



Organización de las Naciones Unidas
para la Alimentación y la Agricultura

CARBONO ORGÁNICO DEL SUELO

el
potencial
oculto



ALIANZA MUNDIAL
POR EL SUELO

CARBONO ORGÁNICO DEL SUELO

el potencial oculto

AUTORES

Lefèvre Clara
Rekik Fatma
Alcantara Viridiana
Wiese Liesl

EDITORES

Wiese Liesl
Alcantara Viridiana
Baritz Rainer
Vargas Ronald

REVISORES

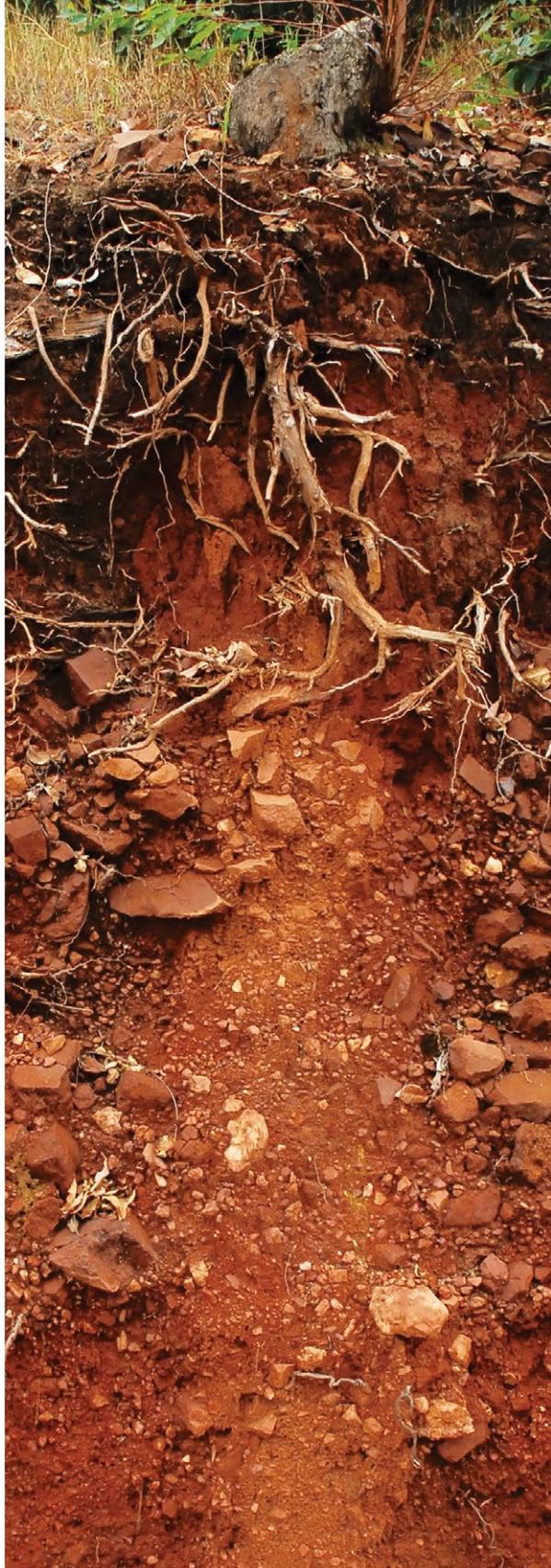
Federici Sandro
Taboada Miguel
Cuevas Rosa
Montanarella Luca

DISEÑO Y PUBLICACIÓN

Sala Matteo
Verbeke Isabelle
Stanco Giulia

TRADUCCIÓN ESPAÑOL

Nofuentes Beatriz



Citación Recomendada:

FAO. 2017. Carbono Orgánico del Suelo: el potencial oculto.
Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura
Roma, Italia

Las denominaciones empleadas y la presentación del material en este producto informativo no implica la expresión de opinión alguna, cualquiera que sea, por parte de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura (FAO) sobre el área legal o de desarrollo de cualquier país, territorio, ciudad o área o de sus autoridades, o concerniendo la delimitación de sus fronteras o límites.

La mención de compañías específicas o productos de manufactureros, sean o no patentados, no implica que estos tengan que estar aprobados o recomendados por la FAO en preferencia a otros de una naturaleza similar que no son mencionadas

Las opiniones expresadas en este producto de información son las del autor (de los autores) y no necesariamente reflejan las opiniones o políticas de la FAO.

ISBN 978-92-5-309681-7

© FAO, 2017

La FAO fomenta el uso, reproducción y la difusión del material en este producto informativo. Excepto donde se indique lo contrario, el material puede ser copiado, descargado e impreso para el estudio privado, investigación y para fines de enseñanza, o para su uso en productos o servicios no comerciales, siempre y cuando el apropiado reconocimiento de la FAO como la fuente y titular de los derechos de autor le sea dado y que no se implique de modo alguno que la FAO aprueba las opiniones de los usuarios, productos o servicios.

Todas las solicitudes por derechos de traducción y adaptación, y para la reventa y otros derechos de uso comercial deberán ser hechos vía [www.fao.org/contact-us/](http://www.fao.org/contact-us/licence-request) licence-request o a la dirección de copyright@fao.org.

Los productos de información de la FAO están disponibles en el sitio web www.fao.org/publications y se pueden adquirir a través de publications-sales@fao.org.

Foto de portada ©FAO/Nicoletta Forlano

Esta publicación ha sido imprimida usando productos y procesos seleccionados a fin de garantizar un impacto ambiental mínimo y promover la gestión sostenible de bosques.

ÍNDICE

Agradecimientos	VIII
Acrónimos	IX
1 · ¿Qué es el COS?	X
1.1 · COS: una parte crucial del ciclo global del carbono	1
1.2 · COS: un componente de la mos	3
1.3 · El suelo: fuente y sumidero de GEI basados en carbono	5
1.3.1 · Dióxido de carbono (CO ₂)	6
1.3.2 · Metano (CH ₄)	6
1.4 · Secuestro de COS	7
2 · El papel del COS para el bienestar humano	10
2.1 · Alcanzando los objetivos de desarrollo sostenible	11
2.2 · COS y biodiversidad	12
2.2.1 · Importancia de la biodiversidad del suelo	12
2.2.2 · Pérdidas de biodiversidad del suelo	13
2.3 · COS, producción alimentaria y suministro de agua	14
2.3.1 · fertilidad del suelo para la producción alimentaria	14
2.3.2 · Influencia del COS en la capacidad de retención del agua y la porosidad	14
2.4 · Efectos del cambio climático en el COS	15
2.4.1 · Efectos del incremento de temperatura y precipitación sobre reservas de COS	15
2.4.2 · Efectos del aumento de la concentración de CO ₂ en la atmósfera	17
2.4.3 · Incertidumbres sobre la respuesta del COS al cambio climático	17
2.5 · Importancia del COS en el marco internacional de mitigación del y adaptación al cambio climático	20
3 · ¿Cuáles son las reservas globales de carbono?	22
3.1 · Reservas globales de carbono actuales	23
3.2 · Zonas críticas y favorables de COS: principales áreas a considerar	25
3.2.1 · Suelos negros	25
3.2.2 · Permafrost	25
3.2.3 · Turberas	27
3.2.4 · Pastizales	28
3.2.5 · Suelo forestal	29
3.2.6 · Zonas áridas	30
4 · Monitoreo, cuantificación, informe y verificación de COS	32
4.1 · Medición, informe y verificación (MRV)	33
4.1.1 · ¿Qué es MRV y para qué se usa?	33
4.1.2 · Guía para informar sobre el COS en inventarios de GEI	34
4.1.2.1 · Uso de la matriz de uso del suelo y cambio en el uso del suelo (UT/CUT)	35
4.1.2.2 · Cálculos diferentes para diferentes tipos de suelo	35
4.1.2.3 · Diferentes niveles de información: uso de niveles metodológicos	36
4.2 · Medición y monitoreo del COS	38
4.2.1 · Medición de COS	38
4.2.1.1 · Métodos de medición del contenido de COS	38

4.2.1.2 • Cálculo de reservas de COS	39
4.2.1.3 • Elementos importantes a considerar para calcular reservas de COS	40
4.2.1.4 • Aumentar la escala de datos de COS	41
4.2.1.5 • Monitoreo de cambios en la reserva de carbono a largo plazo	41
4.2.1.6 • Redes de monitoreo del suelo (RMS)	42
4.2.2 • Dificultades a la hora de medir y monitorear el COS	42
4.2.3 • Verificación de las estimaciones de la reserva de COS	44
5 • Gestión del COS para la producción sostenible de alimentos y la mitigación del y adaptación al cambio climático	46
5.1 • Gestión del COS para la producción sostenible de alimentos	47
5.2 • Gestión del COS para la mitigación del y adaptación al cambio climático	48
5.3 • Desafíos en el secuestro de carbono	51
5.3.1 • Barreras para la adopción de medidas de adaptación y mitigación del cambio climático	51
5.3.1.1 • Barreras financieras	51
5.3.1.2 • Barreras técnicas y logísticas	52
5.3.1.3 • Barreras institucionales	52
5.3.1.4 • Barreras de conocimiento	53
5.3.1.5 • Barreras de recursos	53
5.3.1.6 • Barreras socioculturales	54
5.3.2 • Factores inducidos no antrópicos que limitan el secuestro de COS: factores abióticos	55
6 • ¿Qué sigue? Puntos a considerar	58
Referencias	60
Anexos	72
Anexo 1: Principales métodos para la determinación del contenido de COS	72
Anexo 2: Ejemplos de sistemas actuales de monitoreo nacionales de COS (lista no exhaustiva)	74

RECUADROS

Recuadro 1 · Sensibilidad de los lugares críticos y favorables para el cambio climático	18
Recuadro 2 · Principales acuerdos y decisiones relativas al cambio climático considerando los suelos	21
Recuadro 3 · Cálculo de la reserva de COS para diferentes tipos de suelos	39
Recuadro 4 · Soluciones propuestas para superar las barreras	55

TABLAS

Tabla 1 · Visión general de los principales organismos del suelo según su tamaño.	12
Tabla 2 · Funciones del suelo relacionadas con el ciclo del agua y servicios ecosistémicos.	15
Tabla 3 · Revisión de las estimaciones de existencias globales de COS.	24
Tabla 4 · Estimaciones recientes de las reservas de COS en la región del permafrost.	26
Tabla 5 · Ejemplo de una matriz simplificada de conversión de uso del suelo	35
Tabla 6 · Niveles de seguimiento de GEI	37
Tabla 7 · Visión general de los principales métodos de aumento de escala para cuantificar el COS	41

FIGURAS

Figura 1 · COS en el ciclo global del carbono.	2
Figura 2 · Contribución del COS a los objetivos de desarrollo sostenible.	11
Figura 3 · Impacto de la gestión de la tierra en la biodiversidad del suelo	13
Figura 4 · Extrapolación espacial de la vulnerabilidad térmica de reservas de COS	16
Figura 5 · Estimaciones del modelo de potencial acumulado de emisión de carbono procedente de la descongelación del permafrost para 2100, 2200 y 2300.	18
Figura 6. Diagrama esquemático de los ciclos de retroalimentación positiva y la expansión de las tierras áridas debido al cambio climático y la disminución de COS.	19
Figura 7 · Mapa más reciente del contenido de COS a 1m de profundidad (MgC ha^{-1}).	23
Figura 8 · Distribución de turberas en el mundo	27
Figura 9 · Distribución de pastizales en el mundo	28
Figura 10 · Densidad de cubierta forestal	29
Figura 11 · Cantidad de carbono por hectárea en tierras áridas	30
Figura 12 · Resumen del marco de monitoreo, informe y verificación (MRV) del COS	45
Figura 13 · Estrategias de manejo sugeridas y disuadidas para el secuestro de carbono en el suelo y su impacto en la productividad de los alimentos y mitigación y adaptación al cambio climático.	50

RESUMEN EJECUTIVO

El suelo se ha convertido en uno de los recursos más vulnerables del mundo frente al cambio climático, la degradación de la tierra y la pérdida de biodiversidad. El suelo es una importante reserva de carbono, conteniendo más carbono que la atmósfera y la vegetación terrestre en conjunto. El carbono orgánico del suelo (COS) es dinámico, no obstante, los impactos antropogénicos sobre el suelo pueden convertirlo en un sumidero o fuente neta de gases de efecto invernadero (GEI). Se ha logrado un enorme progreso científico en la comprensión y explicación de la dinámica del COS. Sin embargo, la protección y el monitoreo de las reservas de COS a nivel nacional y global todavía se enfrentan a desafíos complicados que obstaculizan el diseño e implementación de políticas efectivas sobre el terreno y adaptadas a regiones específicas.

Una vez el carbono entra en el suelo en forma de material orgánico gracias a la fauna y flora del suelo, puede persistir en el suelo durante décadas, siglos o incluso milenios. Eventualmente, el COS puede perderse en forma de CO_2 o CH_4 emitido de nuevo a la atmósfera, como material erosionado o como carbono orgánico disuelto que desemboca en ríos y océanos. La dinámica de estos procesos resalta la importancia de cuantificar los flujos globales de carbono para garantizar los máximos beneficios del COS para el bienestar humano, la producción de alimentos y la regulación climática.

El COS es el componente principal de la materia orgánica del suelo (MOS). Como indicador de la salud del suelo, el COS es importante por sus contribuciones a la producción de alimentos, la mitigación y adaptación al cambio climático, y el logro de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS). Un alto contenido en MOS proporciona nutrientes a las plantas y mejora la disponibilidad de agua, lo cual mejora la fertilidad del suelo y, en definitiva, mejora la productividad de los alimentos. Además, el COS mejora la estabilidad estructural del suelo promoviendo la formación de agregados que, junto con la porosidad, aseguran suficiente aireación e infiltración de agua para promover el crecimiento de la planta. Con una cantidad óptima de COS, la capacidad de filtración de agua de los suelos permite el suministro de agua limpia. A través de la mineralización acelerada del COS, los suelos pueden ser una fuente de emisiones de GEI a la atmósfera. A pesar de que el impacto global del cambio climático en las reservas de COS es muy variable dependiendo de la región y tipo de suelo, es probable que el aumento de las temperaturas y de la frecuencia de eventos extremos conduzca a mayores pérdidas de COS.

A nivel global, las existencias de COS se estiman en un media de 1 417 PgC en el primer metro de suelo, aunque su distribución es espacial y temporalmente variable. Los puntos críticos y favorables de COS, que son respectivamente áreas de alto contenido de COS (por ejemplo, turberas o suelos negros) y extensas superficies de bajo contenido de COS (por ejemplo, tierras secas), constituyen zonas de conflicto. Con el cambio climático y la gestión insostenible, estas áreas son susceptibles a convertirse en fuentes netas de emisión de GEI. Sin embargo, si se gestionan adecuadamente, son suelos con potencial de secuestrar grandes cantidades de carbono, contribuyendo a la mitigación del y a la adaptación al cambio climático.

En el contexto de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), acuerdos internacionales como el Protocolo de Kyoto y el Acuerdo de París han indicado las bases para los objetivos de emisiones de GEI, así como la necesidad de informar regularmente sobre emisiones antropogénicas de GEI. Como parte de estos esfuerzos, se deben presentar inventarios precisos sobre las emisiones debidas a cambios en las reservas de COS. El Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) proporciona directrices para medir, informar y verificar los inventarios nacionales de reservas de COS según el Marco de Monitoreo, Informe y Verificación (MRV) que asegura que dichos inventarios cumplen los criterios de integridad, transparencia, coherencia, exactitud y, por tanto, comparabilidad. Para lograr una mayor especificidad y precisión, se necesitan métodos mejorados para medir, contabilizar, monitorear e informar sobre esta específica reserva de carbono.

El cambio climático supone una amenaza importante para la seguridad alimentaria debido a su fuerte impacto sobre la agricultura. Se cree que afecta negativamente la agricultura, el ganado y pesca suponiendo reducción los rendimientos, migración biológica y pérdida de servicios ecosistémicos que, en definitiva, supone una reducción de los ingresos agrícolas y un aumento de los precios de los alimentos. El secuestro de COS puede ayudar a mitigar estos problemas mientras ofrece una solución parcial al calentamiento global. Por lo tanto, hay necesidad de implementar una serie de prácticas de conservación de COS sugeridas para alcanzar el potencial máximo de mitigación del y adaptación al cambio climático, y de la productividad alimentaria. Sin embargo, existen una serie de barreras para la adopción de estas prácticas, incluidas las financieras, técnicas/logísticas, institucionales, de conocimiento, de recursos y socioculturales, y sus interacciones. Cuando estas barreras se combinan con factores abióticos que limitan la acumulación de COS, restringen la adopción de prácticas de mitigación del y adaptación al cambio climático. A pesar de la existencia de soluciones conocidas para superar las barreras inducidas por el ser humano, las tasas globales de adopción de prácticas sostenibles de gestión del suelo siguen siendo relativamente bajas.

Esta publicación tiene como objetivo proporcionar una visión general de los principales hechos y datos científicos acerca del conocimiento y sus brechas en lo referente al COS, a responsables de decisiones y profesionales. Resalta cómo se puede implementar mejor información y buenas prácticas para contribuir a poner fin al hambre, contribuir a la adaptación y la mitigación del cambio climático, y avanzar hacia el alcance del desarrollo sostenible global.

AGRADECIMIENTOS

La preparación del libro “Carbono Orgánico del Suelo - el potencial oculto” ha contado con el apoyo y aportación de una serie de personas, dedicando agradecimientos especiales a (en orden alfabético): Martial Bernoux (FAO) y Lucrezia Caon (FAO).

También se agradece especialmente a la Confederación Suiza, la Comisión Europea, el Ministerio de Relaciones Exteriores de Islandia y el Ministerio de Relaciones Exteriores de Holanda, por su apoyo financiero para la publicación de este libro.



ACRÓNIMOS

AFOLU	Agricultura, silvicultura y otros usos de la tierra
AR	Informe de Evaluación del IPCC
ASS	África Subsahariana
BD	Bulk density
C	Carbono
CH ₄	Metano
CNULD	Convención de las Naciones Unidas de Lucha contra la Desertificación
CMNUCC	Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático
CO ₂	Dióxido de carbono
COD	Carbono orgánico disuelto
COP	Conferencia de las Partes de la CMNUCC
COS	Carbono orgánico del suelo
CUT	Cambio en el Uso del Territorio/Tierra/Suelo
DA	Densidad Aparente
GC/CC	Garantía de calidad/Control de calidad
GEI	Gases de Efecto Invernadero
GPD	Base de datos global de turberas (Global Peatland Database)
GTIS	Grupo Técnico Intergubernamental de Suelos
IPCC	Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático
MOS	Materia orgánica del suelo
MRV	Monitoreo, Informe y Verificación
NDC	Contribuciones a nivel nacional
N ₂ O	Óxido nitroso
OMM	Organización Meteorológica Mundial
PCG	Potencial de Calentamiento Global
PgC	Petagramos de carbono ¹
PK	Protocolo de Kyoto
PMA	Países Menos Avanzados
PPN	Productividad Primaria Neta
RMS	Red de monitoreo del suelo
SIG/GIS	Sistemas de Información Geográfica
UNCBD	Convenio de las Naciones Unidas sobre la Diversidad Biológica
UT	Uso del Territorio/Tierra/Suelo
Vis-NIR	Visible/Infrarrojo cercano
WRB	Base de Referencia Mundial (World Reference Base)
WRB	World Reference Base

1 1 PgC = mil millones de toneladas métricas de carbono = 3,7 mil millones de toneladas de CO₂ = 1 GtC (gigatonelada de carbono)

1 • ¿QUÉ ES EL COS?



1.1 · COS: UNA PARTE CRUCIAL DEL CICLO GLOBAL DEL CARBONO

El carbono orgánico del suelo (COS) es una pequeña parte del ciclo global del carbono, el cual implica el ciclo del carbono a través del suelo, la vegetación, el océano y la atmósfera (Figura 1). Se estima que la reserva de COS almacena 1 500 PgC en el primer metro de suelo, lo cual supone más carbono que el contenido en la atmósfera (aproximadamente 800 PgC) y la vegetación terrestre (500 PgC) combinados (FAO y GTIS, 2015) (Véase la sección 3.1 para más información sobre las existencias de COS). Este extraordinario reservorio de COS no es estático, sino que está constantemente circulando entre las diferentes reservas mundiales de carbono en formas moleculares diversas (Kane, 2015).

Siendo el CO₂ (dióxido de carbono) y CH₄ (metano) los principales gases atmosféricos basados en carbono, organismos autótrofos (principalmente plantas), y microbios foto- y quimio-autótrofos sintetizan el CO₂ atmosférico en material orgánico. El material orgánico muerto (principalmente en forma de residuos vegetales y exudados) es incorporado al suelo por la fauna del mismo, lo que conlleva la entrada de carbono en el suelo a través de la transformación del material orgánico por microorganismos heterótrofos. Este proceso de transformación de materiales orgánicos da como resultado una mezcla biogeoquímica compleja de residuos vegetales y productos de descomposición microbiana en varias etapas de descomposición (Von Lützow *et al.*, 2006, Paul, 2014) que pueden asociarse con minerales del suelo y ocluirse dentro de agregados, permitiendo la persistencia del COS en el suelo durante décadas, siglos o incluso milenios (Schmidt *et al.*, 2011). El CO₂ se emite de vuelta a la atmósfera cuando la materia orgánica del suelo (MOS) es descompuesta (o mineralizada) por microorganismos. La pérdida de carbono también puede ser causada por exudados radiculares como el ácido oxálico, que liberan compuestos orgánicos de las protectoras asociaciones con minerales (Keiluweit *et al.*, 2015). Finalmente, el carbono también es parcialmente exportado de los suelos a ríos y océanos como carbono orgánico disuelto (COD) o como parte del material de erosión.

En principio, la cantidad de COS almacenada en un suelo determinado depende del equilibrio entre la cantidad de C que entra en el suelo y la que sale del suelo como gases de respiración basados en C, procedentes de la mineralización microbiana y, en menor medida, de la lixiviación del suelo como COD. Localmente, el C también se puede perder o ganar a través de la erosión o deposición del suelo, lo que lleva a la redistribución del C del suelo a escala local, paisajística y regional. Por lo tanto, los niveles de almacenamiento de COS se controlan principalmente gestionando la cantidad y el tipo de residuos orgánicos que entran en el suelo (es decir, el aporte de C orgánico al sistema del suelo) y minimizando las pérdidas de C del suelo (FAO y GTIS, 2015).

Los factores que controlan la descomposición de la MOS incluyen la temperatura del suelo y el contenido de agua (principalmente determinado por las condiciones climáticas), que influyen mucho en el almacenamiento del C del suelo por su efecto sobre la actividad microbiana. La composición de la comunidad microbiana (por ejemplo, la relación bacterias-hongos) también puede influenciar la descomposición preferente de ciertos compuestos. La presunta recalcificación química de las moléculas complejas que acumulan COS, como la lignina o los lípidos, no contribuye sustancialmente a la persistencia de la MOS en el suelo

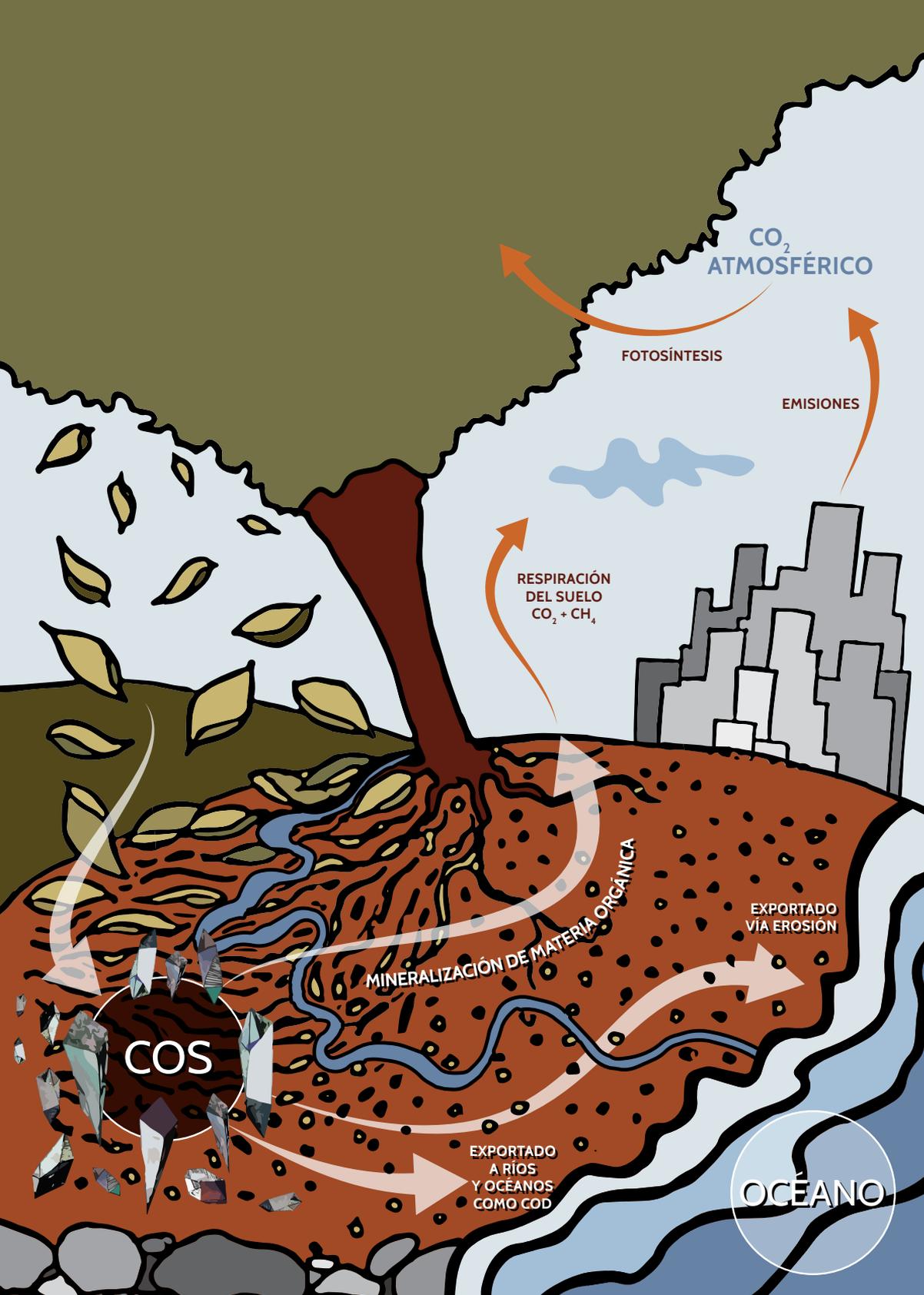


Figura 1 · COS en el ciclo global del carbono.

(Marschner *et al.*, 2008; Thévenot *et al.*, 2010). La persistencia de la MOS está más bien afectada por la estabilización del COS en la matriz del suelo a través de su interacción y asociación con los minerales del suelo (Schmidt *et al.*, 2011).

La cuantificación de los flujos globales de carbono es necesaria para aclarar, entre otros aspectos, si los ecosistemas terrestres globales fijan más CO₂ atmosférico a través de la fotosíntesis que el que emiten a la atmósfera a través de la respiración. Por un lado, el balance mundial de carbono está determinado por la concentración atmosférica de CO₂ y la absorción de CO₂ por el océano y la tierra y, por otro lado, por las emisiones derivadas de las emisiones de combustibles fósiles, el uso de la tierra y el cambio de uso de la tierra. La evaluación más reciente de C indicó que, entre 2006 y 2015, las emisiones a la atmósfera eran dos veces más altas que la suma de los sumideros oceánicos y terrestres, siendo el 90 por ciento de estas emisiones procedentes de combustibles fósiles y la industria (Le Quéré *et al.*, 2016). El flujo de carbono derivado de los cambios en el uso de la tierra fue más predominante en los tiempos preindustriales, ya que, entre 1750 y 2011, un tercio de todos los gases de efecto invernadero (GEI) antropogénicos se derivaron de los cambios en el uso de la tierra (IPCC, 2014). A largo plazo, el CO₂ atmosférico ha aumentado aproximadamente de 180 a 280 ppm desde el último período glacial, añadiendo alrededor de 220 PgC a la atmósfera durante un período de 10 000 años. Esto se traduce en una tasa de aumento de alrededor de 4.4 PgC/año (Baldocchi *et al.*, 2016).

