



**MÁSTER UNIVERSITARIO EN
CIENCIAS AGROAMBIENTALES Y AGROALIMENTARIAS**

TRABAJO FIN DE MÁSTER

**PRÁCTICAS DE AGRICULTURA REGENERATIVA
PARA LA FIJACIÓN DE CARBONO EN SUELOS
EN LA MITIGACION DEL CAMBIO CLIMÁTICO**

DAVID GONZÁLEZ SÁNCHEZ

DRA. CONSUELO ESCOLÁSTICO.
UNIVERSIDAD NACIONAL DE EDUCACIÓN A DISTANCIA

DR. AGUSTÍN DEL PRADO.
BASQUE CENTER FOR CLIMATE CHANGE. BC3

SEPTIEMBRE 2021

INDICE

RESUMEN.....	3
1. INTRODUCCIÓN	5
1.1. El problema del cambio climático.....	5
1.2. Contribución de la agricultura al cambio climático	7
1.3. Ganadería y cambio climático.....	8
2. OBJETIVOS	10
3. FUNDAMENTOS TEÓRICOS	10
3.1. Suelos y secuestro de carbono en la mitigación del cambio climático	10
3.1.1. Los suelos como sumideros de carbono.....	10
3.1.2. La materia orgánica del suelo.....	11
3.1.3. La influencia de la microbiota.....	12
3.1.4. La dinámica del suelo.....	13
3.1.5. Agregados del suelo	14
3.1.6. Bomba microbiana de carbono.....	15
3.1.7. El papel de los rumiantes	17
3.1.8. Praderas y carbono	18
3.1.9. El papel de la ganadería para favorecer el secuestro de carbono	18
3.3. Agricultura Regenerativa	19
3.4. Manejos de Agricultura Regenerativa.....	20
3.4.1. Mínimo laboreo o labranza cero.....	20
3.4.2. Mejora de la eficiencia del uso del agua. Diseño hidrológico Keyline.....	22
3.4.3. Aplicación de compost.....	24
3.4.4. Cultivos de cobertura	25
3.4.5. Retención de restos vegetales.....	25
3.4.6. Diversidad de cultivos.....	26
3.4.7. Intercropping.....	26
3.4.8. Agroforestería	27
3.4.9. Integración de cultivos y ganado.....	27
3.4.10. Pastoreo rotacional dirigido	28
3.5. Potencialidades de la agricultura regenerativa en la mitigación del cambio climático.....	28
Cultivos anuales	32
Pastos.....	32
Agroforestería	32
Combinación	33
3.6. Algunas críticas a la agricultura regenerativa	34
4. CONCLUSIONES	36
5. BIBLIOGRAFIA.....	39
6. ANEXO.....	¡Error! Marcador no definido.

RESUMEN

La amenaza del cambio climático, pone de manifiesto la necesidad de reducir de manera urgente las emisiones de gases de efecto invernadero, para evitar las peores consecuencias de un calentamiento global que podría superar los 3° C a finales de siglo. Por otra parte, es necesario secuestrar el exceso de CO₂ hasta reducirlo a unos niveles que no supongan un riesgo para nuestra sociedad. Dentro de las diferentes soluciones basadas en la naturaleza, los suelos agrícolas presentan un amplio potencial de almacenamiento de este carbono en su interior. En los últimos años, se está abriendo una corriente cada vez mayor de científicos y agricultores bajo el concepto de agricultura regenerativa, que propugna la utilización de prácticas y manejos basados en el aumento de materia orgánica del suelo y de la actividad microbiana, como herramienta de mitigación del cambio climático.

En este trabajo, se realiza una revisión bibliográfica sobre los diferentes aspectos que engloban el concepto de agricultura regenerativa: mecanismos del suelo que permiten el secuestro de carbono, prácticas y manejos que lo incentivan y potencialidades de mitigación.

ABSTRACT

The threat of climate change highlights the need to urgently reduce greenhouse gas emissions, in order to avoid the worst consequences of a global warming that could exceed 3°C by the end of the century. Apart from that, it is necessary to sequester the excess CO₂ to reduce it to levels that do not pose a risk to our society. Among the different solutions based on nature, agricultural soils present a wide potential for storing this carbon inside them. In recent years, a growing current of scientists and farmers is coming out under the concept of regenerative agriculture, which advocates the use of practices and management based on the increase of soil organic matter and microbiological activity, as a tool for climate change mitigation.

In this work, a bibliographic review is carried out on the different aspects that comprehend the concept of regenerative agriculture: soil mechanisms that allow carbon sequestration, practices and management that encourage it, and mitigation potentials.

ABREVIATURAS	SIGNIFICADO
IPCC	Panel Intergubernamental del Cambio Climático
GEI	Gases de efecto invernadero
PPM	Partes por millón
GTC	Giga toneladas de carbono
CO ₂	Dióxido de carbono
CH ₄	Metano
N ₂ O	Oxido nitroso
MOS	Materia orgánica del suelo
COS	Carbono orgánico del suelo
HM	Manejo holístico
PRV	Pastoreo Racional Voisin
AMP	Adaptive multi-paddock

1. INTRODUCCIÓN

1.1. El problema del cambio climático

El cambio climático se está transformando en una de las principales preocupaciones de nuestra sociedad. Sus efectos son cada vez más claramente visibles y están ampliamente documentados (Pidcock & Mcsweeney, 2021). Se espera, además, que sus consecuencias a lo largo de este siglo se vayan incrementando, si no se ponen en marcha medidas oportunas capaces de modificar la actual trayectoria de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI).

El aumento de concentración de concentración de CO₂ en la atmósfera tiene un papel crítico en el cambio climático. En Octubre de 2016, la Organización Meteorológica Mundial publicaba que la superación 2015 de la cifra de 400 ppm de CO₂ en la atmósfera (WMO, 2016). Se trata de una cifra simbólica que, entre otras cosas, implica haber superado el límite de seguridad que los científicos del IPCC, habían delimitado como arriesgado para la vida y el ser humano. Además, la tendencia observada en los últimos años, es la de seguir aumentando una media de 2-3 ppm CO₂/año, lo que se suma al resto de datos que indican que nos encontramos en un proceso de calentamiento continuo que, a lo largo de esta década, nos podría llevar a sobrepasar el límite de 1,5°C de aumento de temperatura con respecto al nivel preindustrial. Se trata del umbral que los científicos del IPCC determinan como punto de no retorno.

En el Special Report 15 del IPCC (IPCC, 2018) se establece una cantidad de 570 GtCO₂ remanente compatible con un calentamiento de 1,5°C. Desde la época preindustrial a la actualidad, las emisiones antropogénicas ascendieron a aproximadamente 2200 ± 320 GtCO₂ (Le Quéré et al., 2018) con un ritmo actual de 42 GtCO₂/año, lo que, de seguir este ritmo de emisiones, deja un margen de poco más de una década para intentar no sobrepasar dicho límite. Alcanzar este objetivo de 1,5°C, supondrá reducir las emisiones netas a cero, alrededor de 2050 (IPCC, 2018).

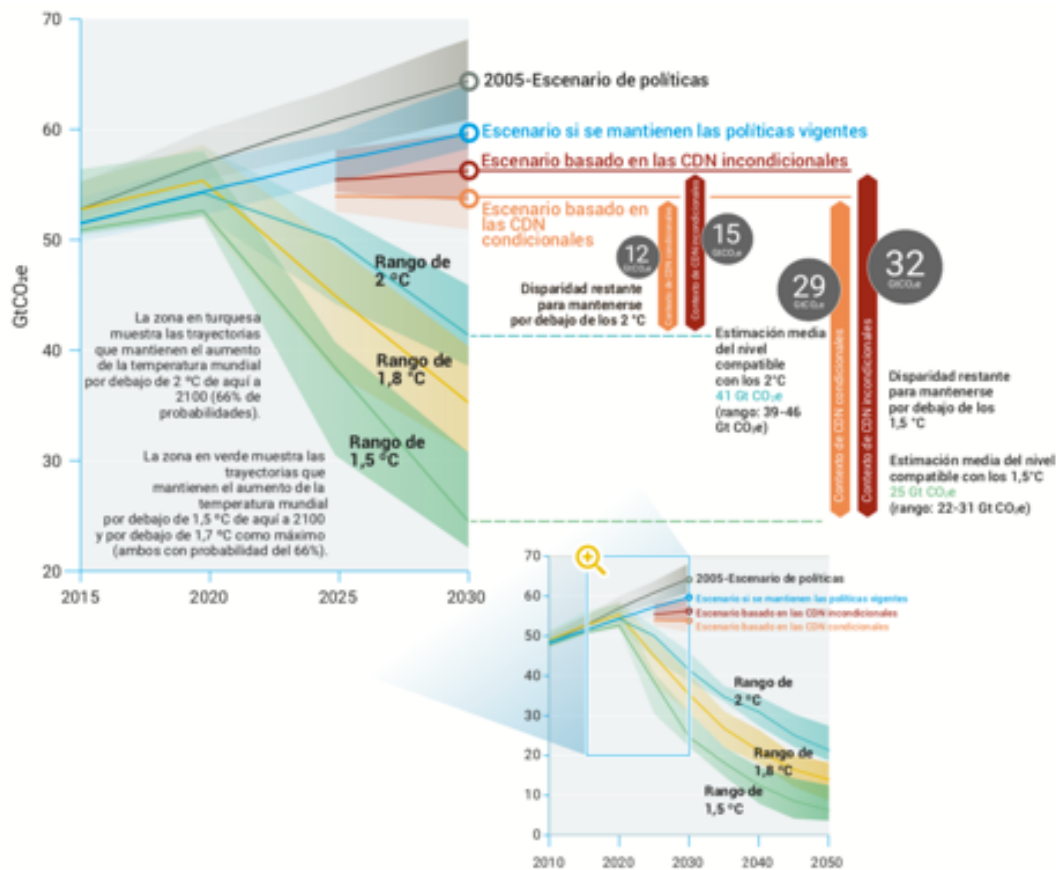


Fig. 1: Emisiones mundiales de GEI en función de diferentes escenarios y disparidad en las emisiones en 2030. Fuente: SR15 IPCC

El informe plantea la posibilidad de limitar el calentamiento a 1,5 °C, pero para ello sería necesario reducir hasta un 45% las emisiones de dióxido de carbono en 2030 respecto de los niveles de 2010 y alcanzar una emisión cero neta en 2050. Si bien, la última actualización Sixth Assessment Report, Climate Change 2021: The Physical Science Basis, the Working Group I, informa que el presupuesto de carbono para limitar la temperatura a 1,5 °C, no debería sobrepasar las 300 gigatoneladas a finales de siglo. Al ritmo actual de 42 GtCO₂/año, dicho presupuesto se agotaría en menos de 8 años (IPCC, 2021). Además, el informe indica que en escenarios con emisiones de CO₂ elevadas los sumideros terrestres y oceánicos serán menos efectivos, ralentizando la acumulación de CO₂ en la atmósfera (Fig. 2).

Se hace obligado, por tanto, desarrollar estrategias para extraer el exceso de CO₂ de la atmósfera para detener el cambio climático. Además, no es suficiente evitar que las emisiones sigan creciendo, si no que es necesario reducir los niveles de CO₂ actuales de 400 ppm a cerca de los valores preindustriales (278 ppm).

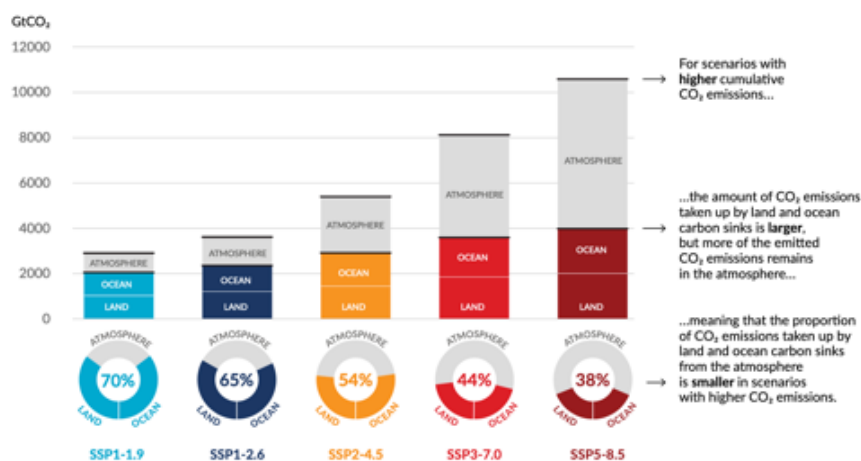


Figura 2: Emisiones acumulativas antropogénicas de CO₂ absorbidas por los sumideros terrestres y oceánicos para el año 2100. Fuente: IPCC, 2021.

Este es el objetivo de una iniciativa de política pública, denominada "4 por 1000", presentada por el Gobierno francés en la 21ª Reunión de la Conferencia de las Partes de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (COP-21), donde se estableció un objetivo global de aumentar las existencias de COS de los suelos, como estrategia para reducir los niveles de CO₂ en la atmósfera. Para ello, se fija una tasa anual del 0,4% (o 4 por 1000) de incremento de COS en todas las tierras agrícolas, incluidos los bosques. Un aumento del 0.4% de COS, secuestraría entre 2.8 y 3.4 GtC por año y permitiría convertir a los suelos agrícolas en sumideros de carbono.

1.2. Contribución de la agricultura al cambio climático

Las actividades relacionadas con la agricultura, silvicultura y otros usos de la tierra, representaron alrededor del 13% de CO₂, el 44% de metano (CH₄) y el 82% de las emisiones de óxido nitroso (N₂O) de actividades humanas a nivel mundial durante 2007-2016 (IPCC SR 15, 2018). Representan el 23% de Emisiones antropogénicas netas totales de GEI o 10-12Gt de CO₂ equivalente por año, incluidos 5-5.8 GtCO₂e / año de producción agrícola y 3-5.5 GtCO₂e / año de las actividades cambio de uso de la tierra y silvicultura (IPCC, 2014).

Un tercio del CO₂ emitido a través de actividades humanas a la atmósfera desde 1850 hasta 1998 provino de actividades agrícolas (Houghton & Nassikas, 2017). Se estima que desde el inicio de la agricultura se han perdido alrededor de 133 GtC por la pérdida de

materia orgánica del suelo y erosión del suelo (Sanderman et al., 2018), es decir, se han perdido del 30 al 75% del carbono orgánico original (Lal et al., 2007).

El desarrollo de la agricultura industrial a lo largo del siglo XX, con prácticas como la fertilización sintética nitrogenada, la extensión del monocultivo y la imposición de una lógica basada sólo en el incremento de la productividad, ha acelerado el agotamiento de reservas de carbono del suelo y ha incrementado la emisión de N₂O y CO₂ a la atmósfera (Khan et al, 2007).

Si además analizamos el sistema agroalimentario desde una perspectiva más global, habría que sumar diferentes etapas de la cadena de suministro tales como la venta al por menor, transporte, consumo, combustibles, gestión de residuos, procesos industriales y embalajes. De esta forma, en 2015 el conjunto de emisiones del sistema alimentaria representó el 34 % de las emisiones de GEI. 18 Gt de CO₂ e/año a nivel mundial y que se muestra en la figura 3 (Crippa et al., 2021).

