

El suelo agrícola, una perspectiva histórica de su degradación y la oportunidad de contribuir a la mitigación del cambio climático*

Agricultural land, a historical perspective of its degradation and the opportunity to contribute to the mitigation of climate change

Les terres agricoles, une perspective historique sur leur dégradation et la possibilité de contribuer à l'atténuation du changement climatique

MARÍA JOSÉ MARQUÉS**



PALABRAS CLAVE

Secuestro de carbono; Laboreo; Degradación.

RESUMEN Los suelos agrícolas han perdido carbono orgánico (CO), afectando a su productividad. Garantizar la alimentación de una población creciente y afrontar el reto del cambio climático nos obliga a mejorar las condiciones del suelo; una vía es recuperar ese CO perdido. Este artículo expone brevemente la evolución del concepto de degradación del suelo a nivel global hasta la concepción actual de recurso natural que suministra bienes y servicios. Uno de ellos es la capacidad de secuestro de C, que puede aumentarse gracias a manejos sostenibles; por ejemplo, reduciendo el laboreo, podemos aumentar 0,4 t C/hectárea anualmente. Esto es vital para nuestro país, cuyas tasas de almacenamiento de CO en el suelo son las menores de Europa.

KEYWORDS

Carbon sequestration; Tillage; Degradation.

ABSTRACT Loss of organic carbon (OC) under agricultural land affects its productivity. Food security in a growing population trend, and the challenge of climate change adaptation, lead us to improve soil conditions, one way is by recovering that lost OC. This article briefly exposes the evolution of the soil degradation concept at a

* Recibido: 28 de agosto de 2021; aceptado: 26 de octubre de 2021.

** María José Marqués pertenece al Departamento de Geología y Geoquímica de la Universidad Autónoma de Madrid.

global level until the current view as a natural resource supplying goods and services. One of these services is the C sequestration capacity, which can be increased by sustainable land management practices, for example, by reducing tillage, we can increase 0.4 t C / hectare annually. This change is vital for our country, which has one of the lowest OC stocks in soil in Europe.

MOTS CLÉS

Séquestration du carbone; Labour du sol; Degradation.

RÉSUMÉ Les sols agricoles ont perdu leur carbone organique (CO) affectant leur productivité. Garantir l'alimentation d'une population croissante et faire face au défi du changement climatique, nous oblige à améliorer les conditions des sols, une des moyens est la recuperation du CO perdu. Cet article expose brièvement l'évolution du concept de dégradation des sols au niveau global jusqu'à la conception actuelle du sol comme une ressource naturelle fournissant des biens et des services. Un de ces services est la capacité de séquestration du C, qui peut augmenter grâce à une gestion durable, par exemple, en réduisant le labourage, on peut augmenter 0,4 t C / ha par an. C'est vital pour notre pays, dont les taux de stockage de CO aux sols sont parmi les plus bas de l'Europe.

Introducción

El cambio climático ya no es objeto de debate. Hay suficientes evidencias de episodios inéditos de altas temperaturas o especies que aparecen donde antes nunca estuvieron o eventos meteorológicos extremos que aumentan su frecuencia. Importantes acuerdos, convenios y programas a distintos niveles, impulsan a todos los sectores productivos a cooperar para mitigar esta situación. La reciente modificación del Reglamento europeo de julio de 2021 para conseguir la neutralidad climática de Europa en el año 2035 (COM (2021) 554 final) es buena prueba de ello. En España, la Estrategia de Descarbonización a Largo Plazo (ELP-2050)¹, aprobada por el Gobierno español es un ejemplo de documento estratégico para hacer patente la necesidad y la oportunidad de cambiar el modelo productivo en diferentes sectores. El sector agrícola tiene la oportunidad de contribuir a este esfuerzo mediante dos estrategias posibles: minimizar las emisiones de gases de efecto invernadero y aumentar la capacidad de secuestro de carbono en el suelo. Este último aspecto es clave, pues aumentando el carbono orgánico (CO) en el suelo se puede producir una cascada de beneficios

¹ Consejo de Ministros (2021). El Gobierno aprueba la Estrategia de Descarbonización a Largo Plazo, que marca la senda para alcanzar la neutralidad climática a 2050. Nota de prensa disponible en https://www.miteco.gob.es/es/prensa/201103cminaprobacionelp_tcm30-516139.pdf

adicionales que suponen una mejora de la estructura del suelo, de la capacidad de retener agua y nutrientes y de alojar mayor biodiversidad (Lal, 2004).

El CO ha disminuido en el suelo a causa de su uso agrícola. La transformación de terrenos forestales en terrenos agrícolas supone una disminución drástica de CO, muy variable dependiendo del clima y del suelo. En su revisión sobre la transformación de bosques a cultivos en el mundo, Murty *et al.* (2002) ofrecen una cifra media en torno al 30% de disminución de CO, sobre todo en los primeros años. Los valores originales ya nunca se recuperarán mientras se siga utilizando el suelo para la agricultura.

La falta de CO en el suelo es uno de los principales indicadores de su degradación. Este artículo desarrolla el concepto de degradación del suelo intentado dar una visión general de cómo ha ido cambiando la percepción que se tiene del suelo como proveedor de alimentos hasta una visión actual del suelo como recurso no renovable, y aún más recientemente, su papel como sumidero de carbono que ayude a mitigar el cambio climático.

La degradación del suelo a lo largo de la historia

Aunque las sociedades preagrícolas del Paleolítico realizaron cambios en su entorno inmediato (Hillel, 1992), la degradación de suelos empezó a tener consecuencias relevantes a causa del desarrollo de la agricultura a partir del Neolítico, hace aproximadamente 10 mil años. Hoy, la agricultura y la ganadería producen degradación del territorio de forma generalizada en el planeta, y de forma más localizada, la minería y la industria afectan irreversiblemente a los suelos, destruidos o contaminados. En el último siglo, la superpoblación y el consecuente desarrollo urbanístico ha añadido otro matiz a la degradación de suelos: el sellado, cuyos efectos también se pueden considerar irreversibles (Scalenghe y Marsan, 2009). La degradación del suelo está, por tanto, relacionada con su uso. En la figura 1 se observa que en el planeta hay un 71% de tierra sólida emergida que puede ser habitable, la mitad de la cual se usa para la agricultura, un 1% del suelo, según datos de la primera década del siglo XXI, está transformado para usos urbanos y de infraestructuras (Ritchie y Roser, 2013).

En las tierras agrícolas, cada vez más extensas, el riego, de una antigüedad aproximada de 6.000 años, el laboreo de 3.000 años y la mecanización en las últimas décadas, a la vez que han aumentado la productividad, han ido produciendo cambios importantes en la composición vegetal natural, particularmente los bosques, cambios en las poblaciones de animales, cambios en la topografía del terreno, cambios en las características físico-químicas del suelo, manipulación de los cursos de agua, pérdida de suelo y extensión de los deltas. Dos o tres mil años después del comienzo de la agricultura se hizo patente el desarrollo de las ciudades (Cohen, 1995; Montgomery, 2008).

FIGURA 1. Uso del suelo a nivel mundial



* Tierras baldías: desiertos, saladares, canchales, tierra improductiva.

Fuente: Adaptado de Ritchie y Roser (2013): *Global land use for food production*, en Our world in Data (OurWorldinData.org).

Los seres humanos han cambiado la faz de la tierra para alimentarse y para protegerse. No podemos adjudicar premisas del pensamiento moderno a las citas de los personajes del pasado, en este sentido, los testimonios de degradación del territorio que podemos encontrar de los pensadores griegos como Platón, Aristóteles, o Jenofonte, o romanos como Varrón, Columela, o Plinio (Kwiatkowska *et al.*, 2001), o el anteriormente citado Buffon, por ejemplo, son seguramente producto de la melancolía o del utilitarismo², más que un reflejo de un genuino interés por la conservación del territorio como el que podemos tener en la actualidad. Parece evidente que la norma, durante milenios, ha sido la falta de preocupación del ser humano por la destrucción de la naturaleza, incluso, más aún orgullo por el aumento de la superficie agrícola o ganadera, la minería o la industrialización, que se han visto como el paradigma del progreso.

