas en suelos Calcixerepts con un horizonte petrocálcico en profundidad (denominados Xerepts con limitaciones de profundidad), tenían valores medios y variabilidad mucho más altos (71,5 ± 22,9 Mg C ha^{-1}), que los de otros tipos de Xerepts (33,3 ± 3,3 Mg C ha^{-1}).

En relación con el almacenamiento de COS en las tierras de cultivo de las zonas 1,3,4,5 y 7, los valores observados se encontraban dentro del rango promedio nacional (45,3 ± 28,5 Mg C ha^{-1} en los cultivos anuales y 38,09 ± 11,9 Mg C ha^{-1} en los cultivos leñosos permanentes, Rodríguez Martín et al., 2016) para una profundidad de 0-30 cm, y en estudios previos realizados en estas zonas (Fernández-Ugalde et al. 2009; Imaz et al. 2010; Antón et al. 2019). Los valores más altos observados en la zona 4, correspondieron a un grupo particular de parcelas en Xerepts con limitaciones de profundidad (Figura 41), lo que constituye un ejemplo de la heterogeneidad natural y la relevancia de considerar áreas con características de suelo homogéneas para comparaciones entre manejos.

Evaluando la diferencia entre las zonas y los tipos de suelo, hay que señalar que los valores de almacenamiento de SOC que se muestran en la Figura 36 corresponden a las capas superiores de los suelos gestionados convencionalmente. Se sabe que el manejo agrícola tiende a homogeneizar las propiedades de la capa superior del suelo (Kuzyakov y Zamanian 2019), desdibujando las diferencias naturales. A pesar de ello, las diferencias observadas en la zona 1 son un ejemplo de las posibles condiciones naturales y las limitaciones impuestas por el tipo de suelo al almacenamiento de SOC. Los suelos con mayor contenido de COS en esta zona

fueron los descritos como Xerolls, es decir, con un horizonte superior móllico rico en materia orgánica, dentro de un área de régimen de humedad xérica, que corresponde a Molisoles más o menos drenados de regiones con climas mediterráneos desarrollados sobre pastos o especies de roble (S.S.S. 2014). Por otra parte, los suelos que contienen yeso (Gypsids, figura 41), son los que tienen los valores de referencia COS más bajos. Se conocen las limitaciones de los altos contenidos de yeso para la COS (Virto et al. 2006; Casby-Horton et al. 2015)

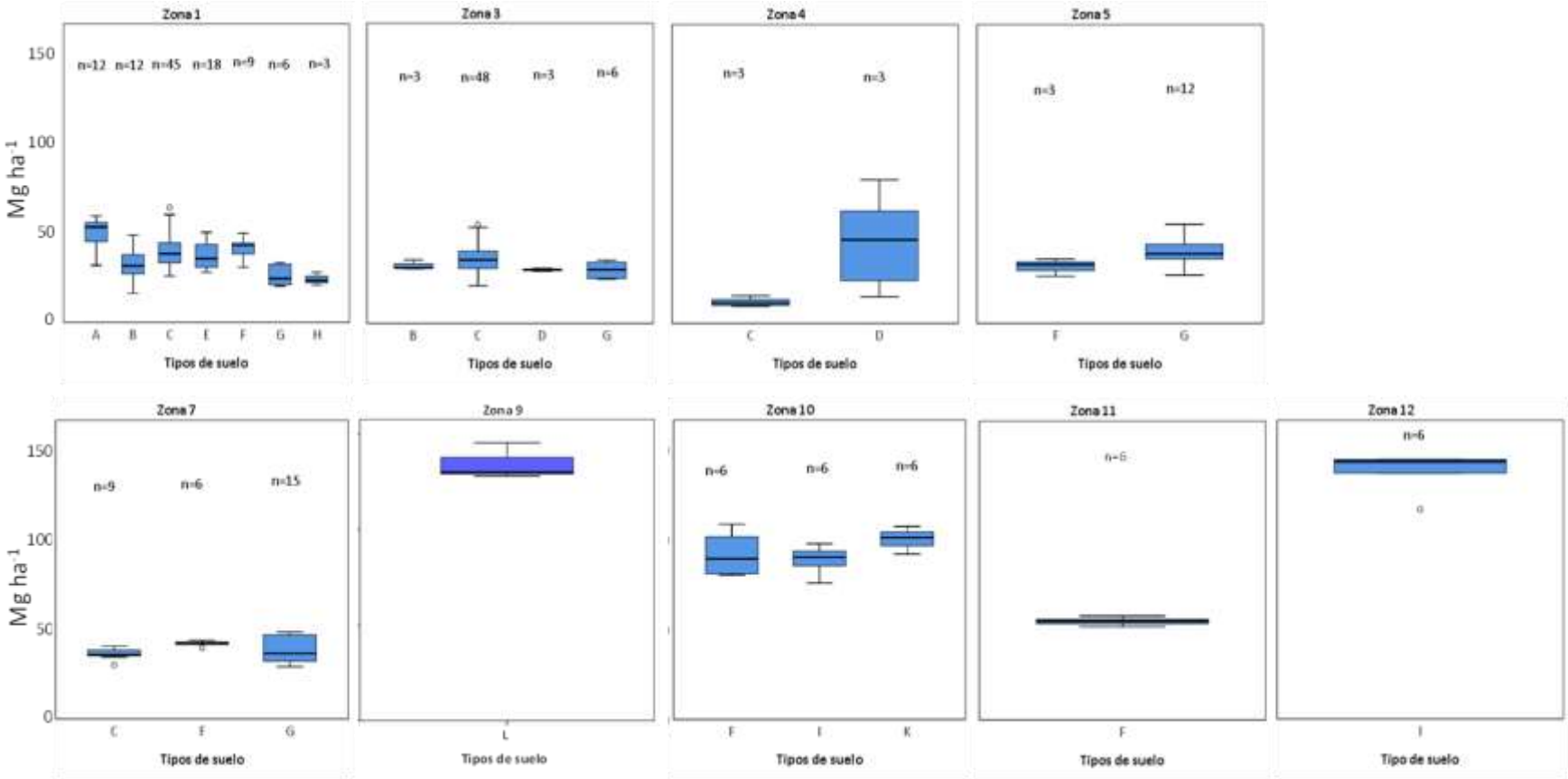


Figura 41 Stock de C orgánico (0-20 cm) en los suelos cultivados de las diferentes zonas bajo manejo convencional, por tipología de suelo.

A: Xerolls, B: Ustolls, C: Xerepts, D: Xerepts con limitaciones en profundidad, E: Calcids, F: Orthents, G: Fluventic Inceptisols y Entisols; H: Gypsids; I: Udepts, L: Udifluvents (S.S.S., 2014)

3.3.2.2 Densidad aparente

La Figura 42 muestra los resultados de la densidad aparente de la capa superior del suelo (0-20 cm) de cada una de las zonas evaluadas. Al igual que en el caso del carbono orgánico, los resultados corresponden a las parcelas incluidas en el manejo convencional, con la intención de reflejar así el nivel de referencia o línea de base de los suelos agrícolas de la región.

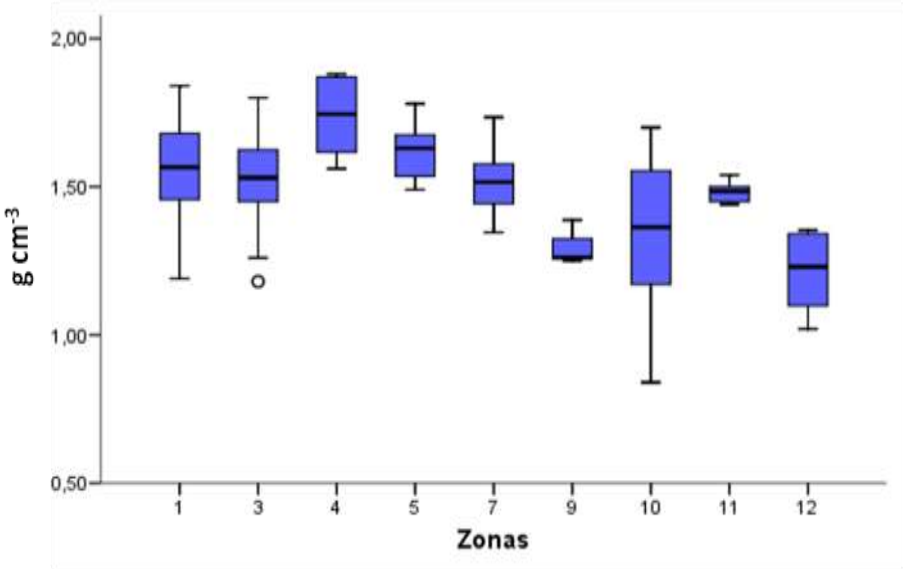


Figura 42 Densidad aparente (0-20 cm) en los suelos cultivados de las diferentes zonas bajo manejo convencional

Los resultados de densidad aparente muestran una variabilidad muy grande, donde los valores oscilaron entre densidades por debajo de 0,9 g cm $^{-3}$ en algún punto de la zona 10 a valores cercanos a 1,9 g cm $^{-3}$ en la zona 4, para la profundidad estudiada. La fuente de dicha variabilidad se explica en parte por los diversos sistemas de cultivo que están incluidos dentro de las parcelas bajo manejo convencional en este estudio, donde encontramos desde cultivos permanentes como olivos o viña a parcelas de cultivos herbáceos con diferentes intensidades en el manejo. La diversidad de manejos y cultivos evaluados implica, además, que los controles se realizaran sobre parcelas que se encontraban diferentes fases de cultivo, lo que representa otra fuente de variabilidad. Esto ya fue descrito por Franzluebbers et al. (1995) que observo que las diferencias en la densidad aparente del suelo entre los calendarios de labranza mostraban una gran dependencia estacional. Según el autor, la densidad aparente disminuye con el laboreo, pero vuelve rápidamente a los niveles observados antes de la misma debido al proceso de la densificación del suelo (Hill et al., 1985)), que, además, puede verse incrementado con el laboreo cuando el contenido en COS es menor y menor integridad de los agregados (Elliott, 1986).

En cualquier caso, la tendencia observada es similar a la descrita en el apartado del carbono orgánico del suelo. Las zonas 9, 10 y 12 presentan una densidad aparente por debajo del resto, 1.30± 0.07 g cm $^{-3}$, 1.15 ± 0.14 g cm $^{-3}$ y 1.21 ± 0.08 g cm $^{-3}$ respectivamente. En este caso la

zona 11 está incluida con las zonas 1, 3, 5 y 7 en la zona media con densidades medias entre 1,43 ± 0,08 g cm $^{-3}$ y 1,62 ± 0,10 g cm $^{-3}$. La zona 4 destaca por encima de la media con una densidad aparente media de 1,74 ± 0,14 g cm $^{-3}$.

La figura 43 contiene los resultados de densidad aparente de la capa superior en los diferentes tipos de suelo dentro de cada zona. Los resultados muestran diferencias en las zonas 1, 3, 4 y 7. En la zona 1, todos los suelos son bastante homogéneos, aunque la densidad aparente de los Xerepts (1,61 ± 0,13 g cm^{-3}) apareció significativamente mayor ($p < 0,05$) que la densidad aparente de los Orthens (1,42 ± 0,05 g cm^{-3}). Los dos tipos de suelos incluidos en la zona 4, uno Xerepts y el otro Xerepts con limitaciones en profundidad muestran diferencias significativas entre ellos (1,61 ± 0,0 g cm^{-3} y 1,87 ± 0,01 g cm^{-3} respectivamente). En la zona 7 la densidad aparente de los suelos agrupados como Orthens (1,65 ± 0,07 g cm^{-3}) fue significativamente mayor que la de los Xerepts y los agrupados como Fluventic inceptisols y Entisols (1,51 ± 0,06 g cm^{-3} y 1,48 ± 0,09 g cm^{-3} respectivamente).

La tendencia observada indica que las zonas con manejos ligados a la gestión de pastos y praderas tienden a presentar valores más bajos de densidad aparente, destacando las zonas 10 y 12. Eso ya ha sido observado en otras ocasiones en zonas de pastos similares (Ammann et al. 2009; Rodríguez Martín et al. 2016; Peco et al. 2017; Tang et al. 2019; Lasanta et al. 2020). Los valores de densidad aparente que muestran el resto de zonas también se encuentran dentro de lo observado en suelos agrícolas en anteriores estudios realizados en la región (Imaz et al. 2010; Antón et al. 2019). El laboreo intensivo, un menor contenido de carbono orgánico del suelo y cambios en las características físico químicas básicas del suelo, como consecuencia del uso agrícola más intensivo explican estas diferencias (Tang et al., 2019). Nuevamente, los pastizales ubicados en la zona 1 no presentaron diferencias en cuanto a densidad aparente con las parcelas puestas en cultivo de la misma zona, lo que remarca la importancia y la dependencia con la escala de trabajo a la hora de hacer este tipo de estudios.

Valorando la densidad aparente dentro de las zonas y los suelos presentes en cada una, la dependencia estacional y los diferentes calendarios de cultivo de las parcelas incluidas en este trabajo pueden explicar las diferencias observadas entre ellos.

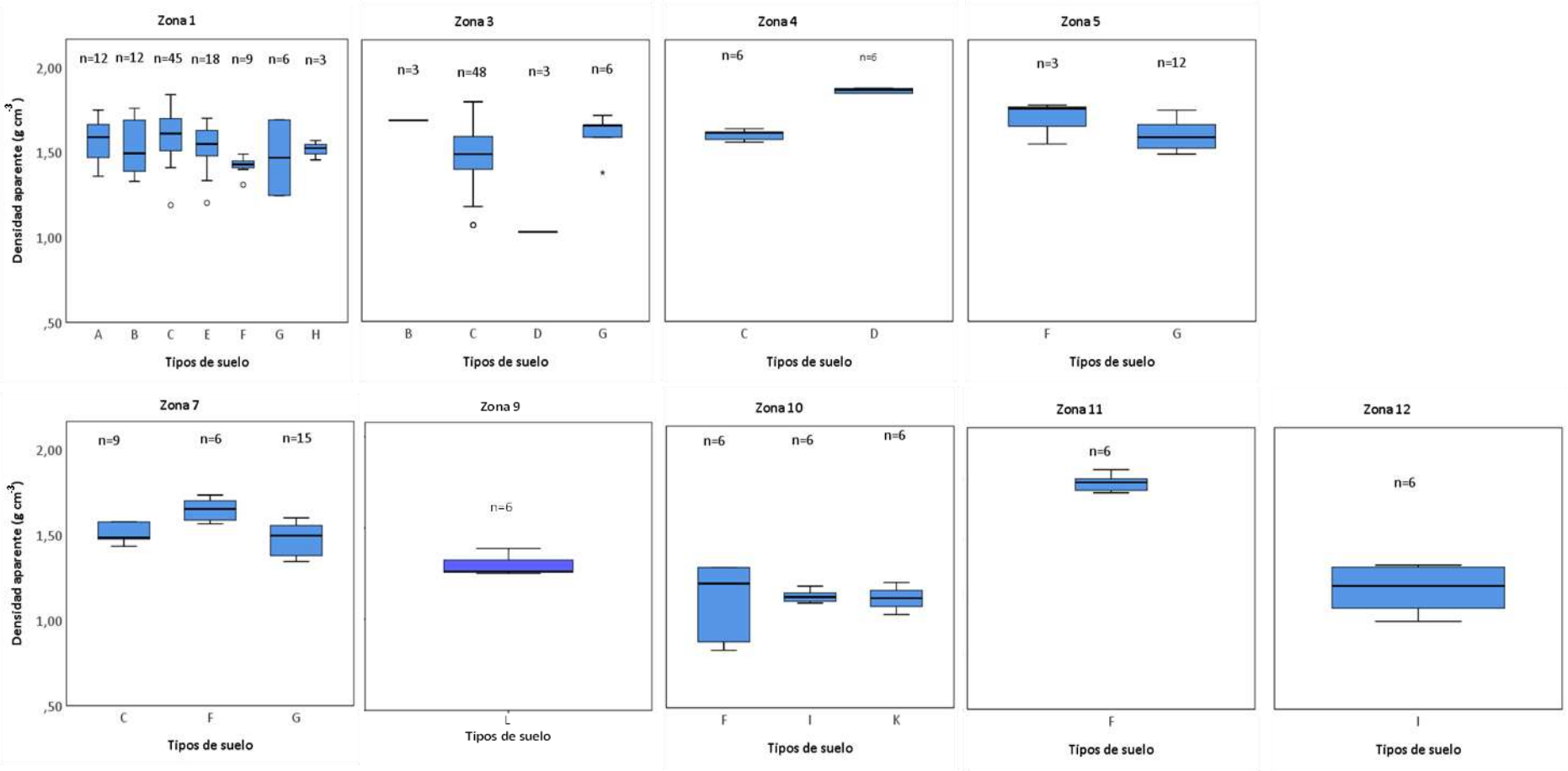


Figura 43 Valores de densidad aparente (0-20 cm) en los suelos cultivados de las diferentes zonas bajo manejo convencional, por tipología de suelo.

A: Xerolls, B: Ustolls, C: Xerepts, D: Xerepts con limitaciones en profundidad, E: Calcids, F: Orthents, G: Fluventic Inceptisols y Entisols; H: Gypsids; I: Udepts, L: Udifluvents (S.S.S., 2014)

3.3.2.3 Capacidad de retención de agua disponible

El análisis de la capacidad de retención de agua de las parcelas incluidas en el manejo convencional se ha realizado a una profundidad de 30 cm, y se considera como la línea base de los suelos agrícolas de la región. Por la naturaleza de este indicador y su metodología de estudio, se ha realizado a dos niveles. Por un lado, se ha evaluado el contenido gravimétrico (g de agua/g de suelo) de agua a capacidad de campo (CC) en los primeros 30 cm de suelo, representado en la Figura 44. La capacidad de campo se define como el contenido de agua que es capaz de retener un suelo antes de saturarse. A partir de este punto, el suelo no tendrá capacidad de retener más agua de manera que todo el aporte por encima de ese punto tenderá a escurrir superficialmente o a drenarse a capas más profundas. Teóricamente corresponde con el contenido de agua presente en un suelo al someterlo a una presión de -0,33 bares (Richards y Weaver, 1944).

El segundo nivel de estudio es la capacidad de retención de agua disponible (CRAD, en L/m^2 o mm) en los 30 primeros centímetros de profundidad, representada en la figura 45. La CRAD se define como el contenido de agua que puede retener un suelo que está disponible para ser absorbido a un ritmo adecuado para permitir el crecimiento normal por las plantas. Representa el contenido de agua en el suelo entre el punto de capacidad de campo, ya descrito, y el punto de marchitez. El punto de marchitez se define como el contenido de agua mínimo presente en un suelo en el cual una planta no puede seguir extrayendo agua del mismo. Teóricamente corresponde con el contenido de agua retenida en el suelo tras ser sometido a una presión de -15 bares (Richards y Weaver, 1944). El punto de marchitez en un suelo suele estar determinado por la textura, que determina el tamaño de las partículas minerales del mismo. En cambio, el punto de capacidad de campo de un suelo puede estar determinada, además de por la textura, por otros factores, como la estructura, el contenido de carbono orgánico del suelo, contenido de macroporos o compactación en suelos agrícolas. Por lo tanto, la capacidad de campo puede modificarse a través de estrategias de manejo como las planteadas en este trabajo, y es por esto que se incluye en el presente análisis, como clave en la mejora de la CRAD de los suelos.

En el caso de la CC se presenta un análisis del contenido gravimétrico, que representa la relación entre la masa de agua y la masa de suelo una vez seco. El análisis de la CRAD se ha realizado del contenido volumétrico, incluyendo en el cálculo la densidad aparente del suelo, de forma que representa el volumen real de agua contenido en un volumen de suelo. Los resultados están expresados en forma de altura o lámina de agua de forma que 1 mm, que equivale a 1 litro/m^2.

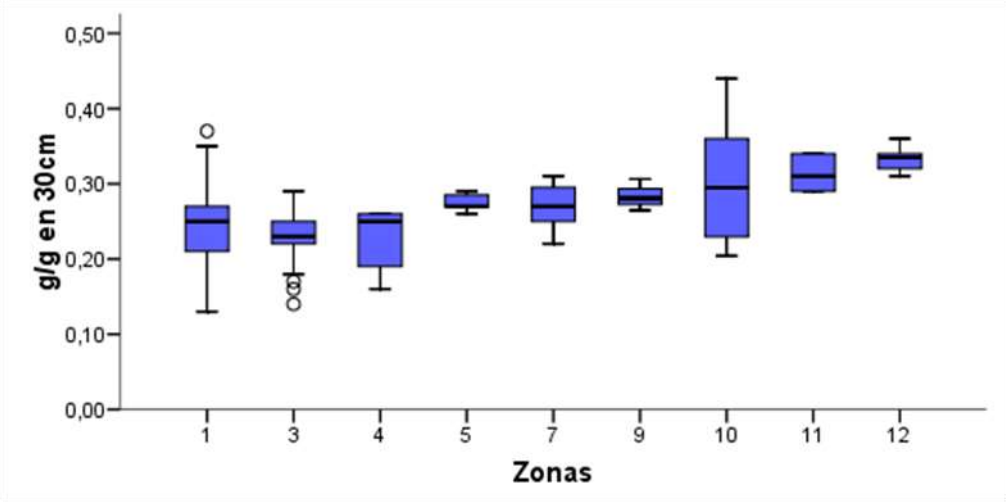


Figura 44 Capacidad de campo (g agua/g suelo, 0-30 cm) en los suelos cultivados de las diferentes zonas bajo manejo convencional.

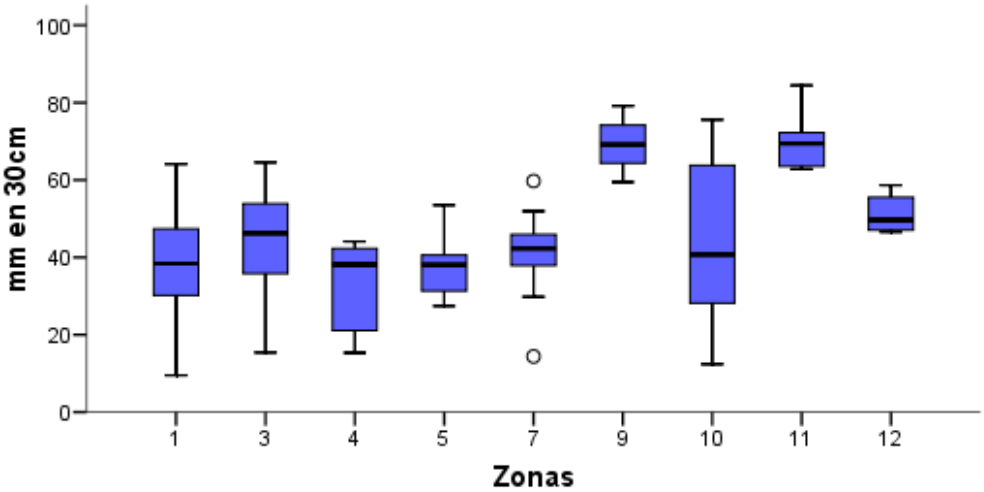


Figura 45 Capacidad de retención de agua disponible para las plantas, CRAD (L agua/m^2 o mm, 0-30 cm) en los suelos cultivados de las diferentes zonas bajo manejo convencional.

Los resultados de CC muestran un rango de datos a nivel regional que va desde los 0.12 g_{agua}/g_{suelo} medidos en alguna parcela de la zona 1 a los 0.44 g_{agua}/g_{suelo} observados en la zona 10. A nivel de zonas también se aprecia una variabilidad elevada, que puede deberse a la diversidad de condiciones de manejo y tipos de suelo evaluados. Analizando los resultados en detalle a nivel regional, se observa la misma tendencia ya reflejada tanto en el contenido de carbono orgánico como en la densidad aparente. Las zonas 10, 11 y 12 con 0.36 ± 0.03 g_{agua}/g_{suelo}, 0.30 ± 0.02 g_{agua}/g_{suelo} y 0.33 ± 0.02 g_{agua}/g_{suelo} respectivamente muestran un contenido de agua en capacidad de campo significativamente superior ($p < 0,05$) al resto de zonas, que muestran de media 0.24 ± 0.05 g_{agua}/g_{suelo}, grupo en el que se integra la zona 9 en este caso.

Los resultados de la CRAD en las zonas de cultivo se encuentran ligeramente por encima de los observados en otros estudios de la región. Por ejemplo, Fernández-Ugalde et al. en 2009 observaron valores medios para un laboreo convencional de 20.89 ± 0.20 mm. La variabilidad de suelos muestreados y la contribución de la densidad aparente a dicha variabilidad, puede explicar esta diferencia. Los valores mayores de la CRAD observados en las zonas 9, 10 y 11 se encuentran dentro de lo observado en zonas de condiciones similares por (Girona-García et al. 2018). En este caso, la explicación vuelve a estar ligada a la localización geográfica y una mejor preservación tanto de SOC, como de estructura (normalmente no labrados) y otras propiedades físicas, textura, relacionadas con la capacidad de retención de agua (Bescansa et al. 2006). Esto queda reflejado al observar los resultados del grupo asociado a pastos que se encuentran en la zona 1, que presenta unos valores de CRAD de 38.71 ± 11,15 mm, en línea con lo observado en parcelas de cultivo en esa zona y lejos de los valores observados en las zonas 10 y 11.