La reciente investigación sobre la dinámica del C del suelo y su influencia en el ciclo global del carbono se ha visto impulsada en parte por el aumento de la concienciación por: 1) la importancia de la accesibilidad a pequeña escala al COS para la renovación del carbono microbiano que se extiende a una profundidad mayor de 20 cm (Trumbore y Czimczik, 2008, Schimel y Schaeffer, 2012, Vogel *et al.*, 2014); 2) el vínculo entre las comunidades microbianas y las propiedades dinámicas e inherentes del suelo en relación al ciclo del carbono y su interacción con otros ciclos biogeoquímicos (Trumbore y Czimczik, 2008; Gårdenäs *et al.*, 2011); y 3) la influencia de la diversidad de plantas en el aumento de la actividad microbiana del suelo y el almacenamiento de carbono en el suelo (Lange *et al.*, 2015).

1.2 · COS: UN COMPONENTE DE LA MOS

El término MOS se utiliza para describir los constituyentes orgánicos en el suelo en diversas etapas de descomposición, tales como tejidos de plantas y animales muertos, materiales de menos de 2 mm de tamaño y organismos del suelo. La renovación de MOS desempeña un papel crucial en el funcionamiento del ecosistema del suelo y el calentamiento global (véase también la sección 2.1). La MOS es fundamental para la estabilización de la estructura del suelo, la retención y liberación de nutrientes de las plantas, y el mantenimiento de la capacidad de retención de agua, lo que la convierte en un indicador clave no sólo para la productividad agrícola sino también para la resiliencia ambiental. La descomposición de MOS libera nutrientes minerales, lo cual los hace disponibles para el crecimiento de las plantas (Van der Wal y de Boer, 2017), contribuyendo un mejor crecimiento de las plantas y una mayor productividad a garantizar la seguridad alimentaria.

La MOS se puede dividir en diferentes grupos basándose en el tiempo necesario para la descomposición total y el tiempo de residencia derivado de los productos en el suelo (tiempo de rotación), de la siguiente manera (Gougoulias *et al.*, 2014):

- **Reservas activas** - renovación en meses o pocos años;
- **Reservas pasivas** - renovación en miles de años.

Los largos tiempos de rotación de los compuestos orgánicos no sólo se explican por condiciones anaeróbicas como en las turbas, sino también por la incorporación de MOS en los agregados del suelo, la fijación de la materia orgánica a las superficies minerales protectoras, la desconexión espacial entre MOS y descomponedores, y las propiedades bioquímicas intrínsecas de la MOS. Los microagregados se consideran responsables de la estabilización de las reservas pasivas (estabilizadores permanentes), mientras que los macroagregados y los terrones que encapsulan pequeños agregados (Degens, 1997) se consideran agentes estabilizadores transitorios (Tisdall y Oades, 1982; Dexter, 1988). Esta estabilización física y química de la MOS dificulta en diferentes grados la descomposición microbiana debido a movilidad y acceso restringidos de los microbios a la materia orgánica, así como difusión de agua, enzimas y oxígeno. Además, dicha estabilización requiere una amplia gama de enzimas microbianas para degradar macromoléculas insolubles que conforman la MOS (Van der Wal y de Boer, 2017).

La MOS contiene aproximadamente 55-60 por ciento de C en masa. En muchos suelos, este C comprende la mayor parte o la totalidad de las reservas de C - a las que se hace referencia como COS - excepto cuando aparecen formas inorgánicas de C del suelo (FAO y GTIS, 2015). Al igual que la MOS, el COS se divide en diferentes grupos en función de su estabilidad física y química (FAO y GTIS, 2015; O'Rourke *et al.*, 2015):

- **Reserva rápida** (reserva lábil o activa) - Después de la incorporación de carbono orgánico fresco al suelo, la descomposición da lugar a la pérdida de una gran proporción de la biomasa inicial en 1-2 años.
- **Reserva intermedia** - Contiene carbono orgánico procesado por microbios que está parcialmente estabilizado en superficies minerales y/o protegido dentro de agregados, con tiempos de rotación en el rango de 10-100 años.
- **Reserva lenta** (reserva refractaria o estable) - COS altamente estabilizado, ingresa en un período de muy lenta rotación de 100 a >1000 años.

Una reserva lenta de COS adicional es el COS pirogénico, formado a partir de biomasa parcialmente carbonizada (por ejemplo, pirolizada) durante incendios forestales (Schmidt y Noack, 2000) que está presente en muchos ecosistemas. Una parte de este material tiene una estructura química aromática altamente condensada (a menudo llamada carbono pirogénico o carbono negro) que resiste la degradación microbiana y por lo tanto persiste en suelos durante largos periodos (Lehmann *et al.*, 2015).

La separación del COS en diferentes reservas es más conceptual que cuantificable y se basa en la facilidad de oxidación o el grado de estabilización física del COS dentro de los agregados o mediante la fijación a los minerales, determinado mediante protocolos analíticos. Aunque las

reservas de COS se usan a menudo para modelizar la dinámica del carbono, rara vez se han presentado formas “cuantificables” y “modelizables” de conciliar las reservas (Zimmermann *et al.*, 2007; Luo *et al.*, 2014). Por lo tanto, el COS y la MOS deben ser considerados como material orgánico en todas las etapas de transformación y descomposición o estabilización (Lehmann y Kleber, 2015).

La proporción de COS lábil en relación al COS total, más que la reserva total de COS propiamente dicha, influye en el secuestro de COS y en la salud del suelo (Blair *et al.*, 1995). Se ha demostrado que la fracción lábil de carbono es un indicador de las propiedades químicas y físicas fundamentales del suelo. Por ejemplo, se demostró que esta fracción era el factor principal en el control de la descomposición de agregados en ferralsoles (arcillas rojas inquebrantable), obtenida a partir del porcentaje de agregados que miden menos de 0,125 mm en la corteza superficial después de la lluvia simulada en el laboratorio (Bell *et al.*, 1998, 1999). La fracción resistente o estable del carbono orgánico del suelo contribuye principalmente a la capacidad de retención de nutrientes del suelo (capacidad de intercambio catiónico). Además, debido a que esta fracción de carbono orgánico se descompone muy lentamente, es especialmente interesante en términos de secuestro de COS a largo plazo.

1.3 · EL SUELO: FUENTE Y SUMIDERO DE GEI BASADOS EN CARBONO

El suelo puede ser una espada de doble filo cuando se trata de flujos de carbono. Los impactos antropogénicos en el suelo pueden convertirlo en sumidero o fuente neta de GEI. Como fuente, el suelo emite GEI a la atmósfera donde atrapan la radiación térmica que aumenta el efecto invernadero contribuyendo así al calentamiento global. Los gases de efecto invernadero a base de carbono emitidos por el suelo son el CO₂ y el metano (CH₄), que son dos de los principales GEI antropogénicos emitidos (IPCC, 2014). Otra forma de GEI es el óxido nitroso (N₂O), cuya emisión se ha vuelto cada vez más antropogénica, en gran parte desde suelos agrícolas e instalaciones ganaderas. La inclusión de los tres gases en los balances de CO₂ del suelo es importante debido a la interconexión de los procesos involucrados en sus emisiones y el ciclo ecosistémico (nitrógeno-carbono, procesos aeróbicos-anaeróbicos). La influencia climática potencial de estos gases difiere dependiendo de su eficiencia relativa climática, es decir, su potencial de calentamiento global (PCG). Se considera que el CO₂ tiene un PCG de 1, seguido del CH₄ con un PCG a 100 años de 28 y N₂O con el mayor PCG de 265 a 100 años (IPCC, 2014).

1.3.1 · DIÓXIDO DE CARBONO (CO₂)

El dióxido de carbono (CO₂) es el gas carbónico más abundante de la atmósfera. Antes de la era industrial, las concentraciones atmosféricas de CO₂ fluctuaron entre 180 y 290 ppm durante 2.1 millones de años (Hönisch *et al.*, 2009). De forma acumulativa, el aumento atmosférico del CO₂ entre 1750 y 2011 fue de 240 PgC. En 2014, la abundancia atmosférica de CO₂ alcanzó más de 397 ppm (Le Quéré *et al.*, 2016), un 40% más alta que antes de la industrialización. El aumento de la concentración atmosférica de CO₂ se atribuye principalmente a la combustión de combustibles fósiles y al cambio del uso de la tierra, especialmente la deforestación (IPCC, 2014).

En los suelos, la liberación de CO₂ a la atmósfera se produce cuando los residuos orgánicos o la MOS se oxidan. El flujo de CO₂ liberado por la fauna del suelo y las raíces subterráneas del suelo a la atmósfera se denomina respiración del suelo y representa el segundo mayor flujo de carbono terrestre (Raich y Potter, 1995). La respiración del suelo es estacionalmente variable ya que está controlada por factores ambientales como la temperatura, la humedad, el contenido de nutrientes del suelo y la concentración de oxígeno. El efecto del cambio climático (especialmente el aumento de las temperaturas y el cambio de los regímenes de precipitación) en la respiración del suelo se aborda en la sección 2.3.1.

1.3.2 · METANO (CH₄)

En base a su PCG, el CH₄ es 28 veces más potente como GEI que el CO₂ (IPCC, 2007). El metano es liberado de los suelos a través de un proceso llamado metanogénesis que se produce durante la descomposición de la materia orgánica en condiciones anaeróbicas (en ausencia de oxígeno). En tales condiciones, los metanógenos –la forma principal de bacteria que produce metano-, además de la fermentación con acetato, utilizan CO₂ en lugar de oxígeno como final aceptador de electrones para actividades metabólicas, liberando CH₄ como subproducto. Por lo tanto, los suelos encharcados, en particular los humedales, las turberas y los arrozales, son la mayor fuente de emisiones de metano (FAO y GTIS, 2015). En 1998, las emisiones mundiales totales de CH₄ procedentes de los humedales se estimaron en 0.15 Pg/año, de las cuales 0.09 Pg/año provenían de humedales naturales y 0.05 Pg/año de arrozales. Además, los inventarios de GEI estimaron que las emisiones de CH₄ procedentes de los arrozales aumentaron de 0.37 PgCO₂-eq/año en 1961 a 0.50 PgCO₂-eq/año en 2010 (FAO y GTIS, 2015).

En contraste, los suelos también tienen un notable potencial de almacenamiento de los principales componentes de los GEI (especialmente C; este proceso, llamado secuestro de carbono en el suelo, se desarrolla en la Sección 1.4). Bajo condiciones aerobias (o en presencia de oxígeno), las bacterias metanotróficas del suelo prosperan y usan el metano como fuente de carbono en un proceso llamado metanotrofia que oxida el metano. Como tal, los suelos forestales tienden a ser buenos depósitos para el metano debido a su bajo nivel freático que permite que estas bacterias crezcan (Serrano-Silva *et al.*, 2014). Por lo tanto, el nivel de la capa freática se considera la clave en cuanto a si un suelo actúa como reserva o fuente de metano. El nitrógeno y la temperatura también se consideran como determinantes del potencial de secuestro de carbono del suelo, ya que regulan la cantidad de emisiones de CH₄ (Kane, 2015).

1.4 · SECUESTRO DE COS

El secuestro de carbono orgánico del suelo es el proceso mediante el cual el carbono se fija desde la atmósfera a través de plantas o residuos orgánicos y se almacena en el suelo. Cuando se trata de CO₂, el secuestro de COS comprende tres etapas: 1) la extracción del CO₂ de la atmósfera a través de la fotosíntesis de las plantas; 2) la transferencia de carbono del CO₂ a la biomasa vegetal; y 3) la transferencia de carbono de la biomasa vegetal al suelo donde se almacena en forma de COS en la reserva más lábil. Esta reserva se caracteriza por la mayor tasa de rotación (días - pocos años), engloba los residuos vegetales recientemente incorporados y se puede descomponer fácilmente por la fauna del suelo, provocando generalmente emisiones de CO₂ a la atmósfera (véase también la sección 1.1). Por lo tanto, la vital planificación de medidas de secuestro de COS requiere mirar más allá de la captación de CO₂ atmosférico, y requiere encontrar maneras de retener C en la reserva lenta de COS. En contraste, la investigación muestra que la reserva estable tiene un potencial mínimo para el secuestro de carbono dada su resistencia al cambio y, por tanto, su falta de respuesta ante la gestión (Kane, 2015).

El carbono recién agregado puede estabilizarse en el suelo mediante una serie de mecanismos (Six *et al.*, 2002, Six *et al.*, 2006, Jastrow *et al.*, 2007, Kane, 2015). Físicamente, el carbono puede estabilizarse a través de su aislamiento dentro de micro y macro agregados del suelo donde es inaccesible para los organismos del suelo. Químicamente, el carbono puede adsorberse fuertemente a arcillas a través de enlaces químicos que impiden el consumo de carbono por los organismos. Bioquímicamente, el carbono puede ser resintetizado en estructuras complejas de moléculas que pueden impedir la descomposición. Los tres mecanismos dependen de una serie de factores bióticos, abióticos y de gestión que determinan la eficacia de estabilización del carbono en el suelo (Six *et al.*, 2006; Kane, 2015).

El concepto de saturación de carbono en el suelo implica que la reserva de carbono del suelo ha alcanzado su capacidad máxima de carga para almacenar los insumos de carbono del suelo (Six *et al.*, 2002, Stewart *et al.*, 2007). Este umbral, que depende de muchos factores incluyendo propiedades inherentes y dinámicas del suelo y sus interacciones con factores abióticos, también se conoce en la literatura como la capacidad máxima de estabilización del carbono (Beare *et al.*, 2014). Se deduce que las curvas de estabilización del carbono del suelo no aumentan infinitamente, y que cuando se alcanza un nivel de saturación de C, el secuestro de COS llega a su fin, y los suelos dejan de ser un sumidero neto de carbono y pueden convertirse en una fuente neta de carbono. Como tal, el secuestro de COS tiene limitaciones espaciales y temporales, y es un proceso reversible (Paustian *et al.*, 2016). Los suelos sin COS tienen el mayor potencial para obtener carbono, pero también la menor propensión a hacerlo. Dado que la mayoría de los suelos en todo el mundo están lejos de sus umbrales de saturación, existe un gran potencial para el incremento de los insumos de C y de la gestión que protege las reservas existentes para maximizar el secuestro de carbono en el suelo (Kane, 2015).

En general, el ciclo del carbono y el secuestro de carbono son más activos en los horizontes superficiales del suelo, mientras que el carbono estabilizado con tiempos de rotación más largos constituye una mayor proporción del COS total encontrado en los horizontes profundos del suelo (Trumbore, 2009; Rumpel *et al.*, 2012). Beare *et al.*, (2014) estimaron que, a mayor profundidad, los suelos tienen una mayor capacidad de almacenar C adicional en comparación con las capas superiores, debido a una mayor diferencia entre el contenido de COS existente y el valor de saturación de COS. La acumulación de C estabilizado con largos tiempos de residencia en horizontes profundos del suelo puede deberse al transporte continuo, a la inmovilización temporal y al procesamiento microbiano de COD dentro del perfil del suelo (Kaiser y Kalbitz, 2012) y/o a la estabilización eficiente de la materia orgánica derivada de la raíz en la matriz del suelo (Rasse *et al.*, 2005). Lorenz y Lal (2005) enfatizaron que los subsuelos tienen el potencial de almacenar 760-1520 Pg de carbono adicional.

Al mismo tiempo, se señaló que se debe tener cuidado al agregar nuevas fuentes de C a los subsuelos debido al riesgo de aumento de la mineralización del COS existente. Sin embargo, el aumento de las reservas de COS en el subsuelo sigue siendo reconocido como un medio prometedor para permitir un secuestro sustancial de C en los suelos (Rumpel *et al.*, 2012).



2 · EL PAPEL DEL COS PARA EL BIENESTAR HUMANO



2.1 · ALCANZANDO LOS OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE

Como se destaca en el primer principio establecido por la Carta Mundial del Suelo revisada (FAO, 2015a, p.2),

“Los suelos son un recurso clave que abre posibilidades, fundamental para generar multitud de bienes y servicios esenciales para los ecosistemas y el bienestar humano. El mantenimiento o la mejora de los recursos mundiales de suelos son esenciales para satisfacer las necesidades globales de alimentos, agua y seguridad energética de la humanidad en consonancia con el derecho soberano de cada Estado sobre sus recursos naturales. En concreto, los aumentos previstos en la producción de alimentos, fibras y combustibles que se exigen para alcanzar la seguridad alimentaria y energética supondrán mayor presión sobre los suelos”.

Los 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la Agenda para el Desarrollo Sostenible de 2030, adoptados por los líderes mundiales en septiembre de 2015, identificaron la necesidad de restaurar los suelos degradados y mejorar la salud del suelo.

Mantener la reserva de COS en equilibrio o incrementar el contenido de COS hacia el nivel óptimo para el entorno local puede contribuir a lograr los ODS (Figura 2). Esto puede lograrse explotando todo el potencial de los servicios ecosistémicos de los suelos para permitir no sólo el apoyo, el mantenimiento o la mejora de la fertilidad y la productividad del suelo (necesarios para lograr los ODS 2 “Hambre Cero” y 3 “Salud y Bienestar”), sino también para almacenar y suministrar más agua limpia (ODS 3 y ODS 6 “Agua limpia y saneamiento”), conservar la biodiversidad (ODS 15 “Vida de ecosistemas terrestres”) y aumentar la resiliencia de los ecosistemas ante un clima cambiante (ODS 13 “Acción por el clima”). En las secciones siguientes, la atención se centra en la producción de alimentos que contribuye a la consecución del ODS 2, en la biodiversidad, que forma parte del ODS 15, y en la mitigación del cambio climático como parte del ODS 13.

Figura 2 · Contribución del COS a los objetivos de desarrollo sostenible.



2.2 · COS Y BIODIVERSIDAD

La biodiversidad del suelo refleja el conjunto y la mezcla de organismos vivos en el suelo. Estos organismos interactúan entre sí, así como con plantas y animales pequeños, formando una red de actividad biológica (Orgiazzi *et al.*, 2016). Por un lado, la biodiversidad del suelo contribuye en gran medida a la formación de MOS a partir de desechos orgánicos, contribuyendo así al aumento del contenido de COS. Por otra parte, la cantidad y calidad de la MOS (y consecuentemente del COS) determina el número y la actividad de la biota del suelo que interactúa con las raíces de las plantas. Por lo tanto, la estructura de la comunidad microbiana del suelo está influenciada en gran parte por la calidad y cantidad de COS, y en menor medida por la diversidad de las plantas (Thiele-Brunh *et al.*, 2012).

2.2.1 · IMPORTANCIA DE LA BIODIVERSIDAD DEL SUELO

La importancia transversal de la biodiversidad se formalizó en la Convención de las Naciones Unidas sobre Diversidad Biológica (UNCBD) establecida en 1992. La biodiversidad asegura el funcionamiento del ecosistema, y cada organismo, independientemente de su tamaño, tiene un papel importante que desempeñar. En 2015, la Carta Mundial del Suelo declaró que

“Los suelos son una reserva clave de biodiversidad mundial que abarca desde los microorganismos a la flora y la fauna. Esta biodiversidad tiene una función fundamental en el respaldo a las funciones del suelo y, por tanto, a los bienes y servicios ecosistémicos asociados con los suelos. Por lo tanto, es necesario mantener la biodiversidad del suelo a fin de salvaguardar estas funciones.”

(FAO, 2015a, p.2-3).

Los organismos del suelo generalmente se clasifican según su tamaño como se indica en la Tabla 1.

Tabla 1 · Visión general de los principales organismos del suelo según su tamaño.

ADAPTADO DE ORGIAZZI ET AL., 2016; GARDI Y JEFFERY, 2009.

Tamaño	Microfauna (Rango de tamaño: 1-100 μ m)	Mesofauna (Rango de tamaño: 100 μ m - 2 mm)	Megafauna (Rango de tamaño: < 2 mm)
+ -	Protozoos	Colémbolos	Lombrices
	Nematodos	Ácaros	Hormigas
	Hongos	Tardígrados	Cochinillas
	Bacterias		Termitas

La biodiversidad del suelo (incluidos organismos como bacterias, hongos, protozoos, insectos, gusanos, otros invertebrados y mamíferos) combinada con COS, moldea la capacidad metabólica de los suelos y se cree que desempeña un papel crucial en el aumento de la producción de alimentos y la resistencia al cambio climático. Las comunidades complejas de organismos del suelo i) determinan la magnitud y la dirección de los flujos de C entre la atmósfera y el suelo (ya sea contribuyendo al secuestro de carbono en el suelo o reduciendo las emisiones de GEI),

ii) influyen en el ciclo del COS y principalmente en la disponibilidad de nutrientes, iii) mejoran la estructura física del suelo promoviendo la agregación, y iv) promueven el control biológico de plagas y la polinización de cultivos (FAO y GTIS, 2015).

Muchos científicos han informado sobre el papel de la macrofauna en la acumulación de COS. Por ejemplo, los milpiés y las lombrices descomponen y transforman la materia orgánica en partículas. La macrofauna del suelo también tiene la capacidad de trasladar el COS a mayores profundidades del suelo donde se cree que tienen tiempos de residencia más largos (Rumpel y Kögel-Knabner, 2011).

2.2.2 · PÉRDIDAS DE BIODIVERSIDAD DEL SUELO

Losses in soil biodiversity have been demonstrated to affect multiple ecosystem functions including decomposition of SOC, nutrient retention and nutrient cycling (FAO and ITPS, 2015). Poor land-management practices and environmental change are affecting belowground communities globally, and the resulting declines in soil biodiversity reduce and impair these benefits (Figure 3) (Wall *et al.*, 2015).



Figura 3 · Impacto de la gestión de la tierra en la biodiversidad del suelo
Modificado por Wall *et al.*, 2015

La gestión agrícola insostenible practicada en muchos agroecosistemas (como los monocultivos, el uso extensivo de labranza, insumos químicos), degrada el frágil entramado de interacciones comunitarias entre las plagas y sus enemigos naturales, lo que tiene repercusiones negativas en los depósitos de COS. Cuando las pérdidas de COS no pueden explicarse completamente por las propiedades físicas del suelo, se plantea la hipótesis de que la estabilidad del COS depende de la actividad y diversidad de organismos del suelo (Gardi y Jeffery, 2009).

Dadas las continuas pérdidas en la diversidad microbiana subterránea, la comprensión de las relaciones entre la biodiversidad del suelo y el ciclo del C es fundamental para proyectar cómo la pérdida de diversidad bajo la alteración ambiental continuada por los seres humanos afectará los procesos globales del ciclo de C (De Graaf y otros, 2015).

Investigaciones recientes indican que la biodiversidad del suelo puede ser mantenida y parcialmente restaurada si se gestiona de manera sostenible. Promover la complejidad ecológica y la robustez de la biodiversidad del suelo a través de mejores prácticas de gestión representa un recurso subutilizado con la capacidad de mejorar en definitiva la salud humana (Figura 3) (Wall *et al.*, 2015). Para consultar técnicas sostenibles de gestión de suelos dirigidas a la mitigación y adaptación al cambio climático, y a la producción sostenible de alimentos, ver sección 5.

2.3 · COS, PRODUCCIÓN ALIMENTARIA Y SUMINISTRO DE AGUA

2.3.1 · FERTILIDAD DEL SUELO PARA LA PRODUCCIÓN ALIMENTARIA

La fertilidad del suelo hace referencia a la capacidad del suelo para apoyar y sostener el crecimiento de las plantas, incluyendo el hacer disponible los nutrientes nitrógeno, fósforo, azufre y otros para la absorción por parte de plantas. Este proceso se ve facilitado por: i) almacenamiento de nutrientes en la MOS; ii) reciclaje de nutrientes de formas orgánicas a formas minerales disponibles para plantas; y iii) procesos físicos y químicos que controlan la absorción, disponibilidad y desplazamiento de nutrientes, y las pérdidas eventuales a la atmósfera y al agua. Los suelos gestionados representan un sistema altamente dinámico, y es este mismo dinamismo el que hace que los suelos funcionen y suministren servicios ecosistémicos. En general, la fertilidad y el funcionamiento de los suelos dependen de las interacciones entre la matriz mineral del suelo, las plantas y los microbios. Estos son responsables tanto de la formación como de la descomposición de la MOS y, por lo tanto, de la preservación y disponibilidad de nutrientes en el suelo. Para mantener las funciones del suelo, debe mantenerse el ciclo de los nutrientes equilibrado en los suelos (FAO y GTIS, 2015).

2.3.2 · INFLUENCIA DEL COS EN LA CAPACIDAD DE RETENCIÓN DEL AGUA Y LA POROSIDAD

La materia orgánica mejora la agregación del suelo y la estabilidad estructural que, junto con la porosidad, son importantes para la aireación del suelo y la infiltración de agua en el suelo. Mientras que el crecimiento de las plantas y la cobertura superficial pueden ayudar a proteger la superficie del suelo, una estructura edáfica estable y bien agregada que resista el sellado de la superficie y continúe infiltrando agua durante intensos eventos de lluvia disminuirá el potencial de inundaciones aguas abajo. La porosidad determina la capacidad del suelo para retener el agua y controla la transmisión del agua a través del suelo. Además de la porosidad total, la continuidad y la estructura de la red de poros son importantes para estas funciones, así como para la función adicional de filtrar los contaminantes en flujos (FAO y GTIS, 2015). Otras funciones del suelo relacionadas con el agua y sus consecuencias en términos de mejora de la calidad del agua para la producción de alimentos se enumeran en la Tabla 2. Por último, el agua almacenada en el suelo sirve como fuente para el 90 por ciento de la producción agrícola mundial y representa alrededor del 65 por ciento del agua dulce global (Amundson *et al.*, 2015).

Tabla 2 · Funciones del suelo relacionadas con el ciclo del agua y servicios ecosistémicos.

De FAO y GTIS, 2015

Función del suelo	Mecanismo	Consecuencia	Servicio ecosistémico
Almacenar (Almacenamiento)	El agua retenida en poros del suelo, sostiene comunidades vegetales y microbianas	Producción de biomasa Protección de la superficie	Alimentos Estética Control de erosión
Tolerar (Absorción)	El agua de un evento se infiltra en el suelo, con exceso perdido como escorrentía	Reducción de la escorrentía de tormenta	Control de erosión Protección inundaciones
Transmitir (Conductividad hidráulica)	El agua que entra en el suelo es redistribuida y el exceso se transmite por percolación profunda	Percolación a aguas subterráneas	Recarga de aguas subterráneas Mantenimiento de caudales
Limpiar (Filtro)	El agua que pasa a través de la matriz del suelo interactúa con partículas del suelo y la biota	Los contaminantes se degradan biológicamente / retienen en zonas de absorción	Calidad del agua

2.4 · EFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN EL COS

Las previsiones actuales sugieren que la respuesta del carbono del suelo frente al cambio climático va desde pequeñas pérdidas hasta ganancias moderadas. La predicción de los efectos compuestos del cambio climático en los suelos es extremadamente difícil debido a las complejas interacciones entre temperatura y humedad, aumento de la productividad y de la descomposición, y variaciones según las regiones y los tipos de suelo (FAO y GTIS, 2015, Keestrea *et al.*).

2.4.1 · EFECTOS DEL INCREMENTO DE TEMPERATURA Y PRECIPITACIÓN SOBRE RESERVAS DE COS

La temperatura y la precipitación son los factores más importantes en el control de la dinámica del COS (Deb *et al.*, 2015). Aunque el aumento de las temperaturas puede aumentar la producción vegetal, aumentando así los aportes de carbono al suelo, también tenderá a incrementar la descomposición microbiana del COS (Keestrea *et al.*, 2016). De hecho, existe un fuerte apoyo empírico a la idea de que el aumento de las temperaturas estimulará la pérdida neta de carbono del suelo a la atmósfera, lo que conducirá a una retroalimentación positiva del ciclo clima-carbono terrestre que podría acelerar el cambio climático (Crowther *et al.*, 2016). Además, con el cambio climático, se prevén fenómenos de precipitación extrema y sequía más

frecuentes que pueden tener mayores impactos en la dinámica de los ecosistemas que los efectos singulares o combinados del aumento del CO_2 y la temperatura (IPCC, 2014). Este aumento en la frecuencia de eventos extremos puede exacerbar la tasa y la susceptibilidad a la erosión, la salinización y otros procesos de degradación acelerados, lo que conduce a nuevas pérdidas de carbono. Finalmente, el cambio climático puede afectar a varios factores formadores de suelos, incluyendo lluvia, temperatura, microorganismos/biota y vegetación, afectando negativamente la tasa de acumulación de COS (FAO y GTIS, 2015).