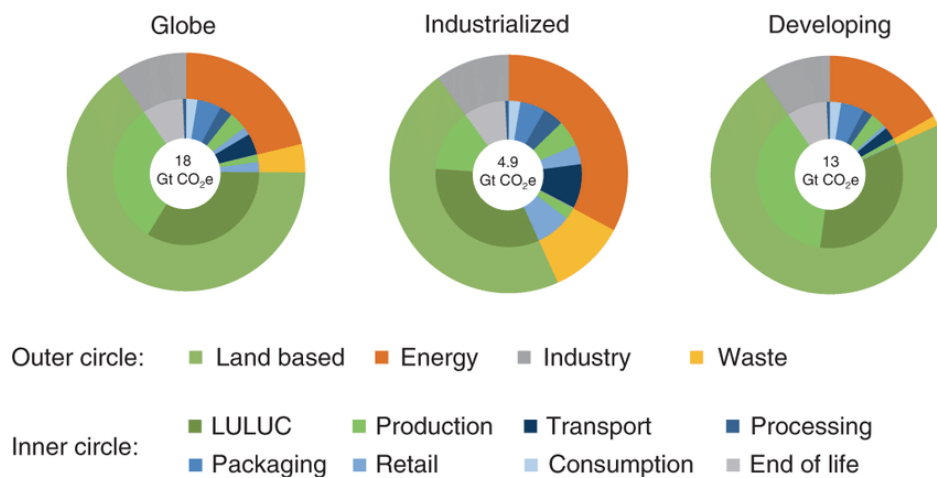


Fig 3. Emisiones GEI del sistema alimentario incluyendo CO₂, CH₄, N₂O y gases fluorados. (Crippa et al., 2021)

1.3. Ganadería y cambio climático

A lo largo del siglo XX hemos podido contemplar como se pasaba de un modelo tradicional ganadero, que, en la mayoría de los casos, estaban relacionados con prácticas que contribuían al mantenimiento de los servicios ecosistémicos en modelos basados en la conservación cultural de la naturaleza, a un modelo en el que se rompe el equilibrio entre el ser humano, el ganado y el medio en el que se desarrollaba la actividad.

El desarrollo de los modelos de producción industriales intensivos, basados en el empleo de técnicas como la selección genética, la explotación intensiva y el empleo de productos químicos para mejorar la producción, han ocasionado un aumento extraordinario de producción de alimentos, pero, por el contrario, han supuesto también una ruptura de los ciclos naturales que, hasta ese momento, la ganadería se había encargado de cerrar. Sobre todo, lo relacionado con el ciclo del carbono y la fertilización de los suelos con la materia orgánica de sus excrementos y el mantenimiento de muchos ecosistemas y modelos agrosilvopastoriles. Aproximadamente 15% de las emisiones GEI provienen del sector ganadero (Gerber et al., 2013) y estas son debidas al uso de energía de combustibles fósiles, la deforestación, la emisión de metano procedente de la gestión del estiércol y de la fermentación entérica, así como emisiones de óxido nitroso por uso de fertilizantes nitrogenados.

El aumento de la demanda de productos ganaderos es un factor importante en el cambio del uso de la tierra para expandir la producción ganadera industrial, lo que está causando una grave pérdida de hábitat de vida silvestre, biodiversidad y reservas de carbono terrestre (Steinfeld et al., 2006). Cuando se lleva a cabo una ganadería más intensiva, existen problemas importantes con la eliminación y la contaminación de los excrementos de ganado (Galloway et al., 2008), el uso de gran cantidad de superficie disponible para la producción de la alimentación de ganado -compitiendo con la humana- y desde una perspectiva de cambio climático, la ganadería intensiva contribuye de manera significativa a las emisiones de GEI (Steinfeld et al., 2006).

Los impactos generados por las prácticas convencionales de agricultura y ganadería, tienen consecuencias en la degradación y los bajos niveles de carbono en los suelos. Sin embargo, la restauración de estas tierras agrícolas por medio de prácticas que incrementen el contenido de Carbono Orgánico del Suelo (COS), supone gran oportunidad en lo que respecta a la mitigación del cambio climático. Por ello, a lo largo de este Trabajo de Fin de Máster se muestran diversos estudios sobre prácticas, que se engloban dentro de lo que se conoce como agricultura regenerativa, que tienen interés por su potencial de incrementar el almacenamiento de carbono en el suelo.

2. OBJETIVOS

El objetivo principal de este Trabajo Fin de Máster es llevar a cabo una revisión bibliográfica para estudiar la capacidad de la agricultura regenerativa como herramienta para el almacenamiento de carbono en suelo y su contribución en la mitigación del cambio climático.

Así mismo, los objetivos específicos son:

- Conocer los factores que influyen el almacenamiento de carbono en el suelo.
- Describir prácticas y manejos de agricultura regenerativa en la gestión del suelo.
- Analizar el potencial de mitigación del cambio climático mediante prácticas de agricultura regenerativa.

3. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

3.1. Suelos y secuestro de carbono en la mitigación del cambio climático

3.1.1. Los suelos como sumideros de carbono

Los suelos se comportan como grandes depósitos de carbono de la tierra (Scharlemann et al., 2014). En el suelo se almacena más carbono que la suma de atmósfera y de toda la vida vegetal del planeta (FAO 2015). A escala global, se estima que los suelos almacenan más del doble del carbono (2,529 Gt) del total combinado de la atmósfera (830 Gt) y la biomasa vegetal (576 Gt) (Le Quéré et al., 2015). Los suelos tienen una gran importancia en el balance global de carbono, por medio de la regulación de los flujos biogeoquímicos y el intercambio de gases de efecto invernadero (GEI) con la atmósfera (Lal, 2013). A través del secuestro de carbono en el suelo, es posible eliminar el CO₂ atmosférico y estabilizarlo en el suelo en microagregados, protegiéndolo de los procesos microbianos del suelo y mejorando su distribución en profundidad.

Tras la quema de combustibles fósiles, el modelo de agricultura industrial actual, tiene el mayor nivel de contribución a la emisión de gases de efecto invernadero (IPCC, 2014). Los manejos convencionales utilizados, la eliminación de la cubierta vegetal o los cambios en los usos del suelo, contribuyen a la degradación de su capa superficial que es donde se acumula la mayor concentración de carbono. Así, las prácticas de laboreo empleadas habitualmente, pueden llegar a provocar una reducción de materia orgánica en

el suelo de un 60% en 60 años (Kinsella, 1995), pudiendo ocasionar la pérdida de unas 2,5 Tm/Ha/año de tierra de cultivo fértil, con el resultado de 970 Mt de pérdida de tierra fértil en la Unión Europea (Panagos et al., 2015).

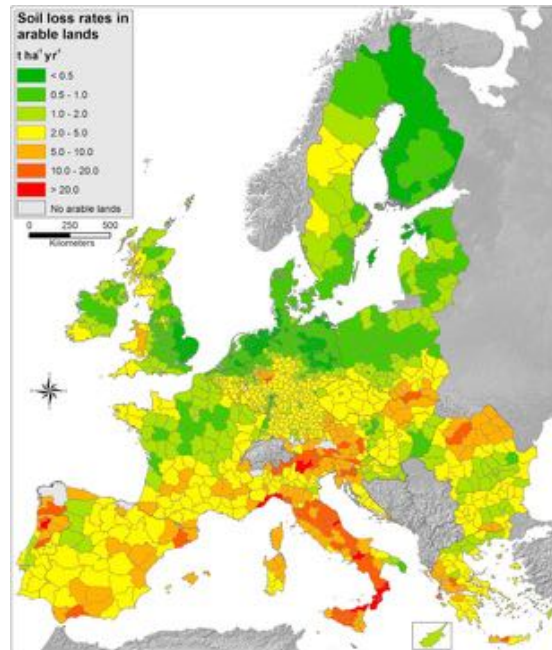


Fig. 4: Tasas medias de pérdida de suelo a nivel provincial (NUTS3) para tierras cultivables en la UE (Panagos et al., 2015)

La restauración de suelos y ecosistemas degradados tiene un alto potencial para el secuestro de carbono, a través de la recuperación del carbono perdido por estas prácticas, que contribuyen a liberar el carbono acumulado en los suelos a la atmósfera en forma de CO₂. Dependiendo del clima, tipo de suelo y manejo, los suelos de los agroecosistemas mundiales (tierras de cultivo, pastizales, etc.) han agotado sus reservas de carbono entre un 25-75% (Lal, 2011), lo que equivale a una pérdida de entre 42 a 78 Gt de carbono. Esto proporciona una gran oportunidad de regeneración de los suelos agrícolas y de los agroecosistemas, pues se estima que hay una capacidad de reserva de carbono recuperable entre 21 y 51 Gt. (Lal, 2004)

3.1.2. La materia orgánica del suelo

La producción agrícola y más concretamente el tipo de modelo productivo, está estrechamente relacionada con la salud de los suelos y uno de los mejores indicadores para conocerla, es el contenido de materia orgánica. La materia orgánica de los suelos (MOS) formada en su mayoría de carbono, mejora la resistencia de los suelos a la erosión,

incrementa la capacidad de retención de agua, mejora y permite albergar una mayor biodiversidad (Doran and Parkin, 1994; Larson and Pierce, 1994; Blum, 2005)

La MOS se compone de aproximadamente el 58% de carbono (Pribyl, 2010), que corresponde al carbono orgánico del suelo (COS) y está muy influenciada por la actividad microbiana y su accesibilidad a restos orgánicos, las condiciones ambientales y las prácticas de manejo. Es una mezcla de sustancias orgánicas en diferentes estados de descomposición formada por restos de vegetales y biomasa de macrofauna y microbiana (Totsche et al., 2010) y materiales de menos de 2 mm de tamaño. Aporta su distintivo color negro y su renovación tiene una gran importancia en el funcionamiento del ecosistema del suelo. La descomposición de MOS libera nutrientes minerales, lo cual los hace disponibles para el crecimiento de las plantas (Van der Wal & De Boer, 2017), contribuyendo a un mejor crecimiento de las plantas y una mayor productividad.

Algunas prácticas como la eliminación de la vegetación perenne, la pérdida de diversidad vegetal a favor de monocultivos, el suelo desnudo, la quema de rastrojos, el sobrepastoreo, la labranza, la falta de oxigenación, el uso de fertilizantes de síntesis y pesticidas, disminuyen los contenidos de MOS (Bot & Benites, 2005). Frente a las técnicas y manejos convencionales de agricultura, ganadería y silvicultura que degradan suelo por la pérdida de MOS, la gestión sostenible de la tierra y los suelos por medio de prácticas sostenibles capaces de incrementar COS, ofrecen un gran potencial de mejora en la adaptación y la mitigación al cambio climático (Smith et al., 2014). Si las prácticas agrícolas son las adecuadas, el suelo puede secuestrar carbono durante largos períodos de tiempo (Post & Kwon, 2000), pudiéndose convertir en herramientas eficaces en la restauración de suelos degradados, la lucha contra la desertización y la mejora de la resiliencia de los agroecosistemas ante los choques ambientales (Banwart et al., 2015) y, por tanto, en la lucha contra el cambio climático.

3.1.3. La influencia de la microbiota

El suelo es el ecosistema más diverso en microbiota del mundo, compuesto principalmente por bacterias, hongos, arqueas, virus y protistas. Estas comunidades fundamentales para la salud de las plantas y su resistencia a fenómenos tales como sequías (Skz et al., 2017), contaminación por metales pesados (Hou et al., 2020) o incluso el parasitismo (Pieterse et al., 2014)

Dentro de esta microbiota, la presencia de hongos micorriza, tiene una influencia positiva en el carbono del suelo (Vries et al., 2013), ya que son los responsables de la fijación de dicho carbono (Clemmensen al., 2013). La presencia de plantas perennes en las plantaciones, es una estrategia que permite el establecimiento de hongos micorriza y, por lo tanto, la fijación de carbono (Oades, 1984).

El empleo de fertilizantes y pesticidas sintéticos tiene graves afecciones sobre la biota esencial del suelo y conducen a una degradación generalizada (Neely & Fynn, 2011). Los hongos micorriza y las bacterias asociadas, se inhiben fuertemente por la alteración excesiva del suelo, como sucede en el caso del empleo del arado y cuando existen altos niveles de fósforo y nitrógeno solubles, comúnmente utilizados como fertilizantes en la agricultura (Leake, et al., 2004). Dichos suelos se vuelven dependientes de insumos artificiales, necesitando cada vez mayores cantidades, a la vez que producen rendimientos decrecientes (Khan et al, 2007). Además, el empleo de fertilizantes nitrogenados sintéticos, conlleva la pérdida de materia orgánica del suelo y la liberación de carbono en forma de CO₂, hasta en aproximadamente 10.000 kg de carbono por hectárea (Khan et al., 2007). Cuanto mayor es la aplicación de fertilizante de nitrógeno sintético, mayor es la cantidad de carbono del suelo perdido como CO₂ y nitrógeno como N₂O (Mulvaney et al., 2009), ambos gases de efecto invernadero.

3.1.4. La dinámica del suelo

La comprensión de los procesos de fijación de carbono en suelo es un tema de gran complejidad y que viene determinado por muchos factores que intervienen en los procesos y mecanismos que afectan a la dinámica del COS, como son las interacciones entre clima, planta, suelo y microbiología o el ciclo de nutrientes (Derner et al., 2007).

Los microorganismos juegan un papel determinante en el suelo, siendo fundamentales en la nutrición y la salud de las plantas, en los procesos de fertilidad, estructura, degradación de los contaminantes orgánicos y la remediación de sustancias tóxicas. Además, son clave en procesos ecológicos importantes, como el ciclo biogeoquímico de carbono, nitrógeno, fósforo y azufre, el secuestro de carbono, la mitigación del metano, la fertilidad del suelo y la disponibilidad de nutrientes de la planta.

Por medio de la fotosíntesis, las plantas producen azúcares simples que exudan a través de las raíces. Estos exudados son alimento para los microorganismos de la rizosfera (Bais et al., 2001), que a su vez permite la construcción de carbono estable en el suelo. La captura y utilización de carbono es impulsada por los microbios del suelo, que producen MOS químicamente diverso y estable, siendo mayor esta en suelos con mayor abundancia de hongos y una producción de biomasa microbiana más eficiente (Kallenbach et al., 2016).

A mayor diversidad de plantas, mayor diversidad microbiana por debajo del suelo (Eisenhauer et al., 2017), porque diferentes plantas exudan diferentes sustancias para alimentar a diferentes microorganismos (Zhalnina et al., 2018). La diversidad de plantas determina la composición y el funcionamiento de la biota del suelo, aumentando la biomasa microbiana del suelo, especialmente hongos y al aumentar su proporción, aumenta la captura de carbono (Johnson et al., 2015).

3.1.5. Agregados del suelo

Los agregados son de gran importancia en el funcionamiento del suelo y en el secuestro de carbono. Se forman por la acción de hifas de hongos micorrízicos que crean una “bolsa de hilos pegajosos” que envuelve y entrelaza partículas del suelo (Jastrow et al., 2006). Las secreciones de carbono líquido en forma de azúcares simples de las raíces de las plantas y de hongos permiten la producción de pegamentos y gomas para formar las paredes del agregado. (Baumert et al., 2018). Dentro de esas paredes hay mucha actividad biológica, nuevamente alimentada por las secreciones de carbono. La mayoría de los agregados están conectados a raíces de plantas, con frecuencia raíces laterales o a tejidos de hongos micorrízicos.

Para la formación de estos agregados es necesaria la presencia de una glicoproteína denominada glomalina, que está relacionada con la estabilidad del agregado del suelo (Nichols & Millar, 2013) y que veíamos con anterioridad. Puede ayudar a las hifas de los hongos a atarse a las raíces y a las partículas del suelo, y de ser puentes para espacios de aire (Comis, 2002).

3.1.6. Bomba microbiana de carbono

La existencia de agregados en el suelo determina que en el suelo se pueda dar un proceso que se conoce como bomba microbiana de carbono (Liang, et al., 2017), que pone de manifiesto el papel activo que desempeñan los microorganismos en el proceso de almacenamiento de carbono en el suelo.