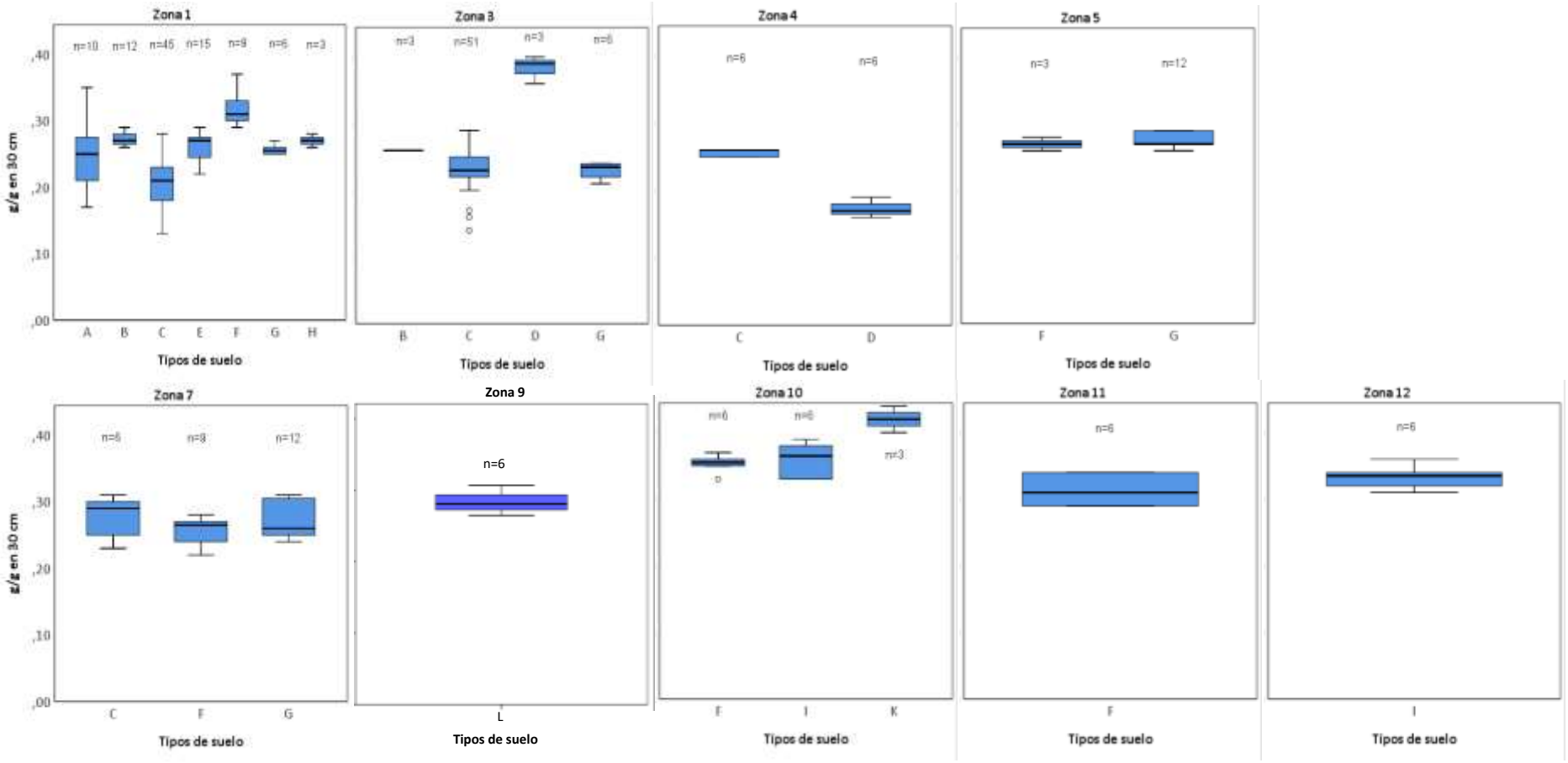


Figura 46. Capacidad de campo (g agua/g suelo, 0-30 cm) en los suelos cultivados de las diferentes zonas bajo manejo convencional.

A: Xerolls, B: Ustolls, C: Xerepts, D: Xerepts con limitaciones en profundidad, E: Calcids, F: Orthents, G: Fluventic Inceptisols y Entisols; H: Gypsids; I: Udepts, L: Udifluvents (S.S.S., 2014)

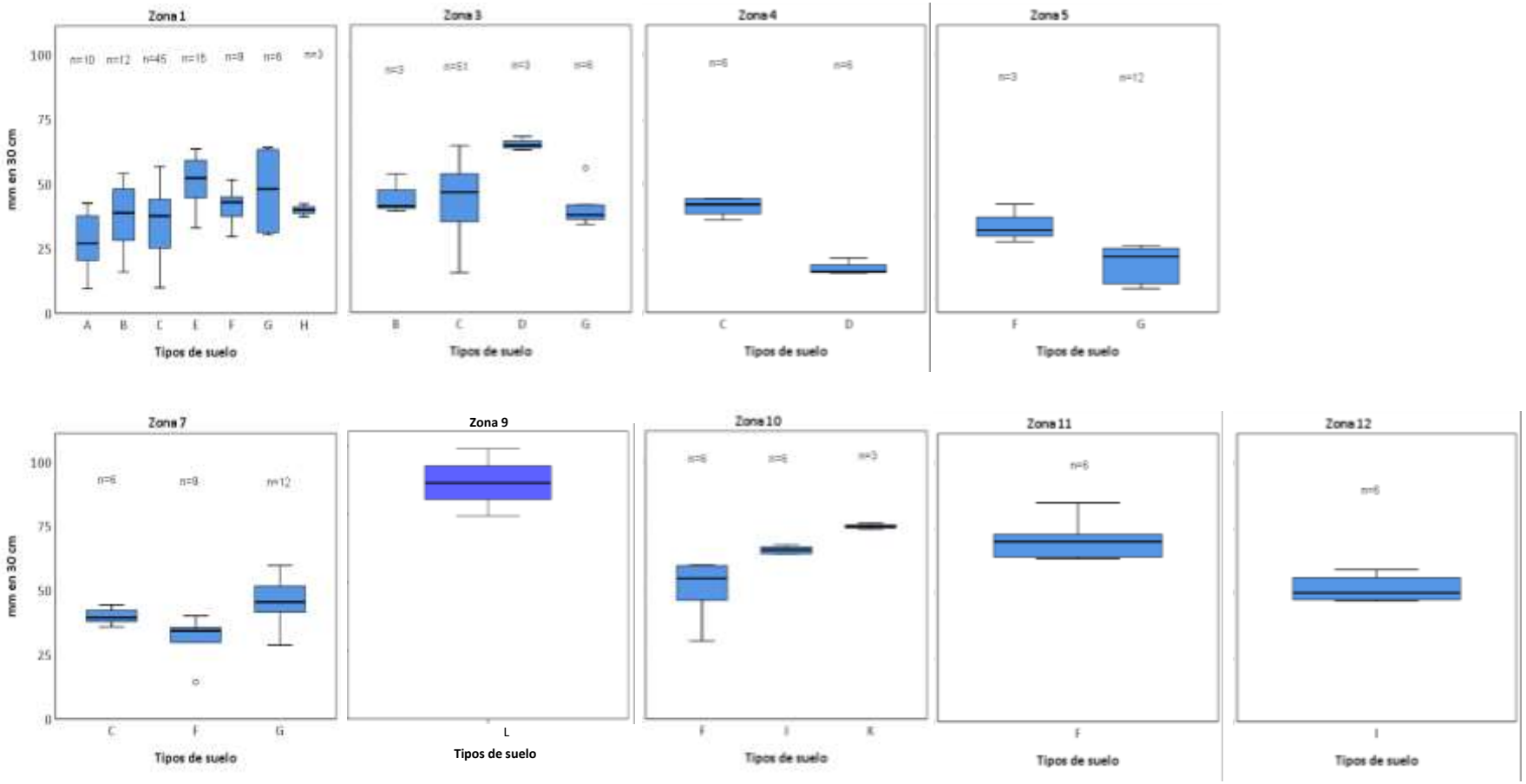


Figura 47. Capacidad de retención de agua disponible para las plantas, CRAD (L agua/m^2 o mm, 0-30 cm) en los suelos cultivados de las diferentes zonas bajo manejo convencional.

A: Xerolls, B: Ustolls, C: Xerepts, D: Xerepts con limitaciones en profundidad, E: Calcids, F: Orthents, G: Fluventic Inceptisols y Entisols; H: Gypsids; I: Udepts, L: Udifluvents (S.S.S., 2014)

3.3.3 Evaluación de las estrategias

El estudio del efecto de cada estrategia considerada sobre los indicadores evaluados se ha realizado de manera similar al efectuado en las parcelas experimentales, para cada grupo de parcelas. En cada grupo, se ha determinado de acuerdo con el logaritmo natural de la proporción de respuesta (LRR) descrito más arriba: $LRR = \ln\left(\frac{\bar{X}_R}{\bar{X}_C}\right)$, donde $\bar{X}_R$ y $\bar{X}_C$ son en este caso los valores medios en la parcela o parcelas de referencia con manejo adaptativo, y los que están bajo manejo convencional dentro de cada grupo, respectivamente.

La varianza de la LRR asociada a cada grupo se calculó siguiendo en este caso a partir de las desviaciones estándar y el tamaño de la muestra de las parcelas de referencia y convencionales dentro de cada grupo de parcelas.

Para proseguir con el estudio a nivel regional, se ha empleado un enfoque comúnmente aplicado en los meta-análisis que permite comparan resultados sobre un mismo parámetro, pero de diferentes áreas de estudio. En este caso, el efecto global de cada estrategia en las zonas con más de un grupo de parcelas, y a escala regional, se analizaron con un modelo de efectos fijos no ponderados (FE). Este modelo considera que la única fuente de variabilidad en el análisis es la asociada al proceso de muestreo dentro de cada grupo, calculado según la ecuación anterior (Hedges y otros, 1999). El análisis no ponderado asigna el mismo peso a cada grupo, evitando la subestimación del LRR debido a las diferencias en los tamaños de las muestras.

Las LRR de las diferentes estrategias a nivel de grupo, zona y región se representaron en gráficos "de bosque", transformándolos previamente en RR para simplificar. De esta manera, el efecto se considera significativo cuando el intervalo de confianza (IC) del 95% del RR no se superpone a uno (α= 0,05).

3.3.3.1 C orgánico en el horizonte labrado

En las figuras 48, 49, 50 y 51 se muestran los resultados del efecto de las estrategias consideradas (agricultura de conservación, aplicación de enmiendas orgánicas externas, rotaciones y gestión de pastos) sobre el stock de COS en forma de ratio de respuesta para cada grupo de parcelas, junto con el efecto global por zona y en toda la región. En este caso del carbono orgánico, el efecto positivo está ligado a un incremento en de dicho parámetro, por lo tanto, será considerado como positivo los resultados en la ratio de respuesta que estén por encima del 1. Los que solapen el 1 se consideran efecto neutro, no supone ni perdidas ni ganancias, y los que estén por debajo del 1 son considerados como efecto negativo, que se traducen en pérdidas de contenido de C. En toda la región, las cuatro estrategias excepto las rotaciones tuvieron un efecto positivo neto, y se observó un efecto negativo en el caso de éstas.

Para cada estrategia individual, el RR del COS fue diferente entre zonas y grupos de parcelas. La variabilidad dentro de cada grupo fue bastante heterogénea. Para la Agricultura de Conservación, 6 de los 11 grupos de parcelas probadas mostraron un efecto positivo neto en COS, y sólo uno (en la zona 3) tuvo un efecto negativo neto. El efecto fue globalmente positivo en la zona 1, y no diferente de 0 en las zonas 3 y 7.

El aporte de enmiendas externas resultó en ganancias netas de COS en 9 de los 16 grupos probados, y sólo uno (en la zona 1) mostró pérdidas netas. Las zonas 1, 3 y 7 tuvieron valores zonales netos positivos en general. La variabilidad intra-zonal fue mayor que para la agricultura de conservación.

Por el contrario, se observó que la rotación tuvo un efecto positivo en uno de los 9 grupos de parcelas donde se probó, y negativo en 3. El efecto neto fue nulo en las zonas 1 y 7, y negativo en la zona 3.

Por último, la mejora de la gestión de los pastizales tuvo un importante efecto positivo en el stock de carbono orgánico en 5 de los 8 grupos de parcelas, distribuidos en cuatro zonas (1, 5, 10 y 11). En solo un grupo mostró efecto negativo.

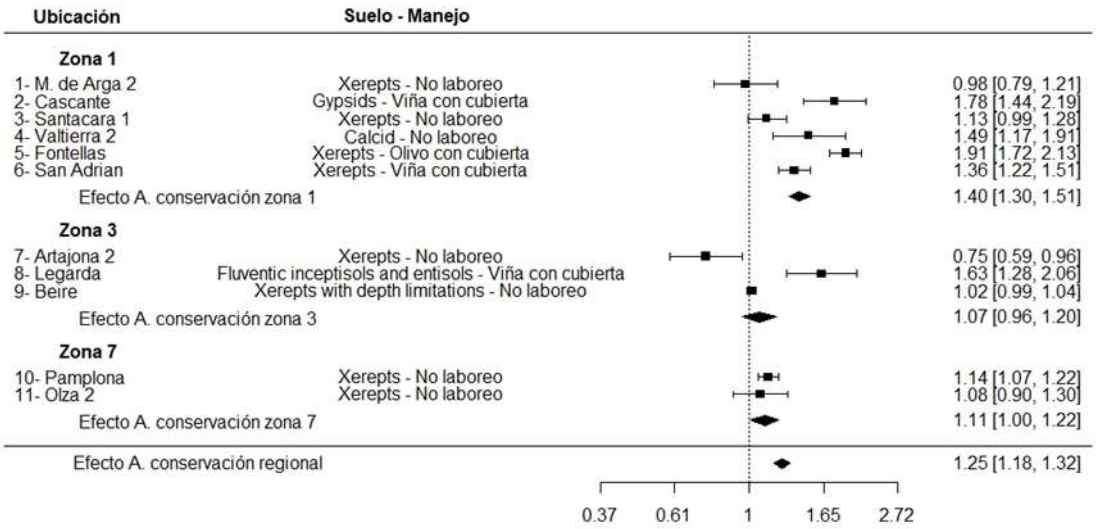


Figura 48 Gráfico "de bosque" para los ratios de respuesta (RR) de los grupos de parcelas considerados en la estrategia "Agricultura de Conservación", para el stock de C orgánico del suelo (0-20 cm).

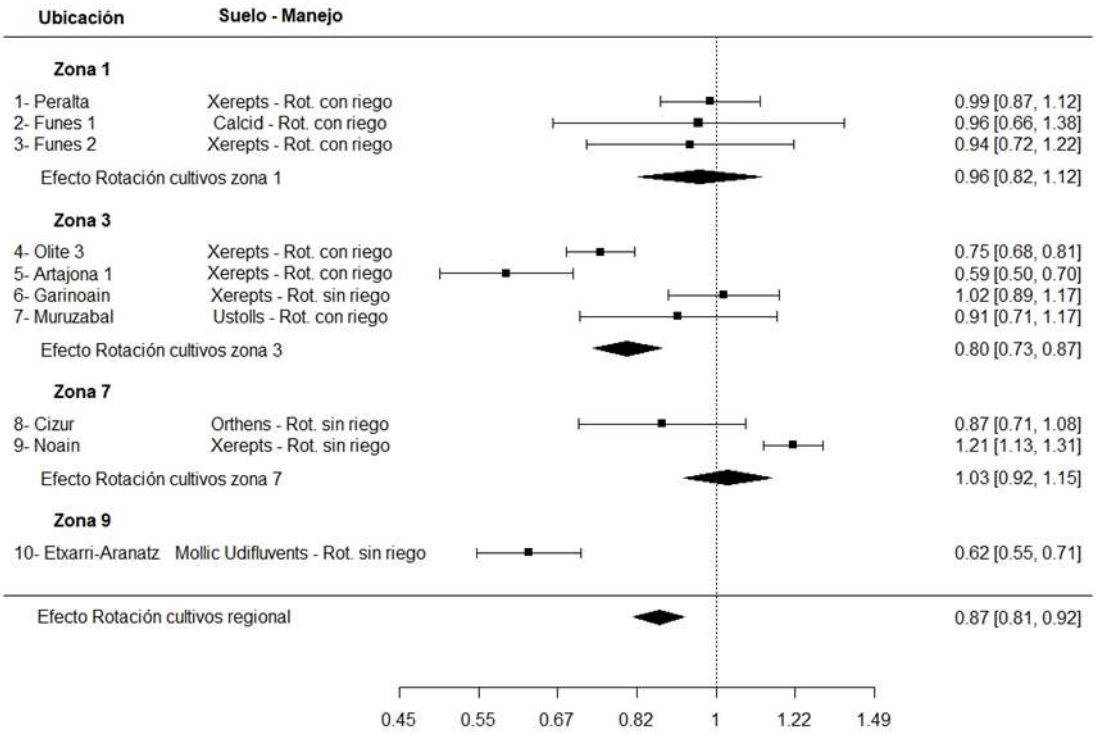


Figura 49 Gráfico "de bosque" para los ratios de respuesta (RR) de los grupos de parcelas considerados en la estrategia "Rotaciones", para el stock de C orgánico del suelo (0-20 cm).

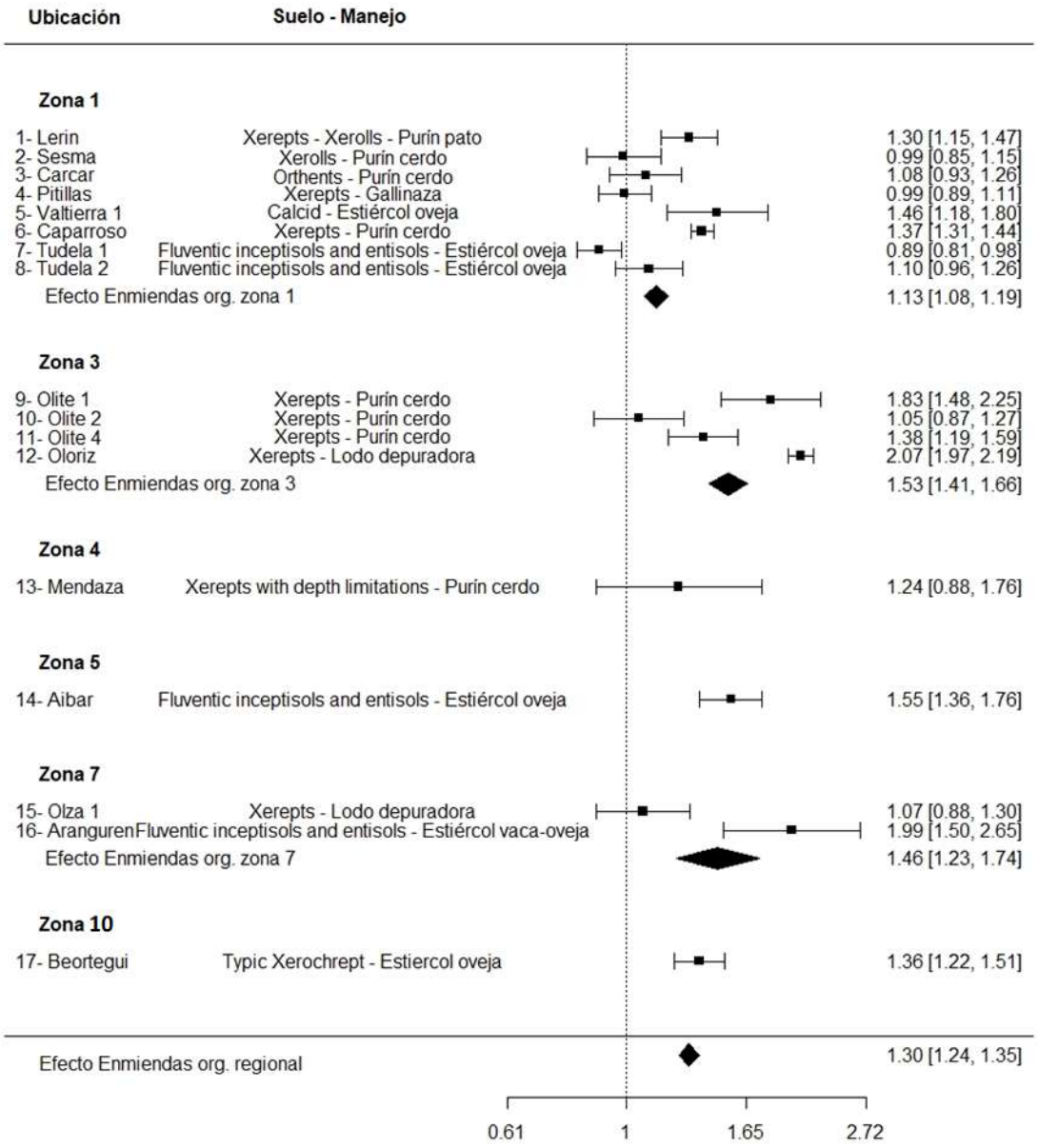


Figura 50 Gráfico "de bosque" para los ratios de respuesta (RR) de los grupos de parcelas considerados en la estrategia "Aportes orgánicos externos", para el stock de C orgánico del suelo (0-20 cm).

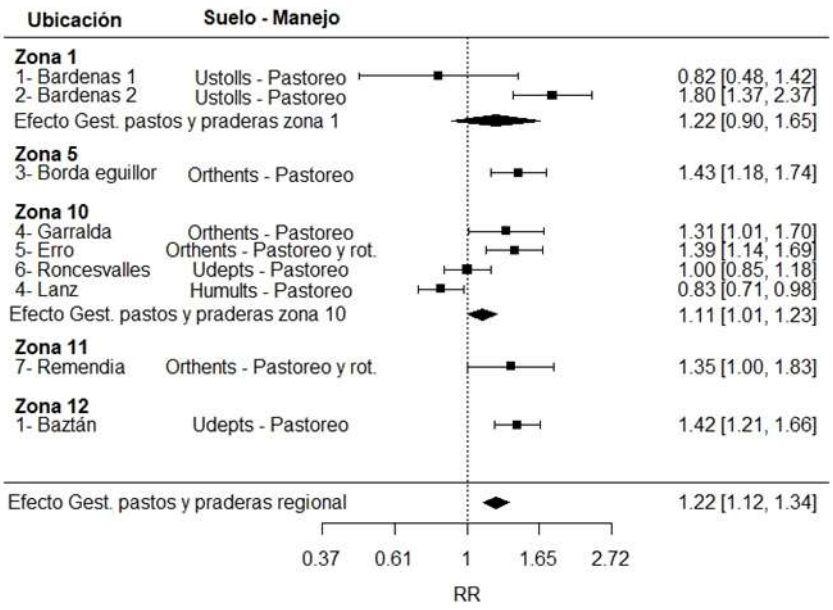


Figura 51 Gráfico "de bosque" para los ratios de respuesta (RR) de los grupos de parcelas considerados en la estrategia "Gestión de pastos y forrajes", para el stock de C orgánico del suelo (0-20 cm).

Una primera observación en cuanto a la eficacia de las estrategias evaluadas en este trabajo es que su efecto neto fue desigual, tanto entre ellas como dentro de cada estrategia en diferentes zonas. En general, la agricultura de conservación, las rotaciones y la gestión de materiales orgánicos parecen ser eficientes a nivel regional en la promoción del almacenamiento de COS en la capa superior del suelo, de acuerdo con la perspectiva general a nivel global (Jia y Shevliakova 2020). Sin embargo, las rotaciones no parecieron comportarse como se esperaba a partir de los conocimientos generales sobre la relación entre la diversificación de los cultivos y las ganancias de COS. (Kremen y Miles 2012; McDaniel y otros 2014; Autret y otros 2016).