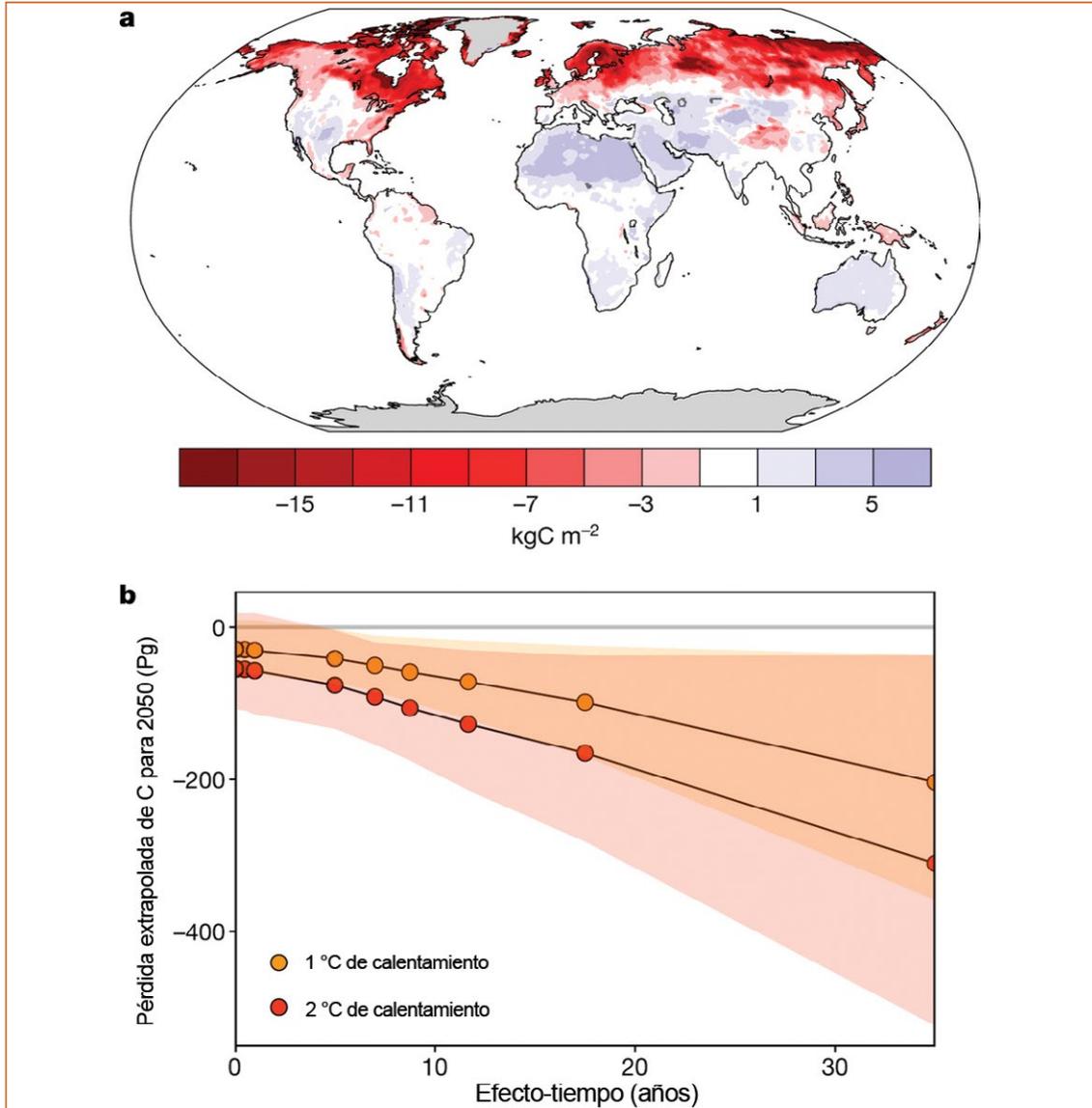


Figura 4 · Extrapolación espacial de la vulnerabilidad térmica de reservas de COS

De Crowther *et al.*, 2016.

a. Mapa de los cambios previstos en las reservas de C del suelo (0-15 cm de profundidad) por píxel para el año 2050 bajo el escenario de ‘no aclimatación’, considerando un aumento de 1 °C en la temperatura media global de la superficie del suelo.

b. Reducciones totales en la reserva global de C considerando el calentamiento global de 1 °C y 2 °C de la superficie del suelo en 2050, bajo un rango completo de diferentes escenarios de efecto-tiempo del C del suelo (eje x). Efecto-tiempo se refiere a la velocidad a la que se realiza la respuesta completa del C del suelo al calentamiento. Las áreas sombreadas indican los intervalos de confianza del 95 por ciento alrededor de las pérdidas medias (puntos) para cada escenario

2.4.2 · EFECTOS DEL AUMENTO DE LA CONCENTRACIÓN DE CO₂ EN LA ATMÓSFERA

Los incrementos antropogénicos en el CO₂ atmosférico pueden impulsar una mayor productividad primaria neta (PPN), que representa el principal insumo de carbono al suelo, siempre y cuando no existan limitaciones de nutrientes y agua. Se espera que este aumento de la PPN estimule el crecimiento de las plantas, pero en última instancia, puede suponer una retroalimentación negativa sobre el CO₂ atmosférico a través de mayores aportaciones de COS (Van Groenigen *et al.*, 2014 y Amundson *et al.*, 2015). De hecho, la teoría de la limitación progresiva de los nutrientes enuncia que las respuestas de la PPN al CO₂ elevado estarán limitadas por el suministro de nutrientes del suelo, particularmente nitrógeno. Todavía no está claro si los aumentos en la PPN se traducirán en un mayor almacenamiento de COS. Los estudios de enriquecimiento de CO₂ en aire libre a menudo no observan cambios en el COS a pesar del aumento de la PPN, posiblemente debido al aumento de las tasas de pérdida de los insumos de C o al aumento de la descomposición del COS a través del efecto impulsor (ver sección 2.4.3). Por último, la acumulación de COS bajo niveles elevados de CO₂ puede ser difícil de medir debido a la heterogeneidad espacial en las reservas de COS y la corta escala temporal de los experimentos en relación con los tiempos de rotación del COS (Todd-Brown *et al.*, 2014).

2.4.3 · INCERTIDUMBRES SOBRE LA RESPUESTA DEL COS AL CAMBIO CLIMÁTICO

Siguen existiendo numerosas incertidumbres al intentar hacer previsiones del comportamiento del COS como función del cambio climático. De hecho, las consecuencias de las acciones humanas sobre el clima global son aún inciertas, en parte debido a una comprensión limitada de la respiración del suelo y a su representación en modelos del sistema terrestre (Gougoulias *et al.*, 2014). Por ejemplo, una alta incertidumbre se refiere al llamado “efecto impulsor” en la descomposición de la MOS, que es uno de los procesos cruciales en los balances de carbono del ecosistema. El efecto impulsor se define como el aumento en la descomposición de las reservas de COS como resultado de la adición de compuestos fácilmente degradables (Van der Wal y de Boer, 2017). Este efecto agrega incertidumbre a la predicción de las futuras respuestas del C del suelo a un clima cambiante debido a que sus mecanismos todavía no se entienden completamente (FAO y GTIS, 2015). Como subrayaron Gougoulias *et al.* (2014), las contribuciones microbianas al cambio climático a través de la retroalimentación del ciclo del carbono no sólo están lejos de ser sencillas sino que añaden mayor incertidumbre debido a los efectos directos e indirectos simultáneos, y a las interacciones con otros factores. Con respecto a los microbios del suelo, muchas preguntas permanecen sin respuesta sobre el tiempo necesario para que los efectos del calentamiento sean combatidos y cuánto tiempo toman las comunidades del suelo para adaptarse a ambientes más cálidos (Crowther *et al.*, 2016).

RECUADRO 1 · SENSIBILIDAD DE LOS LUGARES CRÍTICOS Y FAVORABLES PARA EL CAMBIO CLIMÁTICO

Los efectos del calentamiento global dependen del tamaño de la reserva de COS, con pérdidas considerables en áreas de elevada latitud. Así, la reacción de los puntos críticos de COS al cambio climático es de gran preocupación (FAO y GTIS, 2015). Las áreas de permafrost, que han demostrado contener las mayores reservas de COS y las tasas de calentamiento proyectadas más rápidas, están en peligro de extinción por el calentamiento (Crowther *et al.*, 2016). Cuando la descongelación ocurre en reacción al calentamiento, las reservas del COS de suelos permafrost previamente congelados y protegidos de la descomposición durante milenios, se removilizan y se vuelven disponibles para la descomposición biológica (FAO y GTIS, 2015). Grandes depósitos de MOS que estaban previamente protegidos de la descomposición pueden volverse disponibles para la descomposición biológica (mineralización), dando lugar a un aumento de los flujos de gases de efecto invernadero a la atmósfera (Figura 5) (Tarnocai *et al.*, 2009; Hugelius *et al.*, 2013; Hugelius *et al.*, 2014; FAO y GTIS, 2015; Batjes, 2016). De manera similar, las turberas pueden ser también muy sensibles al cambio climático debido a las mayores tasas de evapotranspiración esperadas como resultado del aumento de las temperaturas. De hecho, cuando estos suelos se calientan o se vuelven más secos, es probable que se pierdan grandes cantidades de carbono (Keestrea *et al.*, 2016).

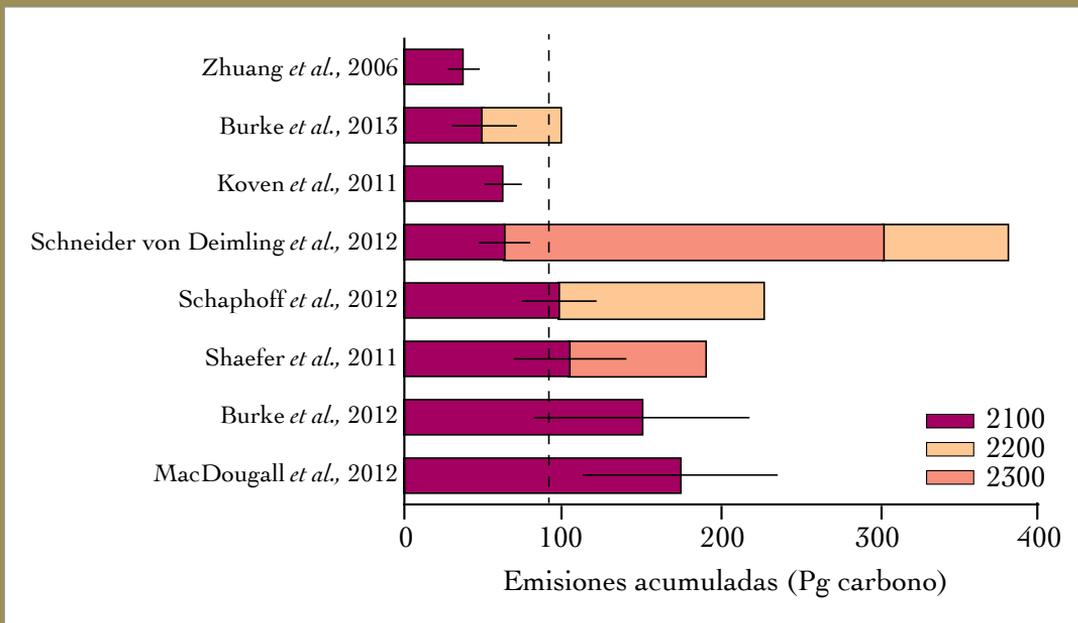


Figura 5 · Estimaciones del modelo de potencial acumulado de emisión de carbono procedente de la descongelación del permafrost para 2100, 2200 y 2300.

De Schuur *et al.*, 2015.

Todas las estimaciones excepto las de Schaphoff *et al.* (2013) y Schaefer *et al.* (2011) se basan en los escenarios más pesimistas del IPCC en términos de mitigación del cambio climático (trayectoria de concentración representativa (RCP) 8.5 en el quinto informe de evaluación (AR5, 2013) y A2 en el AR4 (2007)). Las barras de error muestran incertidumbres para cada estimación que se basan en un conjunto de simulaciones suponiendo diferentes velocidades de calentamiento para cada escenario y diferentes cantidades de C congelado inicial en el permafrost. La línea discontinua vertical muestra la media de todos los modelos bajo la actual trayectoria de calentamiento para 2100 (Schuur *et al.*, 2015).

Debido al cambio climático, se prevé que las tierras áridas se expandan y que sus reservas de COS probablemente se reduzcan (Figura 6). Esto se debería a temperaturas más altas que conllevarían un mayor déficit de presión de vapor y demanda de evaporación, y una menor humedad del suelo que puede conducir a un impacto aún más fuerte de las temperaturas extremas. Se espera que el incremento medio de la temperatura sea más significativo en las tierras áridas, aproximadamente 1.8 veces mayor que en las regiones húmedas (Huang *et al.*, 2015). Además, el almacenamiento de COS disminuye con el aumento de la temperatura y aumenta con el incremento del contenido de agua en el suelo (descrito en la sección 2.3). Por último, la degradación de la tierra inducida por la erosión también puede conducir a la emisión de carbono (Huang *et al.*, 2015).

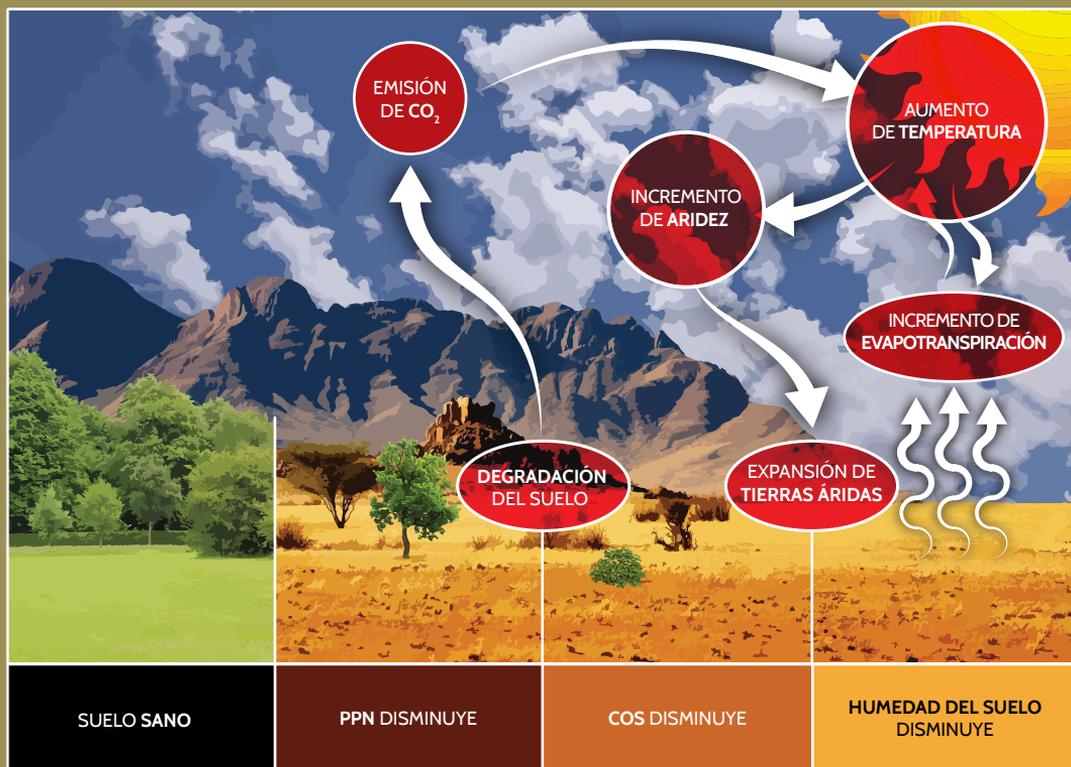


Figura 6. Diagrama esquemático de los ciclos de retroalimentación positiva y la expansión de las tierras áridas debido al cambio climático y la disminución de COS. Modificado de Huang *et al.* 2015

2.5 · IMPORTANCIA DEL COS EN EL MARCO INTERNACIONAL DE MITIGACIÓN DEL Y ADAPTACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO

El cambio climático ha estado en el centro de varios acuerdos internacionales desde los años ochenta (Recuadro 2). El suelo se considera en muchos de estos acuerdos como la mayor reserva de carbono en la Tierra (ver sección 1.1). Por lo tanto, en el futuro, las emisiones de GEI de los suelos deben estudiarse más a fondo para permitir una mejor presentación de los inventarios nacionales de GEI a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático y el Acuerdo de París.

Por lo tanto, es crucial tener un buen conocimiento de las reservas globales actuales de COS y de su distribución espacial para informar a los diversos actores interesados (por ejemplo, agricultores, responsables políticos, usuarios de la tierra) para así hacer un uso óptimo de las tierras disponibles y ofrecer las mejores oportunidades de mitigación del y adaptación al cambio climático, pero también asegurar la producción de alimentos y el suministro de agua suficiente.



RECUADRO 2 · PRINCIPALES ACUERDOS Y DECISIONES RELATIVAS AL CAMBIO CLIMÁTICO CONSIDERANDO LOS SUELOS

- 1988: Creación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) por la Organización Meteorológica Mundial (OMM) y el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente.
- 1992: Conferencia de Río sobre Medio Ambiente y Desarrollo y adopción de las tres Convenciones de las Naciones Unidas (CNUCLD, CMNUCC, UNCBD)

ARTÍCULO 4 DE LA CMNUCC:

“Todas las Partes desarrollarán, actualizarán periódicamente, publicarán y pondrán a disposición de la Conferencia de las Partes (COP) los inventarios nacionales de las emisiones antropogénicas por las fuentes y la absorción por sumideros† (...) [incluidos CO₂, CH₄ y N₂O]; Formular, implementar, publicar y actualizar regularmente (...) medidas para mitigar el cambio climático (...) y medidas para facilitar una adecuada adaptación al cambio climático.”

- 1997: Adopción del Protocolo de Kyoto (PK)

ARTÍCULO 3 DE LAS CONSIDERACIONES DEL PK PARA LA MITIGACIÓN:

“Los cambios netos en las emisiones de GEI por fuentes y absorciones por sumideros† resultantes del cambio de uso de la tierra y las actividades forestales directas inducidas por el hombre desde 1990, medidos como cambios verificables en las existencias de carbono.”

- 2015: Firma del Acuerdo de París
- 2016: Entrada en vigor del Acuerdo de París

ARTÍCULO 4:

Con el fin de alcanzar el objetivo a largo plazo de la temperatura establecido en el artículo 2, las Partes se proponen alcanzar el pico mundial de emisiones de gases de efecto invernadero tan pronto como sea posible y realizar reducciones rápidas para lograr un equilibrio entre las emisiones antropogénicas por fuentes y las absorciones por sumideros† de GEI en la segunda mitad de este siglo; Cada Parte preparará, comunicará y mantendrá sucesivas contribuciones determinadas a nivel nacional (NDC) que se propone lograr. Las Partes deberán adoptar medidas nacionales de mitigación con el fin de lograr los objetivos de dichas contribuciones.

ARTÍCULO 13:

Cada Parte presentará periódicamente un inventario nacional de las emisiones antropogénicas por las fuentes y la absorción por los sumideros† de GEI

- *Marzo de 2017: 192 Partes han ratificado el Protocolo de Kyoto, 197 Partes la CMNUCC y 133 Partes el Acuerdo de París*

† Los suelos son las principales reservas de carbono de la Tierra.



©FAO/Ronald Vargas

3 · ¿CUÁLES SON LAS RESERVAS GLOBALES DE CARBONO?

3.1 · RESERVAS GLOBALES DE CARBONO ACTUALES

La magnitud del almacenamiento de COS es espacial y temporalmente variable y determinada por diferentes factores abióticos y bióticos (Weissert *et al.*, 2016). A nivel mundial, las reservas de COS más grandes se encuentran en zonas críticas como humedales y turberas, la mayoría de las cuales ocurren en regiones de permafrost y en los trópicos (Gougoulia *et al.*, 2014; Köchy *et al.*, 2015). Otros casos de alto contenido de COS son horizontes del suelo enterrados (> 1 m) por procesos volcánicos, eólicos, aluviales, coluviales, glaciales y antropogénicos (O'Rourke *et al.*, 2015).

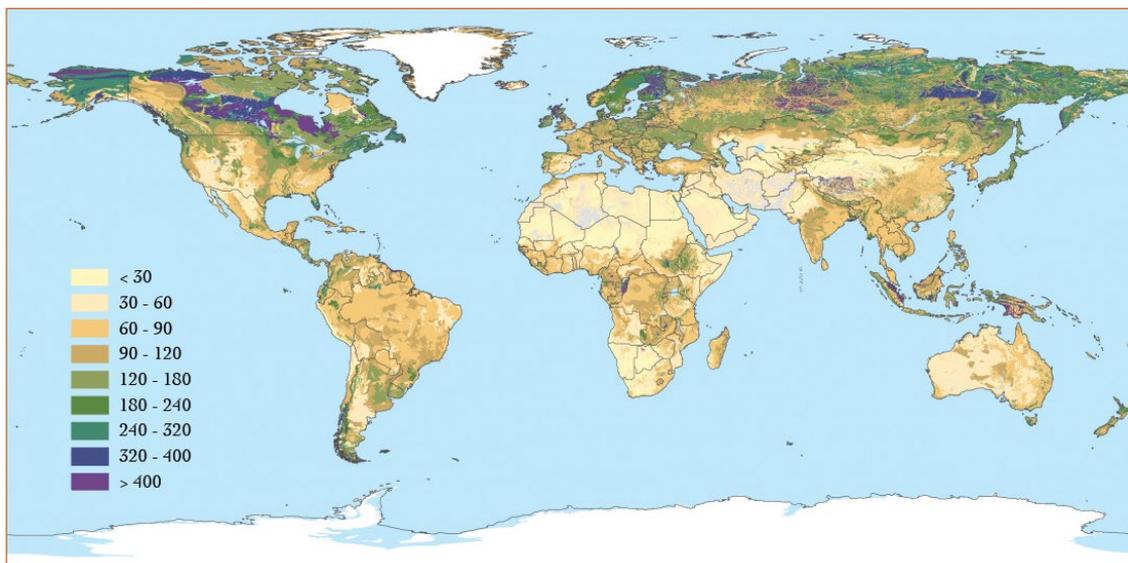


Figura 7 · Mapa más reciente del contenido de COS a 1m de profundidad (MgC ha⁻¹).

De Batjes, 2016.

Note que 1 Mg = 1 t = 10⁹ Pg

La información sobre el método de cálculo se indica en la Tabla 2 en la página siguiente.

Aunque las reservas globales de COS se han estimado alrededor de 1 500 PgC para el primer metro de profundidad (FAO y GTIS, 2015), la Tabla 3 demuestra la alta variabilidad en las estimaciones de COS a lo largo del tiempo y según diferentes cálculos y métodos utilizados. Incluso los mapas de COS publicados más recientemente se basan en datos históricos que se han recopilado durante largos períodos de tiempo en lugar de datos obtenidos a partir de monitoreo reciente y/o actual.

Tabla 3 · Revisión de las estimaciones de existencias globales de COS.

Referencias	SOC stock (PgC)				Método
	0-50cm	0-100cm	0-200cm	0-300cm	
Batjes (1996)	684-724	1 462-1 548	2 376-2 456		Base de datos geo-referenciada (WISE ¹ – 4 353 perfiles del suelo) + DSMW ²
Jobbágy y Jackson (2000)		1 502	1 993	2 344 ³	2 721 perfiles del suelo agrupados por bioma. NSCD ⁴ , WISE y una base de datos del Servicio Forestal Canadiense ⁵
Global Soil Data Task Group (2000) – Programa Internacional sobre la Geosfera y la Biósfera		1 550 (Reserva de COS x area de celda)			Datos de WISE (v.1 - 1 125 perfiles) + DSMW
Hiederer y Köchy (2011)		1 417			HWSD ⁶ versión 1.1
Scharlemann <i>et al.</i> (2014)		1 461 (504-3 000)			Revisión de publicaciones de 1951 a 2011
Shangguan <i>et al.</i> (2014)		1 455	230 cm: 1 923		DSMW y bases de datos regionales/nacionales edáficas
Köchy <i>et al.</i> (2015)		1 062			HWSD + densidad aparente ajustada para suelos orgánicos
		1 325			HWSD + densidad aparente ajustada para suelos orgánicos + mejorada para turberas
Batjes (2016)	755	1 408	2 060		Base de datos WISE _{30sec} +HWSD v1.2 adaptada

¹ Inventario Mundial de Potenciales de Emisiones del Suelo - World Inventory of Soil Emission Potentials (WISE);

² Mapa digital global del Suelo- Digital Soil Map of the World (DSMW), 1961-1981 por IUSS, FAO y UNESCO;

³ De acuerdo con Tarnocai *et al.* (2009), el valor puede subestimar la masa total de material orgánico almacenado en regiones de permafrost;

⁴ Base de datos nacional de caracterización de suelos - National Soil Characterization Database, producida y actualizada por el Departamento de Agricultura de EEUU (1994), que caracteriza 5307 perfiles alrededor del mundo;

⁵ Enfatiza suelos canadienses de bosque y tundra (1997);

⁶ Base de Datos Mundial Armonizada sobre el Suelo (HWSD), basada en el DSMW con actualizaciones de la información mundial del suelo. Versión 1.1 publicada en 2009 y la versión 1.2. en 2012.

3.2 · ZONAS CRÍTICAS Y FAVORABLES DE COS: PRINCIPALES ÁREAS A CONSIDERAR

La distribución del COS es muy heterogénea y depende en gran medida del tipo de suelo, el uso del suelo y las condiciones climáticas. En ciertos tipos de suelo y bajo ciertos usos de la tierra, el almacenamiento de COS es altamente efectivo. Aunque cubren proporcionalmente poca extensión de la superficie terrestre, estas áreas requieren atención especial: son los puntos críticos de COS. Estos puntos críticos son muy sensibles al cambio climático y pueden convertirse fácilmente en fuentes de emisiones de gases de efecto invernadero debido a su alto contenido de COS (Recuadro 1). Por último, las grandes áreas terrestres con bajas reservas de COS por km² representan un potencial para más secuestro de carbono: son los puntos favorables de COS.

3.2.1 · SUELOS NEGROS

Los suelos negros, ampliamente definidos aquí como suelos que contienen un horizonte mólico, cubren alrededor del 7 por ciento de la superficie terrestre libre de hielo (916 millones de ha). La mayoría aparecen en tres regiones del hemisferio norte y en una región al sur del ecuador. Las áreas naturales en las cuales se desarrollaron los suelos negros son las praderas y estepas que experimentan veranos secos y heladas (Altermann *et al.*, 2005; Liu *et al.*, 2012). Estos suelos son de color marrón oscuro a negro debido a su riqueza en humus de alta calidad hasta una profundidad de más de 40 cm - sobre todo de 60 a 80 cm. Este humus de alta calidad es el resultado de una alta saturación de bases (es decir, un alto porcentaje de la capacidad de intercambio catiónico ocupada por los cationes básicos Ca²⁺, Mg²⁺ y K⁺), estructura agregada estable y mezcla biológica intensiva (bioturbación, por ejemplo, por lombrices) (Altermann *et al.*, 2005). En la Base de Referencia Mundial (WRB) para los recursos del suelo, los suelos negros incluyen Chernozems, Kastanozems y Phaeozems. Para los Chernozems, el contenido de COS oscila entre 2.9 y 3.5 por ciento en los 10 cm superiores y supera el 1.2 por ciento en el límite inferior del horizonte chérnico (FAO y GTIS, 2015). Debido a su alta productividad, la mayoría de estos suelos se utilizan intensivamente para la agricultura. Sin embargo, son muy sensibles a la degradación del suelo (por ejemplo erosión, costras y minería de nutrientes) y pérdidas de COS, por lo cual necesitan ser gestionados cuidadosamente para mantener su potencial productivo (Liu *et al.*, 2012).