En los últimos años se está dando un cambio de una visión tradicional, que contempla las formas recalcitrantes de MOS del suelo como polímeros húmicos complejos, a una nueva que considera que realmente se trata de moléculas sencillas. El desarrollo de tecnología que permite la observación directa en alta resolución de los agregados del suelo o en las superficies minerales, está permitiendo considerar que realmente se trata de formas estables de MOS constituidas por moléculas muy simples que provienen de la necromasa de los microorganismos y que pueden permanecer largos períodos de tiempo en el suelo (Schmidt et al., 2011). Se trata de un nuevo marco conceptual que propone que el almacenamiento a largo plazo del carbono del suelo, no es tanto debida a la capacidad recalcitrante del material, sino más bien, por la accesibilidad al mismo. Dicho de otra forma, la MOS permanece estable en el tiempo cuando tiene una protección física adecuada (Dungait et al., 2012).

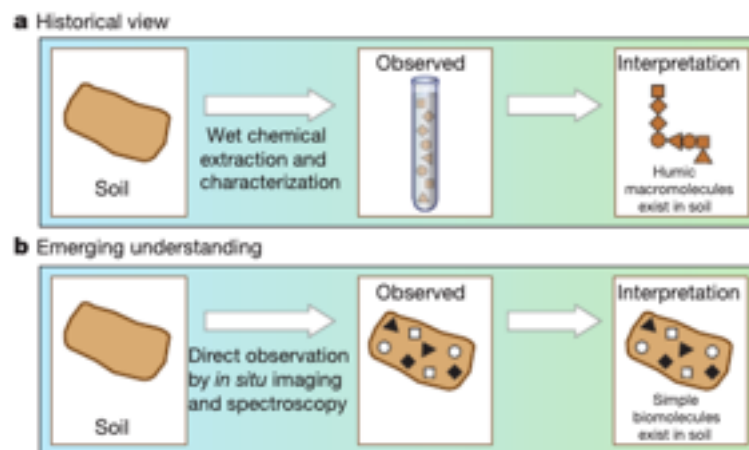


Figura 5. Diferentes visiones MOS (Schmidt et al., 2011)

Para entender el proceso que permite la protección de la MOS en los agregados y por tanto el almacenamiento a largo plazo, debemos detenernos primero en los procesos de anabolismo microbiano que lo permiten. Parte de la glucosa producida a través de la fotosíntesis, es exudada por las raíces, alimentando la microbiota del suelo y permitiendo el aumento de las comunidades microbianas. Cuando esas bacterias y especialmente los

hongos mueren, sus restos formados principalmente de una forma de carbono denominada quitina, pasan a formar parte de la MOS estable del suelo (Kallenbach et al., 2016), estabilizándose en la superficie de los minerales dentro de los agregados (Miltner et al., 2012; Schaeffer et al., 2015).

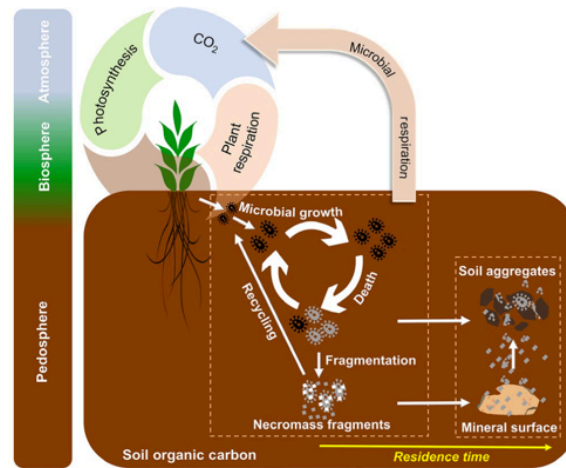


Figura 6. Las plantas producen exudados a través de CO₂ de la atmósfera que en parte es utilizada por los microorganismos en la respiración microbiana (mineralización) y otra persiste en el suelo en forma de necromasa estabilizada en la superficie de los minerales dentro de los agregados. (Miltner et al., 2012)

Por lo tanto, los microorganismos tienen una doble influencia en la COS del suelo. Por un lado, contribuyen a la mineralización de reservas de COS para obtener energía (catabolismo), pero, por otro lado, contribuyen al aumento de COS a través de la biomasa microbiana durante los procesos de anabolismo (Kästner & Miltner, 2018; Liang et al., 2017) y la estabilización de sus residuos dentro de las estructuras del suelo. Así, el carbono orgánico más persistente podría no estar compuesto de desechos de plantas, sino estar formado por carbono que ha pasado primero por la biomasa microbiana (Benner, 2011; Cotrufo et al., 2013)

En el proceso de bomba de carbono microbiana propuesta por Liang et al. (2017), la necromasa microbiana puede asociarse con los minerales del suelo formando compuestos organominerales que permiten la protección física y, por tanto, la estabilidad de la MOS. La comprensión del ciclo del carbono de los microorganismos del suelo, es de gran relevancia para conocer la persistencia largo plazo de su necromasa y su relación con el CO₂ atmosférico y cómo gestionar la productividad agrícola (Liang, 2019).

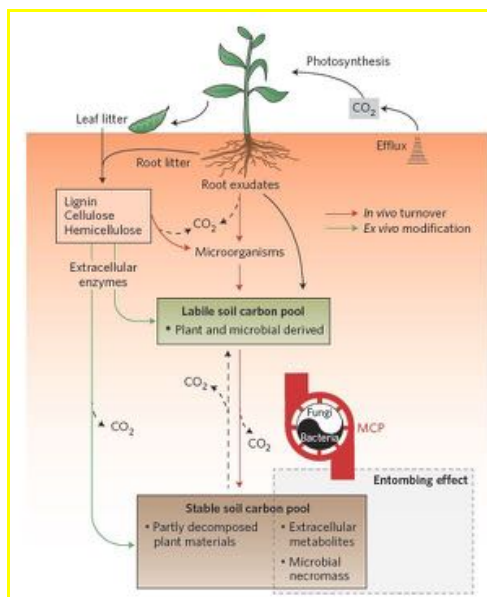


Figura 7. Esquema de la bomba de carbono microbiana (Liang et al., 2017)

Esta nueva perspectiva en la formación de la MOS es fundamental a la hora de considerar la gestión del carbono derivado de los microorganismos del suelo en cualquier intento de gestionar los suelos para el almacenamiento de carbono a largo plazo, como, por ejemplo, en el caso de la introducción de la ganadería en fincas agrícolas.

3.1.7. El papel de los rumiantes

Los herbívoros son una pieza fundamental para el mantenimiento de los ecosistemas, debido a su capacidad de aumentar la concentración de forraje, la eficiencia de pastoreo, la concentración de nutrientes forrajeros y la producción de plantas sobre el suelo (Frank & Groffman, 1998). En su sistema digestivo se encuentran los microorganismos y el grado de humedad adecuado para la descomposición de la materia orgánica ingerida, de forma que los nutrientes vuelven al suelo en forma de orina y estiércol. De otra forma, estos nutrientes podrían quedarse retenidos en la vegetación y la ganadería garantiza de esta forma el ciclado de los mismos (Hamilton & Frank, 2001) y la incorporación además al suelo de más microorganismos a través de sus excrementos, saliva, etc., que a su vez generan más necromasa a través de la bomba microbiana de carbono, generándose un círculo virtuoso natural entre la rizosfera y los estómagos de los animales (Hamilton & Frank, 2001) y aumentando el secuestro de carbono.

3.1.8. Praderas y carbono

Estos ecosistemas terrestres representan aproximadamente el 40% de la superficie terrestre global. Son un gran sumidero de carbono y tienen capacidad de almacenar CO₂ mucho más rápido que los ecosistemas agrícolas (Tong et al., 2015). Las plantas perennes tienen mayor tasa de secuestro de carbono, gracias a disponer de un sistema radicular más complejo y profundo (Conant et al., 2001). Durante muchos siglos, las praderas se han degradado principalmente a través de prácticas de pastoreo no controlado y la transformación de estos pastizales en tierras de cultivo (Reid et al., 2005). Su estado de degradación hace que su potencial de secuestro de carbono esté probablemente entre 88 y 210 GT, equivalente a entre 41 y 99 ppm de CO₂ (Itzkan, 2014).

3.1.9. El papel de la ganadería para favorecer el secuestro de carbono

Los rumiantes manejados a pasto son beneficiosos cuando el pastoreo se realiza de manera apropiada (Delgado et al., 2011; Teague et al., 2013), regenerando los pastos que se encuentran en estado de degradación y aumentando el contenido de carbono de los suelos donde se desarrollan. Entre otros beneficios se podría apuntar una mayor infiltración de agua, una mejor captación de agua, una mayor biodiversidad, una mayor estabilidad y resiliencia de los ecosistemas y un mejor secuestro de carbono (DeRamus et al., 2003). El aumento de las reservas de C en el suelo conducirá a poblaciones más grandes y diversas de microorganismos del suelo, lo que a su vez conduce a un mayor secuestro de C, incluida la oxidación de CH₄ (Bardgett & McAlister 1999; Jamali et al., 2014).

Imitando los comportamientos de los herbívoros durante las migraciones en estado salvaje, la introducción de la ganadería con estos fines, pastará una determinada área planificada, que permanecerá en descanso hasta que se complete el período de recuperación del mismo, con el objetivo de no agotar las reservas energéticas de la planta. Este período de recuperación podrá de ser de 30 días a un año o más, dependiendo de las características climáticas, edafológicas, época del año, régimen de precipitaciones etc. (Savory, 1999).

Para una gestión ganadera sostenible, es necesario realizar una planificación a largo plazo que permita la conservación de los recursos primarios y dotarla, además, de

indicadores que permitan la monitorización continua de los cambios en las condiciones (ecológicas, sociales y económicas) capaces de alertas de síntomas de degradación del agroecosistema.

3.3. Agricultura Regenerativa

Según la definición de Regeneration International, “la Agricultura Regenerativa es aquella que desarrolla prácticas agrícolas y de pastoreo que, entre otros beneficios, revierten el cambio climático mediante la reconstrucción de la materia orgánica del suelo y la restauración de la biodiversidad degradada del suelo, lo que resulta tanto en la reducción del carbono como en la mejora del ciclo del agua. Específicamente, la agricultura regenerativa es una práctica holística de gestión de la tierra que aprovecha la fotosíntesis de las plantas para cerrar el ciclo del carbono y mejorar la salud del suelo, la resiliencia y la densidad de nutrientes de los cultivos. La agricultura regenerativa mejora la salud del suelo, principalmente a través de prácticas que aumentan la materia orgánica del suelo. Esto no solo ayuda a aumentar la diversidad y la salud de la biota del suelo, sino que también aumenta la biodiversidad tanto por encima como por debajo de la superficie del suelo, al tiempo que incrementa la capacidad de retención de agua y captura de carbono a mayores profundidades, lo que reduce los niveles de CO₂ atmosférico que dañan el clima y mejora la estructura del suelo para revertir su pérdida” (www.regenerationinternational.org).

La agricultura regenerativa se fundamenta sobre los siguientes puntos (Burgess et al., 2019):

- 1) Reducir o eliminar la labranza: Minimizar la labranza reduce la oxidación del carbono del suelo, lo que lleva a un mayor contenido de carbono y una mayor capacidad de retención de agua y nutrientes.
- 2) Cobertura vegetal del suelo: que ayuda a reducir la erosión del suelo y el aumento de la producción de materia orgánica a través de cultivos de cobertura, lo que puede aumentar nuevamente el carbono del suelo.
- 3) Fomentar la diversidad de plantas y evitar los monocultivos puede conducir a una mayor producción de materia orgánica debido a la complementariedad del uso de luz, agua y nutrientes de los diferentes cultivos. En muchos casos se apuesta por el uso de perennes, de raíces más profundas que las anuales. Rotación de cultivos.

- 4) Incrementar biológicamente la fertilidad del suelo a través de aplicación de cultivos de cobertura, rotación de cultivos, compost y estiércol animal, que restauran el microbioma planta/suelo para promover la liberación, transferencia y reciclaje de nutrientes esenciales.
- 5) Favorecer la filtración de agua en el suelo. Un ejemplo de esto sería la implementación de diseños hidrológicos en Línea Clave (Keyline Design) (Kullik, 2016).
- 6) La integración de prácticas ganaderas y agrícolas con el objetivo de minimizar los insumos y labores, ya que el estiércol del ganado puede ayudar a mantener el suelo niveles de nutrientes y contribuir a la realización de diferentes tareas como el desherbado, desparasitación, tracción, etc.
- 7) Gestión del pastoreo, combinando altas densidades puntuales de animales.
- 8) Sistemas agroforestales: combinación de diferentes estratos arbóreos o arbustivos con agricultura o ganadería.
- 9) No utilización de fertilizantes químicos de síntesis, ni herbicidas, ni pesticidas.

3.4. Manejos de Agricultura Regenerativa

Son numerosas las técnicas que se engloban dentro del concepto de agricultura regenerativa y principalmente, son conocidas por su capacidad de secuestro de carbono (Crowder et al., 2010; Hepperly et al., 2009; Khorramdel et al., 2013) y disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero (Gattinger et al., 2012). Aunque también existe bibliografía que trata sobre la capacidad de mejorar la retención de agua y la absorción de plantas (Lotter 2003), la mejora de la resiliencia de los servicios ecosistémicos (Pimentel et al., 2005), así como mantener los rendimientos en cuanto a la producción (De Ponti & van Ittersum 2012).

A continuación, se describen los principales manejos utilizados en agricultura regenerativa que pueden mejorar o contribuir al almacenamiento de COS.

3.4.1. Mínimo laboreo o labranza cero

El laboreo es una de las prácticas que más contribuyen a la mineralización de MOS y la erosión del suelo, por lo que cambiar a sistemas de labranza reducida o sin labranza puede tener un impacto positivo en los organismos del suelo y el COS, permitiendo además el ahorro de hasta el 70% de los costos de energía y combustible y la inversión en maquinaria (Kassam et al., 2015).

El cambio al laboreo mínimo no solo mejora la estructura del suelo, sino que también reduce las emisiones de CO₂ y contribuye al aumento de COS (Abdalla, M. et al., 2013). Los sistemas de producción agrícola regenerativos agroecológicos, reducen las emisiones de gases de efecto invernadero, frente a los sistemas de agricultura convencional, en donde las ganancias de carbono obtenidas, se ven contrarrestadas por las mayores emisiones de N₂O a escala de área de la fertilización nitrogenada (Stöckle et al. 2012; Skinner et al. 2014).

Esta práctica, es interesante en términos de almacenamiento de carbono cuando se integra en agroecosistemas diversos, por ejemplo, con un cultivo de cobertura multiespecie, que ayuda en el control de adventicias y en la que cada una de ellas realiza una labor determinada en el suelo como puede ser ayudar a aflojar el suelo con raíces profundas, transferir carbono a la rizosfera, estabilizar la agregación del suelo o suprimir las malas hierbas y las plagas (Finney & Kaye, 2017).

Para los cultivos ecológicos, donde no se pueden usar herbicidas o fertilizantes químicos para controlar las malezas, reducir la labranza es mucho más difícil que en sus análogos convencionales. Los implementos de labranza de conservación que aran a una profundidad limitada y no invierten el suelo como sucede con un arado de vertedera clásico, pueden reducir la perturbación. Pero la necesidad de realizar varias pasadas con equipos de cultivo para controlar las malezas puede contrarrestar los beneficios de los implementos de labranza de conservación y provocar pérdidas de carbono. Sin embargo, en diferentes lugares del mundo se está experimentando con un sistema ecológico de labranza cero basado en un implemento llamado “roller-crimper”, que se utiliza para rodar sobre un cultivo de cobertura, aplanando y tumbando las plantas para que mueran, creando un mantillo en la superficie del suelo que continuará suprimiendo las malezas durante la temporada de crecimiento (Instituto Rodale, 2015). El cultivo encamado al no ser segado, solo partida su caña, pero sin cortarla, acelera la senescencia de la planta (Kornecki et al., 2009) y puede tener un efecto de terminación del cultivo de cobertura tan efectivo como la utilización de herbicida (Ashford & Reeves, 2003). Este encamado hace liberar a las plantas exudados que sirven de alimento a la microbiología que mejora la estructura del suelo.