La agricultura de conservación se ha promovido ampliamente como una técnica eficiente de almacenamiento de COS (González-Sánchez y otros, 2015; Pittelkow y otros, 2015). Sin embargo, su efecto parece ser muy específico de cada contexto (Virto et al. 2015; Jia y Shevliakova 2020). En España, por ejemplo, se ha atribuido a la siembra directa una capacidad potencial de fijación del C atmosférico de 2 Gg año^{-1}, en comparación con la gestión convencional, pero con tasas diferentes en el tiempo y el espacio (González-Sánchez et al. 2012). En zonas de clima mediterráneo se han comunicado resultados contradictorios, desde ganancias netas (Aguilera y otros, 2013) hasta tasas de secuestro más bajas que las de la labranza convencional (Francaviglia y otros, 2019). Esto se ha relacionado con las condiciones

locales, especialmente las relativas al equilibrio hídrico del suelo y su interacción con el rendimiento de los cultivos (Virto et al. 2012a; Dimassi et al. 2014; Shekhar y Shapiro 2019).

En este estudio se ha observado observó que, si bien el efecto a nivel regional es positivo, parece menor y cercano a 0 en las zonas 3 y 7 en comparación con la zona 1 (Figura 48). Estas zonas difieren principalmente en sus regímenes de humedad, como se ha explicado anteriormente, que es más seco en la zona 1 que en las zonas 3 y 7. Aunque no se registraron datos sobre los rendimientos en las parcelas consideradas en este estudio, estos resultados concuerdan con la observación general de aumentos de rendimiento más frecuentes con la agricultura de conservación en tierras áridas y semiáridas (Pittelkow y otros, 2015). Esto puede relacionarse con el mayor efecto de la mejora de las condiciones de humedad del suelo asociadas a la agricultura de conservación en éstas (Bescansa y otros, 2006). Apoyando esta idea, las parcelas de agricultura de conservación con cultivos leñosos permanentes y cubiertas vegetales, donde no hay exportación de biomasa de éstas con la cosecha, mostraron el RR más positivo (Figura 48).

Hay que señalar, sin embargo, que los datos de nuestro estudio se refieren únicamente a la capa superior del suelo (0-20 cm). Se sabe que la acumulación de COS cuando se reduce el laboreo puede limitarse a las capas superiores del suelo (Angers y Eriksen-Hamel 2008; Meurer y otros 2018). Sin duda, esto debe tenerse en cuenta al evaluar el papel de esta estrategia en la mitigación del cambio climático mediante el secuestro de C del suelo. Sin embargo, desde una perspectiva adaptativa, las ganancias en la capa superior del suelo COS, que pueden reducir la erosionabilidad del suelo y aumentar la infiltración, pueden ser de gran interés en una región sometida a un aumento de los fenómenos de precipitaciones extremas y a una escasez de precipitaciones.

La comparación con la parcela experimental centrada en esta técnica (en Ilundain), parece apoyar esta observación. En esta parcela (situada en la zona 7), no se observaron ganancias netas de COS después de varios años de ensayo de técnicas de agricultura de conservación, aunque sí algunos beneficios en relación a la retención de agua o la erosionabilidad (Figura 32).

En relación con el aporte externo de materiales orgánicos, los resultados confirmaron la observación general a escala del Mediterráneo (Aguilera y otros, 2013; Francaviglia y otros, 2019) de que el aumento de los insumos de C asociados a las adiciones exógenas de C orgánico son los sistemas más eficaces para aumentar la COS en los suelos agrícolas.

La variabilidad observada en estos resultados (que fue alta entre y dentro de las zonas, Figura 50) puede relacionarse tanto con las características del suelo como con los diferentes tipos de enmiendas y dosis. El objetivo de la adición de materiales orgánicos exógenos al suelo en las parcelas consideradas no es aumentar el COS *per se*, sino gestionar la fertilidad del suelo. En

consecuencia, las dosis y los tipos de enmiendas variaron entre las parcelas, según las necesidades de los cultivos y la disponibilidad de fuentes económicamente viables. Se ha informado ampliamente sobre la pertinencia del origen y el tipo de enmiendas orgánicas para la estabilización del C orgánicos exógeno (Bhattacharya y otros, 2016). No se ha encontrado ninguna relación directa entre un tipo particular de enmienda orgánica y las ganancias en materia de COS, lo que sugiere que el efecto neto depende de una combinación de factores. Además de la cantidad (Francaviglia y otros 2019), se ha observado que el momento de la aplicación y el fraccionamiento de las dosis, por ejemplo, son determinantes en las ganancias finales de COS cuando se utiliza purín de cerdo en condiciones climáticas similares a las del sur de Navarra (Domingo-Olivé y otros 2016). Estos aspectos deberían ser tenidos en cuenta a la hora de perfilar estrategias eficaces en este sentido.

El beneficio real de importar C orgánico para aumentar el almacenamiento de COS debe considerar la posible pérdida de C en otros sistemas, dependiendo del destino alternativo del C en los materiales utilizados (Powlson et al. 2011). En las parcelas incluidas en el estudio, que representaban parcelas agrícolas reales que utilizaban enmiendas orgánicas y/o fertilización en la región, las fuentes más comunes son de origen animal. En este sentido, la escala regional puede ser un marco adecuado para redistribuir C desde sistemas de excedentes como las granjas de producción animal intensiva a suelos agrícolas pobres en COS (Jia y Shevliakova 2020).

La diversificación de los cultivos no puede separarse del riego para comprender el impacto negativo neto de las rotaciones en el almacenamiento de COS (Figura 49). Ninguno de los grupos de parcelas considerados en las zonas 1 y 3 mostró un efecto positivo de la rotación. El único grupo de parcelas con un efecto positivo se encuentra en la zona 7, donde no se utiliza el regadío. Esto parece relacionado con el hecho de que la introducción del regadío permite adoptar rotaciones de cultivos más complejas en las zonas más áridas. Con todo, el efecto neutro observado en la zona 1, indica la posible viabilidad de esta medida que, si bien no aumentó el COS, puede aumentar el rendimiento mediante la intensificación.

Por último, la variedad de prácticas consideradas como gestión mejorada de los pastizales es amplia, ya que las zonas estudiadas incluyen el gradiente climático más amplio de la región (Figura 46). Sin embargo, se observó una tendencia general hacia una mayor acumulación de SOC en el marco de este tipo de prácticas. Se observa que la inclusión del pastoreo controlado, y/o el cambio de uso de la tierra para incluir las rotaciones de cultivos, parecen eficientes en el almacenamiento de COS en este tipo de manejos. Se ha observado que el pastoreo de media y baja intensidad da lugar a ganancias de COS en las zonas templadas húmedas y secas (Abdalla et al. 2018). Este fue el caso también en la mayoría de los grupos de parcelas de las zonas 10 y 11, donde la línea de base era la más alta de la región (Figura 35).

3.3.3.2 Densidad aparente

Las siguientes figuras (52, 53, 54 y 55) muestran los resultados del efecto de las estrategias consideradas sobre la densidad aparente en forma de ratio de respuesta para cada grupo de parcelas, junto con el efecto global por zona y en toda la región.

A la hora de valorar los resultados de la densidad aparente, hay que puntualizar que los valores del ratio de respuesta que se encuentran por encima del 1 representan un incremento en dicho indicador y que a efectos de estrategia de adaptabilidad se pretende lo contrario, considerando así, una reducción de la densidad aparente como el efecto a positivo. A nivel regional, la agricultura de conservación mostró un efecto negativo neto, las rotaciones y la gestión de pastos un efecto neutro, y solo en el caso de las parcelas con aportes de materiales orgánicos exógenos se observa un efecto positivo en la ratio de respuesta.

La agricultura de conservación mostró variaciones nulas o ligeramente negativas (hacia mayor densidad aparente) en la mayoría de los 11 grupos de parcelas evaluados en esta estrategia. A nivel de zonas, 2 mostraron efecto neutro y una de ellas un efecto negativo (Figura 52).

En el caso de la estrategia de rotación de cultivos uno de los grupos mostro un efecto positivo, 8 grupos mostraron un efecto neutro y uno de los grupos, efecto negativo. En cuanto las zonas, las 3 zonas evaluadas en esta estrategia ofrecieron un efecto neutro (Figura 53).

En el caso de la estrategia asociada al aporte exógeno de C orgánico, la variabilidad observada en el efecto fue mayor que en las estrategias anteriores, de manera que en 8 de los 17 grupos evaluados se observó un efecto positivo (menor densidad aparente), en 4 grupos el efecto fue negativo y en el resto, 5 grupos, el efecto fue neutro. A nivel de zonas 2 mostraron un efecto positivo y en el resto el efecto observado fue neutro. El efecto global de la región es negativo (Figura 54).

En el caso de la estrategia asociada a la gestión de pastos y pastizales (Figura 55), 2 de los grupos mostraron un efecto positivo de los 9 evaluados, si bien los cambios observados fueron menores. En 6 de los 9 el efecto fue neutro y en 1 de los grupos el efecto fue negativo. De las 5 zonas evaluadas en, 3 zonas mostraron un efecto neutro y en una de ellas el efecto fue negativo.

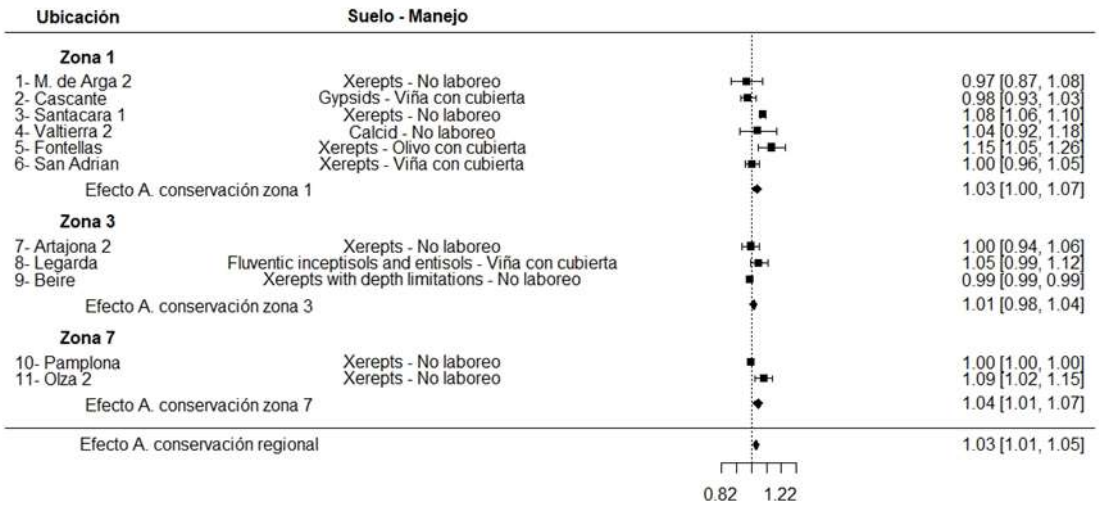


Figura 52 Gráfico "de bosque" para los ratios de respuesta (RR) de los grupos de parcelas considerados en la estrategia "Agricultura de Conservación", para la densidad aparente (0-20 cm).

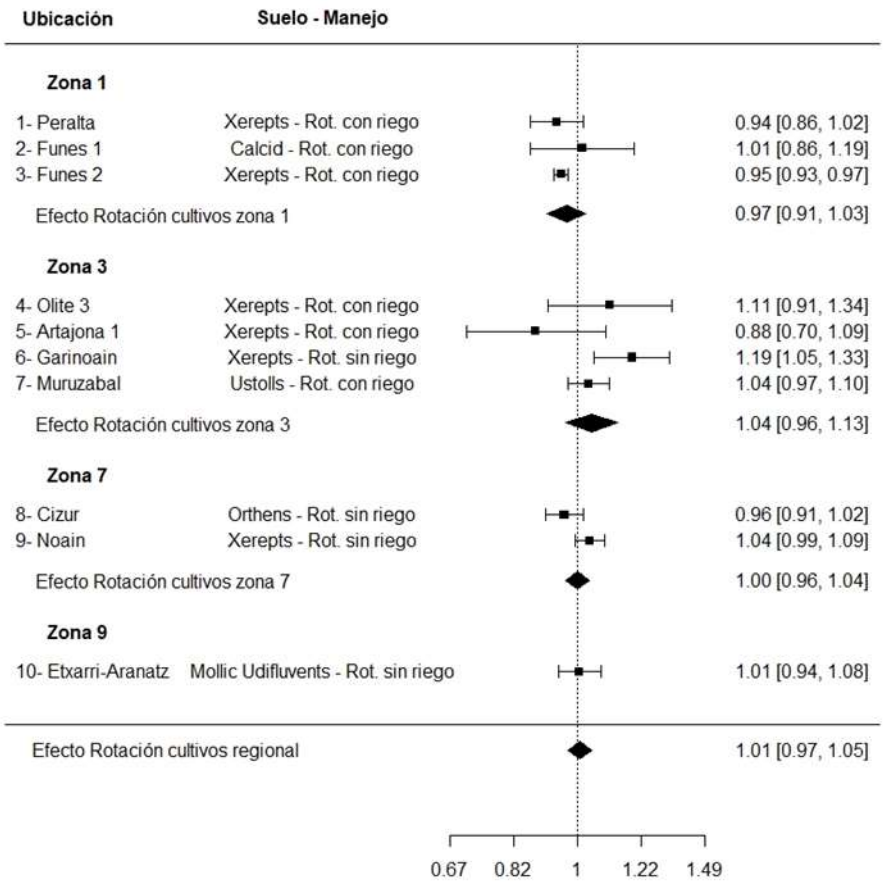


Figura 53 Gráfico "de bosque" para los ratios de respuesta (RR) de los grupos de parcelas considerados en la estrategia "Rotaciones", para la densidad aparente del suelo (0-20 cm).

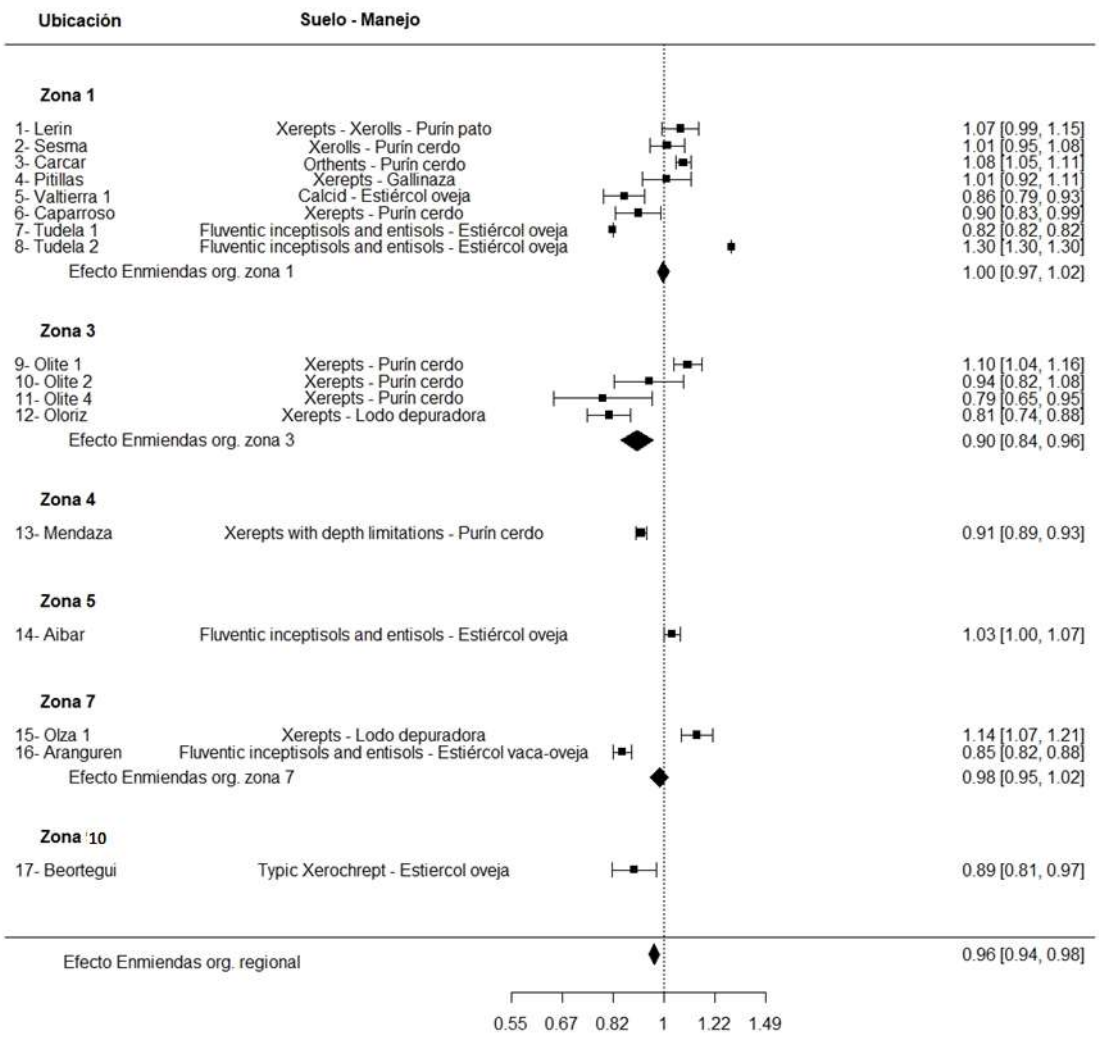


Figura 54 Gráfico "de bosque" para los ratios de respuesta (RR) de los grupos de parcelas considerados en la estrategia "Aportes orgánicos externos", para la densidad aparente del suelo (0-20 cm)

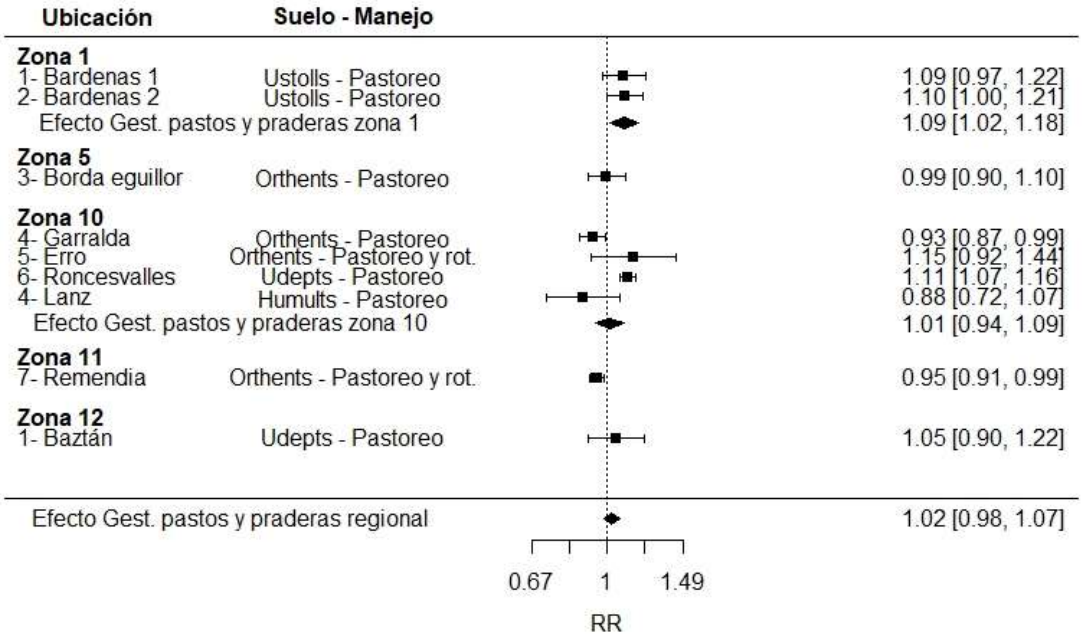


Figura 55 Gráfico "de bosque" para los ratios de respuesta (RR) de los grupos de parcelas considerados en la estrategia "Gestión de pastos y forrajes", para la densidad aparente del suelo (0-20 cm)

A nivel regional estos resultados muestran un efecto dispar de las diferentes estrategias evaluadas frente a la densidad aparente. Únicamente la asociada con la aplicación exógena de C orgánico parece tener un efecto positivo sobre dicho indicador. La rotación de cultivos y la gestión de pastos y pastizales parecen por lo tanto tener un efecto menor o no tener ningún efecto sobre dicho indicador y la agricultura de conservación muestra en efecto negativo, pero de poca relevancia cuantitativa.

El efecto de la agricultura de conservación sobre la densidad aparente no parece ser un tema sobre el que haya consenso. Por un lado existen varios autores que la supresión del laboreo ligado a la agricultura de conservación puede implicar un aumento de la densidad aparente del suelo debido a la no perturbación (Powlson et al. 2012). Por otro lado, otros autores no encuentran diferencias entre diferentes intensidades de laboreo, como es el caso de Nunes et al. (2020), en un meta análisis realizado a partir de 295 estudios situados en EEUU, donde la agricultura de conservación está muy extendida. Algunos autores exponen que la densidad aparente puede verse disminuida en los primeros 5-10 cm, como consecuencia del supuesto

aumento de carbono orgánico ligado a esta práctica y que a partir de esa profundidad la densidad aparente aumenta (Powlson et al. 2014; Mary et al. 2020). En este estudio no se han tomado muestras de densidad aparente a dichas profundidades para corroborar dicha premisa, aunque resultados de otros estudios realizados en la región muestran aumento de la densidad aparente asociada al no laboreo a lo largo de todo el perfil, incluyendo los primeros 5-10 cm (Virto 2007, Fernández-Ugalde 2009). No se observa, en las parcelas de la red, un efecto diferente en aquéllas con cultivos permanentes con cubierta vegetal en relación con las parcelas de cultivo donde se evalúa el no laboreo.

La estrategia de aplicación exógena de C orgánico es la única que parece tener en esta red de parcelas un efecto positivo sobre la densidad aparente (reduciéndola), aunque los resultados son muy variables. Este efecto ha sido observado por varios autores, que además relacionan dicho efecto sobre la densidad aparente con un aumento en el contenido de materia orgánica en el suelo (Anderson et al. 1990; Powlson et al. 2012). Esto último coincide con lo observado en este estudio, donde los resultados muestran un incremento en dicho parámetro asociado a esta estrategia (ver apartado anterior). Por otra parte, no se han encontrado diferencias ni entre los tipos de enmiendas utilizadas ni entre las distintas zonas evaluadas, observándose un efecto desigual extendido en toda la región. El hecho de que estas parcelas se encuentren bajo manejo convencional también debe considerarse, por su efecto homogeneizador de este parámetro.

La disminución de la densidad aparente que se vincula normalmente a la rotación de cultivos suele estar asociada con el aumento de contenido de carbono orgánico del suelo, por lo que se deduce que las rotaciones que generan una mayor SOC son las que conducen a una disminución de la densidad aparente (Zuber et al. 2015). Los factores que pueden determinar la dirección del efecto asociado a dicha práctica incluyen la textura del suelo, la materia orgánica del suelo precedente, la intensidad de laboreo y la región climática donde se sitúa el cultivo. En el caso de la red de parcelas considerada aquí, la mayoría de grupos en los que esta estrategia ha sido evaluada presentan rotaciones de cultivos donde la disposición del riego permite aumentar la intensidad en el cultivo. Como se ha explicado en el apartado anterior, dicho factor puede explicar el hecho de que no se hayan detectado un aumento en el COS asociado a esta práctica. Al igual que el caso anterior, el hecho de que estas parcelas se encuentren bajo manejo convencional también hace que las densidades aparentes se homogenicen.

Finalmente, evaluando los resultados de la estrategia asociada a la gestión de pastos y praderas, el resultado indica que esta estrategia no modificó de manera relevante la densidad del suelo en la profundidad considerada. En general, se ha observado que la acción de pisoteo de los animales de pastoreo al impactar en el suelo puede aumentar la densidad aparente, así como la resistencia mecánica (Evans et al. 2012; Byrnes et al. 2018). Ambos autores coinciden

en que la intensidad del pastoreo y el momento del año en el que se hace son factores determinantes para determinar el efecto de esta estrategia, Byrnes (2018) incluye, además, el factor ambiental específico de cada sitio.

3.3.3.3 Capacidad de retención de agua disponible (CRAD)

Las figuras 56, 57, 58 y 59 muestran los resultados del efecto de las estrategias sobre la CRAD en forma de ratio de respuesta para cada grupo de parcelas, junto con el efecto global por zona y en toda la región. En este caso, el efecto positivo está ligado a un aumento de la capacidad de retención de agua. Por lo tanto, serás considerado como positivos los resultados en la ratio de respuesta que estén por encima de 1. Los que solapen el valor de 1 se consideran efecto neutro, y los que estén por debajo son considerados como efecto negativo.

En el caso de las prácticas ligadas a la agricultura de conservación (Figura 56), no se ha observado un efecto positivo en ninguno de los grupos evaluados en este estudio. En 8 de los grupos el efecto fue neutro, mientas que en 2 grupos el efecto, negativo. A nivel de zonas, la zona 1 muestra más variabilidad en la respuesta, con grupos con efectos contrapuestos. Las zonas 3 y 7 muestran un efecto neutro. A nivel regional, el efecto observado global es cercano a la neutralidad.