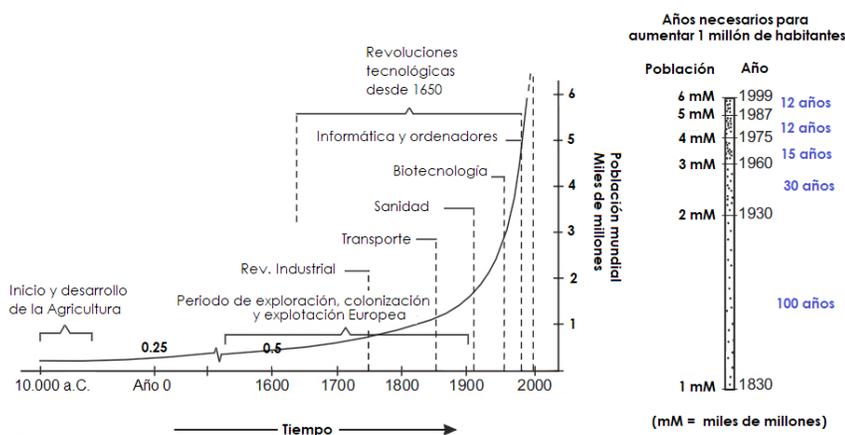
En el siglo XIX se pudo apreciar un punto de inflexión en la velocidad a la que los procesos de degradación se multiplican en el mundo, en paralelo al aumento de población tal y como se puede ver en la figura 2.

Aunque hubo señales de preocupación por el crecimiento exponencial de la población humana y el riesgo de obtención de alimentos que se refleja en la obra *Ensayo sobre el principio de la población*, de Malthus, a finales del siglo XVIII, lo que podemos entender por preocupación medioambiental desde el punto de vista moderno, se inicia a finales del siglo XIX (McNeill, 2003). Se cita frecuentemente el libro de George Perkins Marsh, *Man and Nature* (1864), como una primera visión global de las consecuencias de la degradación del territorio en la conservación de los recursos naturales, pero en general, la preocupación por el entorno se inició con la contaminación del aire

2 Por ejemplo, Platón, en el libro VIII sobre *Las Leyes*, menciona que el agua es importante para regar los campos, y que es fácil "corromperla", y propone que cualquier persona que altere o sustraiga el agua para estos fines debe ser responsable de restituir su calidad y volumen, en función de cada caso. Esta visión no es tanto ambiental como reglamentaria, útil para la buena convivencia.

de las ciudades hacinadas, inmersas en el desarrollo industrial (Platt, 2005), aunque no alcanza niveles de preocupación social y amplio debate en la comunidad científica hasta la mitad del siglo XX. Un claro ejemplo de la alarma que empieza a ser general es la publicación del libro *Primavera silenciosa*, de Rachel Carson, en 1962. En Europa hay diversas iniciativas de organización de movimientos de protección del medioambiente, pero hasta 1972, con la celebración de la llamada Conferencia de Naciones Unidas de Estocolmo, no se materializa la gravedad y extensión de la degradación del medioambiente. Las conclusiones de este evento mundial coinciden con las del informe encargado por el Club de Roma con un título claro: *Los límites del crecimiento* (Meadows, 1977).

FIGURA 2. Incremento de la población mundial hasta el año 2000



Nota: La población en el mundo comenzó a incrementarse en el siglo XIX, cuando la Revolución industrial era ya una realidad, y se disparó en el siglo XX.

Fuente: Sengupta (2017).

Hay que puntualizar que la alarma sobre la degradación específica del suelo llegó aún más tarde. La organización de Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, más conocida como FAO (por sus siglas Food and Agriculture Organization) publica la “Carta Mundial de los Suelos”³ en 1981 para “un aprovechamiento más racional de los recursos edafológicos mundiales y su protección contra la degradación irreversible”. La Carta aboga por que se adopten medidas de protección, se financie la investigación en suelos y se dé más difusión a esta problemática.

3 También denominada en inglés “World Soil Charter”, es un pequeño documento de apenas 4 páginas que insta a los organismos de la ONU y a las organizaciones internacionales a promover una serie de principios de protección del suelo orientados a mantener su producción. Disponible en <http://www.fao.org/3/az897s/az897s.pdf> (acceso 7 de agosto 2021).

El mapa mundial de degradación de suelos, la opinión de los expertos

En paralelo, el Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente (UNEP), financió el proyecto GLASOD (Global Assessment of Human induced Soil Degradation) que significa “valoración global de la degradación del suelo inducida por el ser humano”. Este fue un macroproyecto mundial coordinado por el Centro Internacional de Referencia e Información de suelos, ISRIC⁴ por sus siglas en inglés, con la participación de más de 250 científicos y expertos internacionales, trabajando desde 1988 hasta 1991 para la creación de un mapa de degradación de suelos a nivel mundial (escala 1:10.000.000). Este trabajo, publicado también como Oldeman *et al.* (1991), se presentó en la Conferencia de Río de Janeiro o Cumbre de la Tierra, organizada por la ONU en 1992, la cual es sabido que tuvo una importancia trascendental en el desarrollo posterior de la conciencia medioambiental global (Hsu *et al.*, 2013).

El informe GLASOD fue un trabajo cualitativo basado en el criterio de expertos para caracterizar qué tipo de degradación de suelos había en diferentes zonas del mundo, qué importancia podía tener y cuáles eran sus causas. Se identificaron 12 tipos de degradación de suelos, agrupados en 4 grandes bloques (tabla 1).

TABLA 1. Tipos de degradación de suelo de acuerdo con el informe GLASOD

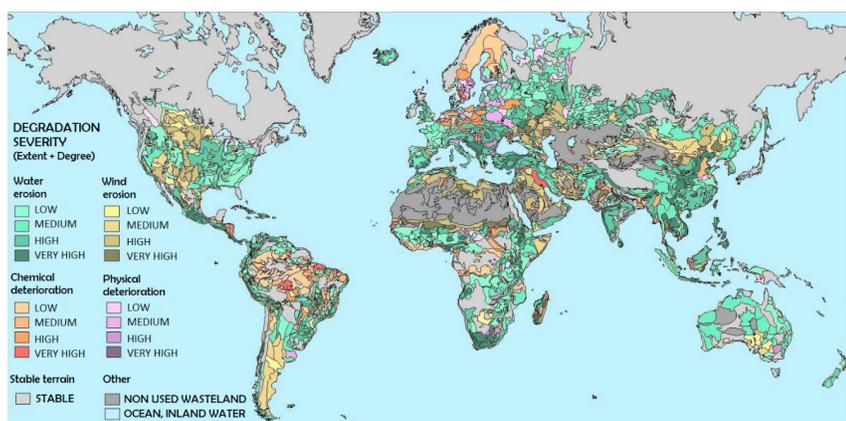
Debida a la erosión hídrica
Pérdida de suelo superficial
Deformación y movimientos en masa (cárcavas)
Debida a la erosión eólica
Pérdida de suelo superficial
Deformación del terreno
Deposición de partículas (en la versión original, <i>overblowing</i>)
Debida a cambios en características químicas
Pérdida de nutrientes y/o materia orgánica
Salinización
Acidificación
Contaminación
Debida al deterioro de características físicas
Compactación
Anegamiento
Subsidencias

4 ISRIC o *International Soil Reference and Information Center* (Centro Internacional de Información y Referencia de Suelos) se creó en 1966, como una fundación científica independiente, a instancias de recomendaciones de la IUSS (Sociedad Internacional de Ciencias del Suelo) y la UNESCO (Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura).

El mapa GLASOD también muestra las zonas libres de degradación o estables y las zonas que hemos denominado baldías denominadas *non used and waste land* por no ser útiles para su aprovechamiento, suelen coincidir con los desiertos (figura 3).