3.2.2 · PERMAFROST

Las bajas temperaturas y el anegamiento en áreas de permafrost reducen las tasas de descomposición y aumentan la crioturbación como resultado de los procesos de congelación-descongelación. Además, los ambientes de deposición que datan del Pleistoceno han llevado a la acumulación de grandes reservas de COS en la capa activa y el permafrost subyacente (Hugelius *et al.*, 2013; Ping *et al.*, 2015). La acumulación de COS en estos suelos los hace importantes para el sistema climático global debido a su potencial de deshielo y, por tanto, de descomposición de materia orgánica acumulada durante un largo período (Recuadro 1) (Ping *et al.*, 2015). Aunque la distribución del permafrost es mundialmente conocida, las

estimaciones del COS en áreas de permafrost siguen siendo variables (Recuadro 4). Sin embargo, se considera que alrededor del 30 por ciento del total de las existencias de COS a 2 m de profundidad se mantiene en la Región Circumpolar del Norte y que la región del permafrost contiene el doble de carbono que la atmósfera actualmente (Schuur *et al.*, 2015).

Tabla 4 · Estimaciones recientes de las reservas de COS en la región del permafrost.

Referencias	Reservas de COS (PgC)			Método
	0-30cm	0-100cm	0-300cm	
Tarnocai <i>et al.</i> , Pan	191	496	1 024	Región Circumpolar de Permafrost del Norte usando la NCSCDB ¹
Hugelius <i>et al.</i> , 2014	217 ± 12	472 ± 27	1 035 ± 150	Misma metodología que Tarnocai <i>et al.</i> (2009) pero usando datos revisados y cubiertos de lagunas de Hugelius <i>et al.</i> (2013)

1 Base de datos de carbono del suelo en la Región Circumpolar del Norte – Incluye datos de perfiles del suelo no incluidos en la HWSD

3.2.3 · TURBERAS

Las turberas son ecosistemas de humedales caracterizados por la acumulación de materia orgánica (turba) derivada de material vegetal muerto y en descomposición bajo condiciones de saturación permanente de agua (Parish *et al.*, 2008; Orgiazzi *et al.*, 2016). Las turberas y los suelos orgánicos contienen el 30 por ciento del carbono del suelo del mundo, pero sólo cubren el 3 por ciento de la superficie terrestre de la Tierra (3.8 Mm² según la base de datos global de turberas - GPD) en 180 países. La mayoría de ellos aparecen en regiones de permafrost y en los trópicos. Allí, la alta productividad de las plantas se combina con la lenta descomposición como resultado de las altas precipitaciones y la humedad (Figura 8) (Parish *et al.*, 2008; FAO, 2012; Klingenfuß *et al.*, 2014). Las turberas, que tienen una profundidad igual o superior a 30 cm, contienen una masa total de COS de 447 PgC, según la GPD, aunque las incertidumbres alrededor de esta estimación permanecen altas (Köchy *et al.*, 2015). Específicamente, la incertidumbre en la profundidad de la turba sigue siendo el mayor obstáculo para estimar el tamaño de las reservas de C de turberas regionales y globales. La profundidad global estimada de la turba de 2,3 m es, sin duda, incierta, y en muchas regiones falta información sobre dicha profundidad, lo que contribuye a la incertidumbre en las reservas de C de turberas (Buffam *et al.*, 2010).

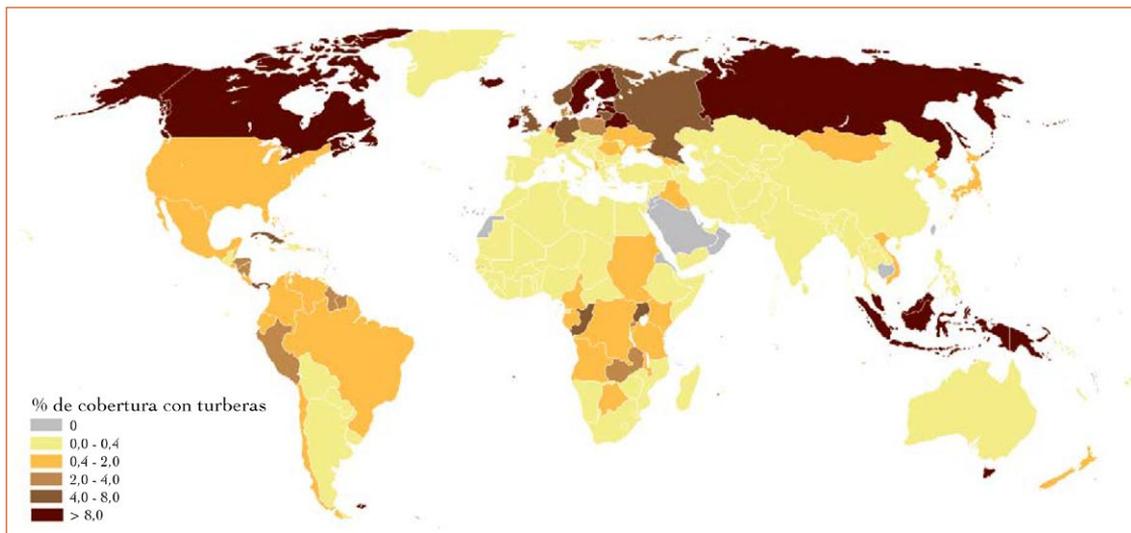


Figura 8 · Distribución de turberas en el mundo

De Parish *et al.*, 2008

3.2.4 · PASTIZALES

Los pastizales, que incluyen dehesas, matorrales, prados y tierras de cultivo sembradas con pastos y cultivos de forraje, cubrían aproximadamente 3.500 millones de hectáreas en 2000 (Figura 9). Actualmente, las praderas cubren aproximadamente el 40 por ciento de la superficie terrestre (McSherry y Ritchie, 2013, Orgiazzi *et al.*, 2016), representan el 70 por ciento del área agrícola global y contienen alrededor del 20 por ciento de las reservas mundiales de COS (FAO y GTIS, 2015). Alrededor del 20 por ciento de los pastizales nativos del mundo se han convertido en cultivos, y una parte significativa de la producción mundial de leche (27 por ciento) y carne de vacuno (23 por ciento) se produce en pastizales gestionados únicamente para esos fines. La industria ganadera -basada en gran medida en praderas- supone la subsistencia para alrededor de 1.000 millones de las personas más pobres del mundo y un tercio de la ingesta de proteínas a nivel mundial. Una de las razones del uso intensivo de praderas es su alta fertilidad natural del suelo. Los pastizales tienen característicamente un alto contenido de MOS inherente, con una media de 333 Mg ha⁻¹. Sin embargo, la Evaluación de la Degradación de la Tierra en Tierras Áridas (LADA) estimó que alrededor del 16 por ciento de las praderas se están degradando actualmente (Conant, 2010).

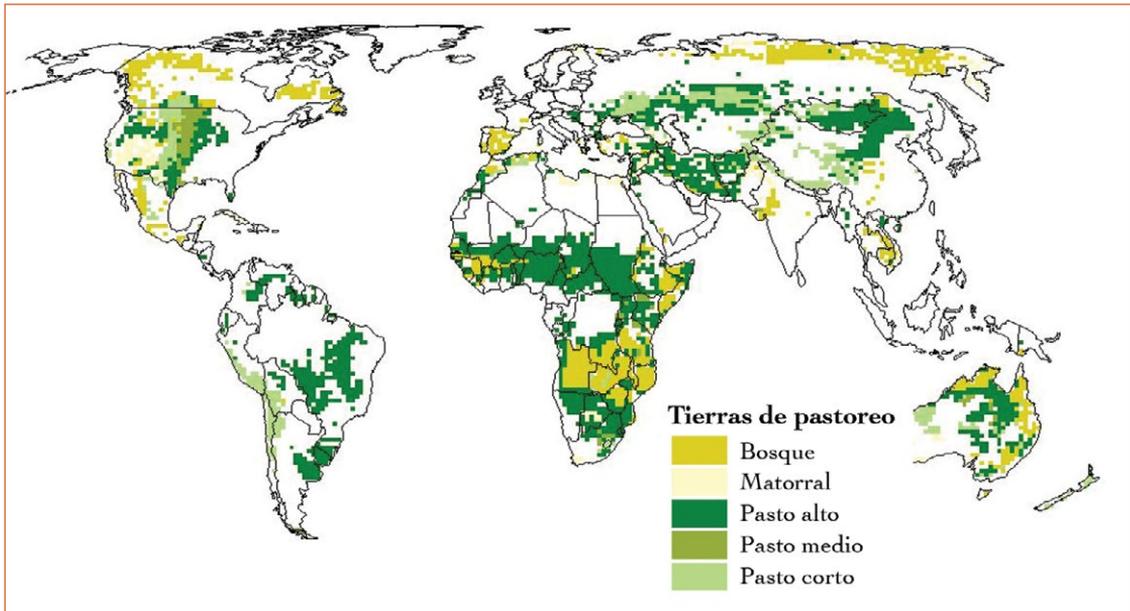


Figura 9 · Distribución de pastizales en el mundo

De Parish *et al.*, 2008

3.2.5 · SUELO FORESTAL

Los bosques cubren 4.03 millones de hectáreas en todo el mundo, aproximadamente el 30 por ciento de la superficie terrestre total. La mayor parte del carbono del suelo se concentra en las turberas dentro de los bosques boreales y los bosques tropicales del sudeste asiático (Figura 10) (Pan *et al.*, 2013). La vegetación forestal y los suelos contienen aproximadamente 1 240 PgC, y las reservas de carbono varían ampliamente entre latitudes. Del total de C terrestre en biomas forestales, el 37 por ciento se encuentra en bosques de baja latitud, el 14 por ciento en latitudes medias y el 49 por ciento en latitudes altas. La reserva de COS puede llegar a comprender el 85 por ciento de las reservas de C terrestres en el bosque boreal, el 60 por ciento en los bosques templados y el 50 por ciento en los bosques tropicales. Una gran parte de la reserva total de COS se encuentra en suelos de regiones de tundra, pre-tundra y taiga. El contenido de COS en suelos forestales puede oscilar de 0 por ciento en suelos muy jóvenes a 50 por ciento en algunos suelos orgánicos o de humedales, conteniendo la mayoría de los suelos entre 0.3 y 11.5 por ciento en los 20 cm superficiales de suelo mineral (Lal, 2005). En todo el mundo, la deforestación causa alrededor del 25 por ciento de la pérdida total de COS (FAO y GTIS, 2015).

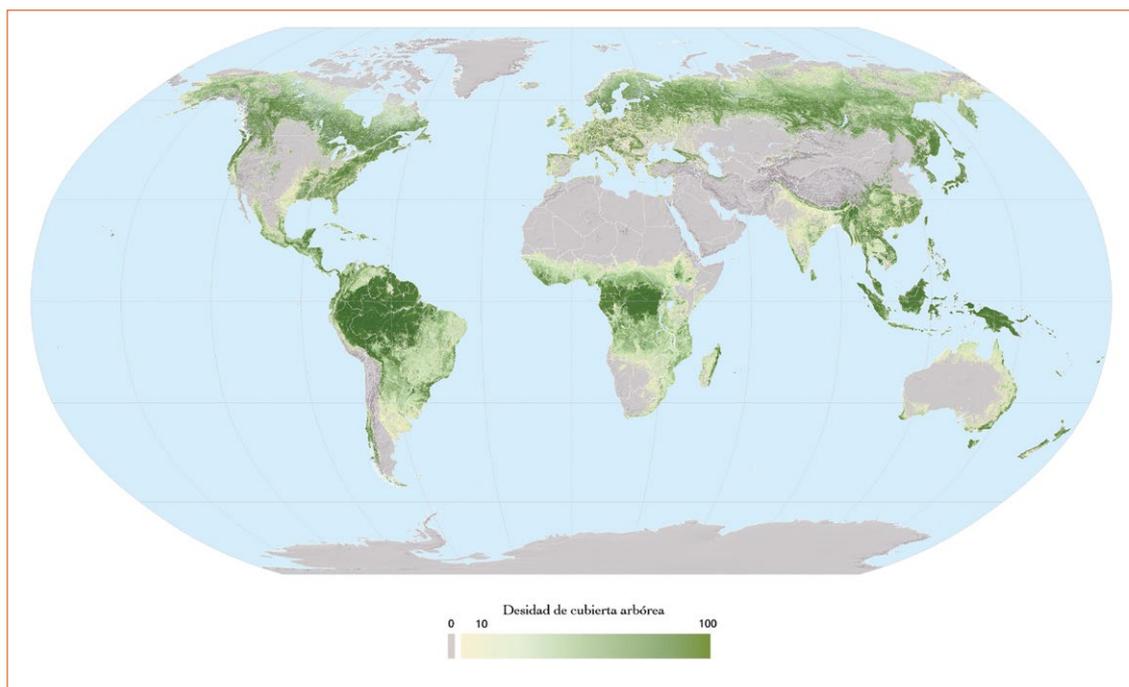


Figura 10 · Densidad de cubierta forestal

De FAO, 2010

3.2.6 · ZONAS ÁRIDAS

Las tierras áridas cubren aproximadamente 430 millones de ha, que comprenden el 40% de la superficie de la Tierra (Figura 11) (FAO y GTIS, 2015). Aunque no hay un límite claro, se considera que las tierras áridas son áreas donde la precipitación media es menor que las pérdidas potenciales de humedad por evaporación y transpiración (FAO, 2004). Los suelos de las tierras áridas se caracterizan por frecuentes tensiones hídricas, bajo contenido de materia orgánica y de nutrientes. Sin embargo, su reserva de carbono representa más de un tercio de la reserva mundial debido principalmente a su gran superficie y su almacenamiento a largo plazo de COS (cuando el suelo no se degrada), más que debido a la cubierta vegetal. Las tierras áridas tienen el potencial de secuestrar más carbono puesto que están lejos de estar saturadas (Naciones Unidas, 2011), pero el almacenamiento de carbono en tierras áridas se ve afectado y limitado por diversos elementos bioclimáticos, y es lento. Además, estos terrenos son susceptibles a diversos tipos de degradación, incluida la erosión eólica, y ciertas prácticas de gestión causan fácilmente la degradación. En consecuencia, los suelos de tierras áridas deben ser gestionados de manera sostenible para mantener sus niveles existentes de COS y fomentar su potencial de secuestro de COS (Naciones Unidas, 2011, FAO y GTIS, 2015).

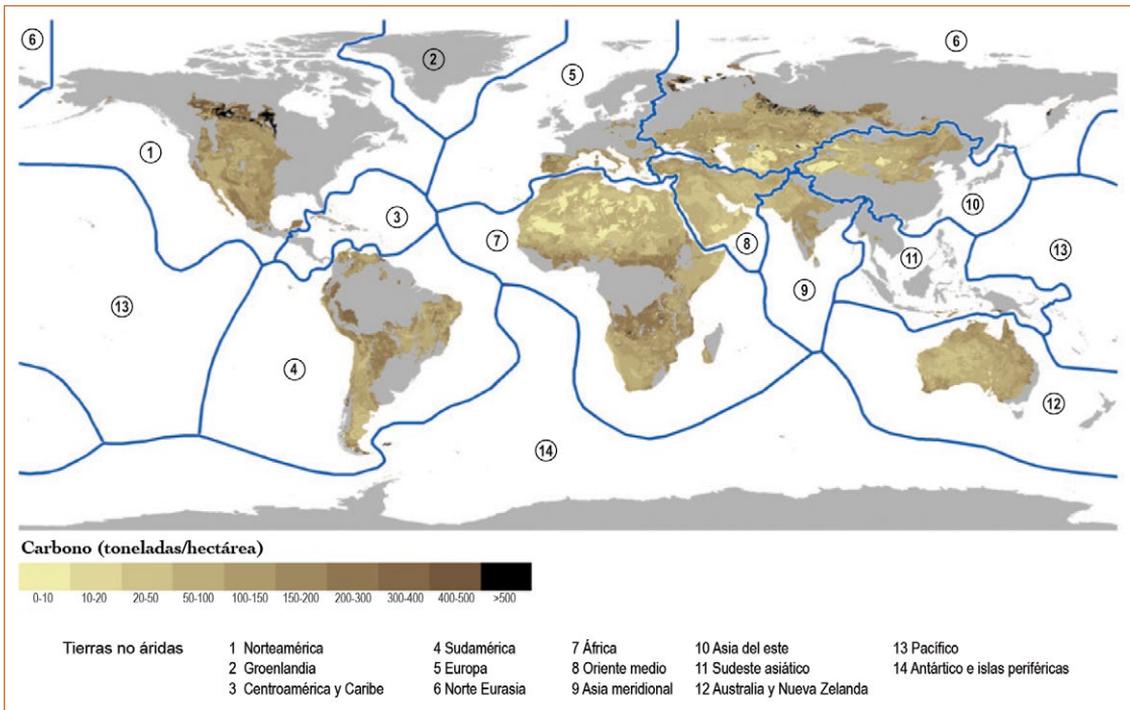


Figura 11 · Cantidad de carbono por hectárea en tierras áridas

De Naciones Unidas, 2010





©FAO/ Hoang Dinh Nam

4 · MONITOREO, CUANTIFICACIÓN, INFORME Y VERIFICACIÓN DE COS

4.1 · MEDICIÓN, INFORME Y VERIFICACIÓN (MRV)

4.1.1 · ¿QUÉ ES MRV Y PARA QUÉ SE USA?

En virtud de la CMNUCC, se requiere que los países cuenten con un sistema nacional de acuerdos institucionales y legales para asegurar la adecuada y oportuna gestión de las emisiones de gases de efecto invernadero a la atmósfera (por ejemplo, mediante la mineralización de la MOS) y de la absorción atmosférica (por ejemplo, secuestro de COS). Estos sistemas de información se denominan sistemas de monitoreo, informe y verificación (MRV) en los cuales:

- El monitoreo (M) se refiere a las variaciones anuales en las reservas de COS debidas a actividades humanas, incluidas las medidas de mitigación, y las emisiones antropogénicas asociadas de GEI y su eliminación (UNFCCC, 2014).
- El informe (R) se refiere al análisis y compilación de datos medidos a través de varios reportes, como las Comunicaciones Nacionales, los Inventarios Nacionales de GEI e Informes Bienales de Actualización en los cuales los países dan cuenta de los resultados de sus acciones para hacer frente al cambio climático (UNFCCC, 2014).
- La verificación (V) se refiere al proceso de verificación independiente de la transparencia, integridad, exactitud y consistencia de la información reportada y de los métodos utilizados para generar dicha información. Al proporcionar retroalimentación sobre la calidad de la información y los métodos, junto con sugerencias para su mejora, la verificación también proporciona garantía y el control de calidad (GC/CC) que mejora todo el proceso de MRV (FAO, 2015).

En general, MRV tiene como objetivo asegurar que la información recolectada en los inventarios nacionales de GEI (y, por consiguiente, en los inventarios de reservas de COS) sea (IPCC, 2006):

- **Transparente:** la documentación es lo suficientemente adecuada y clara como para permitir a cualquier parte interesada que no sea autora del inventario, comprender cómo se ha compilado el inventario y cómo se cumplen los requisitos de buenas prácticas (ver sección 4.1.2).
- **Completa:** se presentan estimaciones para todas las categorías relevantes de fuentes y sumideros (por ejemplo, reserva de carbono en el suelo), y gases. Cuando falten elementos, su ausencia debe documentarse claramente junto con una justificación para la exclusión.
- **Consistente:** las estimaciones se hacen de tal manera que las diferencias en los resultados entre años y categorías reflejan las diferencias reales en las emisiones. Las tendencias de inventarios anuales deben calcularse utilizando el mismo método y las mismas fuentes de datos en todos los años y deben tener por objeto reflejar las fluctuaciones anuales reales de emisiones o absorciones, y no estar sujetas a cambios resultantes de diferencias metodológicas.
- **Comparable:** el inventario se presenta de forma que permite compararlo con inventarios de otros países.
- **Precisa:** el inventario no contiene sobreestimaciones ni subestimaciones en la medida en que se pueda determinar.

En base al Acuerdo de París (Naciones Unidas, 2015), todos los países que ratifican se han comprometido a realizar determinadas contribuciones a nivel nacional (NDC) para mitigar el cambio climático, informar sobre sus emisiones y absorciones antropogénicas, y seguir el progreso de sus contribuciones para la mitigación del cambio climático. El marco MRV supervisa y evalúa la implementación de las contribuciones de mitigación, así como de las políticas y medidas articuladas bajo las NDC de los países (WRI, 2016). El artículo 13 del Acuerdo de París introdujo un nuevo marco de transparencia mejorada para la presentación de informes, que permite una mayor transparencia en la presentación de informes sobre las emisiones de GEI.

4.1.2 · GUÍA PARA INFORMAR SOBRE EL COS EN INVENTARIOS DE GEI

Cada país tiene que informar regularmente al Acuerdo de la CMNUCC/París sobre su nivel de emisiones de GEI (por ejemplo, CO₂, CH₄ y N₂O). Incluso si la forma de estos informes periódicos varía según la situación del país (Anexo 1, no en Anexo 1 o Países Menos Avanzados (PMA)), cada país debe proporcionar información de calidad sobre su nivel de emisión de GEI y evolución, con el fin de demostrar su voluntad y sus esfuerzos para cumplir con los requisitos internacionales para limitar el calentamiento global (UNFCCC, 2016).

Para estimar los cambios de COS y las asociadas emisiones y absorciones antropogénicas de GEI desde la reserva de MOS, los países deben seguir la metodología proporcionada por el IPCC en sus Directrices para Inventarios Nacionales de GEI. Las metodologías y los factores por defecto para la presentación de informes sobre las existencias de MOS figuran en el volumen 4 (“Agricultura, silvicultura y otros usos del suelo” - AFOLU) de las Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de GEI y su Suplemento de Humedales (que se centra en suelos orgánicos de interior, suelos costeros y suelos minerales de humedales continentales). Las otras cinco reservas de C para las cuales se deben reportar las estimaciones de GEI son la biomasa por encima del suelo, la biomasa subterránea, la madera muerta y restos vegetales, y los productos de madera recolectados (IPCC, 2006).

4.1.2.1 · USO DE LA MATRIZ DE USO DEL SUELO Y CAMBIO EN EL USO DEL SUELO (UT/CUT)

Las directrices del IPCC estratifican la presentación de informes sobre la MOS (y, por consiguiente, sobre el COS) en seis categorías de uso del suelo (UT) y treinta categorías de cambio de uso del suelo (CUT), como se muestra en la tabla 5 (IPCC, 2006).

Tabla 5 · Ejemplo de una matriz simplificada de conversión de uso del suelo

Adaptada de IPCC, 2006.

Los valores representan unidades de área (por ejemplo, Mha)

Final \ UT inicial	Terreno forestal	Pastizal	Tierras agrícolas	Humedal	Asentamiento	Otro	Suma total
Terreno forestal	15	3	1				19
Pastizal	2	80					82
Tierras agrícolas			29				29
Humedal				0			0
Asentamiento	1	1	1		5		8
Otro						2	2
Suma inicial	18	84	31	0	5	2	140

4.1.2.2 · CÁLCULOS DIFERENTES PARA DIFERENTES TIPOS DE SUELO

El cálculo de las reservas de COS varía según el tipo de suelo (suelo orgánico o suelo mineral) (IPCC, 2006). Los suelos orgánicos se identifican en base a los criterios 1 y 2 ó 1 y 3, enumerados a continuación (FAO, 1998):

1. Grosor del horizonte orgánico mayor o igual a 10 cm. Un horizonte de menos de 20 cm debe tener un 12 por ciento o más de carbono orgánico cuando se mezcla a una profundidad de 20 cm.
2. Los suelos que nunca están saturados con agua durante más de unos días deben contener más del 20 por ciento de carbono orgánico en peso (es decir, aproximadamente 35 por ciento de materia orgánica).
3. Los suelos están sujetos a episodios de saturación de agua y tienen:
 - a. Al menos 12 por ciento de carbono orgánico en peso (es decir, aproximadamente 20 por ciento de materia orgánica) si el suelo no contiene arcilla; o
 - b. Al menos 18 por ciento de carbono orgánico en peso (es decir, aproximadamente 30 por ciento de materia orgánica) si el suelo contiene 60 por ciento o más de arcilla; o
 - c. Una cantidad intermedia y proporcional de carbono orgánico para cantidades intermedias de arcilla

Todos los demás tipos de suelo se clasifican como minerales. Las clasificaciones de suelo mineral por defecto se basan en la taxonomía del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA) o en la WRB para Clasificación de Recursos del Suelo (FAO, 1998). Ambas clasificaciones incluyen los mismos tipos de suelo por defecto que el IPCC. La clasificación de los suelos minerales por defecto debe usarse junto con los valores de referencia de reserva de C y el factor de cambio de reserva (estratificados según UT/CUT) del IPCC.

Las directrices metodológicas del IPCC siguen dos enfoques generales diferentes para informar sobre los cambios en la reserva de C:

1. Para suelos orgánicos, se basa en el supuesto de que los suelos intercambian gases de efecto invernadero con la atmósfera cuando son afectados por actividades humanas (por ejemplo, drenaje o rehumectación) mientras la actividad humana continúa, o hasta que el suelo pierda suficiente materia orgánica para convertirse en un suelo mineral.
2. Para suelos minerales, se basa en el supuesto de que, dentro de una zona climática y tipo de suelo, el COS está en equilibrio bajo un uso de la tierra, un sistema de prácticas de gestión y un régimen de perturbaciones constantes. En consecuencia, cualquier cambio en el uso de la tierra y/o sistema de prácticas de gestión y/o régimen de perturbación provoca un cambio de COS que se supone que ocurre linealmente a través de un período de tiempo, establecido por defecto a 20 años.

4.1.2.3 · DIFERENTES NIVELES DE INFORMACIÓN: USO DE NIVELES METODOLÓGICOS

Las directrices del IPCC de 2006 fueron diseñadas en tres enfoques nivelados para reportar los cambios en las existencias de C, y las emisiones y absorciones de GEI, incluidos aquellos procedentes de la MOS. La Tabla 6 da una visión general de las diferencias entre los tres niveles. En general, pasar de niveles inferiores a niveles superiores mejora la precisión del inventario y reduce las incertidumbres, pero también aumenta la complejidad y los recursos necesarios para realizar inventarios.

Tabla 6 · Niveles de seguimiento de GEI

Adaptada de IPCC, 2006

Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3
<ul style="list-style-type: none"> • Diseñado para ser el más simple de usar • Las ecuaciones y los valores por defecto de los parámetros (por ejemplo, los factores de emisión y de cambio de existencias) se proporcionan en las directrices del IPCC. • A menudo datos con baja resolución espacial. 	<ul style="list-style-type: none"> • Puede utilizar el mismo enfoque metodológico que el Nivel 1, pero aplica factores de emisión y de cambio de existencias que se basan en datos específicos de cada país o región para las categorías más importantes de uso de la tierra. • Los factores de emisión definidos por países son más apropiados para las regiones climáticas, y las categorías de sistemas de uso de la tierra en ese país. Típicamente se usan una mayor resolución temporal y espacial, y datos de actividad más desagregados. 	<ul style="list-style-type: none"> • Métodos de mayor orden utilizados. • Incluir modelos y sistemas de medición de inventario adaptados a las circunstancias nacionales, repetidos en el tiempo, impulsados por datos de actividades de alta resolución y desagregados a nivel subnacional. • Mayor certeza que las estimaciones de niveles inferiores. • Puede incluir muestreo exhaustivo de campo repetido en intervalos de tiempo regulares y/o sistemas de datos basados en SIG, datos de clase/producción, datos de suelos y datos de actividad de uso y gestión del suelo.

Los métodos predeterminados del IPCC acotan la profundidad del suelo a la cual se estiman los cambios de COS en 30 cm, aunque los países pueden medir el COS y sus cambios para capas más profundas (en tal caso, los factores por defecto del IPCC no son aplicables).

En 2019, se publicarán las directrices metodológicas actuales depuradas con un enfoque particular en los métodos aplicados a los suelos. El refinamiento abordará varios aspectos, como la necesidad de actualizar i) los valores por defecto para los factores de COS y cambio de COS, ii) los factores de emisión y absorción, y iii) la orientación hacia los métodos de niveles más altos para los seis sectores terrestres, con un enfoque especial en tierras de cultivo y pastizales gestionados. Las directrices depuradas tendrán en cuenta los avances científicos realizados en la medición y notificación del COS (es decir, teledetección, SIG, etc.). Para apoyar esta y futuras evaluaciones, se necesitan reservas de referencia de países específicos. Las directrices también se centrarán en la representación de la tierra, especialmente en la identificación y el seguimiento de los sistemas de uso y gestión de la tierra, y los cambios asociados a lo largo del tiempo (IPCC, 2015).