Al tumbar el cultivo de cobertura y la planta termina su ciclo, los restos se quedan como acolchado directamente sobre el suelo, lo que provoca una reducción de la erosión, evita la germinación hierbas adventicias y permite una mayor acumulación de agua en el suelo, que resulta beneficioso para el cultivo que viene a continuación (Derpsch et al., 1991). Este apero puede usarse para tumbar el cultivo de cobertura un tiempo antes de la siembra del cultivo que se emplea con fines comerciales, por lo que no se produce competencia por los nutrientes ni por el agua (Hargrove & Frye, 1987).



Imagen 1: roller-crimper. Fuente: Sustraiak Habitat Design Koop

La utilización de roller-crimper conlleva una disminución del uso de maquinaria que en el caso del estudio de su utilización en la producción de hortaliza llevado a cabo por Canali et al. (2013), permitió reducir hasta en un 56% el consumo de combustible fósil en comparación con el manejo más tradicional de control de hierbas adventicias a través de abonos verdes.

3.4.2. Mejora de la eficiencia del uso del agua. Diseño hidrológico Keyline

Niveles altos de MOS generan una mejor estructura del suelo, que permite mejorar la capacidad de retención de agua del suelo, la tasa de infiltración y la eficiencia de captura de agua permitiendo que penetre rápidamente en el suelo, resultando una menor pérdida de agua por escorrentía y mayores niveles de captación de agua (Lotter et al., 2003). Una mayor proporción de MOS, es una de las principales razones que permiten que los suelos en manejo ecológico sean más estables y puedan mantener mayor cantidad de agua. Existe una fuerte relación entre los niveles de materia orgánica del suelo y la cantidad de agua que se puede almacenar en la zona de las raíces de un suelo. La USDA-

NRCS, sugiere que cada aumento del 1% de SOM se retendrán hasta 180.000 litros más de agua por hectárea (Bryant, 2015).

Dentro de las herramientas que tienen un impacto positivo en la retención de agua en los suelos de cultivo, destaca la metodología Keyline Design (o Diseño en Línea Clave en castellano). Se trata de una técnica que permite gestionar el agua en escorrentía en la parcela de manera eficiente y aumentar la fertilidad del suelo. Para ello, se realiza un diseño adaptado a la topografía del terreno que permite movilizar el agua de lluvia y retenerla para el aprovechamiento de los cultivos por medio de curvas con un desnivel apropiado que garantiza una distribución adecuada del agua sobre la parcela.

El diseño hidrológico en Línea Clave (Keyline Design) tiene dos objetivos principales (Yeomans 2008):

- Garantizar la formación de suelos fértiles en un paisaje diseñado sistemáticamente.
- Reducir la velocidad del flujo superficial en la parcela para conseguir distribuirla uniformemente y que se infiltre en el suelo (Krawczyk 2016; Yeomans 2008).

La disminución de la velocidad del flujo de agua y la infiltración en los surcos del apero, permite que el suelo absorba mayores cantidades de agua de escorrentía, lo que permite aumentar la actividad de la microbiología y aumentar los niveles de SOM (Mangalassery et al., 2014), especialmente dentro de la capa superficial del suelo. Para ello, se utilizó un arado especial, denominado Yeomans, que con sus hojas delgadas penetra en las capas profundas del suelo sin voltearlo y sin mezclar horizontes. Es compatible con labranza cero que se ha comentado en el apartado anterior.



Imagen 2: subsolador Yeomans Plow. Fuente: <http://clearchoicepastures.blogspot.com>



Imagen 3: Parcela con diseño hidrológico Keyline. Fuente: Sustraiak Habitat Design Koop

3.4.3. Aplicación de compost

Los restos vegetales de los cultivos también pueden ser compostados para mejorar la salud del suelo y el secuestro de carbono del suelo. El compostaje es la descomposición aeróbica controlada de materiales orgánicos tales como plantas, animales o estiércol. El producto resultante es una eficaz enmienda para el suelo ya que aumenta la biodiversidad de los suelos y la biomasa microbiana con el correspondiente aumento de los servicios biológicos, como el ciclo de nutrientes, la supresión de enfermedades y la mejora de la estructura del suelo (Ingham, 2006).

Estos beneficios del suelo se traducen en una mayor salud y productividad del suelo reduciendo las necesidades de agua o fertilizantes (Lal, 2004). Se acumulan rápidamente: después de sólo una temporada de aplicación de la modificación con el compost, el carbono orgánico del suelo y la estabilidad del agregado aumentan significativamente en comparación con los suelos no enmendados (Porter et al., 1999). La aplicación de abono a las tierras de cultivo y pastizales estimula la productividad neta primaria y conduce a una mayor acumulación de carbono, (Ryals & Silver, 2013; Ryals et al., 2016). Estimulando la vida en el suelo por el aporte de carbono y nutrientes adicionales en el suelo, mejorando su estructura y la capacidad de retención de agua. Además, cuando el compost reemplaza el fertilizante nitrogenado sintético, las plantas crean más raíces, fijando más carbono atmosférico en el proceso (Khorramdel et al., 2013).

3.4.4. Cultivos de cobertura

Los cultivos de cobertura son aquellos que se siembran para el cubrir el suelo con el objetivo de mejorar la fertilidad, la estructura del suelo, favorecer la infiltración de agua e incrementar la biodiversidad en sistemas de producción agrícola (Lu et al, 2000). También es una herramienta de gran ayuda para el control biológico, ya que ayuda a controlar las hierbas adventicias y las plagas, sin competir con los cultivos comerciales por los nutrientes disponibles en el suelo (Wells et al., 2015). Al reducir la necesidad de operaciones mecánicas en el control de hierbas y aplicaciones de fertilizantes y pesticidas, contribuyen a disminuir las emisiones de GEI (Roesch-Mcnally et al, 2017.)

Como cultivo de cobertura, es habitual utilizar una mezcla de gramíneas y leguminosas que permitan conseguir un equilibrio óptimo de la relación carbono/nitrógeno del suelo, diversificar los microorganismos y la disponibilidad de nutrientes y mejorar la producción de biomasa. Se suelen sembrar a principios de otoño y se cortan después de que florecen en la primavera, dejando un mantillo o biomasa adicional que también se puede utilizar como forraje mediante la integración del ganado (Roesch-Mcnally et al, 2017).

En cuanto al secuestro del carbono, el uso de cultivos de cobertura dentro de la rotación de cultivos puede ser casi tan efectivo como la reforestación de tierras de cultivo, a la vez que presenta otras ventajas, como reducir la lixiviación de nutrientes, la erosión eólica e hídrica y la incidencia de plagas (Poeplau et al., 2014). Por ejemplo, algunos estudios sobre la producción de maíz han demostrado que estos cultivos intercalados con leguminosas pueden secuestrar casi seis toneladas métricas de carbono por hectárea por año, y que incluso permite aumentar los rendimientos agrícolas (Bunch et al., 2019).

3.4.5. Retención de restos vegetales

Los cultivos de cobertura también desempeñan un papel importante en el secuestro del suelo cuando los restos de plantas y raíces se dejan en el sitio en vez de ser eliminados o quemados (Wang & Alva 2012), pues proporcionan materia orgánica que es beneficiosa para los organismos del suelo. En muchos casos, estos restos se eliminan para la producción de energía, en una práctica que agota la materia orgánica del suelo (Blanco-

Canqui 2013), siendo la retención de los restos de cultivos un factor importante en la acumulación de carbono en el suelo (De Moraes et al. 2013).

3.4.6. Diversidad de cultivos

El aumento de la diversidad de variedades de cultivos, tiene un efecto positivo en la disminución de plagas de insectos por medio del control biológico y en la mejora de la productividad (Lundgren & Fausti 2015). Las especies de cultivo con raíces profundas pueden secuestrar más carbono (Rasse et al., 2005), ayudan a romper las compactaciones del arado (Pierret et al. 2016), a generar una acumulación adicional de nutrientes (Steinauer et al., 2016), airear el suelo, proporcionar condiciones beneficiosas para las lombrices de tierra y resto de organismos del suelo (Eisenhauer et al., 2017) y puede influir positivamente en el diámetro de la raíz del cultivo posterior (Han et al., 2016).

3.4.7. Intercropping

El *intercropping* o cultivos intercalados, es una técnica de cultivo en la que, en una misma parcela, intervienen dos o más especies. Consiste en intercalar una especie con otra, cuando la segunda ya está en el ciclo final del desarrollo. La razón para la utilización de esta técnica es que es poco probable que los diferentes cultivos compartan las mismas plagas de insectos y patógenos causantes de enfermedades. Además de esto, el cultivo que se implanta estará rodeado de otro cultivo en periodo de floración y esto, a su vez, atraerá más insectos, muchos de ellos, predadores de otras plagas (Boller et al., 2004).

En cuanto al manejo de hierbas adventicias, esta técnica reduce o elimina el trabajo de desherbado por medios mecánicos. Esto supone un ahorro sustancial en los costes directos del cultivo, especialmente en el modelo agroecológico que intenta convivir con las adventicias y no eliminarlas a base de productos herbicidas (Daxl et al., 1994).

Los cultivos intercalados pueden tener una mayor productividad subterránea que los cultivos únicos y, con el tiempo, secuestran más carbono del suelo debido a una mayor aportación de restos de carbono de raíces (Cong et al., 2014).

3.4.8. Agroforestería

Se trata de un sistema que integra árboles en fincas con cultivos agrícolas, lo que permite una diversificación de la producción, obteniendo a la vez beneficios sociales, económicos y ambientales (Nair et al, 2010). La agroforestería permite aumentar el contenido de materia orgánica, además del carbono secuestrado en la propia madera (Shi et al., 2018). La fertilización adicional con hojas y restos de biomasa procedentes de los árboles aumenta el porcentaje de carbono orgánico del suelo y mejora la salud del suelo (Savarde, 2019). También aumentan la disponibilidad de agua en el suelo por la regulación que los árboles y los arbustos generan en los ciclos del agua y el carbono (Rosenstock et al., 2019). Las raíces de los árboles, más profundas que los cultivos, absorben la humedad y los nutrientes que pueden ser utilizados por estos últimos (Cardinael et al, 2015), haciendo que los suelos bajo las copas de los árboles tengan un mayor contenido de nutrientes y materia orgánica (Joffre & Rambal, 1993).

3.4.9. Integración de cultivos y ganado

La integración de diferentes cultivos, utilizando también diferentes estratos y diferentes ganaderías, para pastar pastos, cultivos de cobertura o rastrojos, es una medida que permite producir sinergias entre los elementos del sistema productivo, mejorando la resiliencia y la sostenibilidad del agroecosistema. Proporciona importantes servicios ecosistémicos, como incrementar el almacenamiento de carbono, la biodiversidad y la eficiencia en el ciclo nutrientes (Sanderson et al., 2013).

Así mismo, puede aumentar la rentabilidad económica por medio de la diversificación de los sistemas de producción agrícola, mejorando la resistencia a la sequía y reduciendo la erosión del suelo (Bonauodo et al., 2014; Franzluebbers & Stuedemann, 2008; Lemaire et al 2014). Con ello, lo que se persigue, es una mejora de los ciclos biológicos de plantas, animales y sus desechos, minimizar y optimizar el uso de productos insumos agrícolas, aumentar la eficiencia en el uso de maquinaria, equipo y mano de obra, generar empleo e ingresos, mejorar las condiciones sociales en las zonas rurales y reducir los impactos ambientales (Macedo, 2009).

3.4.10. Pastoreo rotacional dirigido

También conocido como Manejo Holístico (HM) o Pastoreo Racional Voisin (PRV), es aquel en el que los rebaños pastan en una parcela bastante pequeña durante un período de tiempo muy corto (generalmente de medio día a 2-3 días) antes de ser conducido a la siguiente parcela, para con posterioridad, dar un tiempo de reposo a la parcela pastada para la recuperación del pasto. Todo ello con el objetivo de obtener el tiempo óptimo de reposo o de calidad nutricional del pasto. Trata de imitar los procesos de migración natural de los herbívoros en libertad y su impacto sobre los pastizales. Es un pastoreo planificado en el que se anticipa dónde y cuánto va a estar un determinado número de animales en una parcela cerrada por medio de pastores eléctricos. Hay una observación continuada de las plantas consumidas para evitar el sobrepastoreo, lo que permite ir adaptando continuamente el plan de pastoreo para realizar los ajustes que sean necesarios (Savory & Butterfield, 1999).

A diferencia del pastoreo continuo, donde el efecto neto de las reducciones de carbono puede ser superado por las emisiones de N₂O y CH₄ de los animales y sus excrementos, se consiguen tasas crecientes de MOS (Machmuller et al. 2015), aumentando la fertilidad del suelo y la biomasa y aumentando la diversidad de plantas (Teague et al., 2011).

En la gestión regenerativa se usa una estrategia de pastoreo multipaddock proactiva, centrada en la restauración de la función ecológica y la productividad de zonas degradadas. Diversos estudios han demostrado que el manejo del pastoreo AMP (Adaptive Multi-Paddock) regenerativo en tierras de pastoreo a nivel mundial es capaz de revertir los procesos de degradación asociados con la práctica generalizada del pastoreo extensivo (Teague et al. 2011; Gerrish 2004).

3.5. Potencialidades de la agricultura regenerativa en la mitigación del cambio climático

En las últimas décadas, se está desarrollando el concepto de agricultura regenerativa, que precisamente se centra en todo este conjunto de técnicas agrícolas y ganaderas - desarrolladas en el capítulo anterior- que permiten una mayor capacidad de almacenamiento de carbono en suelos.

Así, diferentes científicos como Rattan Lal, director del Centro de Manejo y Secuestro de Carbono de la Universidad de Ohio, están tratando de estudiar las tasas de acumulación de carbono que serían posibles a través del cambio de manejos en agricultura. Aunque las tasas de acumulación de carbono varían entre países y condiciones climáticas, tipo de suelos, etc., los valores más habituales que nos podemos encontrar en la literatura científica son similares a estas presentadas por Lal (2013):

- 500-1000 kg/ha/año en tierras de cultivo,
- 50-500 kg/ha/año en tierras de pastoreo,
- 500-1000 kg/ha/año en bosques
- 5-10 kg/Ha/año de carbonatos pedogénicos en tierras áridas.

En la tabla 1 se recogen algunos datos estimados en diferentes publicaciones sobre la capacidad de secuestro de COS en suelos agrícolas a nivel mundial. Tal como se muestra, las estimaciones del potencial de secuestro de COS en los suelos, ha ido variando según se tiene un mayor conocimiento de la dinámica del suelo. Así, en 1998 algunas publicaciones (Paustian et al., 1998) cifraban este potencial entre 0.4 y 0.9 Gt CO₂/año, mientras que estudios más actuales, calculan que podría ser mas de 6 Gt/año (Griscom et al., 2017).

Tabla 1. Potencial de secuestro de carbono para los suelos agrícolas mundiales. Elaboración propia.