A su vez, cada uno de estos 4 tipos de degradación fue calificada como ligera, moderada, alta y muy alta. Con relación a la extensión, se determinó si era más o menos frecuente y se estimó dicha extensión en porcentaje. La gravedad resultaba de la combinación entre la intensidad de la perturbación y su extensión, y resultó en cuatro calificativos: degradación leve, moderada, severa y extrema.

FIGURA 3. Mapa de degradación de suelos en el mundo según el proyecto GLASOD



Fuente: Oldeman (1991).

En el análisis de las causas, se identificaron 5 principales:

1. Deforestación o eliminación de la vegetación natural.
2. Sobrepastoreo.
3. Actividades propias de la agricultura.
4. Sobreexplotación de la vegetación para uso doméstico (construcción, calefacción).
5. Actividades industriales.

Con posterioridad a este trabajo de referencia, hay multitud de publicaciones en revistas científicas y libros que se refieren a la degradación del suelo y de la tierra desde un punto de vista global (por ejemplo: Barrow, 1991; Eswaran *et al.*, 2001; Doran, 2002; Nachtergaele *et al.*, 2011a).

La degradación de suelos como pérdida de los servicios de los ecosistemas

Ya entrado el siglo XXI, se afianzó una corriente que asimilaba la degradación de los suelos a la pérdida de los servicios (figura 4) que estos podrían proveer (Robinson *et al.*, 2012; Wall *et al.*, 2012), concepto que ya se había acuñado para los ecosistemas en general años antes (Ehrlich y Ehrlich, 1981) y se había relacionado con las funciones del suelo en particular (Blum, 2005). En este marco conceptual, cuando un suelo se degrada puede perder en mayor o menor grado los siguientes servicios:

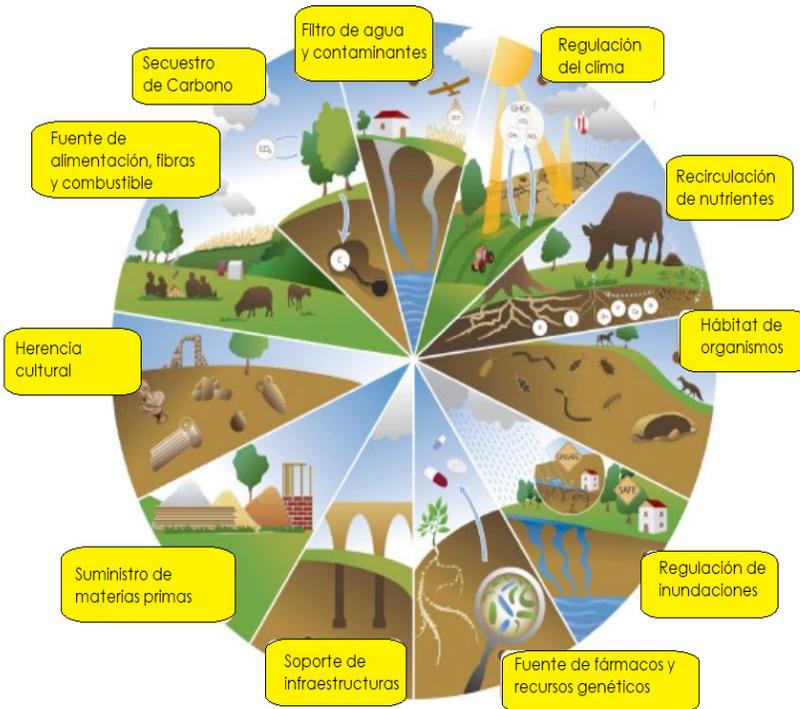
- ▮ **Servicios de provisión:** en el suelo se producen los cultivos para alimentación, fibras y maderas para combustible. También materias primas minerales y materiales de construcción. Igualmente, recursos genéticos y potenciales de medicamentos.
- ▮ **Servicios de soporte:** en el suelo se alojan organismos y es fuente de biodiversidad, gracias a microorganismos del suelo se produce el ciclo de los nutrientes, soporta las plantas que producen la fotosíntesis. Constituye el cimiento para las construcciones.
- ▮ **Servicios de regulación:** el suelo interviene en el ciclo del agua y los nutrientes, puede ser sumidero de carbono, y ayudar en la regulación del clima, puede actuar como filtro purificador de aguas, prevenir escorrentías y crecidas.
- ▮ **Servicios culturales:** conserva vestigios culturales del pasado, diferentes suelos dan lugar a diferentes paisajes con su propia idiosincrasia cultural.

La degradación del suelo ya no es solo una cuestión de conservación de la naturaleza, debe evitarse porque supone una pérdida de recursos que incluso se puede monetizar (Berry *et al.*, 2003; ELD, 2015). La forma de evitarlo es la aplicación de manejos sostenibles. El impacto que la agricultura hace en el terreno se puede reducir mediante sistemas de cultivo que reduzcan la erosión (terrazas, cubiertas vegetales), aplicación de nutrientes con técnicas de precisión que minimicen fugas, preservación de las tierras marginales, en definitiva, empleo de manejos del suelo que contemplen un poco más equitativamente la producción agraria, la diversidad y la conservación del suelo (Baer y Birgé, 2018).

El organismo internacional más directamente implicado en la conservación de suelos, la FAO, parece reaccionar después de un cierto letargo de casi dos décadas, e impulsa la creación de una iniciativa internacional denominada Global Soil Partnership (GSP) —Alianza Mundial por el Suelo—, que culmina en 2012, y también organiza y financia un panel asesor de científicos independientes, el Grupo Técnico Intergubernamental de suelos (GTIS o ITPS, por sus siglas Intergovernmental Technical Panel on Soils). Una de sus funciones es actualizar la Carta Mundial de los Suelos de 1981. Esta nueva

Carta del año 2015, adopta términos más relacionados con la conservación de los “bienes y servicios” que proporciona el suelo, y menciona explícitamente la necesidad de manejo sostenible de los servicios de provisión, soporte, regulación y culturales que emanan del suelo. Como la anterior Carta, da gran importancia a la producción, pero incorpora otras funciones del suelo como el mantenimiento de la biodiversidad o la capacidad de adaptación y mitigación al cambio climático⁵.

Figura 4. Servicios ecosistémicos que puede proporcionar el suelo



Fuente: Adaptado de FAO (2015).

Casi de forma simultánea, otro organismo de Naciones Unidas, más relacionado con la degradación de las tierras secas: la Convención de Naciones Unidas para Combatir la Desertificación (CNULD o UNCCD, United Nations Convention to Combat Desertification), propuso un punto de vista pragmático: la neutralidad de la degradación de la tierra o *land degradation neutrality*, adoptado en 2015⁶. Se asume que inevitablemente

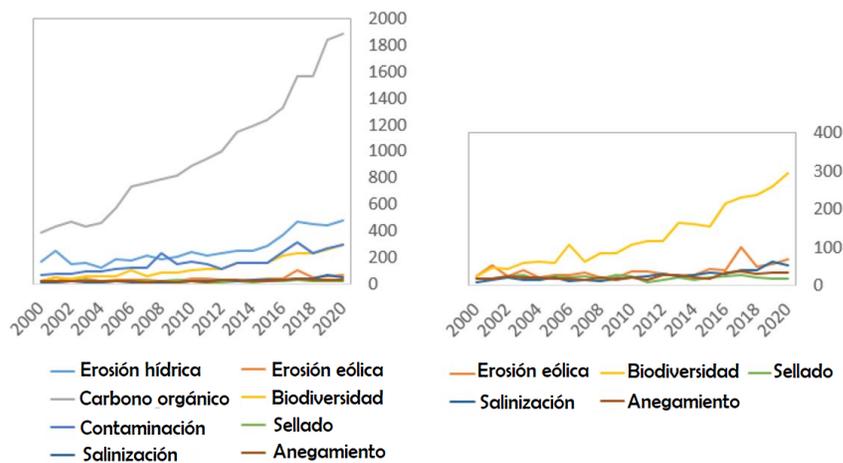
5 Esta actualización de la Carta Mundial de los Suelos puede descargarse en <http://www.fao.org/3/mn442s/mn442s.pdf> (acceso 7 de agosto 2021).