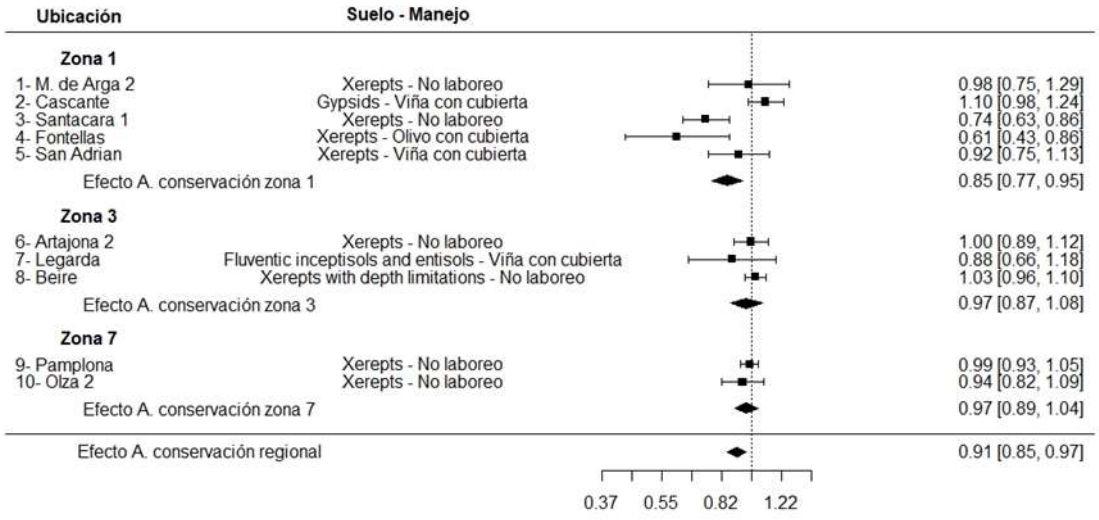


Figura 56 Gráfico "de bosque" para los ratios de respuesta (RR) de los grupos de parcelas considerados en la estrategia "Agricultura de Conservación", para la capacidad de retención de agua disponible (0-30 cm).

Los resultados asociados a la estrategia de rotación de cultivos (Figura 57) también muestran una gran variabilidad dentro de los grupos. Dos grupos de los 9 incluidos en este análisis tienen un efecto positivo sobre la CRAD, en 6 grupos el efecto observado es neutro y en 1 de ellos el efecto es negativo. Tanto a nivel de zonas como el efecto global a nivel regional asociado a esta estrategia es neutro.

El efecto asociado a la estrategia ligada a los aportes extra de C en forma de enmiendas orgánicas muestra mucha variabilidad en los resultados dentro de los grupos (Figura 58). En 5 de los 17 grupos evaluados el efecto de dicha estrategia en la CRAD es positivo, en 6 el efecto es neutro y en otros 6 el efecto es negativo. A nivel de zonas, en 4 de las 5 que son incluidas en este análisis, zonas 1, 3, 4 y 7 muestran un efecto neutro y una de las zonas, zona 5, muestra un efecto negativo. Esto se traduce en que el efecto global de dicha estrategia en la región sea neutro, pero con tendencia a ser positivo.

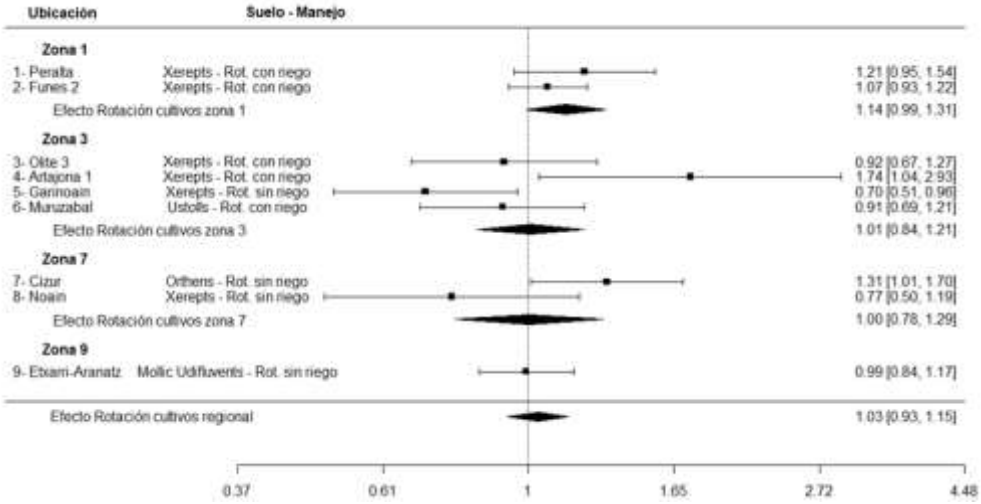


Figura 57 Gráfico "de bosque" para los ratios de respuesta (RR) de los grupos de parcelas considerados en la estrategia "Rotaciones", para la capacidad de retención de agua disponible (0-30 cm).

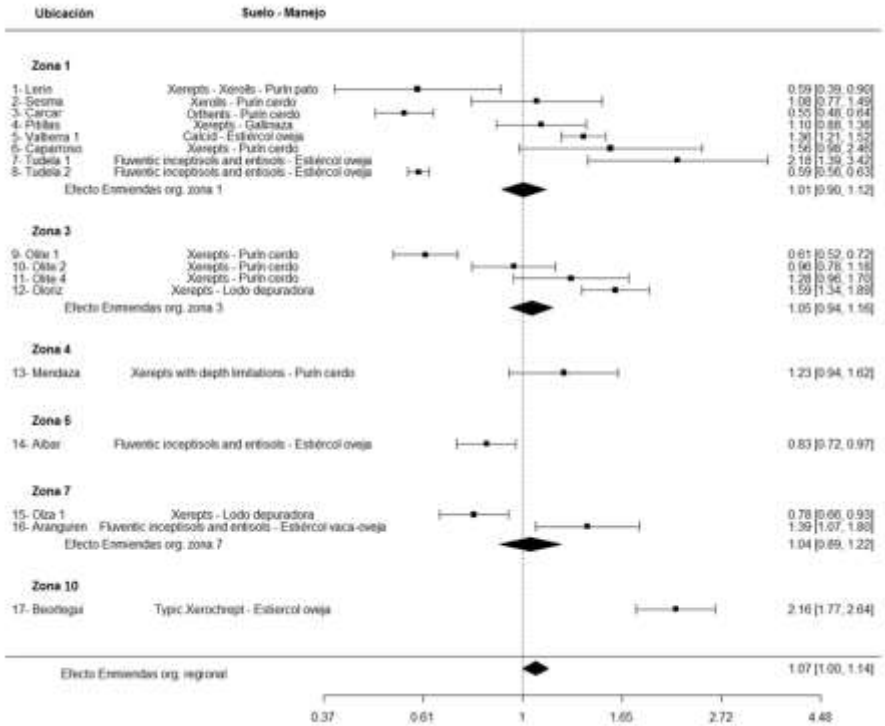


Figura 58 Gráfico "de bosque" para los ratios de respuesta (RR) de los grupos de parcelas considerados en la estrategia "Aportes orgánicos externos", para la capacidad de retención de agua disponible (0-30 cm).

El efecto asociado a la estrategia ligada a los aportes extra de C en forma de enmiendas orgánicas muestra mucha variabilidad en los resultados dentro de los grupos (Figura 58). En 4 de los 16 grupos evaluados el efecto de dicha estrategia en la CRAD es positivo, en 6 el efecto es neutro y en otros 6 el efecto es negativo. A nivel de zonas, en 4 de las 5 que son incluidas en este análisis, zonas 1, 3, 4 y 7 muestran un efecto neutro y una de las zonas, zona 5, muestra un efecto negativo. Esto se traduce en que el efecto global de dicha estrategia en la región sea neutro.

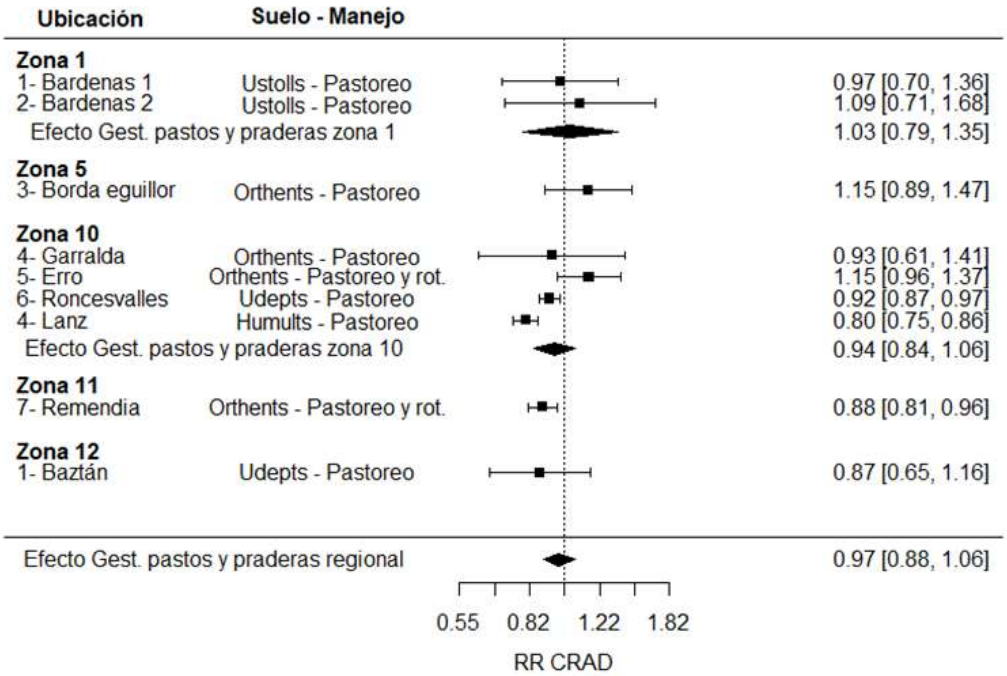


Figura 59 Gráfico "de bosque" para los ratios de respuesta (RR) de los grupos de parcelas considerados en la estrategia "Gestión de pastos y forrajes", para la capacidad de retención de agua disponible (0-30 cm)

En el caso de la estrategia asocia a la gestión de pastos y praderas (Figura 59), los resultados muestran un efecto en 6 de los 9 grupos evaluados. En los 3 grupos restantes el efecto observado en negativo. A nivel de zonas 4 de las 5 incluidas en esta estrategia, zonas 1, 5, 10 y 12, tienen un efecto neutro, y en la zona 11 restante, el efecto observado en negativo. A nivel regional el efecto global asociado a esta estrategia es neutro.

La agricultura de conservación suele estar asociada con una mejora de las propiedades físicas del suelo que facilitan la absorción y retención el agua, de manera que pueda estar disponible para su posterior utilización en los cultivos (Powlson et al. 2014; Nunes et al. 2020). Blanco-Canqui (2018) en una revisión de 14 estudios sobre el efecto de la agricultura de conservación

en la capacidad de retención de agua disponible observo resultados dispares. El resumen de dicho estudio indica que esta técnica aumentó el agua disponible de las plantas en 7 estudios, no tuvo efectos en 5, y se redujo en 2 de ellos. Para dicho autor, el aumento del agua disponible para las plantas se atribuye principalmente al aumento de la concentración de materia orgánica en el suelo. En 5 de los estudios que informaron sobre el aumento del agua disponible con agricultura de conservación, también se comunicaron datos sobre incremento en la concentración de C orgánico en el suelo. Dicho estudio es un ejemplo de que, si bien la agricultura de conservación puede ser una estrategia potencial para gestionar el agua del suelo en las regiones de agua limitada, la falta de efectos o la reducción del mismo en alguno de los casos parece indicar una especificidad local de este efecto.

Estudios previos realizados en el la región muestran una mejora en la CRAD ligada a la agricultura de conservación, atribuyéndola al mayor contenido de carbono orgánico del suelo y cambios en el tamaño y distribución de los poros de la profundidad considerada (Bescansa et al. 2006; Fernández-Ugalde et al. 2009). Los resultados observados en este estudio no corroboran lo observado, a pesar de que el efecto global de dicha estrategia sobre el carbono orgánico sí que indica un incremento de dicha variable para esta estrategia, lo que en un principio, podría suponer una mejora de la CRAD. Las parcelas con cultivos permanentes con cubierta vegetal muestran resultados dispares, pero en línea de lo observado en el resto de parcelas incluidas en el análisis de dicha estrategia. Esto remarca la necesidad de profundizar más en la evaluación del efecto de la agricultura de conservación sobre esta variable en la región.

La aplicaciones exógenas de C orgánico en el suelo también están comúnmente ligadas a una mejora de las propiedades físicas del suelo, lo que implica, entre otras cosas, una mejora en la retención de agua disponible (Anderson et al. 1990; Powlson et al. 2012; Blanco-Canqui et al. 2015), asociada a una mejora en la estructura y a densidades aparentes ligeramente más bajas asociados a un mayor contenido de C orgánico. En este estudio los resultados muestran un efecto neutro sobre la CRAD, a pesar de que esta estrategia es la que mejor resultado ofrece tanto sobre el carbono orgánico del suelo como sobre la densidad aparente del mismo. Esto parece indicar que otros factores como el laboreo pueden interferir en la mejora de la capacidad del suelo de retener agua bajo manejos de este tipo, que es preciso considerar a la escala regional.

Para Indoria et al. (2017), la aplicación apropiada de rotaciones de cultivo puede favorecer el desarrollo de micro y macro poros o canales que facilitan el movimiento y la retención de agua en el suelo. Sin embargo, dicho autor asocia los beneficios del uso de la rotación de cultivos al sistema de cultivo empleado y a su intensificación. Esto está en línea con resultados diversos encontrados en otros estudios, en los que se observan efectos cruzados tanto por el tipo de cultivos incluido en la rotación como por la intensidad del manejo (Kazula et al. 2017; Mtyobile

et al. 2020). Los resultados observados en este estudio muestran un efecto neutro del uso de rotaciones de cultivo sobre la CRAD, posiblemente influenciado por la intensidad de los sistemas incluidos en la evaluación de dicha estrategia, que como ya se ha mencionado (ver apartado de carbono orgánico) están en su mayoría asociados a sistemas con riego. La zona 7, que incluye sistemas de cultivo sin riego, es la única en la que uno de los grupos muestra un efecto positivo.

El efecto del pisoteo de los animales de pastoreo puede provocar la compactación del suelo, disminuyendo el espacio poroso del mismo y provocando una reducción de la infiltración y reduciendo la disponibilidad de agua para las plantas (Milchunas and Lauenroth 1993; Pulido et al. 2018; Hao and He 2019). Para muchos autores, el efecto de dicha estrategia sobre la CRAD del suelo depende de la intensidad (Teague et al. 2011; Dong et al. 2015) y de la localización geográfica (Mcsherry and Ritchie 2013). Los resultados observados en este estudio muestran un efecto neutro asociado a esta estrategia sobre la CRAD. Esto se puede explicar porque las técnicas de pastoreo que son evaluadas en este estudio incluyen prácticas de pastoreo de baja intensidad y de pastoreo controlado.

3.3.3.4 Indicadores Nadapta en nuevas parcelas (2023)

En 2023, se han incorporado a la base de datos ya existente, parcelas muestreadas en el marco de las colaboraciones con otros proyectos. Esto se refiere a una parcela demostrativa en viña con agricultura de conservación (cubiertas) asociada al proyecto (figura 60), y parcelas de pasto y siega (figura 61) en las que se contrastaron parcelas identificadas como de alto valor natural, con parcelas convencionales. Esto hace un total de 13 parcelas nuevas. Esta ampliación viene detallada en el punto 3.4 En las siguientes gráficas se muestran las ratios respuestas de estas parcelas en los indicadores Nadapta del suelo.

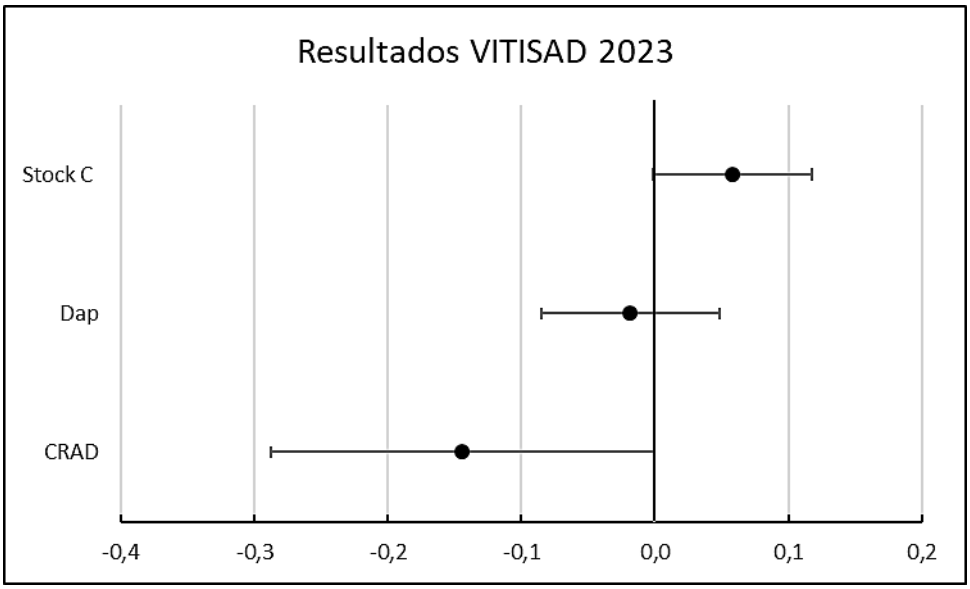


Figura 60. Ratios respuesta de los indicadores Nadapta edáficos para las parcelas pertenecientes al Proyecto VITISAD

En la Figura 60 se puede observar la respuesta que las calles con cubierta provocan en los tres indicadores edáficos medidos en comparación con las calles desnudas. De este modo, puede apreciarse una mayor acumulación de carbono orgánico en los suelos bajo cubieta vegetal, aunque la vegetación en estas calles no se traduce en una mayor capacidad de retener agua, donde se observa un empeoramiento en comparación con el manejo convencional. La densidad, por su parte, no presenta cambios significativos.

Respecto a los objetivos de adaptación esto significa, por un lado, que el mantenimiento de cubiertas puede ser una forma de aumentar, o al menos mantener, la concentración de C orgánico en el suelo (aunque esta parece más asociada a las formas lábiles), y de las condiciones de porosidad total. Por otro lado, que la relación entre estos cambios no está necesariamente vinculada a una mejora en las condiciones de retención de agua.

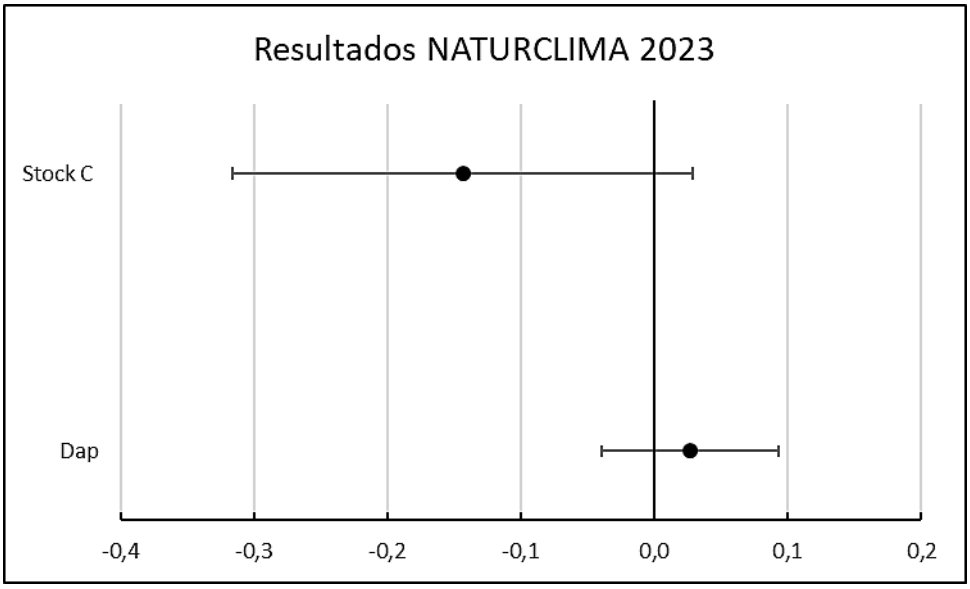


Figura 61. Ratios respuesta de los indicadores Nadapta edáficos para las parcelas pertenecientes al Proyecto NATURCLIMA

En el caso de los resultados de los indicadores del suelo en el proyecto NATURCLIMA, se observa como, a pesar de haber registrado en la mayoría de los casos un efecto negativo en la acumuluación de carbono orgánicoestadisiticamente, no se han encontrado diferencias significativas entre las parcelas de alto valor natural y las de bajo valor natural. Esta respuesta se translada también al caso de la densidad aparente.

3.3.4 Diagnóstico regional

El objetivo de este estudio fue evaluar, a escala regional, y desde el punto de vista de las propiedades del suelo, la eficacia de las diferentes estrategias de manejo agrícola consideradas en el marco de la Hoja de Ruta de Cambio Climático de Navarra por su potencial de adaptación. En particular, se consideraron las estrategias vinculadas a la agricultura de conservación, las rotaciones, y el aporte y uso de enmiendas orgánicas en suelos agrícolas, así como algunas estrategias de reducción de la intensidad y control del pastoreo, en zonas de pastos.

Aunque la mayoría de las acciones consideradas han mostrado algunos efectos positivos en general, éstos no son sencillos de evaluar, ni uniformes en toda la región. Las razones de esta variabilidad parecen ser diferentes para las distintas estrategias. Algunos rasgos generales indican que las ganancias de COS en la capa superficial del suelo son más evidentes con los aportes externos, o están moduladas por el clima en la agricultura de conservación. Estas ganancias no se corresponden necesariamente con cambios en otros parámetros, como la retención de agua, lo que resalta la necesidad de entender la complejidad de las interrelaciones entre diferentes aspectos del manejo, y entre las diferentes propiedades del suelo, a la escala regional. Es conocido que la relación entre el COS y otras propiedades como el almacenamiento y la infiltración de agua, la erosión del suelo, la biodiversidad y la fertilidad del suelo es dependiente, entre otros factores, del suelo y del clima (Johannes et al. 2017). Los resultados observados en términos de CRAD ponen de relieve el hecho de que las posibles diferencias en este aspecto inducidas por los diferentes manejos que facilitan el almacenamiento de COS pueden ser efímeras en las prácticas de cultivo convencionales (Chan & Heenan, 1996).

Como se ha observado en otras regiones (Blanco-Canqui y Ruis, 2018; Nunes et al., 2020), una de las principales preocupaciones de los productores en relación con reducción de la labranza asociada a la agricultura de conservación es el riesgo de una mayor compactación del suelo que puede afectar a la emergencia, desarrollo de raíces o el rendimiento de los cultivos. Según lo observado en este trabajo, si bien el efecto a nivel regional es negativo tanto para la densidad aparente como para la CRAD, ha sido neutro en la mayoría de los grupos en los que se evaluó el no laboreo. Estas consideraciones, junto con el hecho de que la reducción o supresión del laboreo puede ser una técnica eficaz en la promoción del almacenamiento de SOC en la capa superior del suelo en la parte meridional de Navarra, hacen que la agricultura de conservación represente una estrategia que debe considerarse al evaluar la adaptación al cambio climático en la región. Por otro lado, el uso de cubiertas vegetales en cultivos leñosos representa sin duda una estrategia a considerar en un posible enfoque regional de adaptación al cambio climático.

Teniendo en cuenta que las principales amenazas asociadas al cambio climático identificadas para esta región están relacionadas con los cambios en las temperaturas (aumento de las medias y de olas de calor) y las precipitaciones (escasez y fenómenos extremos), debería considerarse una combinación adecuada de las rotaciones y el riego. La variabilidad en los resultados observados demanda, sin embargo, una evaluación especifica en cada contexto (sistema de cultivo empleado y a su intensificación) de cara a valorar los posibles beneficios que esta estrategia puede tener a nivel de región. Esto resulta de especial interés en la región considerando la importante superficie con riego disponible en la misma, donde las rotaciones representan una de las estrategias más ampliamente extendida. Del mismo modo, las ventajas de incluir rotaciones en los sistemas de cultivo, reduciendo así períodos de barbecho, están bien definidas para las zonas templadas y húmedas (Poeplau & Don, 2015), por lo que dicha estrategia debe ser considerada también en zonas con regímenes más húmedos donde el uso de riego es menos frecuente.