Estudio	Gt C/año
Paustian et al., 1998	0.4-0.9
Lal and Bruce, 1999	0.4-0.6
IPCC, 2000	0.8
Lal, 2004	0.4-1,2
Lal, 2008	1.4-3.4
Smith et al., 2008	1.3-1.4
Sommer and Bossio, 2014	0.6-1.3
Paustian et al., 2016	1-2.1
Griscom et al., 2017	6.5
Chabbi et al., 2017	6
Minasny et al., 2017	2-3
Fuss et al., 2018	0.6-1.4

En lo que, a potencialidades de secuestro de carbono a nivel mundial de suelos agrícolas manejados por medio de agricultura regenerativa, las diferentes fuentes consultadas se limitan a realizar estimaciones por medio de extrapolaciones de datos obtenidos de diferentes parcelas experimentales. Tal es el caso del Instituto Rodale, según el cual, el paso de las tierras de cultivo del planeta de manejos convencionales a técnicas regenerativas, permitiría secuestrar aproximadamente secuestrar 12 Gt de CO₂, a los que habría que añadir otras 43 Gt de CO₂ que se obtendría por medio de la conversión de los pastos mundiales a un modelo de pastoreo rotacional regenerativo (Moyer et al., 2020).

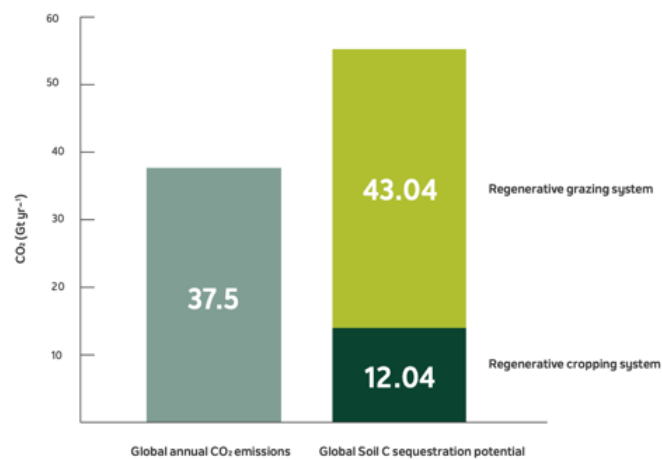


Fig 8: Potencial de secuestro de carbono adoptando prácticas de agricultura regenerativa (Moyer et al., 2020)

Si bien hay algunos otros estudios, como el realizado por el proyecto Drawdown (Hawken, 2018) donde se cita un potencial de 1050 GT entre 2020 y 2050, con valores de 31.19 Gt de CO₂ para prácticas de silvopastoreo y con agricultura regenerativa, 23.15 Gt de CO₂.

Por su parte el Instituto Savory plantea el cálculo teórico de que un aumento de 1.000 kg de carbono por hectárea y año, esto permitiría retirar en el total de las tierras destinadas al pastoreo del mundo, 12 Gt de carbono de la atmósfera por año, lo que equivale a 6 ppm anuales. Si tenemos en cuenta que al año se emiten 2,5 ppm, quedaría un secuestro neto de carbono al año de 3,5 ppm. Volver a los valores preindustriales de CO₂ necesitaría tan solo 40 años (Savory, 2015).

Para la misma superficie, otra investigación (Sacks et a., 2014), plantea una capacidad de almacenamiento de 2.500 kg de carbono por hectárea, con lo que las

estimaciones de secuestro serían de 17,4 Gt. Esto significaría retirar 8,7 ppm de CO₂ al año de la atmósfera (las emisiones de CO₂ actuales están entorno a 2 ppm)

Otros estudios, como el informe presentado por Seth Itzkan (2014), eleva el potencial de los pastizales del mundo a valores comprendidos entre 88 a 210 Gt, con un valor de equivalencia aproximado a entre 41 y 99 ppm, que nos situarían de vuelta prácticamente a los valores preindustriales de CO₂.

Con respecto a las prácticas y manejos utilizados en agricultura que pueden influir en el almacenamiento de carbono en el suelo, a continuación, se analizan especialmente las englobadas dentro de la agricultura regenerativa que se han detallado en el apartado 3.4., como utilización de compost, cultivos de cobertura, sistemas de pastoreo rotacional regenerativo, cultivos perennes, etc.

También se hará una breve mención o se tratarán algunos ejemplos de prácticas agrícolas pertenecientes a la producción convencional y otras de producción ecológica certificada.

En la tabla 2 se muestran los datos de secuestro de carbono publicados a partir de diferentes estudios donde se han aplicados algunas técnicas de agricultura regenerativas.

Tabla 2. Potencial de secuestro de carbono para suelos agrícolas con técnicas regenerativas. Listado de estudios sobre la captura de carbono con prácticas regenerativas (Elaboración propia a partir de la consulta de distintos artículos)

Agroecosistema	Lugar	Secuestro de Carbono Tm CO ₂ ha ⁻¹ año ⁻¹	Ref.
CULTIVOS ANUALES			
Compost y cultivo cobertura	USA	2.3	Hepperly et al., 2009
No arado y estiércol	Iran	4.1	Khorramdel et al., 2013
Compost	USA	2.2	Hepperly et al., 2007
Compost	USA	2.4	Seeberg-Elverfeldt et al., 2012
PASTOS			
Pastoreo rotacional	USA	8.0	Machmuller et al., 2015
Manejo Holístico	USA	3.6	Stanley & Rowntree 2018

Pastoreo rotacional	Sudamerica	7.8	Fisher et al., 1994
AGROFORESTERÍA			
Arbolado en pasto	Irlanda	2.2-2.5	Black et al., 2009
Frutales y cultivos anuales	Filipinas	7.8	Brakas et al., 2011
Agroforestería	USA	3.4	Udawatta et al 2011
Enmienda orgánica	Mediterráneo	5.3	Vicente-Vicente et al., 2016
Intercropping	Malawi	4.0	Garrity et al. 2010
COMBINACIÓN			
Combinación de cultivo sobre pradera y manejo holístico	Australia	9	Jones, 2011

A la luz de los datos recogidos en los estudios reflejados en la Tabla 2, a continuación se resumen los valores de secuestro de carbono en cada uno de los agrosistemas (cultivos anuales, pastos, agroforestería y una combinación de varias de ellas) en relación a los diferentes técnicas y manejos de agricultura regenerativa, que se recogen en la Tabla 3.

Cultivos anuales

Dentro de los manejos utilizados en la producción de cultivos anuales que están dando buenos resultados en cuanto a captura de carbono, nos encontramos con el acolchado, la rotación de cultivos, el empleo de abonos verdes y cultivos de cobertura y labranza reducida. Los resultados se encuentran alrededor de 2 Tm carbono ha⁻¹año⁻¹.

Pastos

El conjunto de prácticas relacionadas con el pastoreo rotacional dirigido, en sus múltiples variantes (Manejo Holístico, PRV, AMP, etc) es sin duda el manejo que más cantidad de carbono es capaz de secuestrar, desde los 3,59 Tm ha⁻¹año⁻¹ de carbono (Stanley & Rowntree 2018), hasta los 8.0 Tm ha⁻¹año⁻¹ de carbono (Machmuller et al., 2015).

Agroforestería

El cultivo de especies perennes -por lo general especies arbóreas- con anuales, bien sea de manera intercalada o al azar, ofrece tasas de secuestro entre 2 (Black et al., 2009) y las casi 8 Tm carbono ha⁻¹año⁻¹(Brakas et al., 2011)

Combinación

La combinación de técnicas de mayor capacidad de fijación de carbono, como son agroforestería combinada con fórmulas de pastoreo rotacional dirigido, reporta la mayor cantidad de carbono fijado por hectárea en la experiencia de Colin Seis en Australia (Jones, 2011), con 9 Tm de carbono ha⁻¹año⁻¹.

Tabla 3. Resumen de capacidad de captura de carbono por agroecosistemas con mejores prácticas regenerativas. Elaboración propia.

MANEJO	Secuestro de CO₂ Tm ha⁻¹año⁻¹
AGROECOSISTEMA	
Cultivos anuales	0.5 - 2
Agroforestería	2 - 8
Pastos	3.5 - 8
Combinación ganadería	9

Por otro lado, como se ha mencionado anteriormente, es interesante resaltar algunos estudios donde se ha demostrado la relación entre la producción ecológica certificada y el secuestro de carbono. En la tabla 4, se reflejan distintos valores de secuestro de carbono en tierras agrícolas en producción ecológica certificada en los agroecosistemas diferentes: cultivos anuales y pastos.

Tabla 4. Potencial de secuestro de carbono para suelos agrícolas en producción ecológica en diferentes estudios a lo largo del mundo. (Minasny et al., 2017)

Práctica	Lugar	Secuestro de CO₂ Tm ha⁻¹año⁻¹	Ref.
-----------------	--------------	---	-------------

CULTIVOS			
Enmienda orgánica	China	0.62	Wang et al 2015
Enmienda orgánica	China	0.54	Jin et al., 2008
Compost	Taiwan	0.46-1.00	Wei et al., 2015
Estiércol de granja	Bélgica	0.45	Buysse et al., 2013
No arado y cultivo de cobertura	USA	0.45	Franzluebbers, 2010
Compost	Egipto	0.83-0.93	Luske & van der Kamp, 2009
Compost	Rodale	0.98	Hepperly et al., 2007
PASTOS			
Cultivo a pastizal	Australia	0.3-0.6	Sanderman et al., 2010
Cultivo a pastizal	Australia	0.76	Chan et al., 2011
Cultivo a pastizal	Australia	0.78	Badgery et al., 2014
Cultivo a pastizal	Francia	0.49	Arrounays et al 2002
Cultivo a pastizal	Inglaterra	0.51	Goulding & Poulton, 2005
Pastizal	Australia	0.75	Chan et al., 2011
Pastizal	Nueva Zelanda	0.6	Schipper et al, 2014

Así mismo, en lo que respecta a las tasas de secuestro y de reservas de carbono en suelo, se considera conveniente destacar algunos estudios (Gattinger et al., 2012; Aguilera et al., 2013) que muestran diferencias significativas entre prácticas convencionales y de agricultura ecológica. Las prácticas utilizadas por la agricultura ecológica, ofrecen mejores tasas de secuestro de carbono que las convencionales. Gattinger et al. (2012), han demostrado que las reservas de carbono orgánico del suelo en los 20 centímetros superiores del suelo son significativamente más altas en la producción ecológica que en las prácticas convencionales (en 2.5-4.5 toneladas de carbono por hectárea).

3.6. Algunas críticas a la agricultura regenerativa

En la medida en la que las prácticas de agricultura regenerativa se extienden por el mundo -pasando incluso a formar parte de propuestas políticas en Estados Unidos (Feldman, 2020)-, comienzan a aparecer publicaciones que ponen en cuestión la capacidad de las prácticas y manejos que bajo este término se engloban.

Uno de los aspectos más controvertidos con la agricultura regenerativa viene del propio concepto de secuestro de carbono en suelo para la mitigación del cambio climático,

entendido este como el aumento de COS originado por cambios en el manejo. Este proceso estaría condicionado a diferentes factores como son la capacidad finita de los suelos para almacenar carbono, la reversibilidad del proceso y que, en determinadas condiciones, el aumento de COS no implica que otros GEI como el N₂O disminuyan, si no que, con el tiempo, incluso pueden aumentar (Powlson et al., 2011).

En el estudio realizado por Searchinger et al., se cuestiona la capacidad de secuestro de COS de la agricultura regenerativa debido a la dificultad de desarrollar a escala global su potencial práctico (2019), a lo que se añaden otras cuestiones como son la dificultad de realizar buenas mediciones de carbono en fincas productivas o la posibilidad de que se esté realizando una contabilidad de carbono defectuosa en los casos en los que se añaden enmiendas orgánicas que provienen del exterior de las fincas. También se discute el potencial de mitigación del almacenamiento de carbono en el suelo, por la posibilidad de que la renovación del carbono orgánico del suelo, produzca una retroalimentación del ciclo del nitrógeno, si no se controlan las entradas de nitrógeno mediante una gestión adecuada (Lugato et al., 2018). Este estudio, que utiliza un modelo biogeoquímico sobre muestras de suelo en las que se realizan prácticas representativas de mitigación de carbono en la Unión Europea y concluye que en manejos con retención de restos de cultivos y baja perturbación de suelo analizadas, no se incrementan las emisiones de N₂O mientras continúe la acumulación de carbono en suelo – los primeros 20-30 años-, pero que a partir de ahí, el suelo puede llegar a un punto de saturación de COS (West & Six, 2007) y producirse mayores emisiones de N₂O. En este punto, el suelo podría pasar de sumidero, a fuente neta de GEI.

En la revisión bibliográfica también aparecen críticas al pastoreo rotacional dirigido, concretamente al Manejo Holístico, que ponen de manifiesto la necesidad de realizar una mayor cantidad de estudios a más largo plazo y se cuestiona la capacidad de almacenamiento de carbono por parte de los pastizales del mundo (Nordborg & Rööb, 2016).

Además, algunos estudios plantean la dificultad de la agricultura regenerativa en relación al salto de escala que se debería realizar para convertirse en una alternativa al modelo de agricultura hoy en día imperante, poder desarrollar su potencial de secuestro de carbono y convertirse en una herramienta determinante en la mitigación del cambio climático. La transición de la agricultura regenerativa presenta dificultades más allá de

innovaciones técnicas que tienen que ver con aspectos no materiales como pueden ser valores culturales, dificultades en torno a la cuestión de la adaptación a los cambios, gestión de la incertidumbre y se puede ver a través de la interacción entre las esferas práctica (comportamiento y técnica), política (económica, legal y cultural) y personal (creencias y valores) (Gosnell et al., 2019). El cambio de modelo de agricultura debe ir acompañado de otras medidas como el desarrollo de programas de extensión agroecológica a diferentes niveles (internacional, nacional y local) involucrando responsables políticos, agricultores, investigadores, consumidores y la totalidad de la cadena alimentaria (Burgess et al., 2019).

4. CONCLUSIONES

Los informes que se publican periódicamente desde el IPCC son concluyentes y apuntan cada vez con más fuerza en la misma dirección: es necesario disminuir las emisiones de GEI de manera urgente y al mismo tiempo, reducir su concentración en la atmósfera. El modelo de agricultura y ganadería industrial actual, es uno de los principales responsables de estas emisiones de GEI y la transición hacia un modelo que no solo no genere emisiones, sino que se convierta en un sumidero neto de carbono, es uno de los grandes retos que como sociedad tenemos que enfrentar en las próximas décadas, si queremos evitar los peores efectos del cambio climático.

Dentro de las diferentes estrategias para extraer el exceso de CO₂ de la atmósfera, el almacenamiento en suelo a través del incremento de COS en tierras agrícolas, es una de las más prometedoras según los estudios analizados. El estado actual de degradación de los suelos mundiales, con niveles de materia orgánica y de fertilidad en descenso, consecuencia del modelo industrial actual, plantea una gran oportunidad a través de la restauración de dicha materia orgánica con técnicas y herramientas que tienen entre sus objetivos el aumento de COS a través de la comprensión de los procesos biológicos que en el suelo suceden. En este sentido, el estudio de los procesos de simbiosis que se dan en la rizosfera entre los microorganismos y las plantas, es fundamental para comprender el ciclo del carbono en el suelo y, por lo tanto, los mecanismos de acumulación a largo plazo. Esto ocurre en la medida en la que no se realicen perturbaciones fuertes en el suelo, tales como arar en profundidad, la aplicación de fertilizantes de síntesis, pesticidas, herbicidas, etc. que destruyen la vida del suelo y se sigan realizando los aportes necesarios de materia orgánica que permiten mantener las redes tróficas del suelo, generando las

condiciones necesarias para la formación de microagregados en el suelo. Estos espacios son clave para el desarrollo de mecanismos, como los descritos a través de la bomba microbiana de carbono, que permiten proteger el carbono en el suelo por largos períodos de tiempo y convertir el suelo en un sumidero para el secuestro del CO₂. Este proceso es de especial importancia cuando hay presencia de plantas perennes, como es el caso de los pastizales, ecosistemas de una gran capacidad de almacenamiento de carbono, pero que en la actualidad se encuentran degradados como consecuencia de prácticas como el sobrepastoreo. Los estudios analizados muestran, como la ganadería manejada de manera adecuada, gracias a la microbiota de sus estómagos, permite la reincorporación de microorganismos en los suelos y adquiere un valor importante en los procesos de restauración de suelos degradados, a la vez que permite cerrar ciclos de fertilización con la incorporación de ganadería dentro de sistemas agrícolas.