6 UNCCD Report of the Conference of the Parties on its twelfth session, celebrado en Ankara el 12-23 de octubre de 2015. Part two: Actions. ICCD/COP (12)/20/Add.1. United Nations Convention to Combat Desertification (UNCCD), Bonn (2016). Disponible en <http://www.unccd.int/Lists/OfficialDocuments/cop12/20add1eng.pdf>

hay tierras que se van a degradar, pero que debe compensarse, a nivel global, con la recuperación de tierras previamente degradadas, ahora ignoradas. Esta concepción puede resumirse en la máxima: “zero net land degradation” (Lal et al., 2012; Chasek et al., 2010).

Siguiendo la estela de la nueva Carta Mundial de los Suelos, en esta última etapa del camino, dos nuevas facetas de la degradación del suelo que no habían sido consideradas tampoco en el informe GLASOD, aparecen más frecuentemente en la literatura científica: la pérdida de biodiversidad del suelo y el sellado del suelo debido a la hiperurbanización (en términos anglosajones: *soil sealing and urban sprawl*), a la vez que se da mayor importancia a la carencia de materia orgánica en el suelo en relación al secuestro de carbono. En un análisis del número de publicaciones en Web of Science desde el año 2000 al 2020 (figura 5) se observa el crecimiento acusado del número de publicaciones referidas al CO del suelo, el siguiente tema de interés es la erosión hídrica, seguida de un conjunto de publicaciones dedicadas a la “contaminación del suelo”. A la derecha se observa la misma gráfica, pero después de eliminar los anteriores temas más citados (carbono orgánico, erosión hídrica...), entonces se puede comprobar que la biodiversidad en la ciencia del suelo está adquiriendo también mayor relevancia.

FIGURA 5. Evolución del número de artículos científicos que se publican anualmente en función de palabras clave sobre temas de degradación del suelo, seleccionados únicamente en la categoría *soil science*



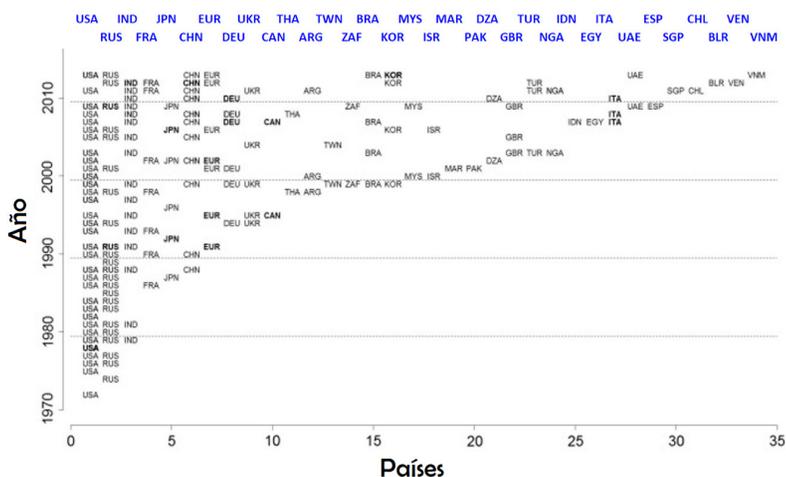
Nota: A la izquierda todas las palabras clave, a la derecha, las cinco con menor frecuencia a menor escala.
Fuente: Web of Science.

La observación remota de la degradación del suelo

Sobrevolando a todos estos debates y corrientes hay dos preguntas fundamentales: ¿Cuánto suelo hay degradado? y ¿Son eficaces las medidas adoptadas para remediarlo?

El proyecto GLASOD intentó dar respuesta a la primera de las preguntas, pero no fue suficiente. Actualmente, la forma de afrontar la obtención de datos ya no se basa en informes de expertos sino en datos cuantitativos. Existe ya información de calidad libre y gratuita, a disposición de investigadores (y del público en general) para observar los procesos que tienen lugar en la tierra. Los sistemas de información geográfica y las técnicas de teledetección han dado un impulso descomunal a la posibilidad de cuantificar la degradación del suelo.

FIGURA 6. Países (símbolos de 3 letras ISO3166) y años en los que se ha lanzado al espacio uno o más satélites orbitales para imágenes de uso civil desde 1970



Fuente: Belward y Skoien (2015).

En el año 2005 se llegó a un acuerdo para constituir el GEOSS (Global Earth Observation System of Systems) para generar, organizar y disseminar los datos obtenidos a partir de estaciones científicas y satélites, cada vez más numerosos (figura 6). La comunidad científica ya disponía de instrumentos y metodologías para determinar, casi al nivel de detalle deseado, qué y cuánta degradación había en el planeta. Al principio, las imágenes gratuitas ofrecidas por los satélites tenían escasa resolución (1 km o 250 m, por ejemplo)⁷, pero en el año 2008 se toma la decisión de dar libre acceso a los datos de imágenes multiespectrales de los satélites norteamericanos LANDSAT, que en aquel momento tenían 30 m de tamaño de pixel. A partir de entonces se inició un proceso de progresivo acceso a datos de imágenes de diferentes sensores en satélites cada vez con mayor resolución. En la actualidad, por ejemplo, los satélites europeos Sentinel 2 ofrecen imágenes gratuitas con resoluciones en torno de 10 m de pixel (Butler, 2014). El largo periodo de observación de algunos satélites proporciona

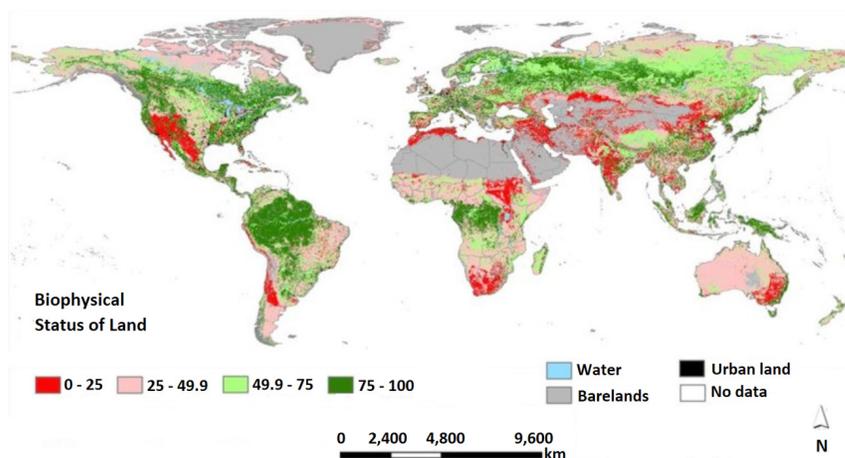
7 Como ejemplo, Meteosat y los otros satélites geoestacionarios, que dan cobertura a todo el planeta, tienen resoluciones de 5.000 metros, landsat-TM, 30 metros y el sensor del satélite Ikonos-1 ofrece 4 metros para imágenes multiespectrales y 1 metro para imágenes pancromáticas.

además una visión de la evolución temporal del estado del planeta y, por ende, de la degradación de suelos. El problema surgía a la hora de escalar los datos obtenidos a nivel local hacia extensiones geográficas más globales o viceversa, hasta qué punto adjudicar un valor obtenido a una escala de cuenca fluvial, a datos concretos de una parcela (Finke y Bierkens, 2002; Leitao *et al.*, 2018).