La variabilidad de los resultados asociados a la estrategia de aportes exógenos sobre los indicadores considerados, sugiere que factores como los tipos de enmiendas y dosis, junto con el sistema de gestión del suelo, deben tenerse en cuenta al evaluar esta estrategia a nivel regional. Aun así, representa una estrategia a considerar en un enfoque regional de adaptación al cambio climático, considerando, además, que permite redistribuir y revalorizar los excedentes de granjas intensivas o de las plantas de tratamiento de aguas residuales. A este respecto, también es necesario considerar otros factores como la ubicación geográfica de la fuente, su disponibilidad y su viabilidad económica.

Los resultados asociados a las estrategias de control de pastos en los indicadores evaluados presentaron un efecto variable en toda la región, donde el gradiente climático parece ser un factor, al menos en la densidad aparente. Los factores ambientales específicos de cada lugar geográfico parecen ser relevantes para evaluar el potencial de adaptación al cambio climático asociado a esta estrategia en la región (Byrnes et al., 2018).

Una observación singular es que el tipo de suelo, tal como se considera en este estudio, no pareció especialmente relevante como factor de la eficacia de las estrategias. Varias razones pueden explicar esta observación. En primer lugar, aunque los tipos de suelo se seleccionaron sobre la base de sus características taxonómicas en Soil Taxonomy (S.S.S. 2014), para este estudio sólo se consideraron los 20 cm superiores del perfil. Algunos perfiles que difieren en su clasificación taxonómica, pueden tener características similares en esta parte del perfil. Por ejemplo, todos los suelos de las zonas 1, 3, 4 y 5 contenían más del 20% de carbonatos en su horizonte superior, lo que es un factor conocido de estabilización del COS (Rowley et al. 2018), y puede determinar la relación entre el COS y las características físicas del suelo (Rabot et al. 2018). En segundo lugar, todos los suelos estudiados aquí correspondían a suelos agrícolas, la mayoría de los cuales han sido gestionados durante décadas. Como se ha explicado

anteriormente, esto implica una homogeneización de sus propiedades superficiales, que se logran acercar progresivamente a las condiciones más favorables para los cultivos (Kuzyakov y Zamanian 2019).

Otro aspecto importante a escala regional, es que el enfoque de este estudio incluye las estrategias de gestión ya en práctica en Navarra. Esto implica que algunos agricultores ya las conocen y que pueden ser utilizadas en la región en explotaciones convencionales dentro de los umbrales de rentabilidad media. Esto puede ser un factor relevante a favor de su expansión en la región, en contraste con los problemas asociados a la introducción de nuevas técnicas (White et al. 2018). Aunque las razones de los agricultores para adoptar estrategias de adaptación son diversas (Prokopy et al. 2019; Demenois et al. 2020), la existencia de agricultores pioneros exitosos en el entorno local es un factor conocido de adopción efectiva de manejos alternativos (Altieri et al. 2015).

Por último, y en relación con la adaptabilidad al cambio climático, las principales amenazas identificadas para Navarra están relacionadas con los cambios en las temperaturas (aumento medio y olas de calor) y las precipitaciones (escasez y fenómenos extremos). En este sentido, se ha observado que algunas de las estrategias evaluadas pueden tener un efecto sobre los principales impactos esperados (pérdida de fertilidad expresada como COS, déficit hídrico).

En este sentido, es preciso tener en cuenta que algunos de los cambios que podrían tener un efecto positivo en la adaptación, podrían no corresponderse con una mayor mitigación del cambio climático, si, por ejemplo, las tasas de secuestro de COS en profundidad no se corresponden con las observadas en la capa superior del suelo, o favorecen las emisiones de otros GEI (agricultura de conservación), o dificultan la mitigación en otros sectores (aportes externos de C orgánico). Es necesario revisar estos aspectos para una evaluación general de cada estrategia (Rumpel et al. 2020). Además, en relación a las ganancias de COS, hay que señalar que su acumulación no es infinita ni irreversible. Los suelos son un sumidero de carbono finito, lo que implica que las tasas de retención tienden a disminuir hasta ser insignificantes en décadas o años (Chenu et al. 2019). Además, los nuevos cambios en la gestión, o los meros efectos de los cambios en el clima pueden revertir las ganancias de COS en lapsos de tiempo muy cortos (Álvaro-Fuentes et al. 2012; Jebari et al. 2018).

A nivel regional puede entenderse, por tanto, que las estrategias consideradas pueden tener un efecto positive en relación a la adaptación, desde el punto de vista de las propiedades del suelo. Este efecto, sin embargo, queda modulado por otros factores. Es preciso considerar por lo tanto las características de los agrosistemas a la escala regional, para considerar las ventajas y posibles limitaciones de cada uno de ellos, para avanzar hacia un diagnóstico y asesoramiento para cada tipo de explotación agrícola.

3.4 Base de datos de la red de parcelas

La información recopilada la red de parcelas ha permitido elaborar una completa base de datos. Dicha base de datos recopila toda la información disponible asociada a cada grupo de parcelas considerado en la red de parcelas, con información relativa a su caracterización. Incluye información relativa a la zona y el municipio en el que se encuentra cada grupo, así como el tipo de suelo y clase textural de referencia, y toda la información referente a la estrategia asociada a cada grupo en relación con los indicadores de adaptabilidad considerados. Recopila una caracterización de los grupos considerados, incluyendo valores potenciales observados dentro de cada grupo sobre cada uno de los indicadores, y una valoración del efecto asociado a cada estrategia sobre dichos indicadores en cada uno de los grupos.

Esta base de datos constituye una herramienta de ayuda a la toma de decisiones clave de cara a la elaboración de un plan de gestión resiliente, que permita elaborar recomendaciones sobre las técnicas que muestran mayor potencial en cada zona o tipo de explotación, trabajo previsto en la fase dos del proyecto.

En las actualizaciones realizadas en la base de datos, han sido añadidos también datos de parcelas que se han incorporado a partir de las colaboraciones con otros proyectos. En particular, la parcela demostrativa de manejo en viña con agricultura de conservación (cubiertas) de EVENA asociada al proyecto VITISAD, y las parcelas de pasto y siega del proyecto NATURCLIMA en el que se colaboró con GAN-NIK.

Tabla 3-7 Base de datos red de parcelas para ayuda en la toma de decisiones. Información relativa a los grupos de parcelas que constituyen la red de parcelas del proyecto: municipio, estrategia, tipo de suelo, textura, número de parcelas incluidas en cada grupo, valores potenciales y efecto de cada estrategia sobre los indicadores de adaptabilidad considerados.

Zona	Grupo	Municipio	Estrategia NADAPTA	Suelo	Textura referencia			Nº parcelas por manejo	Densidad aparente ($g\ cm^{-3}$)			Stock C 20 cm ($T\ ha^{-1}$)			Capacidad retención de agua (mm)		
					Arena (%)	Limo (%)	Arcilla (%)		Media	Error	Efecto estrategia	Media	Error	Efecto estrategia	Media	Error	Efecto estrategia
1	1	Lerín	ExO	Pachic Calcixerolls / Typic Calcixerepts	18	46	36	NADAPTA 2	1.75	0.04		56.31	2.03		12.39	3.64	
								Convencional 3	1.64	0.05		43.32	2.14		29.49	4.89	
1	2	Sesma	ExO	Typic Calcixerolls	28	40	33	NADAPTA 2	1.54	0.04		48.21	1.51		33.33	4.02	
								Convencional 3	1.52	0.04		48.78	3.51		31.00	3.61	
1	3	Peralta	ROT	Typic Calcixerepts	18	69	13	NADAPTA 1	1.52	0.06		42.94	1.50		39.73	3.04	
								Convencional 5	1.62	0.03		43.58	2.38		32.76	3.17	
1	4	Carcar	ExO	Lithic Xeric Torriorthents	13	66	20	NADAPTA 1	1.54	0.02		44.79	2.66		22.84	1.22	
								Convencional 3	1.43	0.02		41.36	2.06		41.37	2.15	
1	5	Pitillas	ExO	Typic Calcixerepts	43	32	25	NADAPTA 1	1.54	0.05		39.83	1.13		42.93	3.45	
								Convencional 3	1.52	0.05		40.16	1.95		39.01	3.22	
1	6	M. de Arga	AC (NL)	Typic Calcixerepts	62	18	20	NADAPTA 2	1.62	0.08		43.04	3.64		33.10	1.82	
								Convencional 2	1.67	0.03		43.99	2.93		33.65	4.34	
1	7	Valtierra	ExO	Xeric haplocalcid	58	23	20	NADAPTA 1	1.68	0.01		48.18	4.86		49.72	1.58	
								Convencional 1	1.44	0.06		33.00	1.21		36.56	1.76	
1	7	Valtierra	AC (NL)	Xeric haplocalcid	58	23	20	NADAPTA 1	1.57	0.07		70.94	8.55		30.53	4.70	ND
								Convencional 1	1.51	0.06		47.51	1.55				
1	8	Fontellas	AC (CV)	Typic Calcixerepts	36	41	23	NADAPTA 1	1.73	0.04		56.78	1.95		29.95	4.23	
								Convencional 1	1.51	0.06		29.70	1.25		49.32	5.34	

Estrategias NADAPTA: Aplicación de fuentes exógenas de materia orgánica (ExO), rotación de cultivos (ROT), agricultura de conservación que incluye no laboreo (AC NL) y el uso de cubiertas vegetales en cultivos permanentes (AC CV) y gestión de pastos y praderas (GPP). ND: no disponible.

1	9	Cascante	AC (CV)	Xeric Calcigypsid	11	57	32	NADAPTA	1	1.48	0.02	42.81	2.61	43.93	2.15
								Convencional	1	1.52	0.03	24.09	2.13	39.88	1.39
1	10	Funes	ROT	Xeric haplocalcid	30	46	25	NADAPTA	1	1.44	0.10	33.27	5.78		ND
								Convencional	2	1.42	0.06	34.77	2.53	54.48	2.59
1	11	Funes	ROT	Xeric haplocalcid	30	46	25	NADAPTA	2	1.51	0.00	33.71	3.64	59.28	1.68
								Convencional	2	1.59	0.02	36.00	2.85	55.50	3.49
1	12	Santacara	AC (NL)	Typic Calcixerepts	46	27	27	NADAPTA	1	1.68	0.01	34.62	2.07	36.30	2.88
								Convencional	1	1.56	0.01	30.68	0.74	49.24	0.34
1	13	Tudela	ExO	Fluventic Haploxerepts	44	34	23	NADAPTA	1	1.38	0.00	18.81	0.73	70.19	15.86
								Convencional	1	1.69	0.00	21.09	0.55	32.20	1.41
1	14	Tudela	ExO	Fluventic Haploxerepts	51	23	27	NADAPTA	1	1.25	0.00	30.84	2.03	62.84	0.89
								Convencional	1	1.63	0.00	33.87	0.92	37.26	0.88
1	15	Bardenas	GPP	Aridic Calciustolls	38	39	23	NADAPTA	1	1.68	0.07	31.31	8.40	38.46	4.73
								Convencional	2	1.54	0.07	38.11	2.84	39.45	4.65
1	16	Bardenas	GPP	Aridic Calciustolls	38	39	23	NADAPTA	1	1.68	0.00	45.85	3.81	38.96	4.95
								Convencional	2	1.54	0.07	25.41	2.82	35.66	6.33
1	17	San Adrian	AC (CV)	Typic Calcixerepts	79	16	6	NADAPTA	2	1.57	0.03	115.69	3.52	32.82	3.07
								Convencional	2	1.57	0.03	85.32	3.81	35.63	1.56
1	18	Caparroso	ExO	Typic Calcixerepts	34	44	22	NADAPTA	1	1.62	0.06	46.29	1.11	37.25	4.72
								Convencional	1	1.79	0.05	33.80	0.13	23.95	4.72
3	1	Olite	ExO	Typic Calcixerepts	43	38	19	NADAPTA	1	1.65	0.03	71.77	6.94	30.67	1.45
								Convencional	1	1.50	0.03	39.28	1.83	49.93	3.34
3	2	Olite	ExO	Typic Calcixerepts	47	30	22	NADAPTA	2	1.41	0.09	41.86	3.69	45.03	3.97
								Convencional	3	1.50	0.04	39.77	1.43	47.02	2.82
3	3	Olite	ROT	Typic Calcixerepts	41	36	24	NADAPTA	1	1.51	0.01	25.95	0.71	42.85	3.11
								Convencional	2	1.36	0.14	34.77	1.20	46.60	6.83

Estrategias NADAPTA: Aplicación de fuentes exógenas de materia orgánica (ExO), rotación de cultivos (ROT), agricultura de conservación que incluye no laboreo (AC NL) y el uso de cubiertas vegetales en cultivos permanentes (AC CV) y gestión de pastos y praderas (GPP). ND: no disponible.

3	4	Olite	ExO	Typic Calcixerepts	41	36	24	NADAPTA	1	1.48	0.00	+	47.91	3.16	+	59.50	0.96	−
								Convencional	2	1.57	0.05		34.77	1.20		46.60	6.83	
3	5	Artajona	ROT	Typic Calcixerepts	21	53	25	NADAPTA	1	1.45	0.16	−	24.64	1.19	−	47.17	11.35	+
								Convencional	3	1.65	0.02		41.87	2.96		27.04	3.00	
3	6	Artajona	AC (NL)	Typic Calcixerepts	31	41	27	NADAPTA	1	1.47	0.01	−	25.26	2.49	−	46.55	0.90	−
								Convencional	3	1.47	0.04		33.72	2.63		46.62	2.54	
3	7	Garinoain	ROT	Typic Calcixerepts	30	49	21	NADAPTA	1	1.70	0.08	−	30.00	1.05	−	38.24	5.84	−
								Convencional	2	1.43	0.05		29.42	1.84		54.52	2.84	
3	8	Oloriz	ExO	Typic Calcixerepts	28	42	30	NADAPTA	1	1.20	0.03	+	44.63	0.92	+	48.73	1.65	+
								Convencional	1	1.49	0.05		21.54	0.38		30.60	2.44	
3	9	Legarda	AC (CV)	Fluventic Haploxerepts	20	58	22	NADAPTA	1	1.69	0.01	−	48.28	5.06	+	35.67	4.54	−
								Convencional	2	1.61	0.05		29.69	1.80		40.47	3.25	
3	10	Beire	AC (NL)	Petrocalcic Calcixerept	62	14	24	NADAPTA	1	1.48	0.00	−	29.70	0.43	−	65.18	1.50	−
								Convencional	1	1.48	0.00		30.15	0.04		66.97	1.74	
3	11	Muruzabal	ROT	Lithic Haplustolls	42	32	26	NADAPTA	1	1.69	0.00	−	32.08	1.58	−	44.67	4.45	−
								Convencional	1	1.66	0.00		33.88	1.31		46.60	2.56	
4	1	Mendaza	ExO	Lithic Calcixerept	43	35	23	NADAPTA	3	1.71	0.02	+	78.54	9.38	−	21.37	2.51	−
								Convencional	2	1.87	0.01		63.13	8.21		17.37	1.31	
5	1	Aibar	ExO	Fluventic Haploxerepts	7	57	36	NADAPTA	1	1.65	0.01	−	61.55	2.35	+	29.25	1.79	−
								Convencional	4	1.60	0.03		39.81	2.20		35.04	1.53	
5	2	Borda Eguillor	GPP	Lithic Udorthent	17	40	44	NADAPTA	2	1.69	0.04	−	45.12	1.96	+	53.84	5.61	−
								Convencional	3	1.70	0.07		31.59	2.83		46.93	3.44	
7	1	Pamplona	AC (NL)	Typic Haploxerepts	41	28	32	NADAPTA	1	1.58	0.00	−	39.41	0.66	−	37.70	1.05	−
								Convencional	1	1.58	0.00		44.89	1.30		37.26	0.49	
7	1	Pamplona	AC (NL)	Typic Haploxerepts	41	28	32	NADAPTA	1	1.58	0.00	−	39.41	0.66	−	37.70	1.05	−
								Convencional	1	1.58	0.00		44.89	1.30		37.26	0.49	

Estrategias NADAPTA: Aplicación de fuentes exógenas de materia orgánica (ExO), rotación de cultivos (ROT), agricultura de conservación que incluye no laboreo (AC NL) y el uso de cubiertas vegetales en cultivos permanentes (AC CV) y gestión de pastos y praderas (GPP). ND: no disponible.

7	2	Olza	ExO	Fluventic Haploxerepts	28	49	23	NADAPTA	2	1.65	0.03		42.58	1.98		36.08	2.74	
								Convencional	2	1.45	0.04		39.73	3.49		46.11	2.04	
7	3	Olza	AC (NL)	Fluventic Haploxerepts	28	49	23	NADAPTA	2	1.45	0.04		39.73	3.49		46.11	2.04	
								Convencional	2	1.57	0.02		42.84	1.48		43.53	2.55	
7	4	Cizur	ROT	Paralithic Xerorthents	25	48	28	NADAPTA	1	1.58	0.04		36.75	3.90		41.11	2.69	
								Convencional	2	1.65	0.03		42.11	0.58		31.41	3.67	
7	5	Noain	ROT	Typic Haploxerepts	10	54	35	NADAPTA	1	1.53	0.03		42.38	0.94		31.67	7.04	
								Convencional	2	1.47	0.01		34.91	1.09		41.26	1.00	
7	6	Aranguren	ExO	Typic Xerofluvent	10	57	33	NADAPTA	1	1.31	0.02		83.42	10.58		56.85	2.54	
								Convencional	2	1.44	0.06		64.42	9.74		43.57	6.06	
9	1	Etxarri-Aranatz	ROT	Mollic Udifluvents	83	13	4	NADAPTA	1	1.31	0.01		83.89	4.50		68.74	1.10	
								Convencional	1	1.30	0.04		134.66	5.48		69.26	5.68	
10	1	Garralda	GPP	Lithic Udorthent	22	26	52	NADAPTA	1	1.22	0.04		113.16	14.39		46.14	3.91	
								Convencional	1	1.32	0.01		86.43	3.49		49.56	9.70	
10	2	Erro	GPP	Lithic Udorthent	22	32	46	NADAPTA	2	1.11	0.04		134.91	7.11		59.11	3.49	
								Convencional	1	0.97	0.10		97.20	8.28		51.45	3.61	
10	3	Roncesvalles	GPP	Typic Dystrudept	33	25	42	NADAPTA	2	1.23	0.03		90.31	3.15		62.86	1.58	
								Convencional	1	1.15	0.02		86.44	6.35		64.70	0.71	
10	4	Beortegui	ExO	Typic Xerochrept	78	16	6	NADAPTA	1	1.37	0.06		63.21	4.95		59.59	3.15	
								Convencional	5	1.55	0.02		58.58	3.07		27.58	2.40	
10	5	Lanz	GPP	Lithic Haplohumult	12	60	28	NADAPTA	1	1.01	0.09		83.66	5.69		59.59	2.06	
								Convencional	2	1.15	0.05		100.29	4.50		74.33	0.68	
11	11	Remendia	GPP	Lithic Udorthent	40	21	39	NADAPTA	2	1.36	0.01		75.69	11.51		63.58	1.80	
								Convencional	3	1.43	0.03		55.95	0.89		71.85	2.25	
12	12	Baztan	GPP	Typic Dystrudept	35	38	26	NADAPTA	1	1.27	0.08		202.09	12.98		44.46	6.26	
								Convencional	2	1.21	0.05		142.77	6.99		51.18	2.07	

Estrategias NADAPTA: Aplicación de fuentes exógenas de materia orgánica (ExO), rotación de cultivos (ROT), agricultura de conservación que incluye no laboreo (AC NL) y el uso de cubiertas vegetales en cultivos permanentes (AC CV) y gestión de pastos y praderas (GPP). ND: no disponible.

4. SELECCIÓN DE PARCELAS PARA SEGUIMIENTO

4.1 Criterios empleados en la fase de selección de parcelas

Una vez fueron analizados los resultados de la primera fase, y viendo la relación entre los indicadores y sus efectos, se llegó a la conclusión de que el stock de C orgánico tenía un papel principal. No sólo por las propiedades que puede darle al suelo por sí mismo (se trata de un parámetro relacionado con muchas funciones del suelo como la biodiversidad, el control de la erosión, etc.), si no por la relación que ya se conocía y que se ha visto reflejada en alguna de las estrategias evaluadas en este trabajo (aplicación de enmiendas orgánicas), con la densidad y la capacidad de retención de agua. Por esta razón se decidió que los criterios para la selección de las parcelas se llevasen a cabo en dos fases:

En la primera, se decidió dar un poco más de importancia a la acumulación de C en el suelo y se seleccionaron las parcelas en las que se hubiera registrado una respuesta positiva en el stock de C y efectos neutros o positivos en los otros dos indicadores (Da y CRAD). Con este primer filtrado, se seleccionaron 7 parcelas de las 43 que había al inicio. Posteriormente, con la intención de proporcionar un mayor abanico de localizaciones sobre las que poder elegir, se incluyeron también las que presentaban efectos neutros en la acumulación de carbono (manteniendo los mismos requisitos para la densidad y la CRAD que en el caso anterior), de manera que, finalmente, se consideraron 16 parcelas para la siguiente etapa.

Cabe recordar que al tratarse de un proyecto que trabaja en torno a la resiliencia frente al cambio climático, cualquier resultado que no signifique un empeoramiento de la situación de partida, ya puede considerarse satisfactorio. En el caso de la elección de parcelas con agricultura de conservación, teniendo en cuenta la tendencia a la compactación asociado a esta práctica, se consideró también incluir parcelas donde se hubiera observado un efecto negativo sobre la densidad aparente.

En la segunda fase de la selección, partiendo del grupo de parcelas propuestas en el bloque anterior, INTIA, mediante la evaluación de la facilidad de seguimiento de las parcelas, en base a la predisposición de los agricultores y las perspectivas de manejo posteriores por parte de estos, seleccionó las parcelas sobre las que realizer el segimiento hasta el final del proyeco.

Como resultado de este proceso de selección, se consiguió pasar de las 43 parcelas iniciales, a las 11 que se mencionan a continuación. Este grupo de parcelas está formado por 5 con manejo adaptativo y 6 con manejo convencional (empleadas como referencia). De este modo, 5 de estas parcelas se encuentran en los municipios de San Adrian y Garinoain (zonas 1 y 3) para la evaluación de la agricultura de conservación, 4 en los municipios de Olite y Pitillas (zonas 1 y 3) para la evaluación del aporte de enmiendas orgánicas y 2 parcelas en el municipio de Zizur (zona 7) para la evaluación de la rotación de cultivos. Como nota aclaratoria, el municipio de San Adrían cuenta con dos parcelas convencionales y una adaptativa. El resto tiene una adaptativa y una convencional. Su ubicación aparece en la figura 62.

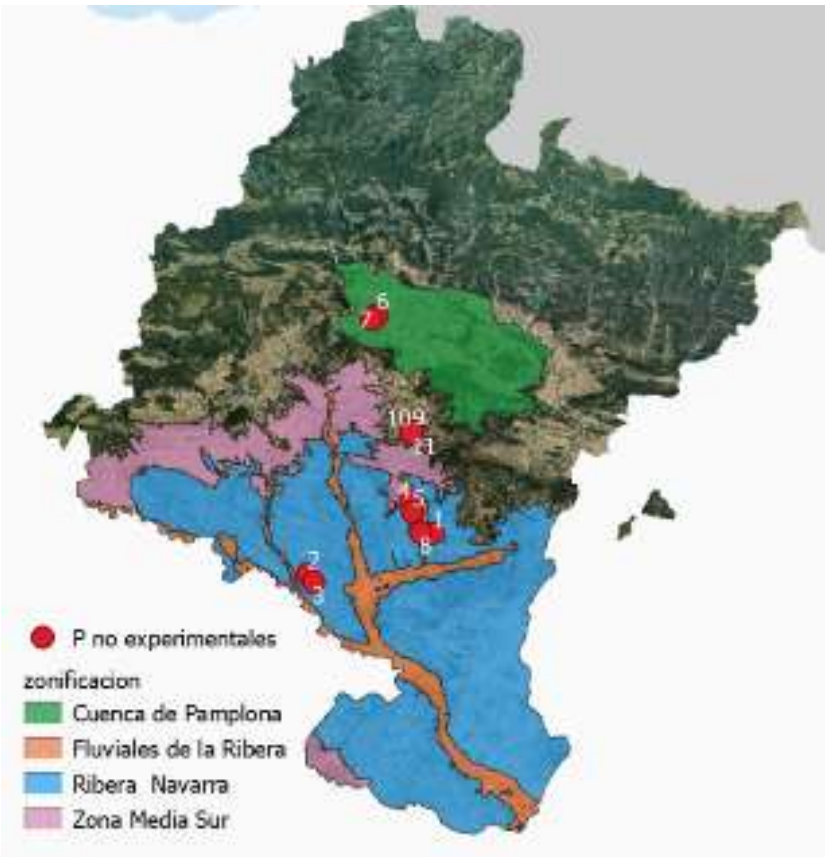


Figura 62 Ubicación de las 11 parcelas seleccionadas para el seguimiento de los indicadores NADAPTA.