4.2 · MEDICIÓN Y MONITOREO DEL COS

4.2.1 · MEDICIÓN DE COS

4.2.1.1 · MÉTODOS DE MEDICIÓN DEL CONTENIDO DE COS

Para facilitar y asegurar el monitoreo de forma regular, la reserva de COS debe ser medida usando un método que sea rentable y pueda cubrir una gran variedad de tipos de suelos. Sin embargo, aplicar un solo método para analizar el COS en diversas circunstancias es un gran desafío ya que el COS no está distribuido uniformemente en amplias superficies, profundidades, tipos de suelos y posiciones de paisaje. Por lo tanto, se han desarrollado varios métodos para medir y evaluar la dinámica del COS. Hasta la fecha, no existe un método estandarizado para medir la concentración total de carbono en el suelo (Lorenz y Lal, 2016). El Anexo 1 ofrece una visión general de los principales métodos de medición del contenido de COS y MOS, mostrando sus ventajas/desventajas y las aplicaciones actuales. Se han alcanzado buenos resultados para la predicción del contenido de COS mediante métodos innovadores que pueden caracterizar el COS de manera rápida y económica, como la espectroscopia de reflectancia de infrarrojo visible e infrarrojo cercano (Vis-NIR) y de infrarrojo medio (MIR) (Viscarra Rossel *et al.*, 2006; Miltz y Don, 2012). Al mismo tiempo, los métodos que se han desarrollado en el pasado, como la oxidación en húmedo y en seco son todavía de uso común, especialmente en los países subdesarrollados. Se puede recomendar la combustión seca para la medición de COS en lugar del comúnmente usado y económico método Walkley-Black, debido a que este último requiere factores de corrección para la oxidación incompleta. Sin embargo, la combustión en seco tiene altos costos analíticos, y requiere una laboriosa preparación y destrucción de la muestra. Se considera necesaria la aplicación de este método analítico en laboratorios de referencia para construir grandes bibliotecas espectrales y desarrollar modelos de calibración precisos (Shepherd y Walsh, 2002). Sin embargo, los métodos innovadores de modelización, como el aprendizaje de memoria combinado con análisis estratificados, son medios prometedores para optimizar la calibración y desbloquear el potencial de las técnicas espectroscópicas para determinar con precisión y rapidez el COS (Jaconi *et al.*, en revisión).

4.2.1.2 · CÁLCULO DE RESERVAS DE COS

Las reservas de COS se calculan multiplicando la proporción de carbono orgánico (es decir, % masa de C entre 100) por el incremento de profundidad, densidad aparente (DA) y la proporción de suelo libre de fragmentos gruesos (es decir, fragmentos <2 mm) en el incremento de profundidad. La proporción libre de fragmentos gruesos es en base a la masa (es decir, masa de suelo sin fragmentos gruesos/masa total del suelo). Sin embargo, dependiendo del tipo de suelo, la reserva de COS se calcula utilizando diferentes parámetros (Recuadro 3). En suelos de turba y suelos orgánicos en general, la determinación de la reserva de COS es bastante difícil. Para calcular las reservas de C en el caso de la turba, es necesario conocer la extensión (área) de turba (y tipos de turba), la profundidad de turba, % C y DA, los cuales difíciles de obtener (ITPS, 2016).

RECUADRO 3 · CÁLCULO DE LA RESERVA DE COS PARA DIFERENTES TIPOS DE SUELOS

Ecuación 1: Cálculo de la reserva de COS en suelos minerales

$$\text{COS}_{\text{reserva}} = p * \text{DA} * (\text{C}_{\text{total}} - \text{C}_{\text{min}}) * \text{FC}_{\text{pd}}$$

Donde: COS = reserva de carbono orgánico del suelo [kg m^{-2}]
 C_{tot} y C_{min} = (contenido total y mineral (o inorgánico) de carbono [g g^{-1}], a considerar para suelos calcáreos, y si la combustión seca ocurre normalmente a altas temperaturas (de lo contrario C_{tot} es igual a C_{min}) †
 p = profundidad del horizonte/orden de profundidad [m]
DA = densidad aparente [kg m^{-3}]
 FC_{pd} = Factor de corrección de pedregosidad $((1 - \% \text{ piedras})/100)$, incluyendo substracción de gravas y piedras

Ecuación 2: Cálculo de la reserva de COS de capas orgánicas (por ejemplo, mantillo)

$$\text{COS}_{\text{mantillo}} = d * \text{DA} * (\text{C}_{\text{total}} - \text{C}_{\text{min}}) * \text{FC}_{\text{pd}}$$

Donde: $\text{COS}_{\text{mantillo}}$ = carbono orgánico en mantillo [kg m^{-2}]
Peso = peso seco del mantillo muestreado
 C_{tot} y C_{min} = (contenido total y mineral (o inorgánico) de carbono [g g^{-1}], a considerar para suelos calcáreos, y si la combustión seca ocurre normalmente a altas temperaturas (de lo contrario C_{tot} es igual a C_{min}) †

† Valores obtenidos por medición directa o indirecta, ver Anexo 1.

4.2.1.3 · ELEMENTOS IMPORTANTES A CONSIDERAR PARA CALCULAR RESERVAS DE COS

La densidad aparente es el peso del suelo por unidad de volumen (Secretaría AMS y GTIS, 2016), el factor más importante para estimar las reservas de COS y el principal responsable de las variaciones entre estimaciones. Las reservas de COS en áreas con suelos de alto contenido en carbono orgánico son las más afectadas por la variabilidad de DA (Hiederer y Köchy, 2011). Dado que la reserva de COS es función de varios factores, la incertidumbre (o errores en la medición) en un factor, afecta a todos los demás (véanse las ecuaciones del Recuadro 3). Sin embargo, la DA es uno de los parámetros del suelo más subestimados cuando se determina *in situ*. En muchos estudios, falta información sobre el método o el número de réplicas utilizadas para el cálculo de la DA, o ni siquiera se mide o determina. Los valores de DA que faltan suponen un gran error de incertidumbre en las estimaciones de las reservas de COS y de los cambios en las mismas (Walter *et al.*, 2016). Por consiguiente, las medidas para reducir la incertidumbre en las reservas globales de COS deben dirigirse a los suelos que están asociados a una gran extensión (área), altos niveles de C orgánico, baja DA o gran profundidad (Köchy *et al.*, 2015). Se pueden utilizar los siguientes enfoques para obtener la DA (Secretaría AMS y GTIS, 2016, Lorenz y Lal, 2016):

1. La DA se puede medir después del muestreo.
2. Estimada usando las funciones apropiadas de pedotransferencia. Sin embargo, las funciones de pedotransferencia tienen errores mayores que los métodos de estimación y medición.
3. Usando valores de referencia de la bibliografía (es decir, los valores del Nivel 1 o Nivel 2 del IPCC).

La sustracción del contenido de piedra (incluida la grava), es decir, la pedregosidad, para determinar la cantidad de tierra fina, también es crucial para el cálculo exacto de la reserva de COS. La estimación de la pedregosidad es difícil y lleva mucho tiempo, y por lo tanto no se lleva a cabo en muchos inventarios de suelos, o sólo se estima visualmente en el perfil (Secretaría AMS y GTIS, 2016). En lugar de utilizar un valor constante, se recomienda determinar con exactitud la pedregosidad cuando los fragmentos de roca dominan el volumen total de la muestra (por ejemplo, a profundidades de suelo mayores) para reducir posibles errores de medición (Lorenz y Lal, 2016). Los enfoques para obtener la pedregosidad incluyen (Secretaría AMS y GTIS, 2016):

1. Medición directa en muestras de suelo (peso de piedras en un volumen de muestra conocido);
2. Estimación durante el trabajo de campo; y
3. Valores citados en la bibliografía (por ejemplo, valores típicos por tipo de suelo y profundidad – planteamientos de Niveles 1 y 2).

Hasta la fecha, no existe un método práctico y robusto para estimar la pedregosidad. Esto debe desarrollarse para aumentar la exactitud de los cálculos (Lorenz y Lal, 2016), ya que las ligeras sobrestimaciones o subestimaciones de DA y pedregosidad y, por consiguiente, la cantidad de tierra fina, pueden tener un fuerte impacto en las estimaciones de la reserva de COS (Secretaría AMS y GTIS, 2016).

Para evitar la sobrestimación de las poblaciones de COS, especialmente en suelos pedregosos, recientemente se propuso un cálculo más simple (Poeplau *et al.*, 2017):

$$COS_{reserva} = p * (C_{total} - C_{min}) * \frac{masa_{tierra\ fina}}{volumen_{muestra}}$$

Este cálculo subraya que el volumen muestreado (volúmenes de muestra) no debe ser corregido en base a la pedregosidad, sino que la prioridad debe ser estimar de manera precisa la masa de tierra fina (*masa_{tierra fina}*).

Por último, a pesar de que de acuerdo con las directrices del IPCC de 2006, la profundidad necesaria para los inventarios de GEI es de 30 cm, no hay consenso científico sobre la profundidad del suelo a la que deben realizarse las mediciones y estimaciones de las reservas de COS (2006, Lorenz y Lal, 2016). Es bien sabido que el uso y gestión de la tierra es probable que tenga un impacto mayor en capas más profundas del suelo (IPCC, 2006).

4.2.1.4 · AUMENTAR LA ESCALA DE DATOS DE COS

Se necesitan datos a nivel nacional en todos los informes sobre GEI. Por lo tanto, existe la necesidad de escalar los datos disponibles a escalas locales y nacionales. Existen diferentes métodos para ello y en la tabla 7 (Secretaría AMS y GTIS, 2016) se ofrece una visión general de los métodos comunes para escalar.

Tabla 7 · Visión general de los principales métodos de aumento de escala para cuantificar el COS

Tomada de Secretaría AMS y GTIS, 2016

Aumento de escala convencional	De acuerdo de la clase	Derivar las existencias de COS por hectárea por “clase”. Este enfoque se utiliza en ausencia de coordenadas espaciales de los datos de origen
	Geolocalización	Las ubicaciones de puntos con referencia espacial se superponen con capas de GIS de covariables importantes.
Mapeo digital del suelo (todos los métodos requieren Geolocalización)	Recopilación de datos	Regresión múltiple, árbol de clasificación, red neuronal artificial
	Geoestadística	Regresión kriging, kriging con deriva externa
	Sistemas de conocimiento	Sistema de inferencia difusa, árbol de decisión, redes de creencias bayesianas

4.2.1.5 · MONITOREO DE CAMBIOS EN LA RESERVA DE CARBONO A LARGO PLAZO

Los cambios temporales en las reservas de COS pueden evaluarse mediante reiterados inventarios del suelo, mediante programas de monitoreo en sitios representativos antes y después del uso del suelo y/o cambios en la gestión, o mediante muestreo reiterado del suelo

durante intervalos de tiempo regulares (Lorenz y Lal, 2016). Aquellas propiedades del suelo que responden más a la intervención de su gestión pueden monitorearse con bastante facilidad. Sin embargo, los cambios de COS, que también pueden verse afectados por el cambio climático, están sujetos a variabilidad interanual debido a la rotación de prácticas, así como a la irregularidad en el régimen de perturbación y a los ciclos en las variables climáticas. Por lo tanto, las existencias de COS deben ser monitoreadas a lo largo de períodos de tiempo más largos. Por otra parte, los cambios en la reserva de COS son pequeños en relación a las grandes existencias de COS, así como con su variabilidad inherente en el espacio y el tiempo, lo cual requiere técnicas de medición sensibles y la debida consideración de las diferencias mínimas detectables. Por lo tanto, los protocolos de monitoreo deben ser diseñados para detectar cambios en las propiedades del suelo a escalas espaciales y temporales relevantes, con precisión y poder estadístico adecuados. Por ejemplo, el efecto del cambio climático sobre el COS se observa más fácilmente a una escala amplia que a una escala espacial más pequeña (Batjes y Van Wesemael, 2014).

Se recomienda el seguimiento continuo de COS a intervalos de tiempo de 10 años. Puede ser un equilibrio entre la detectabilidad de los cambios y los cambios temporales en las tendencias. Sin embargo, este periodo es más largo que la duración de muchos proyectos de uso y gestión de la tierra que involucran la medición de los cambios en la reserva de COS (es decir, inicio y final del proyecto). Algunos países utilizan un intervalo de 5 años (Batjes y Van Wesemael, 2014).

4.2.1.6 · REDES DE MONITOREO DEL SUELO (RMS)

Dentro de las redes de monitoreo del suelo (RMS), se puede proporcionar información sobre cambios directos en las reservas de COS mediante mediciones repetidas en un sitio dado, así como datos para parametrizar y probar modelos biofísicos a escala de parcela. Las RMS deben estar diseñadas para detectar cambios en las propiedades del suelo a escalas espaciales y temporales pertinentes, con precisión y potencia estadística adecuadas. Sin embargo, la mayoría de las RMS se encuentran en la fase de planificación o en las primeras etapas de su implementación; Pocas redes se encuentran en países en desarrollo, donde la mayoría de la deforestación y cambios de uso de la tierra está ocurriendo. Dentro de estas redes de monitoreo, las zonas pueden ser organizadas de acuerdo con diferentes esquemas de muestreo, por ejemplo, cuadrícula regular, aproximación estratificada o muestreo aleatorio. Deberían asociarse métodos estadísticos adecuados a cada uno de estos diseños de muestreo (Batjes y Van Wesemael, 2014). En el Anexo 2 (lista no exhaustiva) se enumeran ejemplos de RMS nacionales.

4.2.2 · DIFICULTADES A LA HORA DE MEDIR Y MONITOREAR EL COS

En primer lugar, los cambios anuales en el COS son pequeños en comparación con las reservas de COS, y estas son muy variables a lo largo del paisaje. Cambios en el balance de carbono atribuibles a proyectos sólo pueden detectarse después de 5-10 años (FAO, 2015). En segundo lugar, la idoneidad de los datos existentes para supervisar los cambios en las reservas de COS es incierta. Existe actualmente una gran necesidad de revisar metodologías, incluidas las

de muestreo del suelo, y de información actualizada sobre teledetección e información sobre el terreno para aumentar la credibilidad de los datos globales (Lorenz y Lal, 2016). A nivel mundial, para que un programa de monitoreo de COS pueda representar los principales tipos de ecosistemas y permitir que se estimen tanto las reservas de COS como los cambios de las reservas, aún quedan varios retos por resolver:

- 1. Armonización:** Dado que la información sobre el COS se encuentra geográficamente desequilibrada, un desafío inmediato es la armonización de los programas regionales existentes de monitoreo de suelos y bases de datos de suelos (Batjes y Van Wesemael, 2014; Jandl *et al.* 2014; Secretaría AMS y GTIS, 2016). La armonización hace referencia a la minimización de las diferencias sistemáticas entre las diferentes fuentes de medidas ambientales (Batjes y Van Wesemael, 2014).
- 2. Métrica universal:** Es necesaria la identificación de una métrica universal para la supervisión del COS. Generalmente, la información está disponible para el contenido total de C, que luego se convierte en el conjunto de COS total (Jandl *et al.*, 2014).
- 3. La resolución espacial y temporal universal:** la adopción de una resolución espacial y temporal apropiada desde el punto de vista científico y político (por ejemplo, para la CMNUCC) para la medición del COS, así como protocolos globales consistentes son finalmente necesarios (Batjes y Van Wesemael, 2014).
- 4. Medida de la profundidad del suelo:** Se requiere un enfoque estandarizado de la profundidad del suelo para las estimaciones de las existencias de COS, ya que éste puede distribuirse de forma desigual en el perfil del suelo (Jandl *et al.*, 2014, Lorenz y Lal, 2016).
- 5. Protocolos de campo y muestreo:** Se necesitan protocolos específicos de trabajo de campo y sistemas de muestreo eficaces para la evaluación de la dinámica del COS. La gran heterogeneidad espacial del COS, en contraste con su moderado cambio temporal, requiere protocolos de muestreo económicos para captar adecuadamente las dinámicas del COS a escala de paisaje e identificar pequeños cambios de COS en un conjunto altamente variable (Batjes y Van Wesemael, 2014; Jandl *et al.*, 2014, Lorenz y Lal, 2016).
- 6. Necesidad de incluir el COS en experimentos del suelo:** Los programas de monitoreo de COS deben enlazarse con experimentos edáficos a largo plazo que ofrezcan una línea base de la reserva de COS y puedan incluir un conjunto de zonas donde realizar investigaciones específicas sobre los procesos del suelo y sus impactos en el COS (Jandl *et al.*, 2014).
- 7. Mejora de la comprensión:** La comprensión de los procesos de estabilización del COS es incompleta. No existe un acuerdo general sobre los métodos de fraccionamiento de COS para estimar el grado de estabilización logrado (Jandl *et al.*, 2014).

4.2.3 · VERIFICACIÓN DE LAS ESTIMACIONES DE LA RESERVA DE COS

La evaluación de la Garantía de calidad y el Control de calidad GC/CC contribuye a la mejora de transparencia, consistencia, completitud, exactitud y, por tanto, comparabilidad de los inventarios de GEI. El proceso de GC/CC es parte del proceso interno de verificación. El control de calidad es un sistema planificado de procedimientos de revisión llevados a cabo por terceros que no están directamente involucrados en el proceso de monitoreo/reporte. Las revisiones se realizan en un inventario completado usando procedimientos de CC. A su vez, verifican que se cumplan los objetivos cuantificables, asegurando que el inventario represente las mejores estimaciones posibles de emisiones y absorciones dado el estado actual del conocimiento científico y la disponibilidad de datos, y apoye la efectividad del programa de CC. Las actividades de control de calidad incluyen métodos generales tales como la verificación exacta de la recolección y cálculo de datos, y el uso de procedimientos normalizados aprobados para la recopilación de datos, cálculos de emisiones y absorciones, incluyendo incertidumbres asociadas, archivado de datos e informes (IPCC, 2006).

En cuanto a la recolección de datos (es decir, las mediciones), las RMS deberían incluirse en un programa de validación de métodos cruzados más amplio para permitir en última instancia comparaciones validadas tanto espacial como temporalmente dentro de y entre países (Batjes y Van Wesemael, 2014). Por último, la verificación de acuerdo con el IPCC implica la comparación de las estimaciones del inventario nacional de GEI con estimaciones alternativas y también es una medida para asegurar la calidad de las estimaciones preparadas (IPCC, 2006). Un resumen del proceso MRV bajo el marco del COS se muestra en la Figura 12.

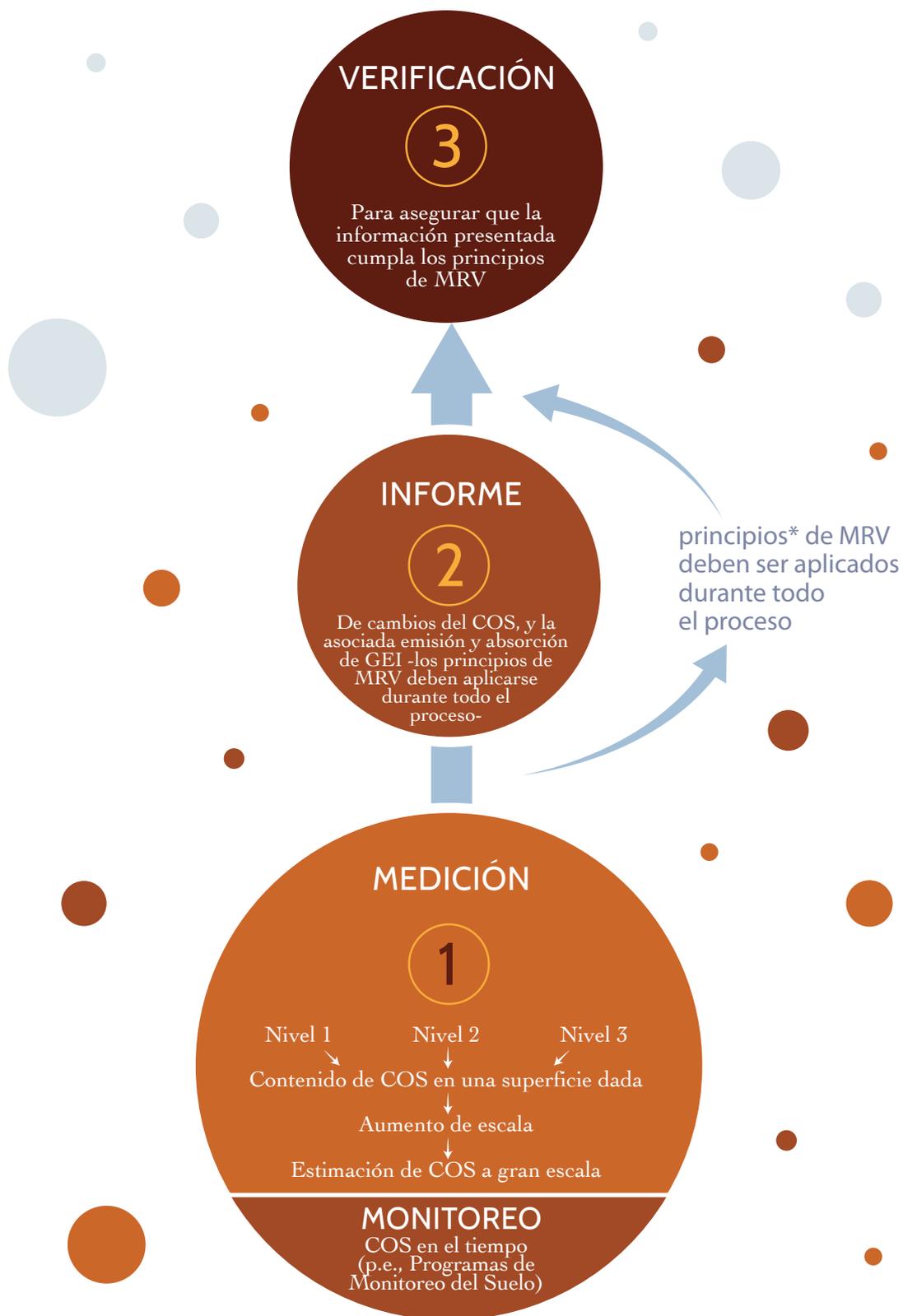
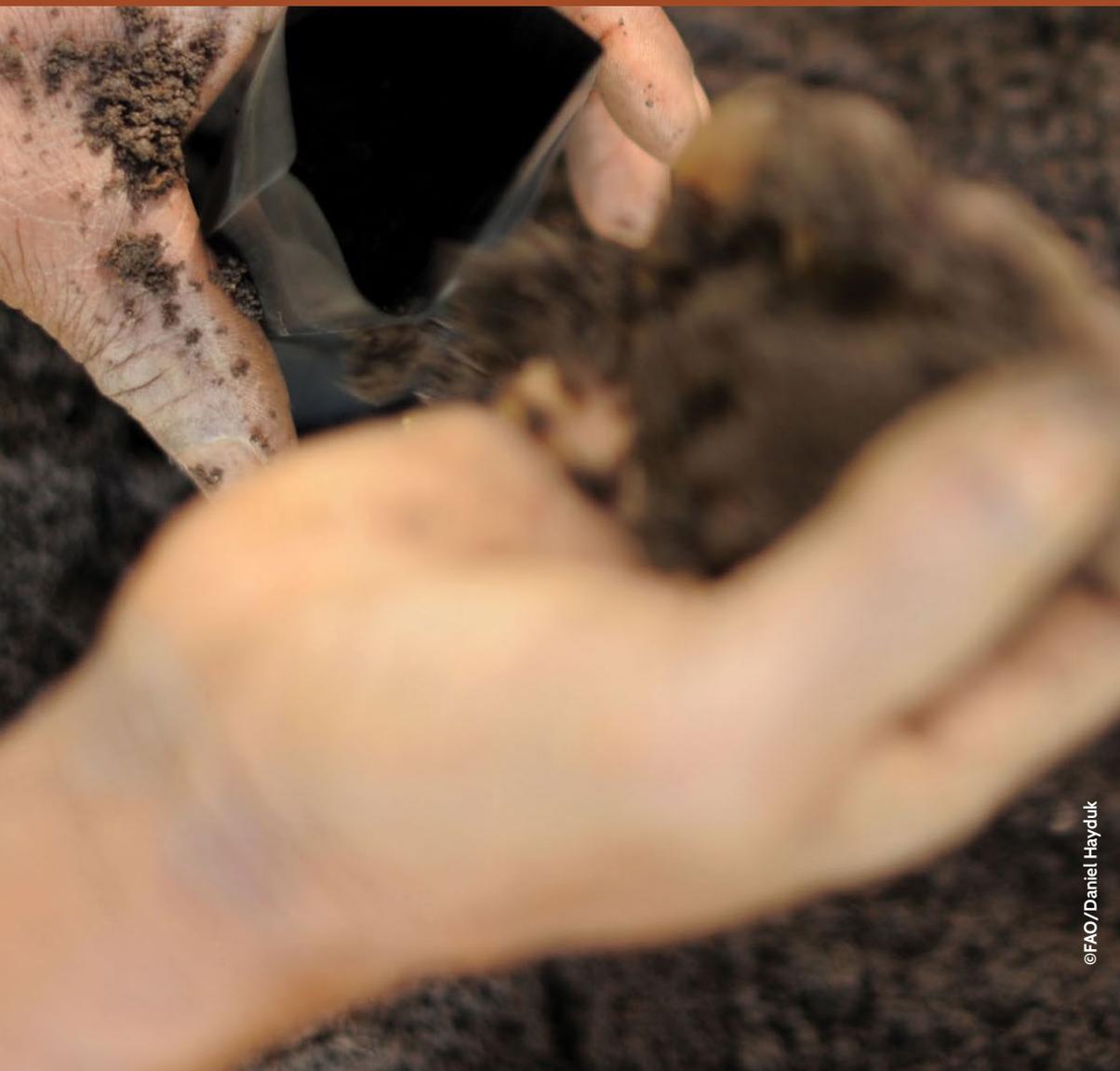


Figura 12 · Resumen del marco de monitoreo, informe y verificación (MRV) del COS

*Principios de MRV: Precisión, consistencia, completitud, comparabilidad y transparencia (Ver sección 4.1.1)

5 · GESTIÓN DEL COS PARA LA PRODUCCIÓN SOSTENIBLE DE ALIMENTOS Y LA MITIGACIÓN DEL Y ADAPTACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO



5.1 · GESTIÓN DEL COS PARA LA PRODUCCIÓN SOSTENIBLE DE ALIMENTOS

Se ha reconocido ampliamente que el secuestro de COS puede tener gran importancia como medida de mitigación del y adaptación al cambio climático. Sin embargo, a menudo se olvida que el COS (como un indicador de la MOS) desempeña un papel igualmente importante para garantizar la seguridad alimentaria. Esto se logra mejorando la productividad del suelo y manteniendo consistentemente altos rendimientos, particularmente aumentando la capacidad de retención de agua y nutrientes, y mejorando la estructura del suelo, mejorando así las condiciones de crecimiento de las plantas (Zdruli *et al.*, 2017)

Es probable que el cambio climático tenga un fuerte impacto en la agricultura, lo que supone una gran amenaza para la seguridad alimentaria (FAO, 2015). Se cree que la proyección del IPCC de un incremento de la temperatura de 4 °C hasta finales del siglo XXI causará repercusiones devastadoras para la seguridad alimentaria, dada la creciente demanda mundial de alimentos (IPCC, 2007). De hecho, el cambio climático es uno de los principales desafíos que enfrenta el sector agrícola mundial para satisfacer las necesidades mundiales de alimentos. La seguridad alimentaria en relación con el cambio climático se ve afectada en cuatro dimensiones diferentes (FAO, 2015):

- disponibilidad de alimento
- accesibilidad al alimento
- estabilidad en el suministro de alimento
- capacidad de los consumidores para utilizar adecuadamente el alimento (seguridad alimentaria y nutrición).