Con relación específica a la degradación del suelo, el programa LADA⁸ (Land Degradation Assessment in Drylands) fue pionero en el uso de estas tecnologías para evaluar y realizar mapas de la degradación a diferentes escalas espaciales (FAO, 2011), aunque se iniciaron en zonas secas, la metodología se empleó en otras regiones del mundo. Para evitar el sesgo de realizar solo mapas de degradación, este proyecto se complementó con otro denominado WOCAT (World Overview of Conservation Approaches and Technologies) que incluye la representación de la capacidad de la tierra y cómo evoluciona en diferentes áreas, sobre todo a nivel local. Pero también a nivel global, gracias a la cooperación LADA-WOCAT, se ha podido desarrollar un Sistema de Información sobre la Degradación de la Tierra a nivel global (GLADIS), que facilita la interpretación de los cambios en los mencionados anteriormente servicios de los ecosistemas (Nachtergaele *et al.*, 2011b), que en este caso son seis: biomasa, salud del suelo, agua, biodiversidad, beneficio económico y beneficio social.

El mapa de degradación de suelos se ha transformado en el mapa de la capacidad que tienen los ecosistemas de suministrar recursos, suelos degradados son aquellos que no son capaces de expresar todo su potencial.

FIGURA 7. Mapa del estado biofísico del suelo, o de su capacidad para suministrar bienes y servicios



Fuente: Adaptado de Nachtergaele *et al.* (2010).

⁸ Este programa está financiado por el organismo internacional Global Environmental Facility (GEF), con el apoyo de la UNEP y la FAO, y participan activamente muchos países.

La metodología para realizar estas estimas de la degradación del suelo utiliza bases de datos de suelos en el mundo, de acceso abierto, sobre los que se aplican algoritmos para poder adjudicar rangos de valores a cada uno de los seis factores mencionados en anteriormente, lo que facilita la elaboración de mapas de degradación (Nachtergaele y Petri, 2008).

El empleo de “indicadores clave” para conocer la evolución de la degradación del suelo ha sido una de las ramas más prolíficas de la ciencia del suelo (Kirkby *et al.*, 2000). Por mencionar algunos ejemplos, dos de los indicadores más utilizados para estimar la degradación de los suelos son la cobertura vegetal y el contenido de CO en el suelo. Los cambios en la cobertura vegetal del planeta han sido monitorizados desde hace más de 40 años, a partir de datos procedentes de sensores en distintos satélites como los Landsat, SPOT, IRS o Sentinel, gracias a un proyecto internacional denominado CORINE (Coordination of Information on the Environment). Más recientemente se ha conseguido el hito de realizar el mapa mundial del contenido de carbono en el suelo (FAO, 2018). Este mapa (figura 8) se ha obtenido gracias a la colaboración de múltiples países, bajo la coordinación del anteriormente mencionado grupo de expertos ITPS y la iniciativa GSP. La finalidad es poner a disposición de la comunidad científica de datos de partida obtenidos por métodos experimentales y armonizados para todos los lugares del mundo, para conocer si las medidas de manejo sostenible del suelo van a aumentar el contenido de carbono en el suelo, aspecto importante desde la perspectiva de la propia recuperación del suelo, pero también como medida paliativa del cambio climático (IPCC, 2006).

FIGURA 8. Mapa GSOC, versión 1.2.0. Almacén o stock de carbono en el suelo considerando 30 cm de profundidad



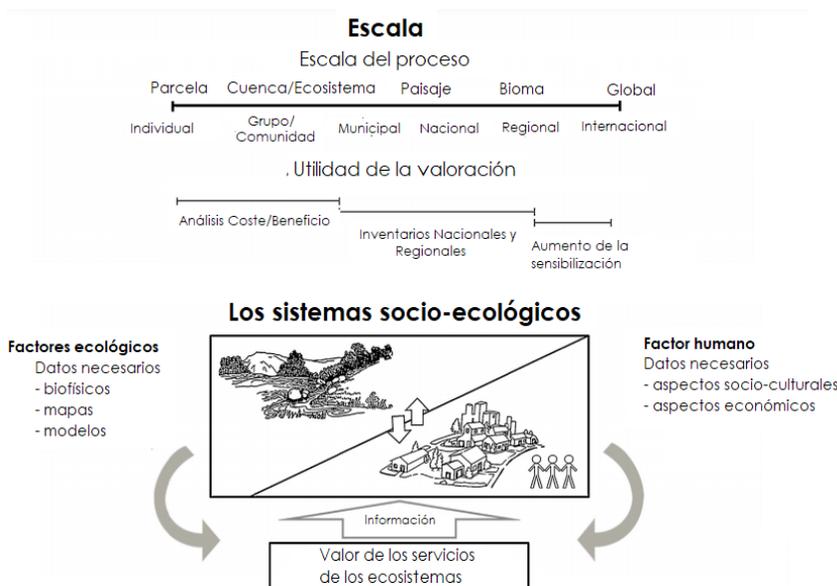
Fuente: FAO (2018).

Modelos para el estudio de la degradación del suelo

Para saber con datos experimentales reales la dimensión espacial y temporal de la degradación del suelo es necesaria una inversión de medios y tiempo inasumible.

Desde hace décadas se emplean modelos, que han ido creciendo en complejidad, como herramientas analíticas para conocer los cambios en un parámetro determinado, a partir de los cambios de factores implicados, por ejemplo, se puede estimar la producción de biomasa vegetal (productividad del cultivo) a partir de variables como contenido en CO₂ y nutrientes en el suelo, suministro de agua y diferentes manejos; esto es lo que se conoce como modelos basados en procesos. A mayor escala, los modelos de paisaje se sitúan en cuencas hidrográficas para evaluar las diferentes estrategias posibles de manejo de la tierra. Para ello, tienen en cuenta variables como el estado de degradación o conservación del suelo, la erosión, el suministro de agua, las comunidades vegetales, el clima, el nivel económico y la fuente de ingresos de la zona. Otro tipo de modelos como los denominados integrados globales, incluyen más variables, por ejemplo, para un modelo de degradación general del suelo habría que considerar aspectos de la población, la economía, la agricultura, la obtención de energía, la reglamentación ambiental, y por supuesto, el suelo (Turner *et al.*, 2016). El nivel de complejidad que pueden alcanzar estos modelos es enorme, en la figura 9 se puede observar el marco conceptual para considerar todos los elementos posibles que pueden ser tenidos en cuenta a la hora de elaborar un modelo y su utilidad.

FIGURA 9. Aspectos a considerar para el desarrollo de modelos con diferentes escalas y fuentes de datos biofísicos y socioeconómicos



Fuente: Adaptado de Turner *et al.* (2016).

En sus inicios, los modelos no eran tan complicados. El proceso más importante de la degradación del suelo a nivel global es la erosión hídrica (Oldeman, 1991) y ha sido uno de los más estudiados mediante modelos. El más utilizado para valorar el efecto de los manejos en la pérdida de suelos es sin duda el modelo USLE (Universal

Soil Loss Equation; Wischmeier y Smith, 1978). Se trata de un modelo empírico que únicamente emplea los siguientes parámetros para estimar la pérdida de suelo por unidad de superficie: K (pérdida de suelo en Mg ha^{-1}) = $R \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P$, siendo R la erosividad del clima, K la erosionabilidad del suelo, LS la topografía del terreno, C el factor de cobertura vegetal y P los manejos sobre el terreno.

Ha sido precisamente su sencillez lo que ha contribuido a su difusión y empleo en la comunidad científica global. Este modelo experimentó actualizaciones y mejoras (Renard y Ferreira, 1993 o Kinell y Risse, 1998) y abrió la puerta a muchos otros modelos de predicción de la pérdida de suelo, como se ha mencionado, cada vez más complejos (Knisel, 1980; Silburn y Loch, 1991; Laflen *et al.*, 1991; Morgan *et al.*, 1998). También se desarrollaron modelos para estimar la pérdida de suelo por erosión eólica (Wagner, 2013).

Es necesario indicar que el aumento de la complejidad no implica necesariamente una mejora en la predicción de los modelos, pues pueden tener problemas de acumulación de errores, sobre-parametrización⁹ y aplicación de resultados a escalas no apropiadas; además dado que el número de parámetros necesarios es, a veces, tan alto, la falta de datos reales obliga a recurrir a estimas o indicadores de esos parámetros, con lo cual, las conclusiones pueden ser cuestionables (Beven, 1991).