Los resultados de la evaluación de estas parcelas aparecen en el apartado 5. RESULTADOS INDICADORES AÑO 2023.

4.2 Resumen de la respuesta inicial de las parcelas seleccionadas

En las siguientes tablas (Tablas 4-1, 4-2 y 4-3) se muestra la comparativa entre las parcelas bajo manejo adaptativo seleccionadas y sus homólogas bajo manejo convencional, tanto a escala municipal como a escala zonal. Puede observarse como al ampliar la escala de observación (escala zonal), los resultados sufren variaciones considerables, sobre todo en las parcelas correspondientes al manejo de Agricultura de Conservación (Tabla 6). Por el otro lado, las parcelas estudiadas para el Aporte de Enmiendas Orgánicas y la Rotación de Cultivos mantienen, en líneas generales, la misma respuesta que la escala municipal. A pesar de ello, llama la atención el desplazamiento de la ratio respuesta en algunas de ellas (como por ejemplo la relativa al stock de carbono orgánico en la parcela de Olite (Tabla 7). Por tanto, el seguimiento futuro de estas parcelas es de gran importancia de cara a confirmar posibles tendencias.

Al igual que como se comentaba en el apartado 4 "*Resultado de la red de parcelas*", se recuerda que, en los resultados correspondientes a la densidad aparente (Dap), el aumento de esta se considera negativo. De ahí las diferencias en cuanto a la clasificación en las tablas en comparación con los otros dos indicadores.

Tabla 4.1. Tabla comparativa entre la respuesta de las parcelas bajo Agricultura de Conservación con las convencionales a escala municipal y a escala zonal. Stock C: Stock de carbono orgánico; Dap: Densidad aparente; CRAD: Capacidad de Retención de Agua Disponible; Color verde: mejora respecto al manejo convencional; Color amarillo: neutralidad respecto al manejo convencional; Color naranja: empeoramiento respecto al manejo convencional; El porcentaje de cada casilla refleja el valor de la ratio respuesta frente al manejo convencional.

	AGRICULTURA DE CONSERVACIÓN			
	Garinoain / municipio	Garinoain / zona 3	San Adrian / municipio	San Adrian / zona 1
Stock C		-12%	25%	82%
Dap	17%	13%		4%
CRAD	-35%			-35%

Tabla 4.2. Tabla comparativa entre la respuesta de las parcelas bajo Aporte de Enmiendas Orgánicas con las convencionales a escala municipal y a escala zonal. Stock C: Stock de carbono orgánico; Dap: Densidad aparente; CRAD: Capacidad de Retención de Agua Disponible; Color verde: mejora respecto al manejo convencional; Color amarillo: neutralidad respecto al manejo convencional; Color naranja: empeoramiento respecto al manejo convencional; El porcentaje de cada casilla refleja el valor de la ratio respuesta frente al manejo convencional.

	ExO			
	Pitillas / municipio	Pitillas / zona 1	Olite / municipio	Olite / zona 3
Stock C			18%	30%
Dap			7%	7%
CRAD			-25%	

Tabla 4.3. Tabla comparativa entre la respuesta de las parcelas bajo Aporte de Enmiendas Orgánicas con las convencionales a escala municipal y a escala zonal. Stock C: Stock de carbono orgánico; Dap: Densidad aparente; CRAD: Capacidad de Retención de Agua Disponible; Color verde: mejora respecto al manejo convencional; Color amarillo: neutralidad respecto al manejo convencional; Color naranja: empeoramiento respecto al manejo convencional; El porcentaje de cada casilla refleja el valor de la ratio respuesta frente al manejo convencional.

	ROTACIÓN DE CULTIVOS	
	Cizur / municipio	Cizur / zona 7
Stock C		
Dap		
CRAD	27%	

5. RESULTADOS INDICADORES AÑO 2023 (FASE 3)

En el siguiente apartado se comentan los resultados en forma de ratio respuesta obtenidos durante la campaña de muestreo de 2023 en las parcelas no experimentales seleccionadas para su seguimiento como casos de éxito en la fase anterior del proyecto.

5.1 5.1 Ratios Respuesta (RR)

5.1.1 Zizur – Rotación de cultivos

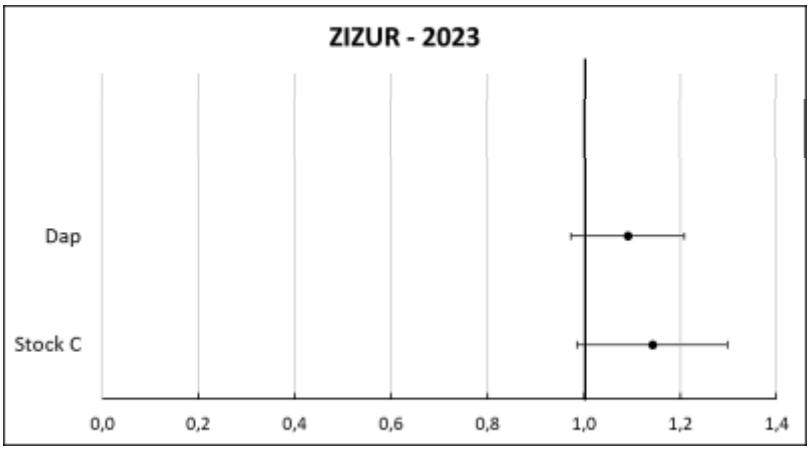


Figura 63. Gráfico de la ratio respuesta de la parcela de Rotación de Cultivos en Zizur sobre la parcela del mismo municipio bajo manejo convencional.

Debido a problemas con el equipo de laboratorio, los resultados de CRAD en Zizur en 2023 no están disponibles por el momento.

En el caso de las RR correspondientes a la parcela con rotación de cultivos de Zizur (figura 63), puede verse como los dos indicadores han respondido de manera neutra al manejo, de manera que no se han apreciado diferencias significativas entre la parcela convencional y la sometida a rotación. Cabe destacar el caso del stock de C, donde el resultado se aproxima mucho al efecto positivo de la práctica.

5.1.2 Garinoain – Agricultura de conservación

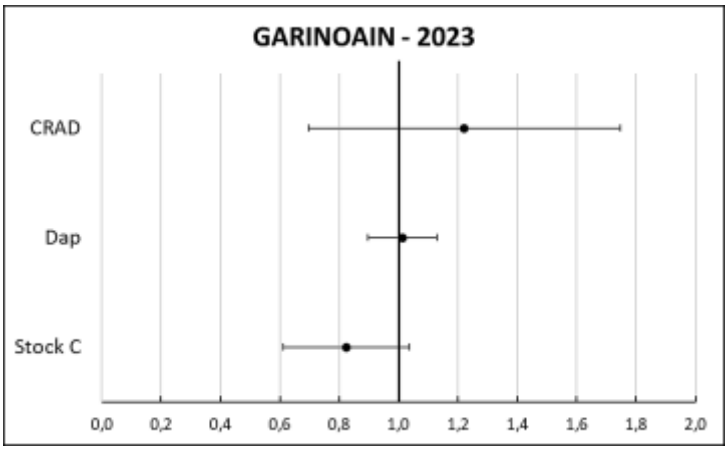


Figura 64. Gráfico de la ratio respuesta de la parcela de Agricultura de Conservación en Garinoain sobre la parcela del mismo municipio bajo manejo convencional.

En las parcelas correspondientes al municipio de Garinoain (figura 64), donde se evalúa el efecto de la agricultura de conservación, ninguno de los tres indicadores muestra cambios remarcables. Aunque la respuesta en el stock se ha mantenido neutra, una gran parte de los resultados de la parcela adaptativa han sido peores que los obtenidos en la parcela convencional. A pesar de ello, a efectos estadisticos, no se observan diferencias significativas. Por último, cabe destacar la elevada variabilidad en la CRAD.

5.1.3 Olite – Aporte de enmiendas orgánicas

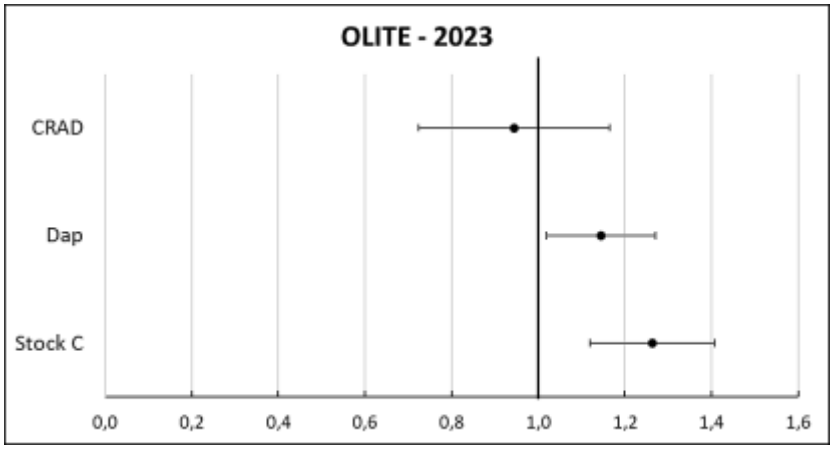


Figura 65. Gráfico de la ratio respuesta de la parcela de Aporte de Enmiendas Orgánicas en Olite sobre la parcela del mismo municipio bajo manejo convencional.

La parcela situada en Olite con aporte de enmiendas orgánicas presenta diferencias significativas en dos de los tres indicadores estudiados. De este modo, la parcela adaptativa

ha visto aumentada la densidad y el stock de carbono de manera significativa en comparación con la parcela convencional (figura 65). Esto se traduce en un efecto positivo el stock, pero no así en la densidad, donde el suelo se ha compactado. Por su parte, la CRAD no ha sufrido ningún cambio significativo.

5.1.4 Pitillas – Aporte de enmiendas orgánicas

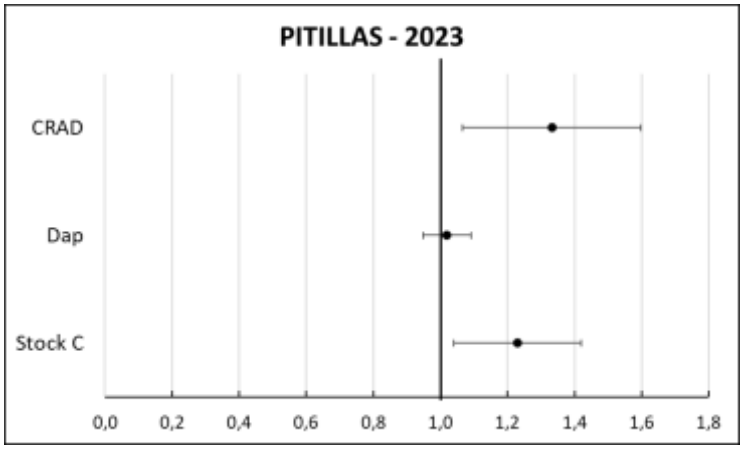


Figura 66. Gráfico de la ratio respuesta de la parcela de Aporte de Enmiendas Orgánicas en Pitillas sobre la parcela del mismo municipio bajo manejo convencional.

La parcela correspondiente al municipio de Pitillas, con aporte de enmiendas orgánicas, presenta una mejora, tanto en el stock de carbono como en la capacidad de retención de agua, respecto a la parcela convencional. Por su parte, la densidad mantiene una respuesta neutra al manejo (figura 66).

5.1.5 San Adrian – Agricultura de Conservación

Las parcelas de San Adrián tienen una particularidad debido a un laboreo realizado en el año 2021, posterior al primer muestreo (el cual se tomó como situación de referencia). En la primera parcela, en el momento del muestreo, esta tenía todas las calles con cubierta, pero en 2021 se llevó a cabo un laboreo de todas ellas y se dejó de manera alterna una calle desnuda y otra nuevamente con cubierta.

En el caso de la segunda parcela, inicialmente existía una alternancia entre calles desnudas y con cubierta y, tras el laboreo total de 2021, se volvió al mismo esquema.

De este modo, las comparaciones que pueden realizarse son dos: por un lado, en la primera parcela se podrían contrastar diferentes manejos de cubierta (el efecto de labrar y quitar la cubierta en toda la parcela y dejar posteriormente cubierta únicamente en una de las calles y abonar la otra).

Por su parte, en la segunda el contraste sería el uso o no de cubiertas y el efecto de labrarlas y volver a dejarlas. En este caso se contaría con un manejo "convencional" como tal, aunque sea con aporte de abono orgánico.

Así pues, los resultados que se presentan, están divididos en la primera y segunda parcela, de modo que cada una cuenta con un manejo "convencional" y un manejo de "cubierta" (figura 67).

Par los factores descritos, los resultados convencionales de 2020 de la Parcela 1, son los mismos que los de la Parcela 2.

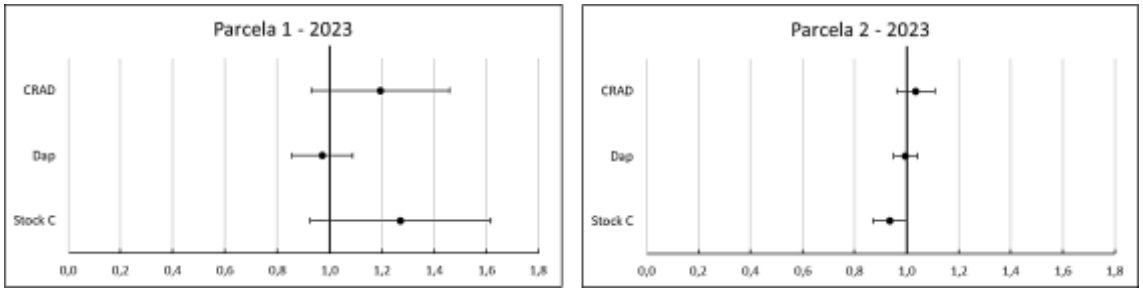


Figura 67. Gráficos de las ratios respuesta de las calles con cubierta en las parcelas de San Adrian sobre las calles de las mismas parcelas bajo manejo convencional.

Como puede observarse en las gráficas, en el año 2023, en ninguna de las dos parcelas se han observado diferencias entre las calles con cubierta vegetal y las desnudas, siendo la respuesta en todas, neutra. La única diferencia que puede verse es la mayor variabilidad de resultados registrada en la primera parcela, aunque finalmente el resultado es el mismo.

A modo de resumen, en la tabla 5-1 pueden observarse los resultados de los intervalos de confianza de las RR de los indicadores de todas las parcelas estudiadas.

Tabla 5-1. Tabla resumen de los intervalos de confianza de cada una de las ratios respuesta para cada uno de los indicadores de las parcelas estudiadas. "+": límite derecho; "-": límite izquierdo; Color verde: ratio respuesta positivo; Color amarillo: ratio respuesta neutron; Color marrón: ratio respuesta negativo. El porcentaje de cada casilla refleja la diferencia respecto al punto neutro (respuesta del manejo convencional).

2023			
Municipio	**Indicador**	**+**	**-**
Zizur (Rot)	Stock C	30%	-1%
	Dap	21%	-3%
	CRAD		
Garinoain (AC)	Stock C	4%	-39%
	Dap	13%	-10%
	CRAD	75%	-30%
Olite (ExO)	Stock C	41%	12%
	Dap	27%	2%
	CRAD	16%	-28%
Pitillas (ExO)	Stock C	42%	4%
	Dap	9%	-5%
	CRAD	60%	7%
San Adrian (AC) Parcela 1	Stock C	62%	-7%
	Dap	9%	-14%
	CRAD	46%	-7%
San Adrian (AC) Parcela 2	Stock C	0%	-13%
	Dap	4%	-5%
	CRAD	11%	-4%

En el caso de Zizur, debido a problemas con el equipo de la boratorio, no ha podido calcularse la CRAD del 2023. Los porcentajes indican la diferencia respecto al punto de efecto nulo (el resultado obtenido por la parcela bajo manejo convencional). Con un vistazo a la escala de colores, puede notarse el efecto mayoritarimente neutro de las prácticas adaptativas. Las únicas parcelas en las que se ha registrado alguna mejoría, son en las sometidas a aportes de enmiendas orgánicas (Olite y Pitillas), tal y como se observó en el proceso de selección de parcelas. La única respuesta negativa en estas dos parcelas ha sido la compactación del suelo en Olite. Para poder contextualizar estos resultados, en la siguiente Tabla 5-2, se presenta la evolución que han tenido las RR respecto a los resultados del año 2020.

Tabla 5-2. Tabla resumen de la evolución de los intervalos de confianza de cada una de las ratios respuesta para cada uno de los indicadores de las parcelas estudiadas en los años 2020 y 2023. "+": límite derecho; "-": límite izquierdo; Color verde: ratio respuesta positivo; Color amarillo: ratio respuesta neutron; Color marrón: ratio respuesta negativo. El porcentaje de cada casilla refleja la diferencia respecto al punto neutro (respuesta del manejo convencional). La "Evolución 2020 – 2023" sigue la misma clave de colores que las ratio respuesta.

		2020		2023		Evolución
Municipio	Indicador	+	-	+	-	2020 - 2023
Zizur (Rot)	Stock C	11%	-31%	30%	-1%	Igual
	Dap	2%	-12%	21%	-3%	Igual
	CRAD	23%	-19%			
Garinoain (AC)	Stock C	12%	-13%	4%	-39%	Igual
	Dap	31%	7%	13%	-10%	Mejor
	CRAD	1%	-56%	75%	-30%	Igual
Olite (ExO)	Stock C	41%	19%	41%	12%	Igual
	Dap	14%	-7%	27%	2%	Peor
	CRAD	21%	-34%	16%	-28%	Igual
Pitillas (ExO)	Stock C	-2%	-14%	42%	4%	Mejor
	Dap	9%	-5%	9%	-5%	Igual
	CRAD	25%	-4%	60%	7%	Igual
San Adrian (AC) Parcela 1	Stock C	47%	24%	62%	-7%	Peor
	Dap	10%	3%	9%	-14%	Mejor
	CRAD	8%	-10%	46%	-7%	Peor
San Adrian (AC) Parcela 2	Stock C	49%	34%	0%	-13%	Peor
	Dap	3%	-3%	4%	-5%	Igual
	CRAD	10%	-11%	11%	-4%	Igual

Respecto a los indicadores de Zizur, han mantenido la neutralidad, aunque en este último estudio, los intervalos de confianza inferiores del stock y la densidad se han aproximado al punto de efecto nulo, quedando muy cerca de una respuesta positiva.

Por su parte, las parcelas con una evolución positiva en el ratio de alguno de sus indicadores son la dedicada agricultura de conservación de Garinoain y la dedicada al aporte de enmienas orgánicas en Pitillas. En la primera, se observa una disminución de la densidad respecto a los resultados anteriores, pasando de una respuesta negativa a una neutra. Respecto a la segunda parfcela mencionada, el stock ha pasado de presentar un resultado negativo, a uno positivo, de manera que en el periodo de tiempo entre los muestreos, la parcela adaptativa ha pasado de acumular menos carbono orgánico que la convencional, a acumular más.

Los peores resultados obtenidos se corresponden a las dos parcelas de San Adrian, donde la mitad del total de indicadores ha empeorado su situación. Estos son los casos del stock de carbono de la primera y segunda parcela y la capacidad de retención de agua de la primera. En todos estos casos, la respuesta ha pasado de ser positiva a ser neutra. A pesar de ello, estos resultados siguen siendo respuestas satisfactorias, ya que el efecto es neutro.

A pesar de la evolución observada en este intervalo de tiempo, es imprescindible la continuación del control de estas parcelas para poder corroborar la tendencia y evolución de las respuestas.

5.2 Consideraciones sobre la interpretación de los resultados

En relación a la presentación de ratios respuesta y resultados generales relativos al carbono en los suelos, existen ciertos errores en la interpretación o cierta relatividad en las conclusiones que suelen realizarse en los trabajos de este tipo. El trabajo realizado por Sanderman et al. (2010) donde se llevó a cabo la revisión de varios de estos estudios, remarca la importancia de obtener datos de series temporales largas a fin de evitar suponer evoluciones o tendencias erróneas en el stock de carbono. De este modo, el estudio compara la mayoría de ensayos agrícolas de campo en los que se indica un aumento en el stock de carbono en base a un manejo del suelo determinado, con estudios a largo plazo que sugieren que esta ganancia relativa se debe a menudo a una reducción o cese de las pérdidas de carbono del suelo más que a un aumento real del stock. En base a esta observación se comenta que, si el nivel de referencia de stock de carbono no se encuentra en un estadio estacionario (si no que este se toma en un momento de evolución significativa del carbono en el suelo), las ratios respuesta sobreestimarán el secuestro neto de carbono. Por este motivo es necesario, además de comparar las parcelas con distinto manejo, observar la evolución de cada una de ellas a lo largo del tiempo.

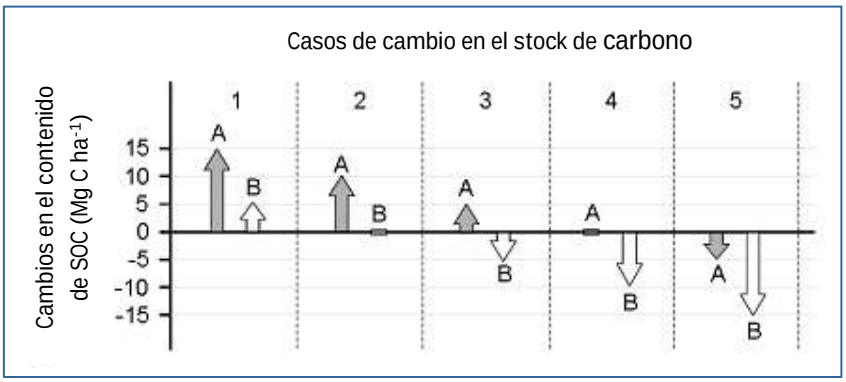


Figura 68. Escenarios de cambio de carbono (1-5) inducidos por dos manejos diferentes (A – flecvhas grises y B – flechas blancas) tras un periodo de tiempo. Las flechas indican la dirección del cambio de carbono y su tamaño refleja la magnitud del cambio. Todos los escenarios tienen la misma diferencia relativa en el almacenaje de carbono entre los dos manejos A y B (10 Mg C ha^{-1}).

Para poder visualizar mejor la importancia de este factor, la figura 68 (Sanderman et al., 2010) presenta cinco escenarios diferentes en los que se compara la capacidad de acumulación de carbono en el suelo por dos manejos diferentes (A y B). De este modo, puede observarse como a pesar de que, en los cinco casos, el manejo A ha obtenido mejores resultados que el manejo B, únicamente en los tres primeros ha habido una mejora en el stock de carbono, mientras que, en los otros dos casos restantes, las dos practicas han sufrido pérdidas.

La figura 69 (Sanderman et al., 2010) permite visualizar el segundo punto mencionado, relativo a la estabilización del nivel de referencia de stock de carbono a lo largo del tiempo.

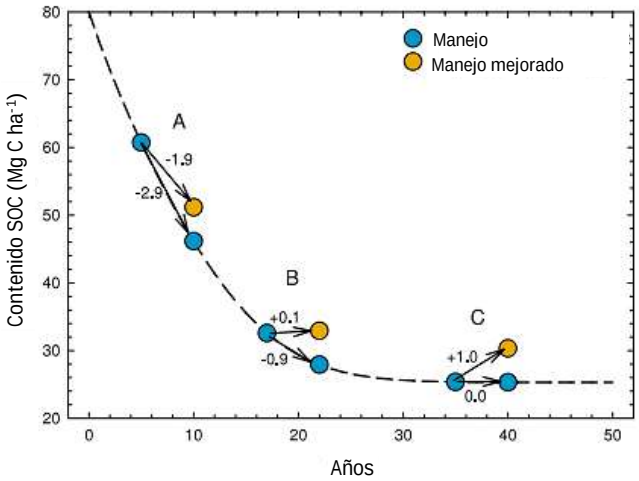


Figura 69. Resultados hipotéticos de un campo de experimentación comparando un manejo del suelo convencional y uno mejorado, iniciados en tres momentos diferentes (A, B y C) después de convertir un ecosistema natral en un ecosistema de producción agricola en el año 0.

Aquí pueden verse los resultados hipotéticos de un estudio de campo comparando dos tipos de manejos, iniciados en tres momentos diferentes (A, B y C), tras haber convertido un ecosistema natural a producción agrícola en el año 0. Tal y como se observa, en los tres puntos el manejo mejorado ha obtenido una ganancia relativa de 5 Mg C/ha tras un periodo de 5 años desde su implantación. Sin embargo, la tasa real de cambio es completamente diferente en cada caso.

De ahí la importancia de obtener series de datos prolongadas en el tiempo que permitan visualizar la evolución del ciclo del carbono en el suelo y detectar los periodos de cambio y estabilización.