El cambio climático, como lo demuestra el aumento de las temperaturas, los cambios en los patrones de precipitación y los fenómenos meteorológicos más frecuentes y extremos, afectan enormemente la producción agrícola y ganadera. Además, el aumento de la temperatura de los cuerpos de agua, la disminución de los niveles de pH y los cambios en los patrones actuales de productividad del mar afectan más a la producción pesquera. En consecuencia, se prevén importantes desventajas que incluyen la reducción de los rendimientos, la migración biológica, la disminución de la agrobiodiversidad y los servicios ecológicos, la pérdida de ingresos agrícolas, y el aumento de los precios de los alimentos y los costes de transacción (FAO, 2015). Por lo tanto, existe la voluntad de perfeccionar las medidas que alivian los riesgos que afectan la seguridad alimentaria mundial. Siendo tan vital como lo es para la mitigación del y adaptación al cambio climático, el COS es clave para asegurar un suministro global constante de alimentos.

El contenido de carbono orgánico del suelo es una de las principales propiedades del suelo, asociada a muchas funciones del suelo. Es una fuente de nutrientes y es crucial para la producción agrícola. Los aumentos en las existencias de COS aumentan los rendimientos de los cultivos en la agricultura comercial de alto insumo, pero especialmente en tierras degradadas de bajos insumos. En áreas como el África Subsahariana (ASS), donde los agricultores de subsistencia experimentan deficiencias en la disponibilidad de fertilizantes y un riego adecuado, el COS es la clave para el aumento de la producción (Lal, 2004). Muchos estudios han cuantificado las

contribuciones del COS en términos de producción de alimentos. De Moraes Sá *et al.* (2017) informaron que la adopción de prácticas agrícolas de conservación de COS puede aumentar la producción de alimentos en 17,6 Mt/año. Lal (2004) especificó que un aumento de 1 tonelada en la reserva de COS de tierras de cultivo degradadas puede aumentar los rendimientos de trigo en 20-40 kg ha⁻¹, el maíz en 10-20 kg ha⁻¹ y el caupí en 0,5-1 kg ha⁻¹. Por lo tanto, una gestión sostenible del suelo que incremente las reservas de COS debe ser llevada a cabo a nivel local y global, y debe ser adoptada para sistemas de alimentos más sostenibles.

5.2 · GESTIÓN DEL COS PARA LA MITIGACIÓN DEL Y ADAPTACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO

La mitigación del cambio climático hace referencia a los esfuerzos dirigidos a restringir, detener y/o revertir el cambio climático a través de estrategias de gestión, cambios de comportamiento e innovaciones tecnológicas que reducen la emisión de GEI. El CO₂ es uno de los gases de efecto invernadero más emitidos por actividades humanas en la actualidad (Kane, 2015). Con prácticas proactivas de mitigación adecuadas, los suelos pueden desempeñar un papel integral en la reducción de las emisiones de CO₂ debido a su potencial como sumidero de carbono (Lal, 2004). Los beneficios derivados de estas acciones de mitigación tienden a ser globales y a largo plazo (IPCC, 2007).

Por otra parte, la adaptación al cambio climático se refiere a los esfuerzos encaminados a lograr una mayor resiliencia frente a condiciones y acontecimientos climáticos sin precedentes. Implica la anticipación del cambio climático y sus efectos adversos, y se esfuerza por administrarlos mediante acciones apropiadas que minimicen los riesgos asociados y los impactos negativos. Para decirlo simplemente, son acciones que ayudan a los sistemas naturales y humanos a adaptarse a un clima cambiante (IPCC, 2014). Contrariamente a la mitigación, las medidas de adaptación pueden ser tanto reactivas como proactivas, y los beneficios suelen ser locales y a corto plazo (IPCC, 2007). Las medidas de adaptación a menudo pueden involucrar al suelo: en un intento por superar la vulnerabilidad y crear resiliencia frente a condiciones climáticas extremas como tormentas, inundaciones y sequías, los suelos sanos y adecuadamente gestionados pueden actuar como un amortiguador. Por ejemplo, los suelos con un contenido óptimo de COS pueden absorber y almacenar el agua de una lluvia abundante y ponerla a disposición para la vegetación bajo condiciones de sequía. Los suelos sanos pueden proporcionar una aireación adecuada y un suministro constante de oxígeno que puede impedir cualquier otra emisión de carbono resultante de la metanogénesis (FAO y GTIS, 2015). Las medidas de mitigación y adaptación ofrecen soluciones que responden al cambio climático y que pueden relacionarse con los objetivos de desarrollo sostenible. Sin embargo, no siempre se consideran complementarias a escala local; A veces son sustituibles, competitivas/conflictivas o independientes entre sí. Por ejemplo, algunas medidas de adaptación al cambio climático, como optimizar la fertilización y el riego, tienen una alta demanda de energía y pueden suponer emisiones de CO₂ aún mayores. Por otra parte, puede que la adaptación nunca sea un sustituto perfecto de la mitigación, ya que ésta será siempre necesaria para evitar cambios aún mayores en el sistema climático. Actualmente, debido al calentamiento ya presente, se requieren medidas de adaptación a pesar de los mayores costes financieros asociados, independientemente de la escala de esfuerzos de mitigación (IPCC, 2007).

Dado el papel de los suelos en la mitigación del y adaptación al cambio climático, y las limitaciones presentadas por la saturación del COS en el secuestro de insumos adicionales de carbono, se requiere una gestión acertada del suelo para asegurar que un suelo se convierta en un sumidero y no en una fuente de CO_2 atmosférico (Paustian *et al.* Al., 2016). Por lo tanto, para cualquier ecosistema dado, es ideal estudiar y determinar tanto las reservas actuales de COS como el punto de saturación de carbono respectivo para determinar el potencial de secuestro de carbono del suelo. Sólo entonces será posible lograr la máxima eficiencia del secuestro de COS mediante estrategias de gestión adaptativa. La Figura 13 muestra las estrategias recomendadas y disuadidas de gestión que fomentan el COS para la producción óptima de alimentos, y la mitigación del y adaptación al cambio climático. Estas prácticas abordan los desafíos anteriores a través de una serie de mecanismos que tienen como objetivo: incrementar el potencial de secuestro fotosintético y de COS (es decir, mediante forestación, reforestación y cultivo de cobertura); disminuir las emisiones de GEI y las pérdidas de COS (es decir, mediante laboreo de conservación o reducido y la agricultura orgánica); y aumentar la producción de alimentos mediante la mejora de las propiedades del suelo para una mejor capacidad de almacenamiento de agua, nutrientes y pH (es decir, mediante la adición de enmiendas orgánicas como composta y biocarbón/biochar).



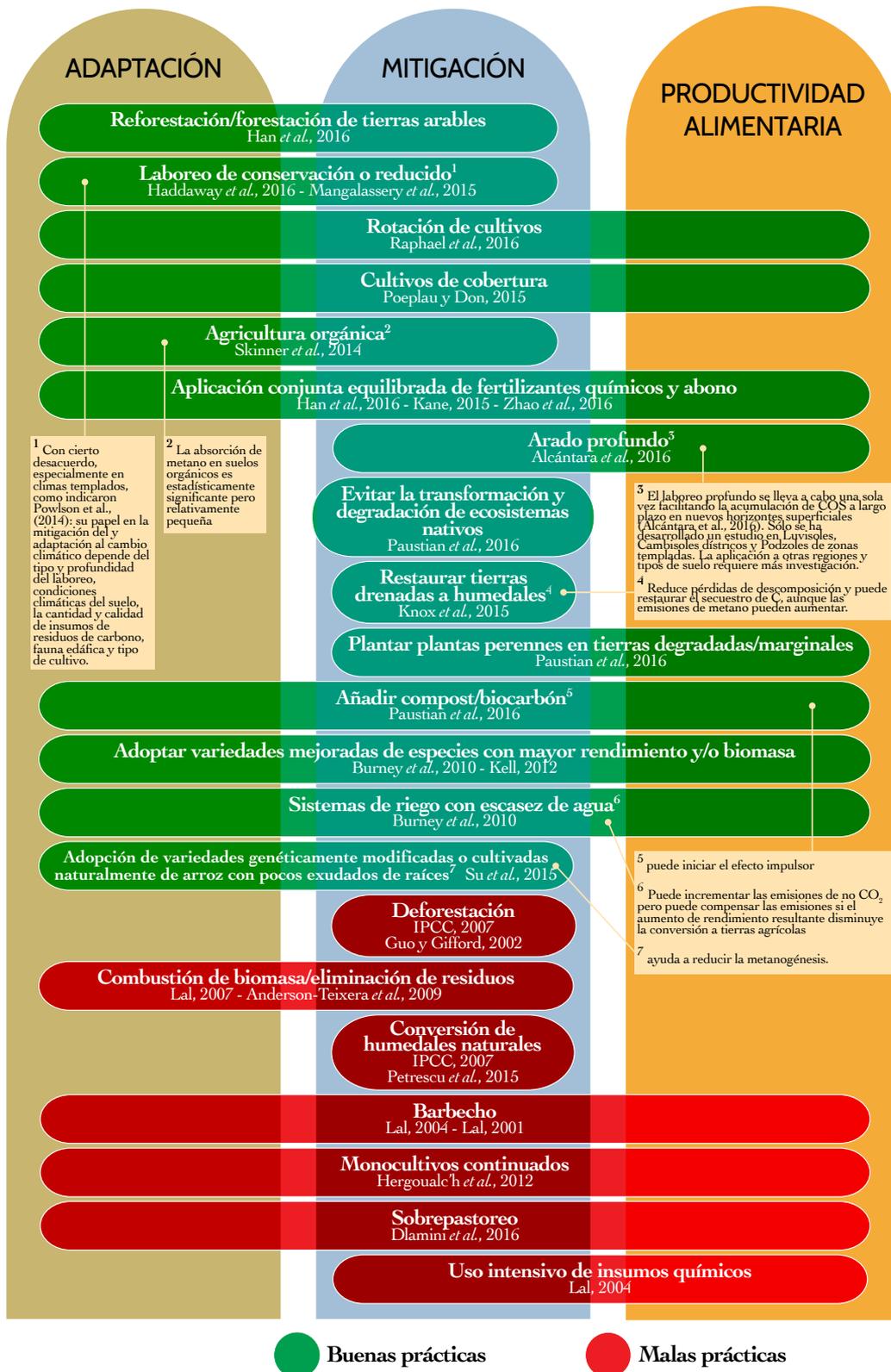


Figura 13 • Estrategias de manejo sugeridas y disuadidas para el secuestro de carbono en el suelo y su impacto en la productividad de los alimentos y mitigación y adaptación al cambio climático.

Los colores indican prácticas buenas (verdes) y malas (rojas). Parcialmente adaptado y modificado de Ogle *et al.*, 2014, y Descheemaeker *et al.*, 2016

5.3 · DESAFÍOS EN EL SECUESTRO DE CARBONO

Los desafíos en el secuestro y preservación de COS son múltiples. Algunos se deben a factores inducidos por el ser humano, tales como las bajas tasas de adopción de prácticas sostenibles de gestión del suelo, debido a razones diversas (FAO y GTIS, 2015). Otros están relacionados con factores abióticos y están más allá del control humano. En esta sección se debaten las diferentes barreras para la adopción de medidas relevantes y los factores abióticos que dificultan el secuestro de COS.

5.3.1 · BARRERAS PARA LA ADOPCIÓN DE MEDIDAS DE ADAPTACIÓN Y MITIGACIÓN DEL CAMBIO CLIMÁTICO

5.3.1.1 · BARRERAS FINANCIERAS

Las barreras financieras son una de las principales barreras que restringen la implementación de estrategias de adaptación (Antwi-Agyei, 2012, 417, 2017 y Azahoni *et al.*, 2015). De hecho, todas las prácticas de adaptación y mitigación del cambio climático implican un coste financiero directo y/o indirecto (Takahashi *et al.*, 2016). Un ejemplo de coste directo de adaptación al cambio climático sería el uso de costosas variedades mejoradas de cultivos que ofrezcan tolerancia a condiciones desfavorables de cultivo o la aplicación de insumos no agrícolas y ricos en carbono. Por otra parte, los costes indirectos incluyen prácticas con altos costes de oportunidad que requieren una inversión de tiempo que de otra manera podría estar dirigida a actividades para producir ingresos (Boon, 2013) (por ejemplo, incorporar residuos de cultivos al suelo versus cuidar cultivos o venderlos como biomasa).

Las barreras financieras que pueden disuadir a los agricultores de implementar las prácticas de generación de COS pueden ser en forma de déficit presupuestario o de finanzas limitadas y acceso al capital a nivel de finca, provincial o nacional (UN-HABITAT, 2010, Takahashi *et al.* 2016). Otros incluyen el alto riesgo cambiario debido a la fluctuación de los tipos de cambio; costes iniciales de inversión tales como los de equipo, maquinaria y mano de obra; costes de oportunidad de los activos del hogar; costes asociados con el tiempo y los viajes para acceder a asesoramiento técnico o insumos; y potencialmente bajos rendimientos dados por la incertidumbre de los beneficios probables (FAO, 2015). De hecho, en un estudio realizado por Takahashi *et al.* (2016) sobre las barreras que los agricultores experimentan en la adopción de medidas de adaptación al cambio climático, la respuesta más frecuente fue la consideración económica, particularmente el riesgo económico relativo a la implementación de una nueva práctica o la imprevisibilidad de las cambiantes condiciones de mercado en relación con el cambio climático. Por lo tanto, la financiación es un factor esencial en la implementación de prácticas entre agricultores (Takahashi *et al.*, 2016).

5.3.1.2 · BARRERAS TÉCNICAS Y LOGÍSTICAS

A pesar de que los avances tecnológicos como las nuevas variedades de cultivos, maquinaria para la conservación de los suelos y sistemas de riego se consideran una de las principales vías agrícolas de adaptación y mitigación del cambio climático (Smit y Skinner, 2002), la falta de tecnología suele ser una de las barreras para la adopción de medidas de mitigación y adaptación (FAO, 2015). Estas barreras para la adopción son especialmente pronunciadas en las regiones menos desarrolladas, como en ASS (Kithiia, 2011; Antwi-Agyei, 2012), donde los agricultores tienen poco o ningún acceso a tales herramientas (Kolikow *et al.*, 2013). Como tal, estas limitaciones pueden restringir las oportunidades de los agricultores para lograr la resiliencia agrícola y mejorar la seguridad alimentaria a través de prácticas de mitigación y adaptación que fomentan el secuestro de COS (Antwi-Agyei, 2012).

Las barreras técnicas pueden aparecer en muchas formas, incluyendo la falta de disponibilidad de tecnologías apropiadas, capacidad técnica y/o equipo, y baja detección de cambios a corto plazo, tales como los encontrados durante las mediciones periódicas de la dinámica de COS (FAO, 2015). Las barreras logísticas han sido reportadas como la dificultad y complejidad para hacer adaptaciones a las tendencias climáticas a largo plazo debido a la alta variabilidad interanual, especialmente dado el alto riesgo de fracasos a corto plazo y la inviabilidad de las prácticas adaptativas de un año a otro (Takahashi *et al.*, 2016).

5.3.1.3 · BARRERAS INSTITUCIONALES

Instituciones como los gobiernos tienen el poder de aumentar o eliminar las barreras, y pueden actuar como puente u obstáculo para implementar medidas de adaptación al y mitigación del cambio climático (Bessbroek *et al.*, 2013). Por ejemplo, las bajas tasas de adopción de prácticas de mitigación y adaptación al cambio climático en muchos países del África subsahariana pueden atribuirse a sus políticas gubernamentales ineficazmente burocráticas, que a menudo limitan las estrategias de adaptación a nivel regional y local (Sietz *et al.*, 2011; Antwi-Agyei, 2012). Las barreras institucionales pueden aparecer como regulaciones de políticas nacionales, pero también como propiedad insegura de la tierra; mercados imperfectos y baja capacidad de asumir riesgos; servicios limitados de investigación y extensión; débil coordinación interinstitucional; convenciones culturales de género; y un énfasis concentrado en los beneficios de mitigación sin considerar los beneficios que no están relacionados con el cambio climático (FAO, 2015).

La toma de decisiones en granjas, y las prácticas agrícolas y ganaderas son en gran parte impulsadas por los mercados disponibles y el modelo de negocio (Antwi-Agyei *et al.*, 2015). Por ejemplo, los agricultores perciben que debido a sus vínculos preestablecidos a largo plazo con mercados específicos, encontrar nuevos mercados para nuevos cultivos o nuevos híbridos o variedades que secuestran más carbono en el suelo es una tarea difícil, ya que es poco probable que un agricultor cambie o intercale cultivos a menos que haya un mercado garantizado (Takahashi *et al.*, 2016). Sin embargo, la falta de mercados fácilmente disponibles también puede suponer un desarrollo deficiente de la infraestructura física, como las redes de carreteras, o la ausencia de instalaciones de almacenamiento adecuadas para determinados cultivos. Esto desalienta particularmente la adopción, ya que debilita el poder de negociación de muchos pequeños agricultores que no pueden almacenar sus cosechas en sus fincas si deciden hacerlo cuando los precios de mercado son bajos (Antwi-Agyei *et al.*, 2015).

Además, en muchas comunidades de pequeños agricultores, especialmente en los países en desarrollo, el único vínculo que los agricultores tienen con activos de conocimiento y las innovaciones tecnológicas para la gestión sostenible del suelo es a través de servicios de extensión. Dado que el papel de los extensionistas es facilitar y transferir los avances científicos de la agricultura, a menudo se encuentran abrumados por el número de comunidades de las cuales son responsables. Esto impide la eficacia de atender a las necesidades de todos los agricultores y dificulta la adopción de prácticas de conservación del suelo. Por lo tanto, la débil capacidad institucional lleva a la falta de fiabilidad o mera falta de información sobre la adaptación al clima que, junto con la variabilidad meteorológica, pondrá la seguridad alimentaria en muchos países en desarrollo bajo considerable estrés (Antwi-Agyei, 2012).

5.3.1.4 · BARRERAS DE CONOCIMIENTO

Las barreras de conocimiento en forma de falta de información o de concienciación son uno de los principales obstáculos para reducir la degradación de las tierras, mejorar la productividad agrícola y facilitar la adopción de una gestión sostenible de la tierra entre los pequeños agricultores (Liniger *et al.* 2011). En los países subdesarrollados, la falta de equipos de última generación en los departamentos meteorológicos se traduce en una mala información sobre las condiciones meteorológicas, lo que da lugar a la baja adopción de estrategias de gestión que mitiguen y se adapten al cambio climático por parte de los agricultores (Antwi-Agyei, 2012). Es importante señalar que la información climática fidedigna, como las previsiones anuales, es igualmente importante para la seguridad alimentaria, dado que muchos sistemas agrícolas dependen globalmente de la agricultura de secano o de temporal y las previsiones estacionales pueden no ser la mejor opción para la planificación a largo plazo de actividades agrícolas (Ziervogel *et al.*, 2010). El suficiente conocimiento de las diferentes opciones disponibles también es crucial para que los agricultores tomen decisiones argumentadas sobre las mejores estrategias de gestión (Lee, 2007).

Un aspecto significativo en relación con la barrera del conocimiento es que en algunos casos, no se trata tanto de lo que se transmite al agricultor sino de quién lo transmite. En una encuesta realizada por Takahashi *et al.* (2016), muchos agricultores encuestados expresaron su escepticismo sobre la exactitud de la información procedente de ciertas fuentes, concretamente, de partes políticas, y subrayaron la necesidad de acceso a la información procedente de fuentes fidedignas, coherentes, objetivas y apolíticas. En general, es deseable e incluso se espera que los agricultores formen parte de paneles o comisiones sobre la gestión sostenible del suelo y para la formulación de políticas, ya que los agricultores, junto con los agentes de extensión cooperativos, son considerados las fuentes más fiables de información local (Takahashi *et al.* 2016).

5.3.1.5 · BARRERAS DE RECURSOS

La ausencia de suficiente tierra, mano de obra, insumos, agua y/o plantas disponibles para comenzar a adaptarse y mitigar el cambio climático pueden considerarse como barreras de recursos (Takahashi *et al.*, 2016). En un estudio, se identificó que el mayor obstáculo para mejorar las funciones del suelo y otros servicios de los ecosistemas en el África subsahariana

era la falta de residuos vegetales debida a la baja productividad de los suelos (Palm *et al.*, 2014). En términos de mano de obra, por ejemplo, muchos agricultores, especialmente en los países en desarrollo, dependen del trabajo fuera de la explotación como una fuente adicional de ingresos, lo que a su vez limita el tiempo que dedican a trabajar en sus explotaciones implementando prácticas innovadoras y sostenibles de gestión del suelo (Takahashi *et al.*, 2016).

5.3.1.6 · BARRERAS SOCIOCULTURALES

Las barreras sociales son claves para influenciar las acciones de gente frente a la mitigación y adaptación al cambio climático (Antwi-Agyei *et al.*, 2015) y pueden ser cognitivas o normativas (Swim *et al.*, 2011). Antwi-Agyei *et al.* (2015, p.19) afirmaron que “los sistemas de creencias de un grupo particular de personas pueden constituir una de las mayores barreras para la implementación de estrategias de adaptación al clima”. La implementación voluntaria de prácticas sostenibles de gestión del suelo depende en gran medida de cómo los agricultores perciben el cambio climático y la identificación de riesgos, que están fundamentalmente influenciados por las creencias personales, las normas culturales, los sistemas de valores y las cosmovisiones (Jones and Boyd, 2011; Smith *et al.*, 2011; Antwi-Agyei, 2012, Adger *et al.*, 2013). Por lo tanto, diferentes grupos culturales con sistemas de creencias preexistentes diferentes dentro de la misma región geográfica pueden responder de manera diferente a los riesgos generados por el cambio climático (Moser, 2010; Adger *et al.*, 2013).

La interconexión de barreras

Las diferentes barreras para la adopción de prácticas de adaptación al y mitigación del cambio climático están muy entrelazadas, amplificando los retos para fomentar el secuestro de COS. Por ejemplo, las barreras técnicas y logísticas están altamente conectadas y relacionadas con restricciones financieras, socioeconómicas e institucionales (Klein *et al.*, 2001). Esto puede ejemplificarse con la falta de fondos suficientes para un organismo gubernamental o por la ausencia de una estructura adecuada que permita un informe eficiente, lo cual probablemente se traducirá en limitaciones técnicas, logísticas y de conocimiento. Además, las barreras financieras están altamente correlacionadas con las barreras institucionales. En particular, las insuficientes facilidades de crédito se consideran uno de los obstáculos más importantes que obstaculizan la aplicación de estrategias de gestión apropiadas por parte de los agricultores, por ejemplo, en Etiopía (Bryan *et al.*, 2009). También está claro que la barrera institucional de falta de mercados fácilmente accesibles evidencia aún más las barreras financieras. La ausencia de mercados alimenta el círculo vicioso que une los bajos precios de los productos agrícolas con la incapacidad de pagar los préstamos, impidiendo la adquisición de futuros préstamos y resultando en bajas tasas de adopción de prácticas sostenibles de la tierra (Antwi-Agyei *et al.*, 2015).

En algunos casos, se pueden superar diferentes barreras para la adopción de estrategias de mitigación y adaptación al cambio climático utilizando una serie de enfoques. El recuadro 4 contiene una lista de tácticas recomendadas para superar algunas de estas barreras.

RECUADRO 4 · SOLUCIONES PROPUESTAS PARA SUPERAR LAS BARRERAS

- Las barreras financieras pueden superarse mediante incentivos financieros o regulaciones que tengan en cuenta las condiciones locales, incluidos los incentivos proporcionados para los mercados locales (FAO y GTIS, 2015).
- Las barreras socioculturales pueden superarse a través de estrategias de adaptación que reconozcan el contexto local, como los sistemas de creencias y el conocimiento indígena (Jennings y Magrath, 2009).
- Las barreras del conocimiento pueden ser superadas a través de políticas que mantengan el monitoreo del clima y que aseguren una efectiva y consistente comunicación de la información (Easterling *et al.*, 2003; Howden *et al.*, 2007). Esto también puede lograrse mediante el fortalecimiento de políticas que apoyen a todas las partes interesadas que proporcionen información climática relevante sobre la investigación, los sistemas analíticos, servicios de extensión, industria y redes regionales (Howden *et al.*, 2007).
- Las barreras técnicas y logísticas pueden superarse poniendo a disposición las tecnologías existentes para implementar una gestión sostenible del suelo e invirtiendo en nuevas estrategias técnicas o de gestión, tales como variedades mejoradas. También deberían establecerse políticas que mantengan la capacidad de hacer continuos ajustes y mejoras en los activos del conocimiento a través del “aprender haciendo” mediante el seguimiento específico de prácticas de mitigación y adaptación al cambio climático, y sus costes, beneficios y efectos (Burton y Naciones, 2005; Howden *et al.*, 2007).
- Las barreras institucionales y de recursos pueden superarse mediante el desarrollo de nuevas infraestructuras (por ejemplo, estructuras de riego, tecnologías eficientes de uso del agua, sistemas de transporte y almacenamiento), revisión de políticas (régimen de tenencia de la tierra, derechos de propiedad), y establecimiento de mercados accesibles y eficientes para productos e insumos (por ejemplo, semillas, fertilizantes, mano de obra, etc.) y para los servicios financieros, incluidos los seguros (Turvey, 2001; Howden *et al.*, 2007).

5.3.2 · FACTORES INDUCIDOS NO ANTRÓPICOS QUE LIMITAN EL SECUESTRO DE COS: FACTORES ABIÓTICOS

Además de las barreras inducidas por el hombre, existen factores abióticos difíciles de controlar tales como las condiciones climáticas y la textura del suelo que pueden limitar el potencial del suelo para secuestrar el carbono, particularmente influenciando los procesos del ciclo del carbono mediados por la biota del suelo (FAO y GTIS, 2015). Las temperaturas más cálidas de latitudes septentrionales aceleran la descomposición del COS, que se observa por los altos flujos de CO₂ que tienen lugar durante el verano cuando se promueven los procesos biológicos. En consecuencia, mantener las existencias de COS puede ser más difícil en estas condiciones. En climas cálidos y secos se estima que las tasas de secuestro de COS en suelos agrícolas y de ecosistemas restaurados oscilan entre 0 y 150 kgC ha⁻¹/año, en comparación con los 100 a 1

000 kgC ha⁻¹/año en climas húmedos y fríos (Lal, 2001). Esto se puede explicar por el hecho de que, durante los meses de invierno o en climas fríos, se observan bajos flujos de CO₂, ya que las bajas temperaturas evitan los procesos de descomposición (Ward *et al.*, 2007, Armstrong *et al.*, 2015). Sin embargo, durante eventos extremos como la sequía, la descomposición de MOS puede disminuir inicialmente, pero posteriormente aumentar tras la rehumectación (Borken y Matzner, 2008). Aunque está bien establecido en modelos del ciclo de C del suelo que la temperatura controla enormemente el almacenamiento de MOS, la sensibilidad a la temperatura de la descomposición de diferentes fracciones de MOS sigue siendo un área de incertidumbre (Conant *et al.*, 2011).

El agua también influye en el almacenamiento de COS en varios procesos. Las tasas de descomposición disminuyen a medida que los suelos se vuelven más secos, siendo los suelos húmedos bien aireados óptimos para la actividad microbiana. Por el contrario, las tasas de descomposición de materia orgánica disminuyen en suelos inundados debido a la restringida aireación, dando lugar a menudo a suelos con cantidades muy elevadas de COS (por ejemplo, suelos de turba y mantillo) (FAO y GTIS, 2015). En estos suelos saturados con agua, otras propiedades abióticas, incluyendo propiedades físicas tales como la profundidad y densidad aparente de turba también influyen en el procesamiento biológico del ciclo de C. Estas propiedades controlan, por ejemplo, la disponibilidad de sustrato y las velocidades de difusión de agua, compuestos y gases a través del perfil de turba, influyendo finalmente en el COS (Dorrepaal *et al.*, 2009; Levy *et al.*, 2012). Sin embargo, tales condiciones de inundación pueden causar un aumento en las emisiones de CH₄ (Blodau *et al.*, 2004). En términos de metano, Armstrong *et al.* (2015) mostraron un pico en las emisiones de CH₄ de los suelos de turba, especialmente en el otoño (caracterizado por relativamente altos niveles de agua y temperaturas), lo que promovió una mayor metanogénesis (producción de CH₄), limitando la metanotrofia (oxidación CH₄).