En los últimos años, a la hora de hacer modelos predictivos que ayuden a definir la variabilidad espacial o temporal de cualquier parámetro, se utilizan sistemas de tratamiento de datos basados en lo que suele denominarse métodos de *machine learning* que se ha traducido al español como métodos de aprendizaje automático. Estos métodos suelen dividirse en dos grandes grupos: los clásicos y los *deep learning-based* (aprendizaje profundo)¹⁰. Un ejemplo de los métodos clásicos sería el empleo de *random forest* o *gradient boosting*, que puede utilizarse para estimar y posteriormente representar en mapas la degradación de suelos (por ejemplo, en pastizales, Yousefi *et al.*, 2020). Otro ejemplo de empleo de aprendizaje profundo sería el denominado de redes neuronales o Convolutional Neural Networks (CNN). Han sido empleados para caracterizar la degradación del suelo en diversos trabajos, por ejemplo, Silveira *et al.* (2019) o Rukhovich *et al.* (2021).

Esta mecánica de proceso de datos viene a ser como una visión artificial. El ordenador “aprende” a distinguir imágenes como lo hace el cerebro humano; en el proceso, se necesita supervisión humana para que el ordenador pueda aprender a distinguir a

⁹ Puede darse la circunstancia de que algunos modelos tengan más parámetros que datos utilizados para la calibración del modelo.

¹⁰ Dentro de los modelos clásicos estarían los árboles de decisión, donde los datos se manejan mediante técnicas no paramétricas supervisadas. Si se agrupan los árboles de decisión de forma aleatoria para obtener decisiones, se pasa a un nuevo tipo de procedimiento, denominado *random forest*. Si el agrupamiento de los árboles de decisión es secuencial, el procedimiento se denomina *gradient boosting*.

qué categoría (previamente definida) pertenece un píxel de una imagen. Vemos que la gran necesidad de datos de estos modelos hace que converjan, en la investigación de la degradación de suelos, los datos multitemporales proporcionados por los satélites y los modelos que aplican procesos de *machine learning* de última generación.

Los mapas o las clasificaciones del terreno obtenidos mediante estos procedimientos deben necesariamente ser validados, es decir, comprobados *in situ*, mediante lo que se conoce como “verdad terreno”. Cada proyecto particular debe incluir las comprobaciones que precise muestreando el terreno en los lugares necesarios, pero también se pueden utilizar las bases de datos georreferenciadas que puedan existir a nivel global. En Europa, por ejemplo, existe una base de datos en el seno del proyecto LUCAS (Land Use/Cover Area frame Statistical survey)¹¹, gracias al cual se realizan periódicamente (cada 3-4 años) muestreos y análisis de laboratorio estándares de unos 20.000 puntos de muestreo¹² en diferentes países de Europa.

El secuestro de carbono para la recuperación del suelo

Tenemos, pues, las herramientas necesarias para conocer las causas y la extensión de la degradación de los suelos. También el conocimiento de las estrategias para evitarla. Se trata del manejo sostenible del suelo. Cuando nos referimos a que el suelo debe ser utilizado de forma sostenible, suponemos que la estrategia de uso minimiza la erosión o pérdida de suelo, mantiene una buena estructura, permite que el agua pueda infiltrarse y almacenarse de acuerdo con su textura y estructura, mantiene una cobertura vegetal suficiente sobre el suelo, que se consigue mantener o aumentar el contenido de materia orgánica y nutrientes, no produce salinización, sodificación o alcalinización, la posible contaminación está a niveles que no entrañan un riesgo para las personas o los ecosistemas y finalmente, permite que haya una biodiversidad suficiente para asegurar las funciones del suelo o que se minimiza el sellado del mismo (FAO, 2017).

Muchas de estas premisas pueden conducir a la consecución de un objetivo que enlaza el suelo y el clima, en inglés se denomina *climate-smart soil* (Paustian *et al.*, 2014), y se podría traducir como un suelo inteligente desde el punto de vista climático. Se basa, como se ha mencionado anteriormente, en la posibilidad de conseguir, mediante un manejo adecuado, que se reduzcan las emisiones de gases de efecto invernadero, y algo más: que el suelo acumule carbono, de forma que disminuya la concentración de estos gases con carbono en la atmósfera (dióxido de carbono y metano fundamentalmente).

11 El programa o proyecto LUCAS surgió en 2001 de una decisión del Parlamento Europeo para recabar información periódica sobre cambios de uso del suelo. Inicialmente se recogía la superficie ocupada por diferentes usos del suelo (agrícola, forestal, urbano...). Desde el año 2009 además se recogen muestras de suelo y se analizan diferentes parámetros físico-químicos en un laboratorio especializado.

12 La metodología y parámetros se pueden encontrar en https://esdac.jrc.ec.europa.eu/ESDB_Archive/eusoils_docs/other/EUR26102EN.pdf (acceso 8 de agosto 2021).

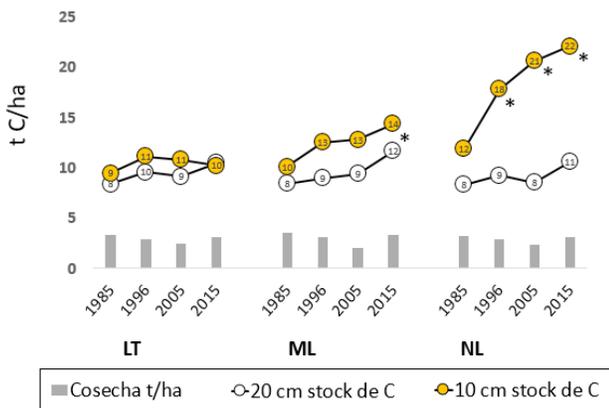
Existen cientos de evidencias de la capacidad de secuestro de carbono en el suelo agrícola (World Bank, 2012). La capacidad de distintos suelos de acumular CO está entre 0,3 y 1,15 toneladas por hectárea y año (Zomer *et al.*, 2017). Muchos de estos datos están basados en modelos de predicción a futuro, tal como se ha descrito anteriormente, en diferentes escenarios de incrementos de temperatura y a diferentes escalas espaciales. En estas proyecciones a gran escala y largo plazo la validación es imprescindible pero difícil, por ello los trabajos con datos experimentales reales a largo plazo son extraordinariamente valiosos. Normalmente se considera que un experimento puede ser denominado de largo plazo cuando se han estudiado una variable durante un periodo de 10-15 años (Riar y Bhullar, 2020) y no es frecuente que los ensayos experimentales sean de muy larga duración (Grosse *et al.*, 2020); este tipo de estudios se realiza a nivel de parcela. El libro de Bhullar y Riar (2020) ofrece una extensa revisión de estudios agronómicos a largo plazo. El más conocido es el de Rothamsted, de más de un siglo (Poulton, 1995).

Son pocos los experimentos que se han mantenido a largo plazo para conocer el efecto de diferentes manejos agrícolas en las características del suelo. Uno de ellos se sitúa en la Finca El Encín, Madrid, manejada desde hace más de 30 años (Hernanz *et al.*, 2009; Bienes *et al.*, 2020) por científicos de este centro de investigación y desarrollo rural (IMIDRA, Instituto Madrileño de Investigación y Desarrollo Rural, Agrario y Alimentario). El experimento compara el manejo tradicional del suelo: el laboreo intensivo, que supone arado de vertedera y varios pases de cultivador y disco, con otros dos tipos de manejo: el mínimo laboreo, que prescinde de la vertedera y reduce al mínimo las demás labores, y por último, el no laboreo, también llamado siembra directa. Entre otros aspectos estudiados en esta investigación, se destaca aquí la influencia de estos manejos en el secuestro de carbono. En la figura 10 se observa que los suelos manejados con laboreo tradicional tienen un stock de carbono, en los primeros 10 cm de suelo, de entre 9 y 11 toneladas de C por hectárea, muy similar al stock de la capa inferior entre 10 y 20 cm de profundidad. Si se suman ambos contenidos, se puede decir que el stock de C en estos suelos calizos de esta zona del centro peninsular manejados con laboreo tradicional está en torno a 20 t C/ha (en 20 cm de profundidad). Este valor coincide con los datos obtenidos en un reciente estudio del contenido de carbono en suelos españoles bajo distintos usos (Calvo *et al.*, 2020) que estima que en suelos agrícolas (cereales y leñosos) de la Comunidad de Madrid, hay un stock de C en torno a 24 t/ha (en 30 cm de profundidad). Es una cantidad pequeña comparada con la capacidad de almacenamiento de carbono en la zona cuando los suelos están cubiertos por bosques, que se estima, de media, en 85 t C/ha según estos mismos autores.