La agricultura -en su sentido más amplio, incluyendo la ganadería- regenerativa trata de incorporar en su planteamiento la comprensión de los procesos complejos que suceden en la relación plantas-suelo-microorganismos-animales, para desarrollar técnicas que su uso no degrade las condiciones del suelo, sino que consigan el efecto contrario; la regeneración. La mayoría de las técnicas estudiadas, se encuentran en un grado de madurez suficiente como para su expansión a una escala mayor a la que se desarrolla en la actualidad y algunas de ellas, como el pastoreo rotacional dirigido, comienzan a ser ampliamente conocidas por los múltiples beneficios que ofrecen, no solo desde un punto de vista económico por los ahorros en alimento que genera, sino también desde un punto de vista ambiental por las mejoras en biodiversidad que proporciona.

En lo que respecta al papel de la agricultura regenerativa en mitigación del cambio climático, en la bibliografía repasada se puede observar el éxito de algunos estudios en lo que al almacenamiento de carbono se refiere. Algunos experimentos ofrecen tasas muy elevadas de almacenamiento de carbono en suelo que invitan a pensar que una extensión de las prácticas a escala planetaria, permitiría reducir en un porcentaje elevado el exceso de CO₂ en la atmósfera. Sin embargo, resulta evidente que los datos de estos experimentos recogidos en campo son una porción muy pequeña de la superficie total destinada a la agricultura y la ganadería en el mundo y que el desarrollo a escala de este tipo de prácticas, plantea grandes dificultades más allá de lo agronómico. Se hace necesario desarrollar estudios en mayor profundidad, más investigación y desarrollar estrategias

que permitan la expansión de estas prácticas a una escala mayor, para poder obtener más información sobre su potencialidad en la mitigación del calentamiento global. Para ello, será necesario abordar las diferentes dificultades que impiden avanzar en este camino: por un lado, el desarrollo de mecanismos de financiación, una mayor investigación en los mecanismos que permiten la fijación de carbono a largo plazo, la necesidad de colaboración entre científicos, administraciones, diferentes agentes del sector y una sociedad que cada vez está más sensibilizada con la calidad del producto del que se alimenta y en sus repercusiones ambientales, sociales y económicas. Por otro, programas de transferencia de conocimientos, romper algunas barreras culturales y enfrentar diferentes problemáticas sociales y desarrollar políticas públicas que garanticen su éxito. Todo ello cuestiones que exceden las limitaciones propias de este trabajo.

El suelo tiene una gran capacidad de almacenamiento de carbono y sus límites están aún por conocer. Pero su capacidad es reversible; es posible mejorar el estado en el que se encuentran, pero manejos inadecuados pueden seguir con su degradación.

5. BIBLIOGRAFIA

Abdalla, M., Osborne, B., Lanigan, G., Forristal, D., Williams, M., Smith & Jones, 2013. Conservation tillage systems: a review of its consequences for greenhouse gas emissions. *Soil Use Manag.*

Aguilera, E., Lassaletta, L., Gattingerd, A., Gimeno, BS., 2013. Managing soil carbon for climate change mitigation and adaptation in Mediterranean cropping systems: A meta-analysis. *Agriculture Ecosystems and Environment* 168:25-36.

Ashford DL, Reeves DW. Use of a mechanical roller crimper as an alternative kill method for cover crop. *Am J Altern Agric.* 2003; 18: 37–45.

Badgery, W.B., Simmons, A.T., Murphy, B.W., Rawson, A., Andersson, K.O., Lonergan, V.E., 2014. The influence of land use and management on soil carbon levels for crop-pasture systems in Central New South Wales, Australia. *Agric. Ecosyst. Environ.* 196.

Bais HP, Loyola Vargas VM, Flores HE, Vivanco JM (2001) Root specific metabolism: the biology and biochemistry of underground organs. *In vitro Cell Dev Biol Plant* 37: 730–741

Banwart et al., 2015. *Soil Carbon: Science, Management and Policy for Multiple Benefits*. SCOPE Series, Vol. 71, CABI, Wallingford, UK.

Bardgett, R.D., and E. McAlister., 1999. The measurement of soil fungal: bacterial biomass ratios as an indicator of ecosystem self-regulation in temperate meadow grasslands. *Biology and Fertility of Soil* 29:282-290.

Baumert, V., Vasilyeva, N., Vladimirov, A., Meier, I., Kögel-Knabner, I., Mueller, C., 2018. Root Exudates Induce Soil Macroaggregation Facilitated by Fungi in Subsoil. *Frontiers in Environmental Science.* 6. 10.3389/fenvs.2018.00140.

Benner, R., 2011. Biosequestration of carbon by heterotrophic microorganisms. *Nature Reviews Microbiology*, 9, 75. <https://doi.org/10.1038/nrmicro2386-c3>

Black, K., Byrne, K.A., Mencuccini, M., Tobin, B., Nieuwenhuis, M., Reidy, B., Bolger, T., Saiz, G., Green, C., Farrell, E.T., Osborne, B., 2009. Carbon stock and stock changes across a Sitka spruce chronosequence on surface-water gley soils. *Forestry* 82, 255–272.

Blanco-Canqui, H., 2013. Crop Residue Removal for Bioenergy Reduces Soil Carbon Pools: How Can We Offset Carbon Losses? *BioEnergy Res.* 6, 358–371.

Blum, W., 2005. Soils and climate change. *J. Soils Sediments* 5, 67–68.

Brakas, S.G., Aune, J.B., 2011. "Biomass and carbon accumulation in land use systems of Claveria, the Philippines." In Carbon Sequestration Potential of Agroforestry Systems, ed. B. M. Kumar and P. K. R. Nair, pp. 163-175. Springer Netherlands.

Bryant, L., 2015. "Organic Matter Can Improve Your Soil's Water Holding Capacity." NRDC Expert Blog. <https://www.nrdc.org/experts/lara-bryant/organic-matter-can-improve-your-soils-water-holding-capacity>

Boller, E., Hani, F., Poehling, Editors., 2004: Ecological infrastructures.: Ideabook on functional biodiversity at the farm level. IOBC, OILB, Mattenbach AG. Winterthur, Switzerland.

Bonaudo, T., Amaury Burlamaqui B., Sabatier, R., Ryschawy, J., Bellon, S., Leger, F., Magda, D., TichiT, M., , 2014. Agroecological principles for the redesign of integrated crop– livestock systems. *Eur. J. Agron.* 57, 43–5.

Bot, A. & Benites, Jesus, 2005. The importance of soil organic matter. *FAO Soils Bulletin.* 80.

Bunch, R., Berkelaar, D., Motis, T., Bunch, J., Swartz, S, 2019. Restoring the Soil: How to Use Green Manure/Cover Crops to Fertilize the Soil and Overcome Droughts; ECHO Incorporated, 2019; ISBN 978-1-946263-30-8.

Buyse, P., Roisin, C., Aubinet, M., 2013. Fifty years of contrasted residue management of an agricultural crop: impacts on the soil carbon budget and on soil heterotrophic respiration. *Agric. Ecosyst. Environ.* 167, 52–59.

Burgess P.J., Harris J., Graves A.R., Deeks L.K., 2019. Regenerative Agriculture: Identifying the Impact; Enabling the Potential. Report for SYSTEMIQ. 17 May 2019. Bedfordshire, UK: Cranfield University.

Canali, S., Campanelli, G., Ciaccia, C., Leteo, F., Testani, E., Montemurro, F. (2013). Conservation tillage strategy based on the roller crimper technology for weed control in Mediterranean vegetable organic cropping systems. *European Journal of Agronomy.* 50.

Cardinael, R., Mao, Z., Prieto, I., Stokes, A., Dupraz, C., Kim, J., Jourdan, C., (2015). Competition with winter crops induces deeper rooting of walnut trees in a Mediterranean alley cropping agroforestry system. *Plant and Soil.* 391. 10.1007/s11104-015-2422-8.

Chabbi, A., Lehmann, J., Ciais, P., Loescher, H., Cotrufo, M.F., Don, A., Sancléments, M., Schipper, Louis & Six, J. & Smith, P & Rumpel, Cornelia. (2017). Aligning agriculture and climate policy. *Nature Climate Change.* 7.

Chan, K.Y., Conyers, M.K., Li, G.D., Helyar, K.R., Poile, G., Oates, A., Barchia, I.M., 2011. Soil carbon dynamics under different cropping and pasture management in temperate Australia: results of three long-term experiments. *Soil Res.* 49, 320–328.

Comis, 2002. Glomalin: Hiding Place for a Third of the World's Stored Soil Carbon, Agricultural Research, <http://agresearchmag.ars.usda.gov/2002/sep/soil>

Conant, R. T., Paustian, K. & Elliott, E. T. 2001. Grassland management and conversion into grassland: effects on soil carbon. *Ecol. Appl.*

Conant, R., Six, J. & Paustian, K. 2003. Land use effects on soil carbon fractions in the southeastern United States. I. Management-intensive versus extensive grazing. *Biol. Fertility Soils* 38, 386–392.

Cong, W., Hoffland, E., Li, L., Six, J., Sun, J., Bao, X., Zhang, F., Derwerf, W., 2014. Intercropping enhances soil carbon and nitrogen. *Global Change Biology.* 21. 10.1111/gcb.12738.

Cotrufo, M. F., Wallenstein, M. D., Boot, C. M., Deneff, K., & Paul, E., 2013. The Microbial Efficiency-Matrix Stabilization (MEMS) framework integrates plant litter decomposition with soil organic matter stabilization: Do labile plant inputs form stable soil organic matter? *Global Change Biology*, 19, 988–995.

Clemmensen KE., Ovaskainen O., Dahlberg A., Ekblad A., Wallander H., Stenlid J., Finlay RD., Wardle DA., Lindahl BD., 2013. Roots and Associated Fungi Drive Long-Term Carbon Sequestration in Boreal Forest. *Science* 339, 1615–1618.

Crippa, M., Solazzo, E., Guizzardi, D., Monforti, F., Tubiello, F., Leip, A., 2021. Food systems are responsible for a third of global anthropogenic GHG emissions. *Nature Food.* 2. 1-12. 10.1038/s43016-021-00225-9.

Crowder, DW., Northfield, TD., Strand, MR., Snyder, WE., 2010. Organic agriculture promotes evenness and natural pest control. *Nature* 466, 109–112.

Daxl, R.; von Kayserlingk, N.; Klien-Koch, C.; Link, R.; Waibel, H. 1994: Integrated pest management: Guidelines. Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit. Eschborn,

Delgado, JA., Groffman PM., Nearing, MA, Goddard, T., Reicosky, D., Lal, R., Kitchen, NR., Rice, CW., Towery, D., Salon, P., 2011. Conservation practices to mitigate and adapt to climate change. *Journal of Soil and Water Conservation* 66:118A-129A

De Moraes Sá, J.C., Séguy, L., Tivet, F., Lal, R., Bouzinac, S., Borszowski, PR., Briedis, C., Burkner dos Santos, J., Da Cruz Hartman, D., Bertoloni, CG., Rosa, J.,

Friedrich, T., 2013. Carbon Depletion by Plowing and Its Restoration by No-Till Cropping Systems in Oxisols of Subtropical and Tropical Agro-Ecoregions in Brazil. Land Degrad. Dev.

De Ponti, T., Rijk, B., van Ittersum, MK., 2012. The crop yield gap between organic and conventional agriculture. Agric. Syst. 108, 1–9.

DeRamus, HA., Clement, TC., Giampola, DD., Dickison, PC., 2003. "Methane Emissions of Beef Cattle on Forages: Efficiency of Grazing Management Systems." J. Environ. Qual. 32:269–277

Derner, Justin & Schuman, G.E., 2007. Carbon sequestration and rangelands: A synthesis of land management and precipitation effects. Journal of Soil and Water Conservation. 62.

Derpsch, R. R., 1991. Controle da erosão no Paraná, Brazil: Sistemas de cobertura do solo, plantio directo e prepare conservacionista do solo. Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ) GmbH. Eschborn, SP 245, Germany.

Doran, J. W., and Parkin, T. B., 1994. "Defining soil quality for a sustainable environment," in *Biological Indicators of Soil Health*, eds C. Pankhurst, B. Doube, and V. Gupta (Wallingford: CAB International), 1–28.

Dungait, J., Hopkins, D., Gregory, A., Whitmore, A., 2012. Soil organic matter turnover is governed by accessibility not recalcitrance. Global Change Biology. 18. 1781-1796.

Eisenhauer, N., Lanoue, A., Strecker, T., Scheu, S., Steinauer, K., P. Thakur, M., Mommer, L., 2017. Root biomass and exudates link plant diversity with soil bacterial and fungal biomass. Sci Rep 7, 44641 doi:10.1038/srep44641

FAO 2010." Challenges and opportunities for Carbon sequestration in Grassland systems: Technical Report on grassland management and climate mitigation."

FAO and ITPS. 2015. Status of the World's Soil Resources (SWSR) – Technical Summary. Food and Agriculture Organization of the United Nations and Intergovernmental Technical Panel on Soils, Rome, Italy

Feldman, M., 2020. Regenerative Farming and the Green New Deal. <https://www.dataforprogress.org/memos/regenerative-agriculture-and-the-green-new-deal>

Fisher, M., Rao, I., Ayarza, M., Lascano, C., Sanz, JI., Thomas, R., Vera, R., 1994. Carbon storage by introduced deep-rooted grasses in the South American Savannas. Nature. 371. 236-238. 10.1038/371236a0.

Frank & Groffman, 1998. Ungulate vs. landscape control of soil C and N processes in grasslands of Yellowstone National Park. *Ecology* 79, 2229–2241.

Franzluebbers, A. & Stuedemann, J., 2008. Soil physical responses to cattle grazing cover crops under conventional and no tillage in the Southern Piedmont USA. *Soil Tillage Res.* 100, 141–153.

Franzluebbers, A.J., 2010. Achieving soil organic carbon sequestration with conservation agricultural systems in the southeastern United States. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 74, 347–357.

Finney & Kaye, 2017. Functional diversity in cover crop polycultures increases multifunctionality of an agricultural system. *J. Appl. Ecol.* 54, 509–517.

Fuss, S., Lamb, W.F., Callaghan, M.W., Hilaire, J., Creutzig, F., Amann, T., Beringer, T., Garcia, W.D., Hartmann, J., Khanna, T., Luderer, G., Nemet, G.F., Rogelj, J., Smith, P., Vicente, J.L.V., Wilcox, J., Dominguez, M.D.Z., Minx, J.C., 2018. Negative emissions--Part 2: Costs, potentials and side effects. *Environmental Research Letters* 13(6).

Galloway, J.N., Townsend, A.R., Erisman, J.W., Bekunda, M., Cai, Z., Freney, J.R., Martinelli, L.A., Seitzinger, S.P., Sutton, M.A., 2008. Transformation of the nitrogen cycle: recent trends, questions, and potential solutions. *Science* 320, 889–892.

Gattinger, A., A. Muller, M. Haeni, C. Skinner, A. Fliessbach, N. Buchmann, P. Mäder, M. Stolze, P. Smith, N. El-Hage Scialabba, and U. Niggli. 2012. Enhanced top soil carbon stocks under organic farming. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 109:18226-18231.