En suelos minerales, la cantidad y composición de COS es fuertemente dependiente del tipo de suelo, que puede diferir a escala de campo. En suelos ricos en arcilla, se puede esperar un mayor contenido de materia orgánica y una mayor concentración de C O-alquilo derivado de polisacáridos. Por el contrario, los suelos arenosos se caracterizan a menudo por menores contenidos de C y altas concentraciones de C alquilo (Rumpel y Kögel-Knabner, 2011), disminuyendo así su potencial para aumentar las existencias de COS. Otras barreras abióticas para el secuestro de COS pueden ser la erosión del suelo e incendios que inicialmente pueden disminuir el almacenamiento de C en el suelo (Knicker, 2007).



6 · ¿ QUÉ SIGUE? PUNTOS A CONSIDERAR



CICLO DEL COS...

- El alcance total del ciclo global del carbono, su interdependencia con respecto a la dinámica del COS y su relación con otros ciclos biogeoquímicos, aún no se ha comprendido completamente. La medición, mapeo, monitoreo y presentación de informes de COS más precisos pueden contribuir a lograr avances en este sentido.
- Las prácticas y sistemas de gestión de tierras que fomentan el secuestro de COS deben tener como objetivo retener carbono en el suelo a largo plazo. El umbral de saturación de COS sigue siendo un concepto teórico que requiere información específica del lugar sobre la cantidad adicional de COS que puede ser secuestrada y la manera de lograrlo.

SEGURIDAD ALIMENTARIA Y CAMBIO CLIMÁTICO...

- Es necesario aumentar los conocimientos y la acción inmediata para gestionar eficazmente el COS para así mejorar la producción de alimentos, y la mitigación del y adaptación al cambio climático, así como contribuir al logro de los ODS hasta 2030.
- La predicción exacta del impacto de la actividad humana sobre el cambio climático es actualmente limitada, especialmente debido a una comprensión incompleta de la respiración del suelo y a la incertidumbre sobre el efecto impulsor, las contribuciones microbianas a la retroalimentación del carbono o la adaptación de las comunidades microbianas.
- Es necesaria la identificación de puntos críticos de COS y una mejor comprensión de su potencial para mitigar el cambio climático para así concienciar sobre la necesidad de gestionarlos de manera sostenible.

EXISTENCIAS DE COS Y EVALUACIÓN DE LOS CAMBIOS EN LAS MISMAS...

- Muchos de los mapas actualmente disponibles y las estimaciones globales de COS se basan en bases de datos históricas, en lugar de actuales o recientes. Es necesario realizar una nueva recopilación de las reservas nacionales de COS para definir las referencias nacionales de COS y así lograr los ODS y evaluar los efectos del cambio climático.
- Deben establecerse en todos los países métodos innovadores que permitan el monitoreo frecuente y rentable de las reservas de COS. Sigue siendo difícil calcular con precisión las existencias de COS, especialmente debido a la dificultad de medir la densidad aparente y el contenido de piedra.
- La presentación de informes sobre el estado y las tendencias del COS en base a mediciones es una tarea difícil que debe abordarse mediante metodologías armonizadas, el uso de técnicas normalizadas de muestreo y modelaje, el aprovechamiento de soluciones innovadoras para la recopilación y el intercambio de datos, y la consideración de diferentes prácticas implementadas a diferentes escalas.

GESTIÓN...

- Son esenciales las recomendaciones bien fundamentadas y basadas en investigaciones para mantener y/o aumentar las reservas de COS mediante prácticas juiciosas de gestión a distintas escalas para todos los usos del suelo, especialmente en puntos críticos y favorables.
- Se necesitan mejores, más holísticas y comprensibles soluciones para superar barreras de adopción de prácticas de secuestro de COS para el diseño y la implementación de políticas.

REFERENCIAS

- Adger, W. N., Barnett, J., Brown, K., Marshall, N. & O'Brien, K. 2013. Cultural dimensions of climate change impacts and adaptation. *Nature Climate Change*, 3(2): 112-117.
- Agrawal, A. & Perrin, N. 2009. Climate adaptation, local institutions and rural livelihoods. En: *Adapting to climate change: thresholds, values, governance*. s.l.:Cambridge University Press, pp. 350-367.
- Alcántara, V., Don, A., Well, R. & Nieder, R. 2016. Deep ploughing increases agricultural soil organic matter stocks. *Global Change Biology*, 22(8): 2939-2956.
- Altermann, M., Rinklebe, J., Merbach, I., Korschens, M., Langer, U. & Hofmann, B. 2005. Chernozem-Soil of the Year 2005. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 168: 725-740.
- Amundson, R., Berhe, A. A., Hoppmans, J. W., Olson, C., Sztein, A. E. & Sparks, D.L. 2015. Soil and human security in the 21st century. *Science*, 348(6235).
- Anderson-Teixera, K. J., Davis, S. C., Masters, M. D. & Delucia, E. H. 2009. Changes in soil organic carbon under biofuel crops. *GCB Bioenergy*, 1(1): 75-96.
- Antwi-Agyei, P. 2012. *Vulnerability and adaptation of Ghana's food production systems and rural livelihoods to climate variability*. University of Leeds (PhD Thesis).
- Antwi-Agyei, P., Dougill, A. J. & Stringer, L. C. 2015. Barriers to climate change adaptation: evidence from northeast Ghana in the context of a systematic literature review. *Climate and Development*, 7(4): 297-309.
- Armstrong, A., Waldron, S., Ostle, N. J., Richardson, H. & Whitaker, J. 2015. Biotic and abiotic factors interact to regulate northern peatland carbon cycling. *Ecosystems*, 18(8): 1395-1409.
- Arrouays, D., Richer de Forges, A., Morvan, X., Saby, N.P.A., Jones, A.R. & Le Bas, C. 2008. *Environmental Assessment of Soil for Monitoring, Volume IIb: survey of National Networks*. Ispra: JRC Scientific Reports.
- Azhoni, A., Holman, I. & Jude, S. 2017. Contextual and interdependent causes of climate change adaptation barriers: Insights from water management institutions in Himachal Pradesh, India. *Science of the Total Environment*, 576: 817-828.
- Baldocchi, D., Ryu, Y. & Keenan, T. 2016. Terrestrial Carbon Cycle Variability [version 1; referees: 2 approved]. *F1000Research*, Issue 5.
- Batjes, N. H. 1996. Total Carbon and nitrogen in the soils of the world. *European Journal of Soil Science*, 47: 151-163.
- Batjes, N. H. 2016. Harmonized soil property values for broad-scale modelling (WISE30sec) with estimates of global soil carbon stocks. *Geoderma*, 269: 61-68.
- Batjes, N. H. & Van Wesemael, B. 2014. Measuring and Monitoring soil carbon. En: *Soil Carbon, Science, Management and Policy for Multiple Benefits*. s.l.:s.n., pp. 188-201.
- Beare, M. H., McNeill, S. J., Curtin, D., Parfitt, R. L., Jones, H. S., Dodd, M. B. & Sharp, J. 2014. Estimating the organic carbon stabilisation capacity and saturation deficit of soils: a New Zealand case study. *Biochemistry*, 120: 71-87.

- Bell, M. J., Moody, P. W, Connolly, R.D. & Bridge, B. J. 1998. The role of active fractions of soil organic matter in physical and chemical fertility of Ferrosols. *Australian Journal of Soil Research*, 36: 809–819.
- Bell, M. J., Moody, P. W., Yo, S. A. & Connolly, R. D. 1999. Using active fractions of soil organic matter as indicators of the sustainability of Ferrosol farming systems. *Australian Journal of Soil Research*, 37: 279–287
- Biesbroek, G. R., Klostermann, J. E., Termeer, C. J. & Kabat, P. 2013. On the nature of barriers to climate change adaptation. *Regional Environmental Change*, 13(5): 1119-1129.
- Blair, G., Lefroy, R. & Lisle, L. 1995. Soil carbon fractions based on their degree of oxidation, and the development of a carbon management index for agricultural systems. *Australian Journal of Soil Research*, 46: 1459–1466.
- Blodau, C., Basiliko, N. & Moore, T. R. 2004. Carbon turnover in peatland mesocosms exposed to different water table levels. *Biogeochemistry*, 67(3): 331-351.
- Boon, H. 2013. Preparedness and vulnerability: an issue of equity in Australian disaster situations. *Australian Journal of Emergency Management*, 28(3): 12.
- Borken, W. & Matzner, E. 2008. Reappraisal of drying and wetting effects on C and N mineralization and fluxes in soils. *Global Change Biology*, 15: 808-824.
- Bryan, E., Deressa, T. T., Gbetibouo, G. A. & Ringler, C. 2009. Adaptation to climate change in Ethiopia and South Africa: options and constraints. *Environmental Science & Policy*, 12(4): 413-426.
- Buffam, I., Carpenter, S. R., Yeck, W., Hanson, P. C. & Turner, M. G. 2010. Filling holes in regional carbon budgets: Predicting peat depth in a north temperate lake district. *Journal of Geophysical Research*, 115.
- Burke, E. J., Hartley, I. P. & Jones, C. 2012. Uncertainties in the global temperature change caused by carbon release from permafrost thawing. *The Cryosphere Discussions*, 6(5): 1063-1076.
- Burke, E. J., Jones, C. D. & Koven, C. D. 2013. Estimating the Permafrost-Carbon Climate Response in the CMIP5 Climate Models Using a Simplified Approach. *Journal of Climate*, 26: 4897-4909.
- Burney, J. A., Davis, S. J. & Lobell, D. B. 2010. Greenhouse gas mitigation by agricultural intensification. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 107(26): 12052-12057.
- Burton, I. & Nations, D. P. U. 2005. Developing strategies, policies and measures. En: *Adaptation policy frameworks for climate change*. Cambridge: Cambridge University Press, p. 258.
- Chatterjee, A., Lal, R., Wielpolski, L., Martin, M. Z. & Ebinger, M. H. 2009. Evaluation of Different Soil Carbon Determination Methods. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 28(3): 164-178.
- Clark, J. M., Ashley, D., Wagner, M., Chapman, P. J., Lane, S. N., Evans, C. D. & Heathwaite, A. L. 2009. Increased temperature sensitivity of net DOC production from ombrotrophic peat due to water table draw-down. *Global Change Biology*, 15(4): 794-807.
- Conant, R., Ryan, M. G., Ågren, G. I., Birge, H. E., Davidson, E. A., Eliasson, P. E., Evans, S. E., Frey, S. D., Giardina, C. P., Hopkins, F. M., Hyvönen, R., Kirschbaum, M. U. F., Lavallee, J. M., Leifeld, J., Parton, W. J., Steinweg, J. M., Wallenstein, M. D., Wetterstedt, J. Å. M. & Bradford, M. A. 2011. Temperature and soil organic matter decomposition rates – synthesis of current knowledge and a way forward. *Global Change Biology*, 17: 3392-3404.

Conant, R. T. 2010. *Challenges and opportunities for carbon sequestration in grassland systems: A technical report on grassland management and climate change mitigation*. Roma: FAO.

Crowther, T. W., Todd-Brown, K. E. O., Rowe, C. W., Wieder, W. R., Carey, J.C., Machmuller, M. B., Snoek, B. L., Fang, S., Zhou, G., Allison, S. D., Blair, J.M., Bridgham, S. D., Burton, A. J., Carrillo, Y., Reich, P. B., Clark, J. S., Classen, A. T., Dijkstra, F. A., Elberling, B., Emmett, B. A., Estiarte, M., Frey, S. D., Guo, J., Harte, J., Jiang, L., Johnson, B. R., Kröel-Dulay, G., Larsen, K. S., Laudon, H., Lavallee, J. M., Luo, Y., Lupascu, M., Ma, L. N., Marhan, S., Michelsen, A., Mohan, J., Niu, S., Pendall, E., Peñuelas, J., Pfeifer-Meister, L., Poll, C., Reinsch, S., Reynolds, L. L., Schmidt, I. K., Sistla, S., Sokol, N. W., Templer, P. H., Treseder, K. K., Welker J. M. & Bradford, M. A. 2016. Quantifying global soil carbon losses in response to warming. *Nature*, 540: 104-110.

De Moraes Sá, J.C., Lal, R., Cerri, C. C., Lorenz, K., Hundria, M., Cesar, P. & Carvalho, F. 2017. Low-carbon agriculture in South America to mitigate global climate change and advance food security. *Environment International*, 98: 102-112.

Deb, S., Bhadoria, P. B. S., Mandal, B., Rakshit, A. & Singh, H. B. 2015. Soil organic carbon: Towards better soil health, productivity and climate change mitigation. *Climate change and Environmental Sustainability*, 3(1): 26-34.

De Graaf, M. A., Adkins, J., Kardol, P. & Throop, H. L. 2015. A meta-analysis of soil biodiversity impacts on the carbon cycle. *SOIL*, 1: 257-271.

Degens, B. 1997. Macro-aggregation of soils by biological bonding and binding mechanisms and the factors affecting these: a review. *Australian Journal of Soil Research*, 35: 431-459.

Descheemaeker, K., Oosting, S. J., Homann-Kee Tui, S., Masikati, P., Falconnier, G. N. & Giller, K. E. 2016. Climate change adaptation and mitigation in smallholder crop–livestock systems in sub-Saharan Africa: a call for integrated impact assessments. *Regional Environmental Change*, 16(8): 2331-2343.

Dexter, A. 1988. Advances in characterization of soil structure. *Soil and Tillage Research*, 11: 199-235.

Dlamini, P., Chivenge, P. & Chaplot, V. 2016. Overgrazing decreases soil organic carbon stocks the most under dry climates and low soil pH: A meta-analysis shows. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 221: 258-269.

Dorrepaal, E., Toet, S., van Logtestijn, R. S. P., Swart, E., van de Weg, M. J., Terry V. Callaghan, T. V. & Aerts, R. 2009. Carbon respiration from subsurface peat accelerated by climate warming in the subarctic. *Nature*, 460(7255): 616-619.

Easterling, W. E., Chhetri, N. & Niu, X. 2003. Improving the realism of modeling agronomic adaptation to climate change: simulating technological substitution. En: *Issues in the Impacts of Climate Variability and Change on Agriculture*. s.l.: Springer Netherlands, pp. 149-173.

FAO & GTIS. 2015. *Status of the World's Soil Resources*, Roma: s.n.

FAO. 1998. *World reference base for soil resources*. Roma: FAO, ISRIC y ISSS.

FAO. 2004. *Carbon sequestration in dryland soils*, Roma: FAO.

FAO. 2010. *The world's forests 2010*. (disponible en http://foris.fao.org/static/data/fra2010/fao_forest_map_2010.pdf). Accedido el 1 de marzo de 2017.

FAO. 2012. *Peatlands - guidance for climate change mitigation through conservation, rehabilitation and sustainable use*. Roma: FAO y Wetlands International.

FAO. 2015. *Learning tool on Nationally Appropriate Mitigation Actions (NAMAs) in the agriculture, forestry and other land use (AFOLU) sector*. Roma: FAO.

FAO. 2015a. *Revised World Soil Charter*. Roma: FAO.

Gärdenäs, A. I., Ågren, G. I., Bird, J. A., Clarholm, M., Hallin, S., Ineson, P., Kätterer, T., Knicker, H., Nilsson, S. I., Näsholm, T., Ogle, S., Paustian, K., Persson, T. & Stendahl, J. 2011. Knowledge gaps in soil carbon and nitrogen interactions – From molecular to global scale. *Soil Biology and Biochemistry*, 43: 702-717.

Gardi, C. & Jeffery, S. 2009. *Soil Biodiversity*. Luxembourg: Joint Research Center; Institute for Environment and Sustainability.

Global Soil Data Task. 2000. *Global Soil Data Products CD-ROM (IGBP-DIS)*. CDROM. International Geosphere-Biosphere Programme, Data and Information System. Postdam, Germany: Disponible en Oak Ridge National Laboratory Distributed Active Archive Center, Oak Ridge, Tennessee, U.S.A.

Gougoulias, C., Clark, J. M. & Shaw, L. J. 2014. The role of soil microbes in the global carbon cycle: tracking the below-ground microbial processing of plant-derived carbon for manipulating carbon dynamics in agricultural systems. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 94: 2362-2371.

Guo, L. B. & Gifford, R. M. 2002. Soil carbon stocks and land use change: a metaanalysis. *Global Change Biology*, 8(4): 345-360.

Haddaway, N. R., Hedlund, K., Jackson, L. E., Kätterer, T., Lugato, E., Thomsen, I. K., Helene B. Jørgensen, H. B. & Isberg, P-E. 2016. How does tillage intensity affect soil organic carbon? A systematic review protocol. *Environmental Evidence*, 5(1).

Han, P., Zhang, W., Wang, G., Sun, W. & Huang, Y. 2016. Changes in soil organic carbon in croplands subjected to fertilizer management: a global meta-analysis. *Scientific Reports*, 6: 27199.

Hergoualc'h, K., Blanchart, E., Skiba, U., Hénault, C. & Harmanda, J-M. 2012. Changes in carbon stock and greenhouse gas balance in a coffee (*Coffea arabica*) monoculture versus an agroforestry system with *Inga densiflora*, in Costa Rica. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 148: 102–110.

Hiederer, R. & Köchy, M. 2011. *Global Soil Organic Carbon Estimates and the Harmonized World Soil Database*. Luxembourg: JRC-IES.

Hönisch, B., Hemming, N. G., Archer, D., Siddall, M., McManus, J. F. 2009. Atmospheric Carbon Dioxide Concentration Across the Mid-Pleistocene Transition. *Science*, 324(5934): 1551-1554.

Howden, S. M., Soussana, J-F, Tubiello, F. N., Chhetri, N., Dunlop, M. & Meinke, H. 2007. Adapting agriculture to climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 104(50): 19691-19696.

Huang, J., Yu, H., Guan, X., Wang, G. & Guo, R. 2015. Accelerated dryland expansion under climate change. *Nature Climate Change*, 6: 166-171.

Hugelius, G., Strauss, J., Zubrzycki, S., Harden, J. W., Schuur, E. A. G., Ping, C.L., Schirmermeister, L., Grosse, G., Michaelson, G. J., Koven, C. D., O'Donnell, J.A., Elberling, B., Mishra, U., P. Camill, P., Yu, Z., Palmtag, J. & Kuhry, P. 2014. Estimated stocks of circum-polar permafrost carbon with quantified uncertainty ranges and identified data gaps. *Biogeosciences*, 11: 6573-6593.

- Hugelius, G., Tarnocai, C., Broll, G., Canadell, J. G., Kuhry, P. & Swanson, D. K. 2013. The Northern Circumpolar Soil Carbon Database: spatially distributed datasets of soil coverage and soil carbon storage in the northern permafrost. *Earth System Science Data*, 5: 5-13.
- IPCC. 2006. General guidance and reporting. En: 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. s.l.:IGES, Japan.
- Hiederer, R. & Köchy, M. 2011. Global Soil Organic Carbon Estimates and the Harmonized World Soil Database. Luxembourg: JRC-IES.
- Hönisch, B., Hemming, N. G., Archer, D., Siddall, M., McManus, J. F. 2009. Atmospheric Carbon Dioxide Concentration Across the Mid-Pleistocene Transition. *Science*, 324(5934): 1551-1554.
- Howden, S. M., Soussana, J-F, Tubiello, F. N., Chhetri, N., Dunlop, M. & Meinke, H. 2007. Adapting agriculture to climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 104(50): 19691-19696.
- Huang, J., Yu, H., Guan, X., Wang, G. & Guo, R. 2015. Accelerated dryland expansion under climate change. *Nature Climate Change*, 6: 166-171.
- Hugelius, G., Strauss, J., Zubrzycki, S., Harden, J. W., Schuur, E. A. G., Ping, C.L., Schirmer, L., Grosse, G., Michaelson, G. J., Koven, C. D., O'Donnell, J.A., Elberling, B., Mishra, U., P. Camill, P., Yu, Z., Palmtag, J. & Kuhry, P. 2014. Estimated stocks of circumpolar permafrost carbon with quantified uncertainty ranges and identified data gaps. *Biogeosciences*, 11: 6573-6593.
- Hugelius, G., Tarnocai, C., Broll, G., Canadell, J. G., Kuhry, P. & Swanson, D. K. 2013. The Northern Circumpolar Soil Carbon Database: spatially distributed datasets of soil coverage and soil carbon storage in the northern permafrost. *Earth System Science Data*, 5: 5-13.
- IPCC. 2006. General guidance and reporting. In: *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. s.l.:IGES, Japan.
- IPCC. 2007. *Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge (U.K.), New York (U.S.A): Cambridge University Press.
- IPCC. 2014. *Climate Change 2014: Synthesis, Report Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Geneva: IPCC.
- IPCC. 2015. *Technical Assessment of IPCC Inventory Guidelines - Results of Questionnaire Survey AFOLU*. Bonn: s.n.
- Jaconi, A., Don, A. & Freibauer, A. in review. Global and stratified models for soil organic carbon prediction by near infrared spectroscopy on regional scale. *European Journal of Soil Science*.
- Jandl, R., Rodeghiero, M., Martinez, C., Cotrufo, M. F., Bampa, F., van Wesemael, B., Harrison, R. B., Guerrini, I. A., de Richter Jr., D., Rustad, L., Lorenz, K., Chabbi, A. & Miglietta, F. 2014. Current status, uncertainty and future needs in soil organic carbon monitoring. *Science of the Total Environment*, 468-469: 376-383.
- Jastrow, J. D., Amonette, J. E. & Bailey, V. L. 2007. Mechanisms controlling soil carbon turnover and their potential application for enhancing carbon sequestration. *Climatic Change*, 80: 5-23.
- Jennings, S. & Magrath, J. 2009. *What Happened to the Seasons?* s.l.: Oxfam GB.

- Jobbágy, E. G. & Jackson, R. B.** 2000. The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation. *Ecological Applications*, 10(2) : 423-436.
- Jolivet, C., Boulonne, L. & Ratié, C.** 2006. *Manuel du Réseau de Mesures de la Qualité des Sols*, France: Unité InfoSol, INRA Orléans.
- Jones, L. & Boyd, E.** 2011. Exploring social barriers to adaptation: insights from Western Nepal. *Global Environmental Change*, 21(4): 1262-1274.
- Kaiser, K. & Kalbitz, K.** 2012. Cycling downwards – dissolved organic matter in soils. *Soil Biology and Biochemistry*. 52: 29-32.
- Kane, D.** 2015. *Carbon Sequestration Potential on Agricultural Lands: A Review of Current Science and Available Practices*, s.l.: s.n.
- Keestra, S. D., Bouma, J., Wallinga, J., Tittonell, P., Smith, P., Cerdà, A., Montanarella, L., Quinton, J. N., Pachepsky, Y., van der Putten, W. H., Bardgett, R.D., Moolenaar, S., Mol, G., Jansen, B. & Fresco, L. O.** 2016. The significance of soils and soil science towards realization of the United Nations Sustainable Development Goals. *SOIL*, 2: 111-128.
- Keiluweit, M., Bougoure, J. J., Nico, P. S., Pett-Ridge, J., Weber, P. K. & Kleber, M.** 2015. Mineral protection of soil carbon counteracted by root exudates. *Nature Climate Change*, 5: 588–595.
- Kell, D. B.** 2012. Large-scale sequestration of atmospheric carbon via plant roots in natural and agricultural ecosystems: why and how. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 367(1595): 1589-1597.
- Kithiia, J.** 2011. Climate change risk responses in East African cities: need, barriers and opportunities. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 3(3): 176-180.
- Klein, R. J. T., Nicholls, R. J., Ragoonaden, S., Capobianco, M., Aston, J. & Buckley, E. N.** 2001. Technological options for adaptation to climate change in coastal zones. *Journal of Coastal Research*, 17(3): 531-543.
- Klingensfuß, C., Roßkopf, N., Walter, J., Heller, C. & Zeitz J.** 2014. Soil organic matter to soil organic carbon ratios of peatland soil substrates. *Geoderma*, 234-235: 410-417.
- Knicker, H.** 2007. How does fire affect the nature and stability of soil organic nitrogen and carbon? A review. *Biogeochemistry*, 85: 91-118.
- Knox, S. H., Sturtevant, C., Matthes, J. H., Koteen, L., Verfaillie, J. & Baldocchi, D.** 2015. Agricultural peatland restoration: effects of land-use change on greenhouse gas (CO₂ and CH₄) fluxes in the Sacramento-San Joaquin Delta. *Global Change Biology*, 21(2): 750-765.
- Köchy, M., Hiederer, R. & Freibauer, A.** 2015. Global distribution of soil organic carbon - Part I: Masses and frequency distributions of SOC stocks for the tropics, permafrost regions, wetlands, and the world. *SOIL*, 1: 351-365.
- Kolikow, S., Kragt, M. & Mugera, A.** 2013. *An interdisciplinary framework of limits and barriers to agricultural climate change adaptation*. Adelaide, 20th International Congress on Modelling and Simulation.
- Koven, C. D., Ringeval, B., Friedlingstein, P., Ciais, P., Cadule, P., Khvorostyanov, D., Krinner, G. & Tarnocai, C.** 2011. Permafrost carbon-climate feedbacks accelerate global warming. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 108(36): 14769-14774.
- Lal, R.** 2001. World cropland soils as a source or sink for atmospheric carbon. *Advances in Agronomy*, 71: 145-191.

- Lal, R. 2004. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science*, 304(5677): 1623-1627.
- Lal, R. 2005. Forest Soils and Carbon Sequestration. *Forest Ecology and Management*, 220: 242-258.
- Lange, M., Eisenhauer, N., Sierra, C. A., Bessler, H., Engels, C., Griffiths, R. I., Mellado-Vázquez, P. G., Malik, A. A., Roy, J., Scheu, S., Steinbeiss, S., Thomson, B. C., Trumbore, S. E. & Gleixner, G. 2015. Plant diversity increases soil microbial activity and soil carbon storage. *Nature Communications*, 6: 6707.
- Le Quéré, C., Andrew, R. M., Canadell, J. G., Sitch, S., Korsbakken, J. I., Peters, G. P., Manning, A. C., Boden, T. A., Tans, P. P., Houghton, R. A., Keeling, R. F., Alin, S., Andrews, O. D., Anthoni, P., Barbero, L., Bopp, L., Chevallier, F., Chini, L. P., Ciais, P., Currie, K., Delire, C., Doney, S. C., Friedlingstein, P., Gkritzalis, T., Harris, I., Hauck, J., Haverd, V., Hoppema, M., Goldewijk, K. K., Jain, A. K., Kato, E., Körtzinger, A., Landschützer, P., Lefèvre, N., Lenton, A., Lienert, S., Lombardozzi, D., Melton, J. R., Metzl, N., Millero, F., Monteiro, P. M. S., Munro, D. R., Nabel, J. E. M. S., Nakaoka, S-I, O'Brien, K., Olsen, A., Omar, A. M., Ono, T., Pierrot, D., Poulter, B., Rödenbeck, C., Salisbury, J., Schuster, U., Schwinger, J., Séférian, R., Skjelvan, I., Stocker, B. D., Sutton, A. J., Takahashi, T., Tian, H., Tilbrook, B., van der Laan-Luijckx, I. T., van der Werf, G. R., Viovy, N., Walker, A. P., Wiltshire, A. J. & Zaehle, S. 2016. Global Carbon Budget 2016. *Earth System Science Data*, 8: 605-649.
- Lee, B. L. 2007. Information technology and decision support system for on-farm applications to cope effectively with agrometeorological risks and uncertainties. En: *Managing Weather and Climate Risks in Agriculture*. s.l.:Springer Berlin Heidelberg, pp. 191-207.
- Lehmann, J. & Kleber, M. 2015. The contentious nature of soil organic matter. *Nature*, 528(7580): 60-68.
- Lehmann, L., Abiven, S., Kleber, M., Pan, G., Singh, B. P., Sohi, S. P. & Zimmerman, A. R. 2015. Persistence of biochar in soil. En: *J. a. J. S. Lehmann, éd. Biochar for Environmental Management - Science, technology*. Routledge: s.n., pp. 235-283.
- Levy, P. E., Burden, A., Cooper, M. D. A., Dinsmore, K. J., Drewer, J., Evans, C., Fowler, D., Gaiawyn, J., Gray, A., Jones, S. K., Jones, T., McNamara, N. P., Mills, R., Ostle, N., Sheppard, L. J., Skiba, U., Sowerby, A., Ward, S. E. & Zielinski, P. 2012. Methane emissions from soils: synthesis and analysis of a large UK data set. *Global Change Biology*, 18(5): 1657-1669.
- Liniger, H., Mekdaschi Studer, R., Hauert, C. & Gurtner, M. 2011. *Sustainable Land Management in Practice – Guidelines and Best Practices for Sub-Saharan Africa*. s.l.: TerrAfrica, WOCAT y FAO.
- Liu, X., Burras, C. L., Kravchenko, Y. S., Duran, A., Huffman, T., Morris, H., Studdert, G., Zhang, X., Cruse, R. M. & Yuan, X. 2012. Overview of Mollisols in the world: Distribution, land use and management. *Canadian Journal of Soil Science*, 92(3): 383-402.
- Lorenz, K. & Lal, R. 2005. The Depth Distribution of Soil Organic Carbon in Relation to Land Use and Management and the Potential of Carbon Sequestration in Subsoil Horizons. *Advances in Agronomy*, 88: 35-66.
- Lorenz, K. & Lal, R. 2016. *Soil Organic Carbon - An appropriate Indicator to Monitor Trends of Land and Soil Degradation within the SDG Framework?* Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt.
- Luo, Z., Wang, E., Fillery, I. R. P., Macdonald, L. M., Huth, N. & Baldock, J. 2014. Modelling soil carbon and nitrogen dynamics using measurable and conceptual soil organic matter pools in APSIM. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 186: 94104.