En este contexto, si se manejan suelos agrícolas mediante mínimo laboreo, poco a poco, el contenido de carbono va incrementándose, aunque más significativamente en los primeros 10 cm de profundidad. En la figura 10 se observa que, al cabo de 30 años, se ha producido un incremento estadísticamente significativo. Sumando el *stock* de C en los 20 cm de profundidad, con el mínimo laboreo se consigue tener un valor

de 26 t C/ha al cabo de 30 años de manejo. En el caso del no laboreo, la capacidad de secuestro de carbono es mayor, y se observa mucho antes. Tras 30 años de no laboreo el stock de C ha subido a 33 t/ha. Esto supone una tasa anual de aumento de 0,4 T C/ha. La producción no se ha visto afectada, pues la media de cosecha está en torno a 3 toneladas por hectárea y año, similar a la de los otros manejos.

Figura 10. Cambios en el stock de carbono (t C/ha) en suelos agrícolas manejados con laboreo tradicional (LT), mínimo laboreo (ML) y no laboreo o siembra directa (NL), en un seguimiento de 30 años de datos experimentales



Nota: Se consideran dos profundidades del suelo: de 0 a 10 cm y de 10 a 20 cm. La cosecha es la media de producción de trigo y veza en los mismos periodos. Los asteriscos indican diferencias significativas ($p < 0.05$) mediante test Kruskal-Wallis.

Fuente: Bienes *et al.* (2020).

El estudio aquí citado sobre el manejo sostenible del suelo es solo un ejemplo muy concreto del potencial que existe para mitigar las consecuencias de siglos de despreocupación por el entorno; en este caso se ha podido demostrar que, aunque lentamente, se puede almacenar o “secuestrar” C en el suelo agrícola, también en climas semiáridos como el de este caso de estudio.

En el pasado más o menos reciente la preocupación por el suelo estuvo ligada a la provisión de alimentos y fibras y después a la pérdida de suelo; en su momento fueron temas prioritarios dignos de estudio y objeto de financiación por distintos Organismos. En la actualidad, la protección del suelo favoreciendo su función de acumulación de carbono orgánico parece haberse consolidado como un tema prioritario y afortunadamente implica una estrategia ganadora desde múltiples puntos de vista, no solo la mitigación y la adaptación al cambio climático, que están en juego, sino también la vía para mantener la estructura, la fertilidad y la biodiversidad del suelo. En definitiva, aunque ya se ha mencionado a lo largo de este texto, el aumento de CO₂ en el suelo frena su degradación y favorece su recuperación. No se puede perder de vista que frenar la degradación del suelo no es únicamente una cuestión ambiental sino un impulso al desarrollo.

Bibliografía

- BAER, S. G. y BIRGÉ, H. (2018): "Soil ecosystem services: an overview", en D. Reicosky (ed.), *Managing soil health for sustainable agriculture*, Cambridge, Burleigh Dodds Science Publishing Limited, 22 pp.
- BARROW, C. J. (1991): *Land degradation: Development and breakdown of terrestrial environments*, Cambridge, Cambridge University Press, pp. 295, 23.
- BERRY, L.; OLSON, J. M. y CAMPBELL, D. J. (2003): *Assessing the Extent, Cost and Impact of Land Degradation at the National Level: Findings and Lessons Learned from Seven Pilot Case Studies*, Washington, DC, World Bank.
- BEVEN, K. (1991): "Spatially Distributed Modeling: Conceptual Approach to Runoff Prediction", en D. S. Bowles y P. E. O'Connell (eds.), *Recent Advances in the Modeling of Hydrologic Systems. NATO ASI Series (Series C: Mathematical and Physical Sciences)*, vol. 345., Dordrecht, Springer.
- BHULLAR, G. S. y RIAR, A. B. T.-L.-T. F. S. R. (eds.). (2020): *Front Matter* (p. iii). Academic Press, Frick, 224 pp. Diponible en <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818186-7.01001-8>
- BIENES, R. et al. (2021): "Tracking Changes on Soil Structure and Organic Carbon Sequestration after 30 Years of Different Tillage and Management Practices", *Agronomy*, 11, 291.
- BRIDGES, E. M. y OLDEMAN L. R. (1999): "Global Assessment of Human-Induced Soil Degradation", *Arid Soil Research and Rehabilitation*, 13:4, pp. 319-325.
- BUTLER, D. (2014): "Earth observation enters next phase", *Nature*, 508, pp. 160-161.
- CALVO DE ANTA, R. et al. (2020): "Soil organic carbon in peninsular Spain: Influence of environmental factors and spatial distribution", *Geoderma*, 370, p. 114365, doi: 10.1016/j.geoderma.2020.114365
- CHASEK P. et al. (2010): "Operationalizing zero net land degradation: the next stage in international efforts to combat desertification?", *Journal of Arid Environments*, 112, pp. 5-13.
- COHEN, J. E. (1995): "People control the growth of nonhuman populations", *How Many People Can the Earth Support?*, Nueva York y Londres, W. W. Norton and Company.
- DORAN, J. W. (2002): "Soil health and global sustainability: Translating science into practice", *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 88(2), pp. 119-127.
- EHRlich, P. y EHRlich, A. (1981): *Extinction: The Causes and Consequences of the Disappearance of Species*, Nueva York, Random House, 305 pp.
- ELD INITIATIVE (2015): *Report for policy and decision makers: Reaping economic and environmental benefits from sustainable land management*. Disponible en www.eld-initiative.org (acceso 7 de agosto 2021).
- ESWARAN, H.; LAL, R. y REICH, P. F. (2001): "Land degradation: an overview", en E. M. Bridges et al. (eds.), *Responses to Land Degradation. Proc. 2nd. International Conference on Land Degradation and Desertification*, Tailandia, Khon Kaen, Nueva Delhi, India, Oxford Press.