5.3 Evolución de indicadores 2020 – 2023 (valores absolutos)

Los resultados que se presentan en este apartado corresponden a los valores absolutos de los indicadores monitorizados obtenidos en la toma de muestras y al cálculo de los promedios de las repeticiones llevadas a cabo. Las barras remarcadas en los gráficos de manera más intensa hacen referencia a diferencias significativas ($p<0,05$) entre los resultados de los manejos adaptativos y los resultados de las parcelas convencionales. Este 5% de permisibidad, hace que, en algunos casos, los resultados de las ratios respuesta y los de valores absolutos puedan mostrar alguna diferencia.

Los porcentajes marcados en negrita sobre las barras de las gráficas, indican la diferencia entre el resultado bajo el manejo adaptativo y el manejo convencional (siendo la referencia este último) en los casos en los que existen diferencias significativas.

Como se mencionaba en el apartado 5.1.5 referente a las ratios respuesta de San Adrian, debido al laboreo realizado en 2021, las parcelas de este municipio tienen un manejo convencional y uno adaptativo enc ada una de las dos parcelas, por lo que los resultados se presentan por separado para cada una de ellas. En la primera parcela, en el momento del muestreo, esta tenía todas las calles con cubierta, pero en 2021 se llevó a cabo un laboreo de todas ellas y se dejó de manera alterna una calle desnuda y otra nuevamente con cubierta.

En el caso de la segunda parcela, inicialmente existía una alternancia entre calles desnudas y con cubierta y, tras el laboreo total de 2021, se volvió al mismo esquema.

De este modo, como se comentaba en el apartado, las comparaciones que pueden realizarse son dos: por un lado, en la primera parcela se podrían contrastar diferentes manejos de cubierta (el efecto de labrar y quitar la cubierta en toda la parcela y dejar posteriormente cubierta únicamente en una de las calles y abonar la otra).

Por su parte, en la segunda el contraste sería el uso o no de cubiertas y el efecto de labrarlas y volver a dejarlas. En este caso se contaría con un manejo "convencional" como tal, aunque sea con aporte de abono orgánico.

Así pues, los resultados que se presentan en el siguiente apartado, están divididos en la primera y segunda parcela, de modo que cada una cuenta con un manejo "convencional" y un manejo de "cubierta".

Por su parte, los valores situados dentro de las barras indican si la parcela ha sufrido un cambio significativo en comparación a los resultados que obtuvo en 2020 y de cuanto ha sido este.

En la figura 70, donde se presentan los resultados de densidad aparente de 2020 y los de este último análisis, se aprecia como únicamente la parcela situada en Olite (aporte de enmiendas orgánicas), ha registrado una diferencia significativa del 16% respecto a la equivalente convencional. Esto se traduce en un resultado negativo (mayor compactación). Ampliando la escala temporal, puede verse como, a pesar de no haberse detectado diferencias significativas ni en Zizur ni Garinoain, las parcelas convencionales de estos municipios han experimentado cambios remarcables desde la última evaluación. De este modo, la parcela convencional situada en Zizur ha visto disminuida su densidad en un 15%, mientras que la de Garinoain la ha visto aumentada un 13% (mayor compactación). Este aumento ha provocado que en 2020 existieran diferenciass significativas entre las parcelas de este municipio pero que ahora se hayan perdido. Esta evolución en los últimos tres años remarca la importancia de continuar con el seguimiento de cara a poder disponer de datos de series temporales largas, tal y como se mencionaba en el apartado anterior (Interpretación de los resultados), para así poder detectar posibles diferencias significativas a futuro entre las parcelas adaptativas y convencionales.

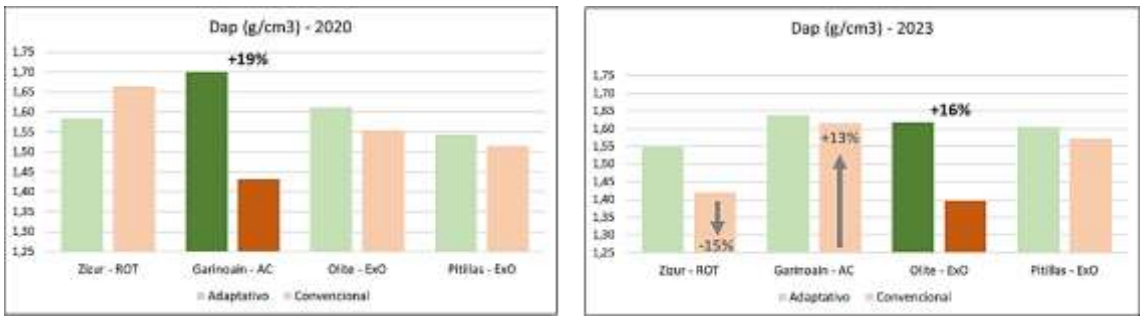


Figura 70. Gráficas de barras con los resultados absolutos de densidad aparente registrados en las diferentes parcelas muestreadas durante los años 2020 y 2023. Los porcentajes en negrita fuera de las barras, indican una diferencia significativa entre la parcela adaptativa y la convencional (tomando como referencia la segunda). Las flechas y porcentajes dentro de las barras, indican un cambio significativo en los resultados de esa parcela respecto a los obtenidos en ella en el año 2020. Barra verde: manejo adaptativo; Barra naranaja: manejo convencional.

En el caso de las parcelas de San Adrian (figura 71), no existen difeerencias significativas en ninguna de las dos parcelas. Sin embargo, comparando su evolución en el tiempo, puede observase como, tanto la calles con cubierta, como las desnudas, han experimentado una disminución en la primera parcela del 13% y 11% respectivamente en comparación con los valores registrados en 2020. Esto puede asociarse al hecho de haber labrado todas las calles en 2021. Por su parte, la segunda parcela solo ha registrado cambios significativos en las calles con cubierta, dónde la densidad ha disminuido un 5% respecto a los valores iniciales. Debido a estos cambios, las diferencias significativas que se registraron en 2020, han desaparecido.

De este modo, puede verse como la implantación de cubiertas vegetales no ha supuesto una compactación respecto a las calles sin cubierta, aunque la interferencia del laboreo de todas las calles en la Parcela 1, sugiere un efecto de descompatación general (tanto en las calles que ahora vuelven a tener cubierta como en las de control sin cubierta).

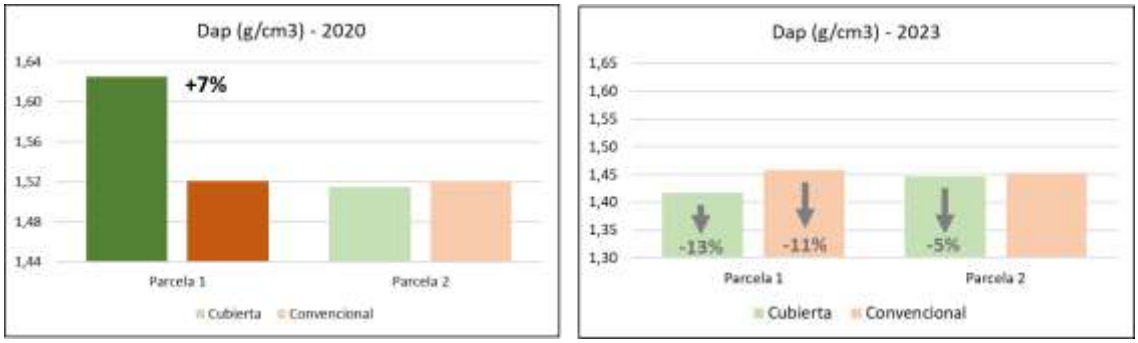


Figura 71. Gráfica de barras con los resultados absolutos de densidad aparente registrados en las parcelas de San Adrian en los años 2020 y 2023. Los porcentajes en negrita fuera de las barras, indican una diferencia significativa entre la parcela adaptativa y la convencional (tomando como referencia la segunda). Las flechas y porcentajes dentro de las barras, indican un cambio significativo en los resultados de esa parcela respecto a los obtenidos en ella en el año 2020. Barra verde: manejo adaptativo; Barra naranaja: manejo convencional.

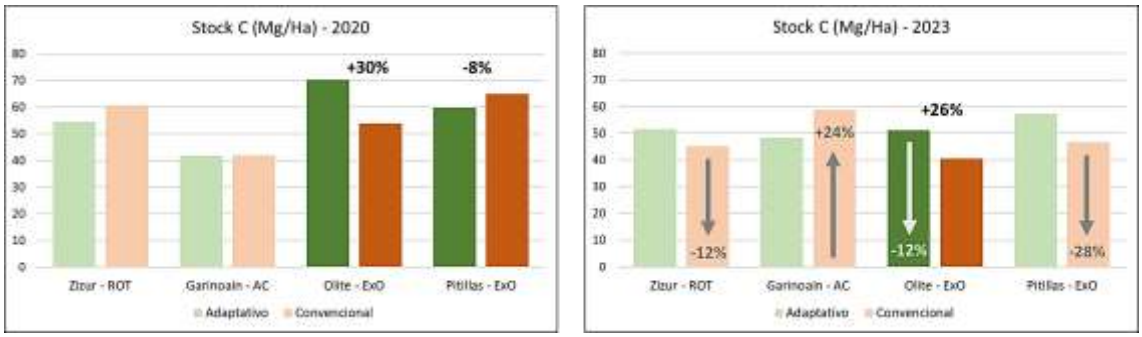
Respecto a los resultados del stock de carbono orgánico (figura 72), estos presentan una diferencia significativa entre las parcelas adaptativa y convencional de Olite, donde la parcela adaptativa ha registrado un 26% más de stock de carbono que la parcela convencional. Esta diferencia significativa se mantiene desde el 2020, donde la diferencia era del 30%. Sin embargo, es importante señalar que la parcela adaptativa ha perdido un 12% de su stock respecto a los valores del primer muestreo. Las otras parcelas que han experimentado un cambio llamativo, son las situada en Pitillas. Desde 2020 hasta ahora, la diferencia que existía en favor de la convencional de un 8%, ha desaparecido debido a la pérdida que ha sufrido de un 28% del stock.

Por otro lado, cabe mencionar los cambios en las parcelas convencionales de Zizur y Garinoain (-12% y +24% respectivamente, si bien ninguna muestra diferencias significativas con su homóloga adaptativa.

En este último gráfico se observan los dos escenarios comentados por separado anteriormente en las otras dos gráficas. Por un lado, los resultados en los que no se han observado diferencias significativas, sí que han tenido una evolución remarcable, como es el caso de Zizur y Garinoain, lo que puede generar diferencias a futuro. Por otro lado, a pesar de haberse registrado un mejor

resultado del manejo adaptativo en Olite, la tendencia que se observa es la de disminuir el stock de carbono.

Figura 72. Gráficas de barras con los resultados absolutos de Stock de Carbono Orgánico registrados



en las diferentes parcelas muestreadas en los años 2020 y 2023. Los porcentajes en negrita fuera de las barras, indican una diferencia significativa entre la parcela adaptativa y la convencional (tomando como referencia la segunda). Las flechas y porcentajes dentro de las barras, indican un cambio significativo en los resultados de esa parcela respecto a los obtenidos en ella en el año 2020. Barra verde: manejo adaptativo; Barra naranaja: manejo convencional.

En el caso de las dos parcelas de San Adrian (figura 73), los cambios del stock en el tiempo son notorios. A diferencia de la situación en 2020, donde en las dos parcelas existían diferencias significativas entre las calles adaptativas y convencionales, en 2023 estas diferencias han desaparecido. Cabe destacar la disminución de las calles con cubierta de la segunda parcela entre el 2020 y el 2023.

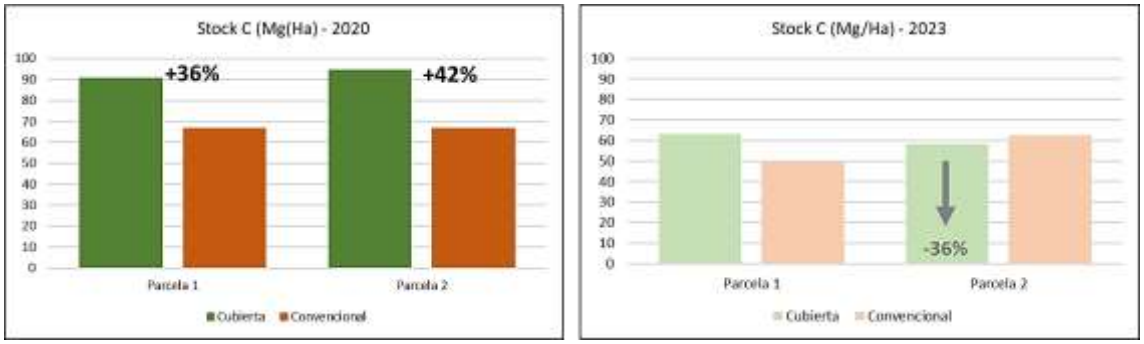


Figura 73. Gráficas de barras con los resultados absolutos de stock de carbono orgánico registrados en las parcelas de San Adrian en los años 2020 y 2023. Los porcentajes en negrita fuera de las barras, indican una diferencia significativa entre la parcela adaptativa y la convencional (tomando como referencia la segunda). Las flechas y porcentajes dentro de las barras, indican un cambio significativo en los resultados de esa parcela respecto a los obtenidos en ella en el año 2020. Barra verde: manejo adaptativo; Barra naranaja: manejo convencional.

Por último, en las gráficas correspondientes a los resultados de la CRAD (figura 74), puede verse como en el año 2023 no se han detectado diferencias significativas en ninguna de las parcelas muestredas entre el manejo adaptativo y el convencional. Sin embargo, comparando esto con los resultados de 2020, puede observarse como la parcela convencional de Garinoain ha sufrido una disminución de la CRAD del 20% respecto a si misma desde el 2020. Esto ha provocado que la diferencia que se registró en 2020 en favor de la convencional, se haya visto neutralizada en el último muestreo.

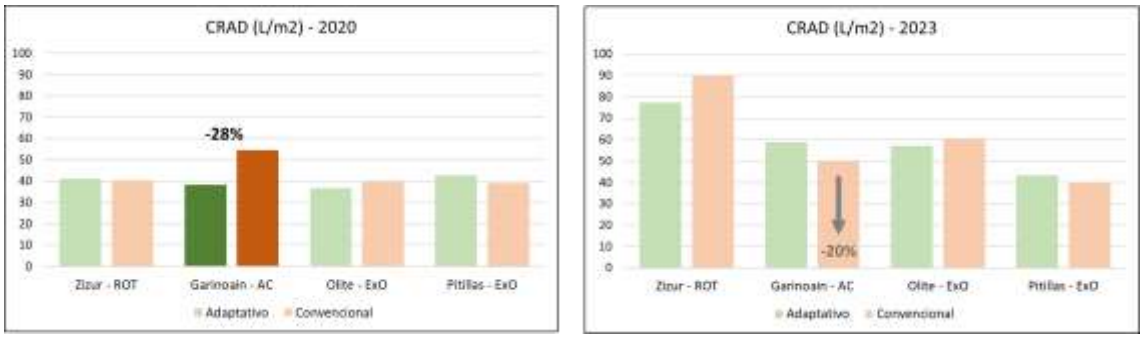


Figura 74. Gráfica de barras con los resultados absolutos de CRAD registrados en las diferentes parcelas muestreadas durante los años 2020 y 2023. Los porcentajes en negrita fuera de las barras, indican una diferencia significativa entre la parcela adaptativa y la convencional (tomando como referencia la segunda). Las flechas y porcentajes dentro de las barras, indican un cambio significativo en los resultados de esa parcela respecto a los obtenidos en ella en el año 2020. Barra verde: manejo adaptativo; Barra naranaja: manejo convencional.

Por su lado, la capacidad de retención de agua es el indicador que mayor cambio ha sufrido entre 2020 y 2023 en San Adrian (figura 75), habiéndose registrado una mejora en tres de los cuatro bloques de calles estudiados. En el caso de la primera parcela, las calles con cubierta han visto aumentada su capacidad en un 21%, mientras que las desnudas no ha tenido cambios remarcables. Por su parte, la segunda parcela ha visto aumentada la capacidad de retención en los dos tipos de calles, aunque este aumento ha sido mayor en las calles con cubierta (un 36% frente al 31% de las desnudas). Estos resultados van en línea con los estudios que relacionan la implantación de cubierta en calles con una mejor capacidad de retención de agua ligada al desarrollo de los sistemas radiculares y el mayor aporte de fracción orgánica al suelo.

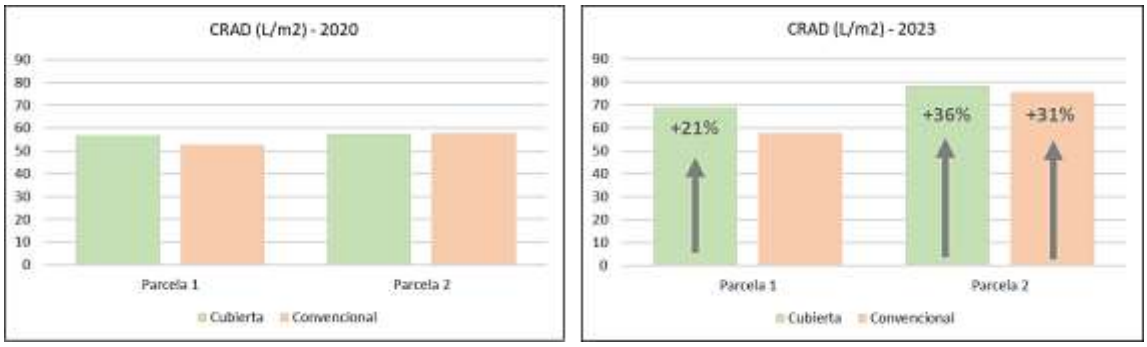


Figura 75. Gráfica de barras con los resultados absolutos de CRAD registrados en las parcelas de San Adrian en los años 2020 y 2023. Las flechas y porcentajes dentro de las barras, indican un cambio significativo en los resultados de esa parcela respecto a los obtenidos en ella en el año 2020. Barra verde: manejo adaptativo; Barra naranaja: manejo convencional.

6. BIBLIOGRAFÍA

La bibliografía empleada en el este documento es la siguiente:

4per1000 Scientific and Technical Comitee (SCT). 2017. Reference Criteria and Indicators for Project Assessment. Document Consortium 3-3. 3rd Meeting of the Consortium. Bonn, Germany.

Aalde H, Gonzalez P, Gytarsky M, et al (2006) IPCC Chapter 2 Generic Methodologies Applicable To Multiple Land-Use Categories. In: 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. pp 1–59

Abdalla, M., A. Hastings, D. R. Chadwick, D. L. Jones, C. D. Evans, M. B. Jones, R. M. Rees, and P. Smith. 2018. "Critical Review of the Impacts of Grazing Intensity on Soil Organic Carbon Storage and Other Soil Quality Indicators in Extensively Managed Grasslands." Agriculture, Ecosystems and Environment 253 (May 2017): 62–81. https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.10.023.

Aguilera, Eduardo, Luis Lassaletta, Andreas Gattinger, and Benjamín S. Gimeno. 2013. "Managing Soil Carbon for Climate Change Mitigation and Adaptation in Mediterranean Cropping Systems: A Meta-Analysis." Agriculture, Ecosystems and Environment 168: 25–36. https://doi.org/10.1016/j.agee.2013.02.003.

Álvaro-Fuentes, Jorge, Mark Easter, and Keith Paustian. 2012. "Climate Change Effects on Organic Carbon Storage in Agricultural Soils of Northeastern Spain." Agriculture, Ecosystems and Environment 155: 87–94. https://doi.org/10.1016/j.agee.2012.04.001.

Allen DE, Singh BP, Dalal RC (2011) Soil Health Indicators Under Climate Change: A Review of Current Knowledge. In: Singh BP et al. (ed) Soil Health and Climate Change. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, pp 260–261

Altieri MA, Nicholls CI, Henao A, Lana MA (2015) Agroecology and the design of climate change-resilient farming systems. Agron Sustain Dev 35:869–890. https://doi.org/10.1007/s13593-015-0285-2

Ammann C, Spirig C, Leifeld J, Neftel A (2009) Assessment of the nitrogen and carbon budget of two managed temperate grassland fields. Agric Ecosyst Environ 133:150–162. https://doi.org/10.1016/j.agee.2009.05.006

Anderson SH, Gantzer CJ, Brown JR (1990) Soil physical properties after 100 years of continuous cultivation. J Soil Water Conserv 45:117–121

Angers, D. A., and N. S. Eriksen-Hamel. 2008. "Full-Inversion Tillage and Organic Carbon Distribution in Soil Profiles: A Meta-Analysis." Soil Science Society of America Journal 72 (5): 1370–74. https://doi.org/10.2136/sssaj2007.0342.

Antón R, Virto I, Gonzalez J, et al (2019) Extension of irrigation in semi-arid regions: What challenges for soil security? Perspectives from a regional-scale project in Navarre (Spain). In: Anne Richer de Forges, Florence Carré, Alex B. McBratney, Johan Bouma DA (ed) Global Soil Security. Towards more science-society interfaces. pp 79–87

Apesteguia M, Plante AF, Virto I (2018) Methods assessment for organic and inorganic carbon quantification in calcareous soils of the Mediterranean region. Geoderma Reg 12:. https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2017.12.001

Baveye PC, Berthelin J, Tessier D, Lemaire G (2018) The "4 per 1000" initiative: A credibility issue for the soil science community? Geoderma 309:118–123. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.05.005

Bescansa P, Imaz MJ, Virto I, et al (2006) Soil water retention as affected by tillage and residue management in semiarid Spain. Soil Tillage Res 87:19–27. https://doi.org/10.1016/j.still.2005.02.028

Bhattacharya, S S, K.-H. Kim, S Das, M Uchimiya, B H Jeon, E Kwon, and J E Szulejko. 2016. "A Review on the Role of Organic Inputs in Maintaining the Soil Carbon Pool of the Terrestrial Ecosystem." Journal of Environmental Management 167: 214–27. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2015.09.042.

Blanco-Canqui H, Hergert GW, Nielsen RA (2015) Cattle Manure Application Reduces Soil Compactibility and Increases Water Retention after 71 Years. Soil Sci Soc Am J 79:212–223. https://doi.org/10.2136/sssaj2014.06.0252

Blanco-Canqui, Humberto, and Sabrina J. Ruis. 2018. "No-Tillage and Soil Physical Environment." Geoderma 326 (December 2017): 164–200. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.03.011.

Bosch-Serra D, Yagüe MR, Poch RM, et al (2017) Aggregate strength in calcareous soil fertilized with pig slurries. Eur J Soil Sci 68:449–461. https://doi.org/10.1111/ejss.12438

Brogniez, D. de, C. Ballabio, A. Stevens, R. J.A. Jones, L. Montanarella, and B. van Wesemael. 2015. "A Map of the Topsoil Organic Carbon Content of Europe Generated by a Generalized Additive Model." European Journal of Soil Science 66 (1): 121–34. https://doi.org/10.1111/ejss.12193.

Byrnes RC, Eastburn DJ, Tate KW, Roche LM (2018) A Global Meta-Analysis of Grazing Impacts on Soil Health Indicators. J Environ Qual 47:758–765. https://doi.org/10.2134/jeq2017.08.0313

Casby-Horton, S, J Herrero, and N A Rolong. 2015. "Gypsum Soils-Their Morphology, Classification, Function, and Landscapes." Advances in Agronomy 130: 231–90. https://doi.org/10.1016/bs.agron.2014.10.002.

Castiella J, Solé J, Niñerola S, Otamendi A (1982) Las aguas subterráneas en Navarra. Proyecto Hidrogeológico. Diputación Foral de Navarra, Dirección de Obras Públicas, Servicio Geológico., Pamplona, Spain.

Cayuela, Maria L., Eduardo Aguilera, Alberto Sanz-Cobena, Dean C. Adams, Diego Abalos, Louise Barton, Rebecca Ryals, et al. 2017. "Direct Nitrous Oxide Emissions in Mediterranean Climate Cropping Systems: Emission Factors Based on a Meta-Analysis of Available Measurement Data." Agriculture, Ecosystems and Environment 238: 25–35. https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.10.006

Chan KY, Heenan OP (1996) The influence of crop rotation on soil structure and soil physical properties under conventional tillage. Soil Tillage Res 37:113–125. https://doi.org/10.1016/0167-1987(96)01008-2

Chenu C, Angers DA, Barré P, et al (2019) Increasing organic stocks in agricultural soils: Knowledge gaps and potential innovations. Soil Tillage Res 188:41–52. https://doi.org/10.1016/j.still.2018.04.011

Churchman GJ (2018) Game Changer in Soil Science. Functional role of clay minerals in soil. J Plant Nutr Soil Sci 181:99–103. https://doi.org/10.1002/jpln.201700605

Conant RT, Ryan MG, Ågren GI, et al (2011) Temperature and soil organic matter decomposition rates - synthesis of current knowledge and a way forward. Glob Chang Biol 17:3392–3404. https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2011.02496.x

Cosgrove S, Curtis B (2018) Supplementary Material. Underst Glob Poverty 285–290. https://doi.org/10.9774/gleaf.9781315316840_14

Costantini EAC, Antichi D, Almagro M, et al (2020) Local adaptation strategies to increase or maintain soil organic carbon content under arable farming in Europe: Inspirational ideas for setting operational groups within the European innovation partnership. J Rural Stud 79:102–115. https://doi.org/10.1016/j.jrurstud.2020.08.005

Demenois, Julien, Emmanuel Torquebiau, Matthieu H. Arnoult, Thomas Eglin, Dominique Masse, Mohamed Habibou Assouma, Vincent Blanfort, et al. 2020. "Barriers and Strategies to Boost Soil Carbon Sequestration in Agriculture." Frontiers in Sustainable Food Systems 4 (April). https://doi.org/10.3389/fsufs.2020.00037.