Garrity, D.P., Akinnifesi, F., Ajayi, O., Sileshi, G., Mowo, J., Antoine, K., Mahamane, L., Bayala, J., 2010. Evergreen Agriculture: A robust approach to sustainable food security in Africa. *Food Security*. 2. 197-214. 10.1007/s12571-010-0070-7.

Gerber, P.J., Steinfeld, H., Henderson, B., Mottet, A., Opio, C., Dijkman, J., Falcucci, A. & Tempio, G., 2013. Tackling climate change through livestock – A global assessment of emissions and mitigation opportunities. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Rome.

Gerrish, J., 2004. Management-Intensive Grazing: The Grassroots of Grass Farming. Green Park Press, Ridgeland, MO, USA.

Griscom, B. W., J. Adams, P. W. Ellis, R. A. Houghton, G. Lomax, D. A. Miteva, W. H. Schlesinger, D. Shoch, J. V. Siikamaki, P. Smith, P. Woodbury, C. Zganjar, A. Blackman, J. Campari, R. T. Conant, C. Delgado, P. Elias, T. Gopalakrishna, M. R. Hamsik, M. Herrero, J. Kiesecker, E. Landis, L. Laestadius, S. M. Leavitt, S. Minnemeyer, S. Polasky,

P. Potapov, F. E. Putz, J. Sanderman, M. Silvius, E. Wollenberg, and J. Fargione., 2017. Natural climate solutions. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 114(44):11645- 11650. DOI: 10.1073/pnas.1710465114.

Gosnell, H., Gill, N., Voyer, M., 2019. Transformational adaptation on the farm: Processes of change and persistence in transitions to ‘climate-smart’ regenerative agriculture. *Global Environmental Change*. 59.

Goulding, K.W.T., Poulton, P.R., 2005. The missing link. *Geoscientist* 15, 4–7.

Hamilton & Frank, 2001. Can plants stimulate soil microbes and their own nutrient supply? Evidence from a grazing tolerant grass. *Ecology* 82, 2397–2402

Han, E., Kautz, T. & Köpke, U., 2016. Precrop root system determines root diameter of subsequent crop. *Biol. Fertil. Soils* 52, 113–118.

Hawken, P., Frischmann, C., Bayuk, K., Mehra, M., Gouveia, J., Zame, K., Mukkavilli, s. Karthik., 2017. Drawdown: The Most Comprehensive Plan Ever Proposed to Reverse Global Warming.

Hargrove, W. L., & Frye, W. W., 1987. The need for legume cover crops in conservation tillage production. In J. F. Power (Ed.), *The Role of Legumes in Conservation Tillage Systems* (pp. 1-5). Ankeny, Iowa: Soil Conservation Society of America.

Hepperly, P., Seidel, R., Pimentel, D., Hanson, J., and D. Douds, Jr., 2007. Organic farming enhances soil carbon and its benefits. Pages 129-153 in *Soil Carbon Management: Economic, Environmental, and Soci-etal Benefits*, J. Kimble, C. Rice, D. Reed, S. Mooney, R. Follet, and R. Lal eds. CRC Press, Boca Raton, 268 p.

Hepperly, P., Lotter, D., Ulsh, C. Z., Seidel, R. & Reider, C., 2009. Compost, Manure and Synthetic Fertilizer. Influences Crop Yields, Soil Properties, Nitrate Leaching and Crop Nutrient Content. *Compost Sci. Util.* 17, 117–126.

Hou, D., O’Connor, D., Igalavithana, AD., Alessi, DS., Luo, J., W. Tsang, DC., Sparks, DL., Yamauchi, Y., Rinklebe, J., Yong Sik Ok, 2020. Metal contamination and bioremediation of agricultural soils for food safety and sustainability. *Nat Rev Earth Environ* 1, 366–381 (2020). <https://doi.org/10.1038/s43017-020-0061-y>

Houghton & Nassikas, 2017. Global and regional fluxes of carbon from land use and land cover change 1850-2015: Carbon Emissions From Land Use. *Glob. Biogeochem. Cycles* 31, 456–472.

Ingham, E., 2006. How the soil food web and compost increase soil organic matter content. in *Org.-Solut. Clim. Change* 13.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), 2000. Land Use, Land-Use Change, and Forestry. R. T. Watson, I. R. Noble, B. Bolin, N. H. Ravindranath, D. J. Verardo, and D. J. Dokken, eds. Cambridge, UK: Cambridge University Press.

IPCC, 2014. Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Cambridge, UK and New York, USA

IPCC, 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge and New York (2014).

IPCC, 2018: Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty.

IPCC, 2018. Special Report on Climate Change, Desertification, Land Degradation, Sustainable Land Management, Food Security, and Greenhouse gas fluxes in Terrestrial Ecosystems.

IPCC, 2021. Climate Change 2021: The Physical Science Basis.

Itzkan, Seth. 2014. Upside Drawdown – The Potential of Restorative Grazing to Mitigate Global Warming by Increasing Carbon Capture on Grasslands. Draft for comment v0.9.5. Somerville, Massachusetts: Planet-TECH Associates.

Jamali, H., S.J. Livesley, S.P. Grover, T.Z. Dawes, L.B. Hutley, G.D. Cook, and S.K.Arndt. The importance of termites to the CH₄ balance of a tropical savanna woodland of northern Australia. *Ecosystems* 14:698-709.

Jastrow, JD., Amonette, JE., Bailey, VL., 2006. Mechanisms controlling soil carbon turnover and their potential application for enhancing carbon sequestration, *Climatic Change* 80:5-23

Jin, L., Li, Y., Gao, Q., Liu, Y., Wan, Y., Qin, X., Shi, F., 2008. Estimate of carbon sequestration under cropland management in China. *Sci. Agric. Sin.* 41, 734–743.

Joffre, R., Rambal, Serge, 1993. How Tree Cover Influences the Water Balance of Mediterranean Rangelands. *Ecology*. 74. 570-582. 10.2307/1939317.

Jones, CE., 2011. Carbon that Counts (in publication). For preliminary data on Dr Christine Jones research at Winona: <http://www.ofa.org.au/papers/JONES-Carbon-that-counts-20Mar11.pdf>

Johnson, D., Ellington, J., Eaton, W., 2015. Development of soil microbial communities for promoting sustainability in agriculture and a global carbon fix. Peer J PrePrints 3:e789v1

Kästner, M., & Miltner, A., 2018. SOM and microbes—What is left from microbial life. In C. Garcia, P. Nannipieri & T. Hernandez (Eds.), *The future of soil carbon* (pp. 125–163). San Diego, CA: Academic Press.

Kallenbach, CM., Frey, SD., Grandy, AS., 2016. Direct evidence for microbial-derived soil organic matter formation and its ecophysiological controls. Nat Commun 7, 13630

Kassam, A., Friedrich, T., Derpsch, R. & Kienzle, J., 2015. Overview of the Worldwide Spread of Conservation Agriculture.

Kinsella, J., 1995, The effect of various tillage systems in soil compaction, p:15-17. In. Farming for a Better Environment. A White Paper, SWCS. Ankeny, Iowa, USA.

Khan, SA., Mulvaney, RL., Ellsworth, TR., Boast, CW., 2007. “The Myth of Nitrogen Fertilization for Soil Carbon Sequestration,” Journal of Environmental Quality. Vol. 36 No. 6, 1821-1832.

Khorramdel, S., Koocheki, A., Nassiri Mahallati, M., Khorasani, R. & Ghorbani, R., 2013. Evaluation of carbon sequestration potential in corn fields with different management systems. Soil Tillage Res. 133, 25–3.

Kornecki TS, Price AJ, Rapel RL, Bergtold JS. Effectiveness of different herbicide applicators mounted on a roller/crimper for accelerated rye cover crop termination. Appl Eng Agric. 2009; 25: 819–826.

Kullik, 2016. Scenario for agricultural land-use based on a Keyline cultivation pattern: The Schloss Tempelhof community in Germany. 10.13140/RG.2.2.27740.18566.

Lal, R., and Bruce, JP., 1999. The potential of world cropland soils to sequester C and mitigate the greenhouse effect. Environmental Science & Policy 2(2):177-185.

Lal, R., 2004. Soil carbon sequestration to mitigate climate change. Geoderma 123, 1–22.

Lal, R., 2004. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. Science 304(5677):1623-162

Lal, R., Follett, R., Stewart, B.A., Kimble, J., 2007. Soil Carbon Sequestration to Mitigate Climate Change and Advance Food Security. *Soil Science*. 172. 943-956. 10.1097/ss.0b013e31815cc498.

Lal, R., 2008. Carbon sequestration. *Philosophical transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological sciences*. 363. 815-30. 10.1098/rstb.2007.2185.

Lal, R., 2011. "[Sequestering carbon in soils of agro-ecosystems](#)," *Food Policy*, Elsevier, vol. 36(S1), pages 33-39.

Lal, R., 2013. Soil carbon management and climate change. <http://dx.doi.org/10.4155/cmt.13.31>

Larson, W. E., and Pierce, F. J., 1994. "The dynamics of soil quality as a measure of sustainable management," in *Defining Soil Quality for a Sustainable Environment*, eds J. W. Doran, D. C. Coleman, D. F. Bezdicek, and B. A. Stewart (Madison, WI: Soil Science Society of America and American Society of Agronomy), 37–51.

Leake, J., Johnson, D., Donnelly, D., Muckle, G., Boddy, L., Read, D., 2004. Networks of power and influence: the role of mycorrhizal mycelium in controlling plant communities and agroecosystem functioning. *Canadian Journal of Botany*, 82: 1016-1045

Lemaire, G., Franzluebbers, A., Carvalho, P. C. de F. & Dedieu, B., 2014. Integrated crop– livestock systems: Strategies to achieve synergy between agricultural production and environmental quality. *Agric. Ecosyst. Environ.* 190, 4–8.

Le Quéré, C., Moriarty, R., Andrew, R. M., Peters, G. P., Ciais, P., Friedlingstein, P., Jones, S. D., Sitch, S., Tans, P., Arneeth, A., Boden, T. A., Bopp, L., Bozec, Y., Canadell, J. G., Chini, L. P., Chevallier, F., Cosca, C. E., Harris, I., Hoppema, M., Houghton, R. A., House, J. I., Jain, A. K., Johannessen, T., Kato, E., Keeling, R. F., Kitidis, V., Klein Goldewijk, K., Koven, C., Landa, C. S., Landschützer, P., Lenton, A., Lima, I. D., Marland, G., Mathis, J. T., Metzl, N., Nojiri, Y., Olsen, A., Ono, T., Peng, S., Peters, W., Pfeil, B., Poulter, B., Raupach, M. R., Regnier, P., Rödenbeck, C., Saito, S., Salisbury, J. E., Schuster, U., Schwinger, J., Séférian, R., Segschneider, J., Steinhoff, T., Stocker, B. D., Sutton, A. J., Takahashi, T., Tilbrook, B., van der Werf, G. R., Viovy, N., Wang, Y.-P., Wanninkhof, R., Wiltshire, A., and Zeng, N.: Global carbon budget 2014, *Earth Syst. Sci. Data*, 7, 47–85.

Le Quéré, C., Andrew, R. M., Friedlingstein, P., Sitch, S., Pongratz, J., Manning, A. C., Korsbakken, J. I., Peters, G. P., Canadell, J. G., Jackson, R. B., Boden, T. A., Tans, P. P., Andrews, O. D., Arora, V. K., Bakker, D. C. E., Barbero, L., Becker, M., Betts, R. A., Bopp, L., Chevallier, F., Chini, L. P., Ciais, P., Cosca, C. E., Cross, J., Currie, K., Gasser, T., Harris, I., Hauck, J., Haverd, V., Houghton, R. A., Hunt, C. W., Hurtt, G., Ilyina, T., Jain, A. K., Kato, E., Kautz, M., Keeling, R. F., Klein Goldewijk, K., Körtzinger, A.,

Landschützer, P., Lefèvre, N., Lenton, A., Lienert, S., Lima, I., Lombardozzi, D., Metzl, N., Millero, F., Monteiro, P. M. S., Munro, D. R., Nabel, J. E. M. S., Nakaoka, S., Nojiri, Y., Padin, X. A., Pregon, A., Pfeil, B., Pierrot, D., Poulter, B., Rehder, G., Reimer, J., Rödenbeck, C., Schwinger, J., Séférian, R., Skjelvan, I., Stocker, B. D., Tian, H., Tilbrook, B., Tubiello, F. N., van der Laan-Luijkx, I. T., van der Werf, G. R., van Heuven, S., Viovy, N., Vuichard, N., Walker, A. P., Watson, A. J., Wiltshire, A. J., Zaehle, S., and Zhu, D.: Global Carbon Budget 2017, *Earth Syst. Sci. Data*, 10, 405–448.

Liang, C., Schimel, JP., Jastrow, JD., 2017. The importance of anabolism in microbial control over soil carbon storage. *Nature Microbiology*. 2. 17105. 10.1038/nmicrobiol.2017.105.

Liang, Chao & Amelung, Wulf & Lehmann, Johannes & Kaestner, Matthias, 2019. Quantitative assessment of microbial necromass contribution to soil organic matter. *Global Change Biology*. 25. 10.1111/gcb.14781.

Lotter, D. W., 2003. Organic Agriculture. *J. Sustain. Agric.* 21, 59–128.

Lotter, D., Seidel, R., Liebhardt, W., 2003. The performance of organic and conventional cropping systems in an extreme climate year. *American Journal of Alternative Agriculture*.

Lu, YC, KB Watkins, Teasdale JR, AA y Abdul-Baki. 2000. Cubiertas vegetales en producción sostenible de alimentos. *Food Internacional* 16:121-157.

Lugato, E., Leip, A. & Jones, A. Mitigation potential of soil carbon management overestimated by neglecting N₂O emissions. *Nature Clim Change* **8**, 219–223 (2018).

Lundgren, J. G. & Fausti, S. W. 2015. Trading biodiversity for pest problems. *Sci. Adv.* 1, e1500558–e1500558.

Luske, B. & van der Kamp, J. 2009. Carbon sequestration potential of reclaimed desert soils in Egypt. (Louis Bolk Instituut / Soil and more).

Macedo, M., 2009. Integração lavoura e pecuária: o estado da arte e inovações tecnológicas. *Revista Brasileira De Zootecnia-brazilian Journal of Animal Science - REV BRAS ZOOTECA*. 38. 10.1590/S1516-35982009001300015.

Machmuller, M., Kramer, M., Cyle, T., Nick Hill, N., Hancock, D., Thompson, A., 2015. Emerging land use practices rapidly increase soil organic matter. *Nat. Commun.* 6, 6995.

Mangalassery, S. Sjögersten, C. S. D.L. Sparkes, J. Craigon and S. Mooney, “To what extent can zero tillage lead to a reduction in greenhouse gas emissions from temperate soils?” *Scientific Reports*, vol. 4, p. 4586, 2014.

Miltner, A., Bombach, P., Schmidt-Brücken, B., Kästner, M., 2012. SOM genesis: Microbial biomass as a significant source. *Biogeochemistry*, 111, 41–55. <https://doi.org/10.1007/s10533-011-9658-z>

Minasny, B., Malone, B.P., McBratney, A.B., Angers, D.A., Arrouays, D., Chambers, A., Chaplot, V., Chen, Z.S., Cheng, K., Das, B.S., Field, D.J., Gimona, A., Hedley, C.B., Hong, S.Y., Mandal, B., Marchant, B.P., Martin, M., McConkey, B.G., Mulder, V.L., O'Rourke, S., Richer-de-Forges, A.C., Odeh, I., Padarian, J., Paustian, K., Pan, G., Poggio, L., Savin, I., Stolbovoy, V., Stockmann, U., Sulaeman, Y., Tsui, C.-C., Vågen, T.-G., van Wesemael, B., Winowiecki, L., 2017. Soil carbon 4 per mille. *Geoderma* 292, 59–86.