- FAO (2011): *Land Degradation Assessment in Drylands: Mapping Land Use Systems at Global and Regional Scales for Land Degradation Assessment Analysis*, v1.1. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Roma.
- (2017): *Voluntary Guidelines for Sustainable Soil Management*, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Roma, 26 pp. Disponible en <http://www.fao.org/3/bl813e/bl813e.pdf>
- (2018): *Global Soil Organic Carbon Map*, Roma. Disponible en <http://www.fao.org/3/I8891EN/i8891en.pdf> (acceso 7 de agosto 2021).
- FINKE, P. A. y BIERKENS, M. F. P. (2002): “Choosing appropriate upscaling and downscaling methods for environmental research. Agricultural Effects on Ground and Surface Waters: Research at the Edge of Science and Society”, *Proceedings of a symposium held at Wageningen*, octubre, 273, pp. 405-409.
- GROSSE, M. et al. (2020): *Chapter 9 - Managing long-term experiment data: a repository for soil and agricultural research* (G. S. Bhullar & A. B. T.-L.-T. F. S. R. Riar (eds.)), pp. 167-182), Academic Press.
- HERNANZ, J. L.; SÁNCHEZ-GIRÓN, V. y NAVARRETE, L. (2009): “Soil carbon sequestration and stratification in a cereal/leguminous crop rotation with three tillage systems in semiarid conditions”, *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 133, pp. 114-122.
- HILLEL, D. (1992): “Human Origins”, *Out of Earth. Civilization and the life of the Soil*, Berkeley y Los Ángeles, University of California Press, pp. 55-62.
- HSU, A.; LLOYD, A.; EMERSON, J. W. (2013): “What progress have we made since Rio? Results from the 2012 Environmental Performance Index (EPI) and Pilot Trend EPI”, *Environmental Science Policy*, 33, pp. 171-185.
- IPCC (2006): “Intergovernmental Panel on climate change guidelines for national greenhouse gas inventories”, National Greenhouse Gas Inventories Programme, Institute for Global Environmental Strategies (IGES). Disponible en <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/>
- KINNEL, P. y RISSE, L. (1998): “USLE-M: Empirical modelling rainfall erosion through runoff and sediment concentration”, *Soil Science Society of America Journal*, 62 (6), pp. 1667-1672.
- KIRKBY, M. J. et al. (2000): “The development of land quality indicators for soil degradation by water erosion”, *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 81, pp. 125-135.
- KNISEL, W. G. (1980): *CREAMS: A Field Scale Model for Chemicals, Runoff and Erosion from Agricultural Management Systems*, USDA.
- KWIATKOWSKA, T.; ISSA, J. y PIÑÓN, F. (2001): *El mundo antiguo y la naturaleza*, México, Plaza y Valdés Editores.
- LAFLEN, J. M.; LANE, L. J. y FOSTER, G. R. (1991): “WEPP: A new generation of erosion prediction technology”, *Journal of Soil and Water Conservation*, 46, pp. 34-38.
- LAL, R. (2012): “Soil carbon sequestration impact on global climate change and food security”, *Science*, 304, pp. 1623-1627.
- LAL R.; SAFRIEL U. y BOER B. (2012): “Zero Net Land Degradation: a new sustainable development goal for Rio+20”. Disponible en <http://www.unccd.org/>

int/Lists/SiteDocumentLibrary/secretariat/2012/Zero%20Net%20Land%20Degradation%20Report%20UNCCD%20May%202012%20background.pdf (acceso 7 de agosto 2021).

- LEITÃO, P. J. *et al.* (2018): "From sample to pixel: multi-scale remote sensing data for upscaling aboveground carbon data in heterogeneous landscapes", *Ecosphere*, 9(8), e02298.
- MCNEILL, J. (2003): "Observations on the Nature and Culture of Environmental History", *History and Theory*, 42(4), pp. 5-43.
- MEADOWS, D. H. (1977): *Limits to Growth: A Report for the Club of Rome's Project on the Predicament of Mankind*, Nueva York, New American Library.
- MONTGOMERY D. (2008): *Dirt: The Erosion of Civilizations*, Berkeley y Los Ángeles, California, University of California Press.
- MURTY, D. *et al.* (2002): "Does conversion of forest to agricultural land change soil carbon and nitrogen? A review of the literature", *Global Change Biology*, 8(2), pp. 105-123.
- NACHTERGAELE, F. y PETRI, M. (2008): *Mapping Land Use Systems at global and regional scales for Land Degradation Assessment Analysis*, Roma, FAO.
- NACHTERGAELE, F.; PETRI, M. y BIANCALANI, R. (2011a): "Land Degradation", en R. Lal y B. A. Astewart, *World Soil Resources and Food Security Advances in Soil Sciences*, Londres, Taylor and Francis, CRC Press, 574 pp. Disponible en <http://www.taylorandfrancis.com/books/details/9781439844502/>
- NACHTERGAELE, F. O.; PETRI, M. y BIANCALANI, R. (2011b): *Global Land Degradation Information System (GLADIS) manual*, v. 1.0, LADA Technical Report No 17, Roma, FAO.
- NACHTERGAELE, F. O. *et al.* (2010): "Global Land Degradation Information System (GLADIS)", *An Information database for Land Degradation Assessment at Global Level. Technical report of the LADA FAO / UNEP Project*, Roma, FAO.
- OLDEMAN, L. R.; HAKKELING, R. y SOMBROEK, W. (1991): *World Map of the status of human-Induced soil degradation*, Wageningen, GLASOD-ISRIC.
- PAUSTIAN, K. *et al.* (2014): "Climate smart soils", *Nature*, 332, pp. 49-57.
- PERKINS-MARSH, G. (1864): *Man and Nature*, en S. Low, y Marston (ed.), *Physical Geography as Modified by Human Action*, Londres, 565 pp. Disponible en <https://publicdomainreview.org/collection/man-and-nature-1864> (acceso 26 agosto 2021).
- PLATT, H. L. (2005): *Shock cities: the environmental transformation and reform of Manchester and Chicago*, Chicago, The University of Chicago Press, 628 pp.
- POULTON P. R. (1995): "The importance of long-term trials in understanding sustainable farming systems: the Rothamsted experience", *Australian Journal of Experimental Agriculture*, 35, pp. 825-834.
- RENARD, K. G. y FERREIRA, V. A. (1993): "RUSLE model description and database sensitivity", *Journal of Environmental Quality*, 22, pp. 458-466.
- RIAR, A. y BHULLAR, G. S. (2020): "Long Term experiments in agriculture: stages, challenges, and precautions", *Long-Term Farming Systems Research. Ensuring Food Security in Changing Scenarios*, Frick, Suiza, Academic Press (Bhullar & Riar, 2020), pp. 3-12.

- RITCHIE, H. y ROSER, M. (2013): *Land Use*. Disponible en <https://ourworldindata.org/land-use> (acceso 6 de agosto 2021).
- ROBINSON, D. A. *et al.* (2012): "Natural capital, ecosystem services, and soil change: Why soil science must embrace an ecosystems approach", *Vadose Zone Journal*, 11(1), p. 6.
- RUKHOVICH, D. I. *et al.* (2021): "The Use of Deep machine learning for the Automated Selection of Remote Sensing Data for the Determination of Areas of Arable Land Degradation Processes Distribution", *Remote Sensing*, 13: 155.
- SCALENGHE, R. y MARSAN, F. A. (2009): "The anthropogenic sealing of soils in urban areas", *Landscape and Urban Planning*, 90, pp. 1-10.
- SENGUPTA, A. (2017): "Distribution, processes and effects of human population. AP Human Geography", *Geography Notes*, 11. Disponible en <http://www.amit-sengupta.com/distribution-processes-effects-human-population-ap-human-geography/> (acceso 5 de agosto 2021).
- SILBURN, D. y LOCH, R. (1991): "Evaluation of the CREAMS erosion model for predicting sediment yields and size distributions", *Workshop on Modelling the Fate of Chemicals in the Environment*, Canberra, Centre for Resource and Environmental Studies, Australian National University, pp. 141-142.
- SILVEIRA *et al.* (2019): "Object-based random forest modelling of aboveground forest biomass outperforms a pixel-based approach in a heterogeneous and mountaintropical environment", *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 78, pp. 175-188.
- TURNER, K. G. *et al.* (2016): "A review of methods, data, and models to assess changes in the value of ecosystem services from land degradation and restoration", *Ecological Modelling*, 319, pp. 19-207.
- WAGNER, L. E. (2013): "A history of wind erosion prediction models in the United States Department of Agriculture: the wind erosion prediction system (WEPS)", *Aeolian Research*, 10, pp. 9-24.
- WALL, D. H. *et al.* (2012): *Soil Ecology and Ecosystem Services*, Oxford University Press.
- WISCHMEIER, W. H. y SMITH, D. D. (1978): "Predicting Soil Erosion Losses: A Guide to Conservation Planning", *USDA Agricultural Handbook*, 537, 58 pp.
- WORLD BANK (2012): *Carbon Sequestration in Agricultural Soils*. Washington, DC, World Bank. Disponible en <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/11868>
- YOUSEFI, S. *et al.* (2021): "Assessment of land degradation using machine-learning techniques: A case of declining rangelands", *Land Degradation & Development*, 32, pp. 1452-1466.
- ZOMER, R. J. *et al.* (2017): "Global Sequestration Potential of Increased Organic Carbon in Cropland Soils", *Scientific Reports*, 7(1), 15554, doi: <https://doi.org/10.1038/s41598-017-15794-8>