- MacDougall, A. H., Avis, C. A. & Weaver, A. J. 2012. Significant contribution to climate warming from the permafrost carbon feedback. *Nature Geoscience*, 5: 719-721.
- Mangalassery, S., Sjögersten, S., Sparkes, D. & Mooney, S. 2015. Examining the potential for climate change mitigation from zero tillage. *The Journal of Agricultural Science*, 153(07): 1151-1173.
- Marschner, B., Brodowski, S., Dreves, A., Gleixner, G., Gude, A., Grootes, P. M., Hamer, U., Heim, A., Jandl, G., Ji, R., Kaiser, K., Kalbitz, K., Kramer, C., Leinweber, P., Rethemeyer, J., Schäffer, A., Schmidt, M. W. I., Schwark, L. & Wiesenberg, G. L. B. 2008. How relevant is recalcitrance for the stabilization of organic matter in soils? *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 171: 91-110.
- McSherry, M. E. & Ritchie, M. E. 2013. Effects of grazing on grassland soil carbon: a global review. *Global Change Biology*, 19(5): 1347-1357.
- Miltz, J. & Don, A. 2012. Optimising Sample Preparation and near Infrared Spectra Measurements of Soil Samples to Calibrate Organic Carbon and Total Nitrogen Content. *Journal of Near Infrared Spectroscopy*. 20(6): 695-706.
- Moser, S. C. 2010. Communicating climate change: history, challenges, process and future directions. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 1(1): 31-53.
- Naciones Unidas. 2011. *Global drylands: A UN system-wide response*. s.l.: United Nations Environment Management Group.
- Naciones Unidas. 2015. *Paris Agreement*. s.l.: s.n.
- Ogle, S. M., Olander, L., Wollenberg, L., Rosenstock, T., Tubiello, F., Paustian, K., Buendia, L., Nihart, A. & Smith, P. 2014. Reducing greenhouse gas emissions and adapting agricultural management for climate change in developing countries: providing the basis for action. *Global Change Biology*, 20(1): 1-6.
- Orgiazzi, A., Bardgett, R.D., Barrios, E., Behan-Pelletier, V., Briones, M.J.I., Chotte, J-L., De Deyn, G.B., Eggleton, P., Fierer, N., Fraser, T., Hedlund, K., Jeffery, S., Johnson, N.C., Jones, A., Kandeler, E., Kaneko, N., Lavelle, P., Lemanceau, P., Miko, L., Montanarella, L., Moreira, F.M.S., Ramirez, K.S., Scheu, S., Singh, B.K., Six, J., van der Putten, W.H. & Wall, D.H. 2016. *Global Soil Biodiversity Atlas*. Luxembourg: Oficina de publicaciones de la Unión Europea, Comisión Europea.
- O'Rourke, S. M., Angers, D. A., Holden, N. M. & Mcbratney, A. B. 2015. Soil organic carbon across scales. *Global Change Biology*, 21: 3561-3574.
- Pallasser, R. 2013. *Technique innovation in soil carbon measurement*. University of Sydney (PhD Thesis).
- Palm, C., Blanco-Canqui, H., DeClerck, F., Gatere, L. & Grace, P. 2014. Conservation agriculture and ecosystem services: An overview. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 187: 87-105.
- Pan, Y., Birdsey, R. A., Phillips, O. L. & Jackson, R. B. 2013. The Structure, Distribution, and Biomass of the World's Forests. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 44: 593-622.
- Parish, F., Sirin, A., Charman, D., Joosten, H., Minayeva, T., Silvius, M. & Stringer, L. 2008. *Assessment on Peatlands, Biodiversity and Climate Change*. Kuala Lumpur and Wageningen: Global Environment Center and Wetlands International.

Paul, E. 2014. *Soil microbiology, ecology and biochemistry*. Academic Press. pp. 598.

Paustian, K., Lehmann, J., Ogle, S., Reay, D., Robertson, G. P. & Smith, P. 2016. Climate-smart soils. *Nature*, 532(7597): 49-57.

Petrescu, A. M. R., Lohila, A., Tuovinen, J.-P., Baldocchi, D. D., Desai, A. R., Roulet, N. T., Vesala, T., Dolman, A. J., Oechel, W. C., Marcolla, B., Friborg, T., Rinne, J., Matthes, J. H., Merbold, L., Meijide, A., Kiely, G., Sottocornola, M., Sachs, T., Zona, D., Varlagin, A., Lai, D. Y. F., Veenendaal, E., Parmentier, F.-J.W., Skiba, U., Lund, M., Hensen, A., van Huissteden, J., Flanagan, L. B., Shurpali, N. J., Grünwald, T., Humphreys, E. R., Jackowicz-Korczyński, M., Aurela, M. A., Laurila, T., Grüning, C., Corradi, C. A. R., Schrier-Uijl, A. P., Christensen, T. R., Tamstorf, M. P., Mastepanov, M., Martikainen, P. J., Verma, S. B., Bernhofer, C. & Cescatti, A. 2015. The uncertain climate footprint of wetlands under human pressure. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 112(15): 4594-4599.

Ping, C. L., Jastrow, J. D., Jorgenson, M. T., Michaelson, G. J. & Shur, Y. L. 2015. Permafrost soils and carbon cycling. *SOIL*, 1: 147-171.

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

Poepplau, C., Bolinder, M. A., Eriksson, J., Lundblad, M. & Kätterer, T. 2015. Positive trends in organic carbon storage in Swedish agricultural soils due to unexpected socioeconomic drivers. *Biogeosciences*, 12: 3241-3251.

Poepplau, C., Vos, C. & Don, A. 2017. Soil organic carbon stocks are systematically overestimated by misuse of the parameters bulk density and rock fragment content. *SOIL*, 3(1): 61–66. Disponible en: <https://doi.org/10.5194/soil-3-61-2017>

Powlson, D. S., Stirling, C. M., Jat, M. L., Gerard, B. G., Palm, C. A., Sanchez, P.A. & Cassman, K. G. 2014. Limited potential of no-till agriculture for climate change mitigation. *Nature Climate Change*, 4(8): 678-683.

Raich, J. W. & Potter, C. S. 1995. Global patterns of carbon dioxide emissions from soils. *Global Biogeochemical Cycles*, 9(1): 23-36.

Raphael, J. P., Calonego, J. C., Milori, D. M. B. & Rosolem, C. A. 2016. Soil organic matter in crop rotations under no-till. *Soil and Tillage Research*, 155: 45-53.

Rasse, D., Rumpel, C. & Dignac, M. 2005. Is soil carbon mostly root carbon? Mechanisms for a specific stabilisation. *Plant and Soil*, 269(1): 341-356.

Rumpel, C., Chabbi, A. & Marschner, B. 2012. Carbon Storage and Sequestration in Subsoil Horizons: Knowledge, Gaps and Potentials. En: *R. Lal et al. eds. Recarbonization of the Biosphere*. Dordrecht, The Netherlands: Springer, pp. 445-464.

Rumpel, C. & Kögel-Knabner, I. 2011. Deep soil organic matter – a key but poorly understood component of terrestrial C cycle. *Plant and Soil*, 338(1-2): 143-158.

Schaefer, K., Zhang, T., Bruhwiler, L. & Barrett, A. P. 2011. Amount and timing of permafrost carbon release in response to climate warming. *Tellus*, 63(2): 165-180.

Schaphoff, S., Heyder, U., Ostberg, S., Gerten, D., Heinke, J. & Lucht, W. 2013. Contribution of permafrost soils to the global carbon budget. *Environmental Research Letters*, 8.

Scharlemann, J. P., Tanner, E. V., Hiederer, R. & Valerie, K. 2014. Global Soil Carbon: understanding and managing the largest terrestrial carbon pool. *Carbon Management*, 5(1): 81-91.

- Schimel, J. & Schaeffer, S. 2012. Microbial control over carbon cycling in soil. *Frontiers in Microbiology*, 3(348): 155-165.
- Schmidt, M. & Noack, A. 2000. Black carbon in soils and sediments: Analysis, distribution, implications, and current challenges. *Global Biogeochemical Cycles*, 14(3): 777-793.
- Schmidt, M. W. I., Torn, M. S., Abiven, S., Dittmar, T., Guggenberger, G., Janssens, I. A., Kleber, M., Kögel-Knabner, I., Lehmann, J., Manning, D. A. C., Nannipieri, P., Rasse, D. P., Weiner, S. & E. Trumbore, S. E. 2011. Persistence of soil organic matter as an ecosystem property. *Nature*, 478: 49–56.
- Schneider von Deimling, T., Meinshausen, M., Levermann, A., Huber, V., Frieler, K., Lawrence, D. M. & Brovkin, V. 2012. Estimating the near-surface permafrost-carbon feedback on global warming. *Biogeosciences*, 9: 649-665.
- Schuur, E. A. G., McGuire, A. D., Schädel, C., Grosse, G., Harden, J. W., Hayes, D. J., Hugelius, G., Koven, C. D., Kuhry, P., Lawrence, D. M., Natali, S. M., Olefeldt, D., Romanovsky, V. E., Schaefer, K., Turetsky, M. R., Treat, C. C. & Vonk, J. E. 2015. Climate change and the permafrost carbon feedback. *Nature*, 520: 171-179.
- Schweizerische Eidgenossenschaft. 2015. *Nationale Bodenbeobachtung (NABO) 1985 – 2009*. Bern: s.n.
- Secretaría AMS & GTIS. 2016. *GSP Guidelines for sharing national data/information to compile a Global soil Organic Carbon map (GSOC17)*. Roma: AMS y GTIS.
- Serrano-Silva, N., Sarria-Guzmán, Y., Dendooven, L. & Luna-Guido, M. 2014. Methanogenesis and methanotrophy in soil: A review. *Pedosphere*, 24(3): 291-307.
- Shangguan, W., Dai, Y., Duan, Q., Liu, B. & Yuan, H. 2014. A global soil data set for earth system modeling. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 6: 249-263.
- Shepherd, K. & Walsh, M. 2002. Development of Reflectance Spectral Libraries for Characterization of Soil Properties. *Soil Science Society of America Journal*, 66(3): 988-998.
- Sietz, D., Boschütz, M. & Klein, R. J. 2011. Mainstreaming climate adaptation into development assistance: rationale, institutional barriers and opportunities in Mozambique. *Environmental Science & Policy*, 14(4): 493-502.
- Six, J., Conant, R. T., Paul, E. A. & Paustian, K. 2002. Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C-saturation of soils. *Plant and Soil*, 241: 155-176.
- Six, J., Frey, S. D., Thiet, R. K. & Batten, K. M. 2006. Bacterial and Fungal contributions to Carbon Sequestration in Agrosystems. *Soil Science Society of America*, 70(2): 555-569.
- 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. *Science of the Total Environment*, 468: 553-563.
- Smit, B. & Skinner, M. 2002. Adaptation options in agriculture to climate change: a typology. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 7(1): 85-114.
- Smith, M. S., Horrocks, L., Harvey, A. & Hamilton, C. 2011. Rethinking adaptation for a 4°C world. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 369(1934): 196-216.
- Sparling, G. P., Schipper, L. A., Bettjeman, W. & Hill, R. 2004. Soil quality monitoring in New-Zealand: practical lessons from a 6-year trial. *Ecosystems and Environment*, 104: 523-534.

- Stevenson, B. A., McNeill, S. & Hewitt, A. E.** 2015. Characterising soil quality clusters in relation to land use and soil order in New Zealand: An application of the phenoform concept. *Geoderma*, 239-240: 135-142.
- Stewart, C. E., Paustian, K., Conant, R. T., Plante, A. F. & Six, J.** 2007. Soil carbon saturation: concept, evidence and evaluation. *Biochemistry*, 86: 19-31.
- Su, J., Hu, C., Yan, X., Jin, Y., Chen, Z., Guan, Q., Wang, Y., Zhong, D., Jansson, C., Wang, F., Schürer, A. & Sun, C.** 2015. Expression of barley SUSIBA2 transcription factor yields high-starch low-methane rice. *Nature*, 523(7562): 602-606.
- Swim, J. K., Stern, P. C., Doherty, T. J., Clayton, S., Reser, J. P., Weber, E. U., Gifford, R. & Howard, G. S.** 2011. Psychology's contributions to understanding and addressing global climate change. *American Psychologist*, 66(4): 241.
- Takahashi, B., Burnham, M., Terracina-Hartman, C., Sopchak, A. R. & Selfa, T.** 2016. Climate Change Perceptions of NY State Farmers: The Role of Risk Perceptions and Adaptive Capacity. *Environmental Management*, 58(6): 946-957.
- Tarnocai, C., Canadell, J. G., Schuur, E. A. G., Kuhry, P., Mazhitova, G. & Zimov, S.** 2009. Soil organic carbon pools in the northern circumpolar permafrost region. *Global Biogeochemical Cycles*, 23(2).
- Thévenot, M., Dignac, M.-F. & Rumpel, C.** 2010. Fate of lignins in soils: a review. *Soil Biology and Biochemistry*, 42: 1200-1211.
- Thiele-Brunh, S., Bloem, J., de Vries, F. T., Kalbitz, K. & Wagg, C.** 2012. Linking soil biodiversity and agricultural soil management. *Environmental Sustainability*, 4: 523528.
- Thünen Institute.** 2016. *National Forest Soil Inventory in Germany – Data quality and data management.* (disponible en: <https://www.thuenen.de/en/wo/projects/forest-monitoring/projekte-bodenzustandserhebung/national-forest-soil-inventory-in-germany-dataqualityand-data-management/>). Accedido el 12 de febrero de 2017.
- Tisdall, J. M. & Oades, J. M.** 1982. Organic matter and water – stable aggregates in soils. *Journal of Soil Science*, 33: 141-163.
- Todd-Brown, K. E. O., Randerson, J. T., Hopkins, F., Arora, V., Hajima, T., Jones, C., Shevliakova, E., Tjiputra, J., Volodin, E., Wu, T., Zhang, Q. & Allison, S. D.** 2014. Changes in soil organic carbon storage predicted by Earth System Models during the 21st century. *Biogeosciences*, 11: 2341-2356.
- Trumbore, S.** 2009. Radiocarbon and soil carbon dynamics. *Annual Review of Earth Planetary Sciences*, 37: 47-66.
- Trumbore, S. & Czimczik, C.** 2008. An uncertain future for soil carbon. *Science*, 321(5895): 1455-1456.
- Turvey, C. G.** 2001. Weather derivatives for specific event risks in agriculture. *Review of Agricultural Economics*, 23(2): 333-351.
- UNFCCC.** 2014. *Handbook on Measurement, Reporting and Verification for developing countries.* Bonn: s.n.
- UNFCCC.** 2016. *National Reports.* (disponible en: http://unfccc.int/national_reports/items/1408.php). Accedido el 13 de febrero de 2017.
- UN-HABITAT.** 2010. *Challenges of Municipal Finance in Africa with special reference to Gaborone City, Botswana.* Nairobi: The Human Settlements Finance Systems Series.

Uveges, J. B. 2015. *Hungarian Soil Monitoring System*. Ispra: s.n.

Van Groenigen, K. J., Qi, X., Osenberg, C. W., Luo, Y. & Hungate, B. A. 2014. Faster decomposition under increased atmospheric CO₂ limits soil carbon storage. *Science*, 344: 508-209.

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.

Viscarra Rossel, R. A., Walvoort, D. J. J., McBratney, A. B., Janik, L. J. & Skjemstad, J. O. 2006. Visible, near infrared, mid infrared or combined diffuse reflectance spectroscopy for simultaneous assessment of various soil properties. *Geoderma*, 131(1-2): 59-75.

Vogel, C., Mueller, C. W., Höschel, C., Buegger, F., Heister, K., Schulz, S., Schloter, M. & Kögel-Knabner, I. 2014. Submicron structures provide preferential spots for carbon and nitrogen sequestration in soils. *Nature Communications*, 5: 2947.

Von Lützow, M., Kögel-Knabner, L., Ekschmitt, K., Matzner, E., Guggenberger, G., Marschner, B. & Flessa, H. 2006. Stabilization of organic matter in temperate soils: Mechanisms and their relevance under different soil conditions – a review. *European Journal of Soil Science*, 57: 426-445.

Wall, D. H., Nielson, U. N. & Six, J. 2015. Soil biodiversity and human health. *Nature*, 528: 69-76.

Walter, K., Don, A., Tiemeyer, B. & Freibauer, A. 2016. Determining Soil Bulk Density for Carbon Stock Calculations: a systematic Method comparison. *Soil Science Society of America Journal*, 80(3): 579-591.

Ward, S. E., Bardgett, R. D., McNamara, N. P., Adamson, J. K. & Ostle, N. J. 2007. Long-term consequences of grazing and burning on northern peatland carbon dynamics. *Ecosystems*, 10(7): 1069-1083.

Weissert, L., Salmond, J. & Scwendenmann, L. 2016. Variability of soil organic carbon stocks and soil CO₂ efflux across urban land use and soil cover types. *Geoderma*, 271: 80-90.

WRI. 2016. *MRV 101: Understanding Measurement, Reporting, and Verification of Climate Change Mitigation*, WRI Working Paper. Washington DC: WRI. (disponible en https://www.wri.org/sites/default/files/MRV_101_0.pdf). Accedido el 21 de febrero de 2017.

Zdruli, P., Lal, R., Cherlet, M. & Kapur, S. 2017. New World Atlas of Desertification and Issues of Carbon Sequestration, Organic Carbon Stocks, Nutrient Depletion and Implications for Food Security. En: *Carbon Management, Technologies, and Trends in Mediterranean Ecosystems*. Springer International Publishing. pp. 13-25.

Zhao, B., Zhang, J., Yu, Y., Karlen, D. L. & Hao, X. 2016. Crop residue management and fertilization effects on soil organic matter and associated biological properties. *Environmental Science and Pollution Research*, 23(17): 17581-17591.

Ziervogel, G., Johnston, P., Matthew, M. & Mukheibir, P. 2010. Using climate information for supporting climate change adaptation in water resource management in South Africa. *Climatic Change*, 103(3): 537-554.

Zimmermann, M., Leifeld, J., Schmidt, M. W. I., Smith, P. & Fuhrer, J. 2007. Measured soil organic matter fractions can be related to pools in the RothC model. *European Journal of Soil Science*, 58: 658-667.

ANEXOS

ANEXO 1: PRINCIPALES MÉTODOS PARA LA DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE COS

Compilado de Lorenz y Lal, 2016; Secretaría AMS y GTIS, 2016; Pallasser, 2013; Chatterjee *et al.*, 2009.

Método	Nombre	Ventajas	Inconvenientes
Analítico	Combustión seca		
	Analizador automático de carbono	<ul style="list-style-type: none"> • Estándar actual • Actualmente el más fiable • Rápido • Sencillo 	<ul style="list-style-type: none"> • Medición independiente del carbono orgánico y total del suelo raramente disponible (sólo para analizadores nuevos que realizan una combustión en dos etapas) • Requiere un gran número de muestras • Costoso • Alto consumo de energía • Interferencia con los carbonatos
	Pérdida por calcinación	<ul style="list-style-type: none"> • Previously widely used • Easy-to-apply method • Inexpensive 	<ul style="list-style-type: none"> • No es fiable debido a reacciones no relacionadas con MO (por ejemplo, interferencia de carbonatos o agua entre celdas) • Sobrevalora el contenido de materia orgánica (probable que ocurra para óxidos y carbonatos debido a las altas temperaturas) • COS obtenido de la MOS con un factor de conversión (0.58) que se sabe que es incorrecto para capas orgánicas
Combustión húmeda	Walkley-Black	<ul style="list-style-type: none"> • Previously widely used • Inexpensive • Quick approximate assessment • Selectively targets OM pools • Little interference from carbonates 	<ul style="list-style-type: none"> • Destructivo • Oxidación incompleta: factor de corrección necesario • Tiende a subestimar el COS • Interferencia con cloruros y óxidos de Mn^{2+} y Fe^{2+} • Requiere químicos nocivos

Método	Nombre	Ventajas	Inconvenientes
Teledetección	Espaciales o aéreas	<ul style="list-style-type: none"> • De uso sobre extensas superficies • No-destrucciono 	<ul style="list-style-type: none"> • Limitación en profundidad de muestreo • Índices sustitutivos necesarios
Espectroscopia	Espectroscopia de absorbancia o reflectancia infrarroja: Espectroscopia visible e infrarrojo cercano (Vis-NIR) e infrarrojo medio (MIR)	<ul style="list-style-type: none"> • Preciso y exacto (menos preciso en la región visible) • Rápido • Rentable • No-destrucciono • Uso en laboratorio o en campo • Alta capacidad de procesamiento • Potencial para teledetección • Permite una alta densidad de muestreo • Potente técnica de análisis 	<ul style="list-style-type: none"> • Necesidad continua de calibración a un número relativamente grande de muestras necesarias • La humedad del suelo puede limitar la precisión • Necesidad de datos de laboratorio de referencia apropiados, correctos y concordantes • Incapacidad de tratar directamente con interferencias de componentes distintos a COS en muestras de origen desconocido • Análisis quimiométrico necesario
	espectroscopia de plasmas inducidos por láser (LIBS)	<ul style="list-style-type: none"> • Preciso (hasta 1mm de resolución) y exacto • Alta capacidad de procesamiento • Potencial de uso en campo • Análisis rápido 	<ul style="list-style-type: none"> • Invasivo • Costoso • Aún en fase de desarrollo • Mide el carbono del suelo total • La presencia de raíces y fragmentos de rocas puede causar variabilidad en la indicación de C • Curva de calibración no universal • Problemas de salud • Interferencias con carbonatos, hierro y agua
	Dispersión inelástica de neutrones (INS)	<ul style="list-style-type: none"> • Preciso y exacto • No destructivo (sin retirada de suelo, sin ablación, sin combustión) • Análisis in situ • Alto potencial para la futura determinación de C del suelo 	<ul style="list-style-type: none"> • Costoso • Aún en fase de desarrollo • Mide el carbono del suelo total • No se realizan mediciones individuales de carbono orgánico y de carbono inorgánico del suelo • Mejores resultados en suelos ricos en C • Problemas de salud • Interferencias con carbonatos

ANEXO 2: EJEMPLOS DE SISTEMAS ACTUALES DE MONITOREO NACIONALES DE COS (LISTA NO EXHAUSTIVA)

País (referencia)	Región cubierta	Selección área	Muestreo del suelo	Profundidad sub-muestras	Fechas muestreo
Alemania <i>(Arrouays et al., 2008; Batjes y Van Wesemael, 2014)</i>	Tierras de cultivo y pastoreo También Walter, <i>et al.</i> , 2016	Cuadrícula	Compuesto	0-10, 10-30, 30-50 y 50-70 y 70-100	<ul style="list-style-type: none"> Primer muestreo en 1986 Cada 10 años
	Suelos forestales (BZE) También Thunen Institute, 2016	Cuadrícula	Compuesto	0-5, 5-10, 10-30, 30-60, 60-90 cm; si posible 90-140 cm y 140-200cm	<ul style="list-style-type: none"> Primer inventario BZE 1987-1993 Último remuestreo 2009-2016
México <i>(Batjes y Van Wesemael, 2014)</i>	Terreno forestal y no-forestal (especialmente pastizal y arbustos)	Cuadrícula	Compuesto	0-30 y 30-60 cm	<ul style="list-style-type: none"> Empezó en 2003 Cada 5 años (cada año 20% de las áreas serán remuestreadas)
Nueva Zelanda <i>(Sparling et al., 2004; Batjes y Van Wesemael, 2014; Stevenson et al., 2015)</i>	Todas	Estratificado (700 áreas de muestreo)	Único	Variable, muestreo por horizonte edáfico; en 2009 1 235 muestras a 30cm	<ul style="list-style-type: none"> Primer muestreo en 1978 Muestreo terminado en 2009
Suecia <i>(Arrouays et al., 2008 ; Batjes y Van Wesemael, 2014; Poeplau et al., 2015)</i>	Tierra agrícola (alrededor de 3 Mha)	Grid	Composite	0-20 cm suelo superficial y 40-60 cm subsuelo. En 2003: 500 muestras 0-20, 20-40 y 40-60 cm	<ul style="list-style-type: none"> Primer inventario 1983-1988 A repetirse cada 10 años Nuevo inventario en proceso

País (referencia)	Región cubierta	Selección área ¹	Muestreo del suelo ²	Profundidad sub-muestras	Fechas muestreo
Francia (Réseau de Mesures de la Qualité des Sols, RMQS) <i>(Jolivet, et al., 2006)</i>	Todas	Cuadrícula	Compuesto	0-30 (Tierra agrícola: 0-menor profundidad de arado), 30-50 (Tierra agrícola: 30-mayor profundidad de arado) cm	· Primer inventario 2001-2006 · A repetirse cada 10 años · Inventario forestal desde 1995
Inglaterra y Gales (National Soil Inventory - Inventario Nacional del Suelo) <i>(Arrouays, et al., 2008)</i>	Todas	Cuadrícula	Compuesto	Profundidad fija 0-15 cm	· Primer inventario 1966-1987 · De 7 a 37 años
Escocia (Inventario Nacional del Suelo de Escocia) <i>(Arrouays, et al., 2008)</i>	Todas	721 ubicaciones de muestreo	Único	Horizonte pedológico, hasta 100 cm	· Primer inventario 1970-1980 · Último remuestreo 2007-2010
Suiza (Nationale Bodenbeobachtung – Red nacional de monitoreo del suelo, NABO) <i>(Schweizerische Eidgenossenschaft, 2015)</i>	Todas	103 ubicaciones de muestreo	4 muestras compuestas de 25 muestras únicas de una superficie de 10x10m	0-20 cm, desde 2005 20-40cm, desde 2010 hasta 100 cm	· NABO empezó en 1985 · A repetirse cada 5 años
Hungría (Sistema húngaro de monitoreo del suelo, TIM) <i>(Arrouays, et al., 2008; Úveges, 2015)</i>	Todos los usos del suelo	Estratificado (1 236 ubicaciones de muestreo)	1 muestra compuesta de 9 muestras puntuales	0-30, 30-60, 60-90 cm (horizonte pedológico hasta 150 cm para suelos forestales)	· TIM empezó en 1992 · A repetirse cada 3 años

1 El muestreo estratificado supone la división del área de estudio en secciones homogéneas. Permite la distribución de un mayor número de muestras en estratos con una mayor variabilidad de reservas de COS. El muestreo en cuadrícula, el área de estudio se divide en pequeñas áreas o bloques. Se toman repetidas muestras en una ubicación de cada bloque. En general, cuanto menor sea la unidad de muestreo, mayor precisión se alcanza. El muestreo en cuadrícula es una técnica práctica y eficiente, y generalmente resulta en una mejor estimación de la variable de interés.

2 Al contrario que el muestreo único, el muestreo compuesto combina un número de muestras discretas recolectadas en una única muestra homogeneizada con el fin del análisis.



Comisión
Europea



MINISTRY FOR FOREIGN AFFAIRS
OF ICELAND



Ministry of Foreign Affairs of the
Netherlands



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Swiss Confederation

ISBN 978-92-5-309681-7



9 789253 096817

I6937ES/1/08.17