Dignac MF, Derrien D, Barré P, et al (2017) Increasing soil carbon storage: mechanisms, effects of agricultural practices and proxies. A review. Agron Sustain Dev 37:. https://doi.org/10.1007/s13593-017-0421-2

Dimassi, Bassem, Bruno Mary, Richard Wylleman, Jér Ôme Labreuche, Daniel Couture, François Piraux, and Jean Pierre Cohan. 2014. "Long-Term Effect of Contrasted Tillage and Crop Management on Soil Carbon Dynamics during 41 Years." Agriculture, Ecosystems and Environment 188: 134–46. https://doi.org/10.1016/j.agee.2014.02.014.

Dirksen C (1999) Soil physics measurements. Catena Verlag, Reiskirchen, Germany

Domingo-Olivé, Francesc, Àngela D. Bosch-Serra, María R. Yagüe, Rosa M. Poch, and Jaume Boixadera. 2016. "Long Term Application of Dairy Cattle Manure and Pig Slurry to Winter Cereals Improves Soil Quality." Nutrient Cycling in Agroecosystems 104 (1): 39–51. https://doi.org/10.1007/s10705-015-9757-7.

Dong W, Yu L, Gao-Lin W, et al (2015) Effect of rest-grazing management on soil water and carbon storage in an arid grassland (China). J Hydrol 527:754–760. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.05.036

EEA (European Environmental Agency), 2012. Climate change, impacts and vulnerability in Europe 2012. An indicator-based report. EEA Report No 12/2012. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Union, 2012. ISBN 978-92-9213-346-7.

EEA. European Environment Agency, 2015. Soil and climate change. Signals 2015 (Living in a chanign climate). Copenhague. Disponible en https://www.eea.europa.eu/signals/signals-2015/articles

EIP-AGRI Focus Group. 2019. "Moving from Source to Sink in Arable Farming," no. June: 28.

Elliott, E.T., 1986. Aggregate structure and carbon, notrogen, and phosphorus in native and cultivated soils. Soil Sci. Soc. Am. J., 50: 627-633.

Evans CRW, Krzic M, Broersma K, Thompson DJ (2012) Long-term grazing effects on grassland soil properties in southern British Columbia. Can J Soil Sci 92:685–693. https://doi.org/10.4141/CJSS2011-070

FAO. 2013. Cllimate-Smart Agriculture. Sourcebook. Rome, Italy. http://www.fao.org/3/i3325e/i3325e.pdf.

Fernández-Getino et al., 2018. Challenges and prospects in connectivity analysis in agricultural systems: Actions to implement policies on land management and carbon storage at EU level. Land Use Policy 71: 146–159.

Fernández-Ugalde O, Virto I, Bescansa P, et al (2009) No-tillage improvement of soil physical quality in calcareous, degradation-prone, semiarid soils. Soil Tillage Res 106:29–35. https://doi.org/10.1016/j.still.2009.09.012

Floristán A (1995) Geografía de Navarra. Tomos I a V. Diario de Navarra, Pamplona, Spain.

Francaviglia, Rosa, Claudia Di Bene, Roberta Farina, Luca Salvati, and José Luis Vicente-Vicente. 2019. "Assessing '4 per 1000' Soil Organic Carbon Storage Rates under Mediterranean Climate: A Comprehensive Data Analysis." Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change 24 (5): 795–818. https://doi.org/10.1007/s11027-018-9832-x.

Franzluebbers AJ, Hons FM, Zuberer DA (1995) Tillage-induced seasonal changes in soil physical properties affecting soil CO2 evolution under intensive cropping. Soil Tillage Res 34:41–60. https://doi.org/10.1016/0167-1987(94)00450-S

Girona-García A, Badía-Villas D, Martí-Dalmau C, et al (2018) Effects of prescribed fire for pasture management on soil organic matter and biological properties: A 1-year study case in the Central Pyrenees. Sci Total Environ 618:1079–1087. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.09.127

Gobierno de Navarra. 2017. "Hoja de Ruta Cambio Climático de Navarra (HCCN) 2017-2030-2050," 110.

Gómez-Miguel, V. 1985. Estudio de los procesos edafogenéticos de redistribución de carbonatos alcalinotérreos en clima árido y semiárido. Tesis doctoral. ETSIA, UPM, 356 pp. Madrid.

Hao Y, He Z (2019) Effects of grazing patterns on grassland biomass and soil environments in China: A meta-analysis. PLoS One 14:1–15. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0215223

Harden et al., 2018. Networking our science to characterize the state, vulnerabilities, and management opportunities of soil organic matter. Global Change Biology 2018; 24: 705-718.

Hill, R.L., Horton, R. and Cruse, R.M., 1985. Tillage effects on soil water retention and pore size distribution of two Mollisols. Soil Sci. Soc. Am. I., 49: 1264-1270.

Horion S, Ivits E, De Keersmaecker W, et al (2019) Mapping European ecosystem change types in response to land-use change, extreme climate events, and land degradation. L Degrad Dev 30:951–963. https://doi.org/10.1002/ldr.3282

Iglesias et al., 2012. A regional comparison of the effects of climate change on agricultural crops in Europe. Climatic Change 112:29–46.

Imaz MJ, Virto I, Bescansa P, et al (2010) Soil quality indicator response to tillage and residue management on semi-arid Mediterranean cropland. Soil Tillage Res 107:17–25. https://doi.org/10.1016/j.still.2010.02.003

Indoria AK, Srinivasa Rao C, Sharma KL, Sammi Reddy K (2017) Conservation agriculture - a panacea to improve soil physical health. Curr Sci 112:52–61. https://doi.org/10.18520/cs/v112/i01/52-61

IPCC 2006, 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme, Eggleston H.S., Buendia L., Miwa K., Ngara T. and Tanabe K. (eds). Published: IGES, Japan.

IPCC, 2014: Summary for policymakers. In: Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Field, C.B. et al. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 1-32.

Israelsen, OW; Hansen, VE. 1962. Principios y prácticas de riego. 3ª edición, Wiley International Edition, Nueva York, USA.

Jebari, Asma, Agustin del Prado, Guillermo Pardo, José Antonio Rodríguez Martín, and Jorge Álvaro-Fuentes. 2018. "Modeling Regional Effects of Climate Change on Soil Organic Carbon in Spain." Journal of Environmental Quality 47 (4): 644–53. https://doi.org/10.2134/jeq2017.07.0294.

Jia G, Shevliakova E, Artaxo P, et al (2019) Climate change and land. Chapter 2: Land-Climate Interactions. IPCC Spec Rep Glob Warm 15 oC 1–186

Jia, Gensuo, and Elena Shevliakova. 2020. "Land-Climate Interactions." In Report, Climate Change and Land: An IPCC Special on Climate Change, Desertification, Land Degradation, Sustainable Land Management, Food Security, and Greenhouse Gas Fluxes in Terrestrial Ecosystems., edited by H.-O. Pörtner P.R. Shukla, J. Skea, E. Calvo Buendia, V. Masson-Delmotte, J. Petzold D.C. Roberts, P. Zhai, R. Slade, S. Connors, R. van Diemen, M. Ferrat, E. Haughey, S. Luz, S. Neogi, M. Pathak, and J. Malley J. Portugal Pereira, P. Vyas, E. Huntley, K. Kissick, M, Belkacemi. IPCC. https://doi.org/10.2307/2403158.

Johannes, Alice, Adrien Matter, Rainer Schulin, Peter Weisskopf, Philippe C. Baveye, and Pascal Boivin. 2017. "Optimal Organic Carbon Values for Soil Structure Quality of Arable Soils. Does Clay Content Matter?" Geoderma 302 (April): 111. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.05.009.

Karlen DL, Peterson GA, Westfall DG (2014) Soil and Water Conservation: Our History and Future Challenges. Soil Sci Soc Am J 78:1493–1499. https://doi.org/10.2136/sssaj2014.03.0110

Kazula MJ, Lauer JG, Arriaga FJ (2017) Crop rotation effect on selected physical and chemical properties of Wisconsin soils. J Soil Water Conserv 72:553–563. https://doi.org/10.2489/jswc.72.6.553

Keyvanshokouhi et al., 2016. Evaluating SoilGen2 as a tool for projecting soil evolution induced by global change. Science of the Total Environment 571: 110–123.

Kremen, C, and A Miles. 2012. "Ecosystem Services in Biologically Diversified versus Conventional Farming Systems: Benefits, Externalities, and Trade-Offs." Ecology and Society 17 (4). https://doi.org/10.5751/ES-05035-170440.

Kuzyakov, Yakov, and Kazem Zamanian. 2019. "Reviews and Syntheses: Agropedogenesis-Humankind as the Sixth Soil-Forming Factor and Attractors of Agricultural Soil Degradation." Biogeosciences 16 (24): 4783–4803. https://doi.org/10.5194/bg-16-4783-2019.

Lal R (2016) Potential and challenges of conservation agriculture in sequestration of atmospheric CO2 for enhancing climate-resilience and improving productivity of soil of small landholder farms. CAB Rev Perspect Agric Vet Sci Nutr Nat Resour 11:. https://doi.org/10.1079/PAVSNNR201611009

Lead, Coordinating, Authors Humberto, and Barbosa Brazil. 2018. "Chapter 4: Land Degradation Table of Contents," 1–112.

Land M, Haddaway NR, Hedlund K, et al (2017) How do selected crop rotations affect soil organic carbon in boreo-temperate systems? A systematic review protocol. Environ Evid 6:. https://doi.org/10.1186/s13750-017-0086-y

Lasanta T, Sánchez-Navarrete P, Medrano-Moreno LM, et al (2020) Soil quality and soil organic carbon storage in abandoned agricultural lands: Effects of revegetation processes in a Mediterranean mid-mountain area. L Degrad Dev 1–16. https://doi.org/10.1002/ldr.3655

Le Bissonnais Y, Blavet D, De Noni G, et al (2007) Erodibility of Mediterranean vineyard soils: Relevant aggregate stability methods and significant soil variables. Eur J Soil Sci 58:188–195. https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2006.00823.x

Lead C, Humberto A, Brazil B (2018) Chapter 4 : Land Degradation Table of Contents. 1–112

Lorenz K, Lal R, Ehlers K (2019) Soil organic carbon stock as an indicator for monitoring land and soil degradation in relation to United Nations' Sustainable Development Goals. L Degrad Dev 30:824–838. https://doi.org/10.1002/ldr.3270

MAPAMA. Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente. Oficina Española de Cambio Climático. 2006. Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático. Disponible en http://www.mapama.gob.es/es/cambio-climatico/temas/impactos-vulnerabilidad-y-adaptacion/plan-nacional-adaptacion-cambio-climatico/planificacion_seguimiento.aspx

MAPAMA. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. Oficina Española de Cambio Climático. 2016. IMPACTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LOS PROCESOS DE DESERTIFICACIÓN EN ESPAÑA. Madrid, 36 pp.

MAPAMA. Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente. 2018. Iniciativa 4 por mil: el carbono orgánico del suelo como herramienta de mitigación y adaptación al cambio climático en España. NIPO m-4867-2018. Madrid, Spain. 262 PP. Disponible en http://www.mapama.gob.es/es/cambio-climatico/publicaciones/publicaciones/4por1000_tcm7-477212.pdf.

Mary B, Clivot H, Blaszczyk N, et al (2020) Soil carbon storage and mineralization rates are affected by carbon inputs rather than physical disturbance: Evidence from a 47-year tillage experiment. Agric Ecosyst Environ 299:106972. https://doi.org/10.1016/j.agee.2020.106972

McDaniel, M. D., L. K. Tiemann, and A. S. Grandy. 2014. "Does Agricultural Crop Diversity Enhance Soil Microbial Biomass and Organic Matter Dynamics? A Meta-Analysis." Ecological Applications 24 (3): 560–70. https://doi.org/10.1890/13-0616.1.

Mcsherry ME, Ritchie ME (2013) Effects of grazing on grassland soil carbon: A global review. Glob Chang Biol 19:1347–1357. https://doi.org/10.1111/gcb.12144

Medina Martín, F. 2015: Impactos, vulnerabilidad y adaptación al cambio climático en el sector agrario: Aproximación al conocimiento y prácticas de gestión en España. Oficina Española de Cambio Climático. Ministerio de Agricultura.

Meurer, Katharina H.E., Neal R. Haddaway, Martin A. Bolinder, and Thomas Kätterer. 2018. "Tillage Intensity Affects Total SOC Stocks in Boreo-Temperate Regions Only in the Topsoil—A Systematic Review Using an ESM Approach." Earth-Science Reviews 177 (October 2017): 613–22. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.12.015.

Milchunas D, Lauenroth W (1993) Quantitative Effects of Grazing on Vegetation and Soils Over a Global Range of Environments Author (s): D . G . Milchunas and W . K . Lauenroth Published by : Ecological Society of America QUANTITATIVE EFFECTS OF GRAZING ON VEGETATION AND SOILS OVER A G. Ecol Monogr 63:327–366

Minasny, Budiman, Brendan P. Malone, Alex B. McBratney, Denis A. Angers, Dominique Arrouays, Adam Chambers, Vincent Chaplot, et al. 2017. "Soil Carbon 4 per Mille." Geoderma. Elsevier B.V. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.01.002.

Mtyobile M, Muzangwa L, Mnkeni PNS (2020) Tillage and crop rotation effects on soil carbon and selected soil physical properties in a Haplic Cambisol in Eastern Cape, South Africa. Soil Water Res 15:47–54. https://doi.org/10.17221/176/2018-SWR

Nunes MR, Karlen DL, Moorman TB (2020) Tillage intensity effects on soil structure indicators-A US meta-analysis. Sustain 12:. https://doi.org/10.3390/su12052071

Odoemene A (2019) Climate change and land grabbing. Res Handb Clim Chang Agric Law 423–449. https://doi.org/10.4337/9781784710644

Paustian K, Collier S, Baldock J, et al (2019) Quantifying carbon for agricultural soil management: from the current status toward a global soil information system. Carbon Manag 0:1–21. https://doi.org/10.1080/17583004.2019.1633231

Paustian K, Lehmann J, Ogle S, et al (2016) Climate-smart soils. Nature 532:49–57. https://doi.org/10.1038/nature17174

Peco B, Navarro E, Carmona CP, et al (2017) Effects of grazing abandonment on soil multifunctionality: The role of plant functional traits. Agric Ecosyst Environ 249:215–225. https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.08.013

Pellerin et al. 2013. Quelle contribution de l'agriculture française à la réduction des émissions de gaz à effet de serre?. Potentiel d'atténuation et coût de dix actions techniques. INRA. Délégation à l'Expertise scientifique, à la Prospective et aux Etudes (DEPE). París, Francia. 94 pp.

Peralta J, Idoia, Biurrum I, García-Mijangos I, et al (2013) Manual de Hábitats de Navarra.

Pittelkow, Cameron M., Bruce A. Linquist, Mark E. Lundy, Xinqiang Liang, Kees Jan van Groenigen, Juhwan Lee, Natasja van Gestel, Johan Six, Rodney T. Venterea, and Chris van Kessel. 2015. "When Does No-till Yield More? A Global Meta-Analysis." Field Crops Research 183: 156–68. https://doi.org/10.1016/j.fcr.2015.07.020.

Poeplau C, Don A, Six J, et al (2018) Isolating organic carbon fractions with varying turnover rates in temperate agricultural soils – A comprehensive method comparison. Soil Biol Biochem 125:10–26. https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.06.025

Poeplau C, Don A, Vesterdal L, et al (2011) Temporal dynamics of soil organic carbon after land-use change in the temperate zone - carbon response functions as a model approach. Glob Chang Biol 17:2415–2427. https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2011.02408.x

Poulton et al., 2018. Major limitations to achieving "4 per 1000" increases in soil organic carbon stock in temperate regions: Evidence from long-term experiments at Rothamsted Research, United Kingdom.

Powlson, D. S., A. P. Whitmore, and K. W.T. Goulding. 2011. "Soil Carbon Sequestration to Mitigate Climate Change: A Critical Re-Examination to Identify the True and the False." European Journal of Soil Science 62 (1): 42–55. https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2010.01342.x.

Powlson DS, Bhogal A, Chambers BJ, et al (2012) The potential to increase soil carbon stocks through reduced tillage or organic material additions in England and Wales: A case study. Agric Ecosyst Environ 146:23–33. https://doi.org/10.1016/j.agee.2011.10.004

Powlson DS, Stirling CM, Jat ML, et al (2014) Limited potential of no-till agriculture for climate change mitigation. Nat Clim Chang 4:678–683. https://doi.org/10.1038/nclimate2292

Prokopy, L. S., K. Floress, J. G. Arbuckle, S. P. Church, F. R. Eanes, Y. Gao, B. M. Gramig, P. Ranjan, and A. S. Singh. 2019. "Adoption of Agricultural Conservation Practices in the United States: Evidence from 35 Years of Quantitative Literature." Journal of Soil and Water Conservation 74 (5): 520–34. https://doi.org/10.2489/jswc.74.5.520.

Pulido M, Schnabel S, Lavado Contador JF, et al (2018) The Impact of Heavy Grazing on Soil Quality and Pasture Production in Rangelands of SW Spain. L Degrad Dev 29:219–230. https://doi.org/10.1002/ldr.2501

Rabot E, Wiesmeier M, Schlüter S, Vogel HJ (2018) Soil structure as an indicator of soil functions: A review. Geoderma 314:122–137. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.11.009

Rasmussen, Craig, Katherine Heckman, William R. Wieder, Marco Keiluweit, Corey R. Lawrence, Asmeret Asefaw Berhe, Joseph C. Blankinship, et al. 2018. "Beyond Clay: Towards an Improved Set of Variables for Predicting Soil Organic Matter Content." Biogeochemistry 137 (3): 297–306. https://doi.org/10.1007/s10533-018-0424-3.

Richards, L., & Weaver, L. (1944). Moisture retention by some irrigated soils as related to soil moisture tension. Journal of Agricultural Research, 69(6), 215–234. https://doi.org/citeulike-article-id:5774994

Rodríguez Martín JA, Álvaro-Fuentes J, Gonzalo J, et al (2016) Assessment of the soil organic carbon stock in Spain. Geoderma 264:117–125. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.10.010

Rodríguez Martín, José Antonio y., Jorge Álvaro-Fuentes, Jose Luis Gabriel, Carmen Gutiérrez, Nikos Nanos, Miguel Escuer, José Joaquín Ramos-Miras, Carlos Gil, Diana Martín-Lammerding, and Rafael Boluda. 2019. "Soil Organic Carbon Stock on the Majorca Island: Temporal Change in Agricultural Soil over the Last 10 years." Catena 181 (May). https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.104087.

Rowley, Mike C., Stéphanie Grand, and Éric P. Verrecchia. 2018. "Calcium-Mediated Stabilisation of Soil Organic Carbon." Biogeochemistry 137 (1–2): 27–49. https://doi.org/10.1007/s10533-017-0410-1.

Rumpel C, Amiraslani F, Chenu C, et al (2020) The 4p1000 initiative: Opportunities, limitations and challenges for implementing soil organic carbon sequestration as a sustainable development strategy. Ambio 49:350–360. https://doi.org/10.1007/s13280-019-01165-2

Salomé C, Coll P, Lardo E, et al (2016) The soil quality concept as a framework to assess management practices in vulnerable agroecosystems: A case study in Mediterranean vineyards. Ecol Indic 61:456–465. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2015.09.047

Sanderman J, Baldock JA (2010) Accounting for soil carbon sequestration in national inventories: a soil scientist's perspective. Environ Res Lett 5:034003. https://doi.org/10.1088/1748-9326/5/3/034003

Sanz-Cobena, A., L. Lassaletta, E. Aguilera, A. del Prado, J. Garnier, G. Billen, A. Iglesias, et al. 2017. "Strategies for Greenhouse Gas Emissions Mitigation in Mediterranean Agriculture: A Review." Agriculture, Ecosystems and Environment 238: 5–24. https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.09.038.

Shekhar, Ankit, and Charles A. Shapiro. 2019. "What Do Meteorological Indices Tell Us about a Long-Term Tillage Study?" Soil and Tillage Research 193 (June): 161–70. https://doi.org/10.1016/j.still.2019.06.004.

Smith, P. 2017. Changing views of nitrous oxide emissions from agricultural soil: key controlling processes and assessment at different spatial scales. European Journal of Soil Science 68, 137–155.

Soussana et al., 2017. Letter to the Editor: Answer to the Viewpoint "Sequestering Soil Organic Carbon: A Nitrogen Dilemma". Environ. Sci. Technol. 51, 11502–11502.

Steiner et al. 2018. Vulnerability of Southern Plains agriculture to climate change. Climatic Change 146:201–218.

Stolbovoy V, Montanarella L, Jones A, Gallego J (2007) Soil sampling protocol to certify the changes of organic carbon stock in mineral soil of the European Union. Version 2

Tang S, Guo J, Li S, et al (2019) Synthesis of soil carbon losses in response to conversion of grassland to agriculture land. Soil Tillage Res 185:29–35. https://doi.org/10.1016/j.still.2018.08.011

Teague WR, Dowhower SL, Baker SA, et al (2011) Grazing management impacts on vegetation, soil biota and soil chemical, physical and hydrological properties in tall grass prairie. Agric Ecosyst Environ 141:310–322. https://doi.org/10.1016/j.agee.2011.03.009

Tiessen H, Moir JO (1993) Total and organic C. In: Carter MR (ed) Soil Sampling and Methods of Analysis. CRC Press, Ottawa, ON, Canada, pp 187–199

Torri SI, Corrêa RS, Renella G (2014) Soil carbon sequestration resulting from biosolids application. Appl Environ Soil Sci 2014:. https://doi.org/10.1155/2014/821768

Trumbore SE (1997) Potential responses of soil organic carbon to global environmental change. Proc Natl Acad Sci U S A 94:8284–8291. https://doi.org/10.1073/pnas.94.16.8284

Tubiello et al., 2014. Agriculture, Forestry and Other Land Use Emissions by Sources and Removals by Sinks. FAO Statistics Division. Working Paper Series ESS/14-02. 89 pp.

van Groenigen,J.W, van Kessel, C., Hungate, B.A., Oenema, O., Powlson, D.S., van Groenigen, K.J. 2017. Sequestering Soil Organic Carbon: A Nitrogen Dilemma. Environ. Sci. Technol. 2017, 51, 4738–4739.

Virto, Iñigo, Pierre Barré, Aurélien Burlot, and Claire Chenu. 2012. "Carbon Input Differences as the Main Factor Explaining the Variability in Soil Organic C Storage in No-Tilled Compared to Inversion Tilled Agrosystems." Biogeochemistry 108 (1–3): 17–26. https://doi.org/10.1007/s10533-011-9600-4.

Virto, Inigo, Paloma Bescansa, Maria Jose Imaz, and Alberto Enrique. 2006. "Soil Quality under Food-Processing Wastewater Irrigation in Semi-Arid Land, Northern Spain: Aggregation and Organic Matter Fractions." Journal of Soil and Water Conservation 61 (6): 398–407.

Virto, Iñigo, María Imaz, Oihane Fernández-Ugalde, Nahia Gartzia-Bengoetxea, Alberto Enrique, and Paloma Bescansa. 2015. "Soil Degradation and Soil Quality in Western Europe: Current Situation and Future Perspectives." Sustainability 7 (1): 313–65. https://doi.org/10.3390/su7010313.

West TO, Post WM (2002) Soil Organic Carbon Sequestration Rates by Tillage and Crop Rotation. Soil Sci Soc Am J 66:1930–1946. https://doi.org/10.2136/sssaj2002.1930

White RE, Davidson B, Lam SK, Chen D (2018) A critique of the paper 'Soil carbon 4 per mille" by Minasny et al. (2017).' Geoderma 309:115–117. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.05.025

Wiesmeier M, Urbanski L, Hobley E, et al (2019) Soil organic carbon storage as a key function of soils - A review of drivers and indicators at various scales. Geoderma 333:149–162

Zuber SM, Behnke GD, Nafziger ED, Villamil MB (2015) Crop rotation and tillage effects on soil physical and chemical properties in Illinois. Agron J 107:971–978. https://doi.org/10.2134/agronj14.0465