Moyer, F., Smith, A., Rui, Y., Hayden, J., 2020. *Regenerative Organic Agriculture and the Soil Carbon Solution*. Rodale Institute

Mulvaney R. L., Khan S. A. and Ellsworth T. R., 2009, Synthetic Nitrogen Fertilizers Deplete Soil Nitrogen: A Global Dilemma for Sustainable Cereal Production, *Journal of Environmental Quality* 38:2295-2314 (2009): 10.2134/jeq2008.0527, American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, and Soil Science Society of America 677 S. Segoe Rd., Madison, WI 53711 USA

Nair, Pk, Nair, V., Mohan Kumar, B., Showalter, J., 2010. Carbon Sequestration in Agroforestry Systems. *Advances in Agronomy*. 108. 237-307. 10.1016/S0065-2113(10)08005-3.

Nichols & Millar, 2013. Glomalin and Soil Aggregation under Six Management Systems in the Northern Great Plains, USA, *Open Journal of Soil Science*, Vol 3, No. 8.

Neely & Fynn, 2011. "Critical choices for crop and livestock production systems that enhance productivity and build ecosystem resilience," SOLAW (The State of the World's Land and Water Resources for Food and Agriculture) Background Thematic Report – TR11, FAO, n.d.

Nordborg, Maria & Rööf, Elin., 2016. Holistic management – a critical review of Allan Savory's grazing method.

Oades, 1984. Soil organic matter and structural stability: mechanisms and implications for management. *Plant Soil* 76, 319–337.

Panagos P, Borrelli P, Poesen J, Ballabio C, Meusburger K, Lugato E, Montanarella L, Alewell C. The new assessment of soil loss by water erosion in Europe. *ENVIRONMENTAL SCIENCE and POLICY* 54; 2015. p. 438-447. JRC95175

Paustian, K., Cole, C.V., Sauerbeck, D., Sampson, N., 1998. CO₂ mitigation by agriculture: An overview. *Climatic Change* 40(1):135-162.

Paustian, K., Lehmann, J., Ogle, S., Reay, D., Robertson, G.P., Smith, P., 2016. Climate-smart soils. *Nature*. 532. 49-57. 10.1038/nature17174.

Pidcock, R & Mcsweeney, R, 2021. Carbon Brief. <https://www.carbonbrief.org/mapped-how-climate-change-affects-extreme-weather-around-the-world>

Pierret, A., Maeght, J.L., Clément, C., Montoroi, J.P., Hartmann, C., Gonkhamdee, S., 2016. Understanding deep roots and their functions in ecosystems: an advocacy for more unconventional research. *Ann. Bot.* 118, 621–635.

Pieterse, C., Zamioudis, C., Berendsen, R., Weller, D., Van Wees, S., Bakker, P., 2014. Induced Systemic Resistance by Beneficial Microbes. *Annual review of phytopathology*. 52. 347-375. 10.1146/annurev-phyto-082712-102340.

Pimentel, D., Hepperly, P., Hanson, J., Douds, D. & Seidel, R. 2005. Environmental, energetic, and economic comparisons of organic and conventional farming systems. *BioScience* 55, 573–582.

Pribyl, 2010. A critical review of the conventional SOC to SOM conversion factor. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2010.02.003>

Poepflau, C.; Don, A. Carbon sequestration in agricultural soils via cultivation of cover crops – A meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 2015, 200, 33–41.

Post, W.M. & Kwon, Kyung., 2008. Soil Carbon Sequestration and Land-Use Change: Processes and Potential. *Global Change Biology*. 6. 317 - 327.

Porter, G. A., Bradbury, W. B., Sisson, J. A., Opena, G. B. & McBurnie, J. C. 1999. Soil Management and Supplemental Irrigation Effects on Potato: I. Soil Properties, Tuber Yield, and Quality. *Agron. J.* 91, 416.

Powlson, D.s & Whitmore, A.P & Goulding, Keith., 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. 42 - 55.

Rasse, D. P., Rumpel, C. & Dignac, M.-F. 2005. Is soil carbon mostly root carbon? Mechanisms for a specific stabilisation. *Plant Soil* 269, 341–356.

Reid, W., Mooney, H., Cropper, A., Capistrano, D., Carpenter, S., Chopra, K., Dasgupta, P., Dietz, T., Duraiappah, A., Hassan, R., Kasperson, R., Leemans, R., May, R.,

McMichael, A., Pingali, P., Samper, C., Scholes, R., Watson, R., Zakri, A.H., Zurek, M., 2005. Millenium Ecosystem Assessment Synthesis Report.

Roesch-Mcnally, G., Basche, A., Arbuckle Jr, J., Tyndall, J., Miguez, F., Bowman, T., Clay, R., 2017. The trouble with cover crops: Farmers' experiences with overcoming barriers to adoption. *Renewable Agriculture and Food Systems*. 33. 1-12.

Rosenstock, T., Wilkes, A., Jallo, C., Namoi, N., Bulusu, M., Suber, M., Mboi, D., Mulia, R., Simelton, E., Richards, M., Gurwick, N., Wollenberg, E., 2019. Making trees count: Measurement and reporting of agroforestry in UNFCCC national communications of non-Annex I countries. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 284.

Ryals, R. & Silver, W. L, 2013. Effects of organic matter amendments on net primary productivity and greenhouse gas emissions in annual grasslands. *Ecol. Appl.* 23, 46–59.

Ryals, R., Eviner, V., Stein, C., Suding, K., Silver, W, 2016. Grassland compost amendment increase plant production without changing plant communities. *Ecosphere* 7

Sacks, A., Teague, W.R., Provenza, F., Itzkan, S., Laurie, J., 2014. Reestablishing the Evolutionary Grassland–Grazer Relationship to Restore Atmospheric Carbon Dioxide to Preindustrial Levels. 10.1201/b13788-10.

Sarvade, S., 2019. Agroforestry and Soil Health: An Overview.

Sanderman, J., Farquharson, R., Baldock, J., 2010. Soil carbon sequestration potential: a re- view for Australian agriculture. A report prepared for the Department of Climate Change and Energy Efficiency CSIRO National Research Flagships.

Sanderman, J., Hengl, T., Fiske, GL., 2018. Soil carbon debt of 12,000 years of human land use. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 114, 9575–9580.

Sanderson, M., Archer, D., Hendrickson, J.R., Kronberg, S., Liebig, M., Nichols, K., Schmer, M., Tanaka, D., Aguilar, J., 2013. Diversification and ecosystem services for conservation agriculture: Outcomes from pastures and integrated crop-livestock systems – Corrigendum. *Renewable Agriculture and Food Systems*. 28.

Savory, A., Butterfield, J., 1999. *Holistic Management: A New Framework for Decision Making*, Island Press.

Savory, A., 2015. Restoring the climate through capture and storage of soil carbon through Holistic Planned Grazing. Savory Institute.

Schmidt, M., Torn, M., Abiven, S., Dittmar, T., Guggenberger, G., Janssens, I., Kleber, M., Kögel-Knabner, I., Lehmann, J., Manning, D., Nannipieri, P., Rasse, D., Weiner, S.,

Trumbore, S., 2011. Persistence of Soil Organic Matter as an Ecosystem Property. *Nature*. 478. 49-56. 10.1038/nature10386.

Searchinger, T., Waite, R., Hanson, C., Ranganathan, J., Dumas, P., Matthews, E., 2019. World Resources Report: Creating a Sustainable Food Future (Final Report).

Seeberg-Elverfeldt, Christina and Marja-Lisa Tapio-Bistrom., 2012. "Agricultural Mitigation Approaches for Smallholders." *Climate Change Mitigation and Agriculture*, ed. E. Wollenberg, M. Tapio-Biström, M. Grieg-Gran and A. Nihart. London: Earthscan.

Schaeffer, A., Nannipieri, P., Kästner, M., Schmidt, B. & Botterweck, J., 2015. From humic substances to soil organic matter—microbial contributions. In honour of Konrad Haider and James P. Martin for their outstanding research contribution to soil science. *J. Soils Sediments* **15**, 1865–1881.

Scharlemann, JPW., VJ Tanner, E., Hiederer, R., Kapos, V., 2014. Global soil carbon: understanding and managing the largest terrestrial carbon pool.

Schipper, L.A., Parfitt, R.L., Fraser, S., Littler, R.A., Baisden, W.T., Ross, C., 2014. Soil order and grazing management effects on changes in soil C and N in New Zealand pastures. *Agric. Ecosyst. Environ.* 184, 67–75.

Shi, L., Feng, W., Xu, J. & Kuzyakov, 2018 Agroforestry systems: Meta-analysis of soil carbon stocks, sequestration processes, and future potentials. *Land Degrad. Dev.* 29, 3886–3897.

Skinner, C., Gattinger, A., Muller, A., Mäder, P., Fließbach, A., Stolze, M., Ruser, R., Niggli, U., 2014. Greenhouse gas fluxes from agricultural soils under organic and non-organic management — A global meta-analysis. *Sci. Total Environ.* 468–469, 553–563.

Skz, A., PrasadVurukonda, S., SandhyaVardharajula, & Shrivastava, M., 2017. Enhancement of drought stress tolerance in crops by plant growth promoting rhizobacteria.

Smith, P., D. Martino, Z. Cai, D. Gwary, H. Janzen, P. Kumar, B. McCarl, S. Ogle, F. O'Mara, C. Rice, B. Scholes, O. Sirotenko, M. Howden, T. McAllister, G. Pan, V. Romanenkov, U. Schneider, S. Towprayoon, M. Wattenbach, and J. Smith. 2008. Greenhouse gas mitigation in agriculture. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 363(1492):789-813. DOI: 10.1098/rstb.2007.2184.

Smith, P., Clark, H., Dong, H., Elsiddig, E.A., Haberl, H., Harper, R., House, J., Jafari, M., 2014. Chapter 11: Agriculture, Forestry and Other Land Use (AFOLU). In *Climate Change 2014: Mitigation*, Edenhofer et al (Eds). Cambridge University Press: Cambridge, UK.

Stanley, P. L., Rowntree, J. E., Beede, D. K., DeLonge, M. S. & Hamm, M. W. 2018. Impacts of soil carbon sequestration on life cycle greenhouse gas emissions in Midwestern USA beef finishing systems. *Agric. Syst.* 162, 249–258.

Steinauer, K., Chatzinotas, A. & Eisenhauer, N., 2016. Root exudate cocktails: the link between plant diversity and soil microorganisms? *Ecol. Evol.* 6, 7387–7396.

Steinauer, Katja & Chatzinotas, Antonis & Eisenhauer, Nico, 2016. Root exudate cocktails: the link between plant diversity and soil microorganisms? *Ecology and Evolution.* 6. 10.1002/ece3.2454.

Steinfeld, H., Gerber, P., Wassenaar, P., Castel, V., Rosales, M., de Haan, C., 2006. *Livestock's Long Shadow: Environmental Issues and Options.* FAO, Rome, Italy.

Stöckle, C., Higgins, S., Kemanian, A., Nelson, R., Huggins, D., Marcos, J., Collins, H., 2012. Carbon storage and nitrous oxide emissions of cropping systems in eastern Washington: A simulation study. *J. Soil Water Conserv.* 67, 365–377.

Sommer, R., D. Bossio., 2014. Dynamics and climate change mitigation potential of soil organic carbon sequestration. *Journal of Environmental Management* 144:83-87.

Soussana, JF., Lutfalla, S., Ehrhardt, F., Rosenstock, T., Lamanna, C., Havlík, P., Richards, M., Wollenberg, E., Chotte, JL., Torquebiau, E., Ciais, P., Smith, P., Lal, R., 2017. Matching policy and science: Rationale for the '4 per 1000 - soils for food security and climate' initiative. *Soil Tillage Res.*

Teague, W.R., Dowhower, S.L., Baker, S.A., Haile, P.B., DeLaune, N., Conover, D.M., 2011. "Grazing Management Impacts on Vegetation, Soil Biota and Soil Chemical, Physical and Hydrological Properties in Tall Grass Prairie." *Agriculture, Ecosystems & Environment* 141(3): 310-322.

Teague, W.R., Provenza, F., Kreuter, U.P., Steffens, T., Barnes, M., 2013. Multi-paddock grazing on rangelands: Why the perceptual dichotomy between research results and rancher experience? *Journal of Environmental Management* 128:699-717.

Teague, R., Barnes, M., 2017. Grazing management that regenerates ecosystem function and grazingland livelihoods. *Afr. J. Range Forage Sci.* 34, 77–86.

Totsche, Kai & Rennert, Thilo & Gerzabek, Martin H. & Kögel-Knabner, Ingrid & Smalla, Kornelia & Spiteller, Michael & Vogel, Hans-Jörg. (2010). Biogeochemical interfaces in soil: The interdisciplinary challenge for soil science. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 173. 88-99. 10.1002/jpln.200900105.

Tong W., Teague WR., Park CS., Bevers S., 2015, GHG Mitigation Potential of Different Grazing Strategies in the United States Southern Great Plains, *Sustainability* 2015, 7, 13500-13521; doi:10.3390/su71013500, ISSN 2071-1050

Udawatta, Ranjith P., Jose, S., 2011. "Carbon sequestration potential of agroforestry practices in temperate North America." In *Carbon Sequestration Potential of Agroforestry Systems*, ed. B. M. Kumar and P. K. R. Nair, pp. 17-42. Springer Netherlands.

Van der Wal, A. & De Boer, W. ,2017. Dinner in the dark: Illuminating drivers of soil organic matter decomposition. *Soil Biology and Biochemistry*, 105: 45-48.

Vicente-Vicente, J.L., García-Ruiz, R., Francaviglia, R., Aguilera, E., Smith, P., 2016. Soil carbon sequestration rates under Mediterranean woody crops using recommended management practices: A meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 235

Vries et al., 2013. Soil food web properties explain ecosystem services across European land use systems. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 110, 14296–14301.

Wang, Q., Li, Y. & Alva, A. 2012. Cover Crops in Mono- and Bioculture for Accumulation of Biomass and Soil Organic Carbon. *J. Sustain. Agric.* 36, 423–439.

Wang, G., Huang, Y., Zhang, W., Yu, Y., Sun, W., 2015. Quantifying carbon input for targeted soil organic carbon sequestration in China's croplands. *Plant Soil* 394 (1- 2).

Wei, W.S., Wang, C.H., Chen, C.L., Chung, R.S., 2015. Accumulation and transformation of soil carbon and nitrogen under different fertilization managements and upland-low- land rotation for 13 years. *Taiwanese J. Agric. Chem. Food Sci.* 53, 9–2.

WMO, 2016: WMO Greenhouse Gas Bulletin. The State of Greenhouse Gases in the Atmosphere Based on Global Observations through 2015. No. 12.

Wells, Michael & Reberg-Horton, s & Mirsky, Steven. (2015). Planting Date Impacts on Soil Water Management, Plant Growth, and Weeds in Cover-Crop-Based No-Till Corn Production. *Agronomy Journal*. 108. 10.2134/agronj2014.0524.

West, Tristram & Six, J., 2007. Considering the influence of sequestration duration and carbon saturation on estimates of soil carbon capacity. *Climatic Change*. 80. 25-41. 10.1007/s10584-006-9173-8.

Yeomans, P. A., 2008. Water for Every Farm. Yeomans Keyline Plan.

Zhalnina et al., 2018. Dynamic root exudate chemistry and microbial substrate preferences drive patterns in rhizosphere microbial community assembly. *Nat Microbiol* 3, 470–480 (2018) doi:10.1038/s41564-018-0129-3