

# TRABAJO FIN DE GRADO

**Autor: Laura Milian Gay.**

**D.N.I.: 52005373-G.**

**Tutor: María Teresa de la Cruz Caravaca.**

**Convocatoria: 30/Junio/2015.**



## **[INFLUENCIA DE LA MATERIA ORGÁNICA DEL SUELO EN EL SECUESTRO DE CARBONO. BIOCHAR, UNA ESTRATEGIA POTENCIAL]**

Universidad Complutense de Madrid. Facultad de Farmacia.

## RESUMEN

Este trabajo trata de explicar las estrategias que existen para ralentizar la emisión de CO<sub>2</sub> a la atmósfera desde el suelo. De esta manera, la menor emisión de gases de efecto invernadero (GEI) pueden frenar la progresión del cambio climático. Por otro lado, se analizan las propiedades del biochar como estrategia para ralentizar el ciclo del carbono que, usado como enmienda orgánica, es capaz de modificar las propiedades del suelo y secuestrar el carbono.

**Palabras clave:** Secuestro de carbono, humificación, recalcitrancia, biochar.

### 1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad hablar del cambio climático es algo cotidiano, todos sabemos que este fenómeno se debe principalmente a las emisiones antropogénicas de gases de efecto invernadero tales como CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, y N<sub>2</sub>O. La creciente concentración de estos gases en la atmósfera está provocando un aumento del efecto invernadero, lo que desemboca en el aumento progresivo de la temperatura del planeta.

Se espera que el clima global en el siglo XXI experimente un incremento de la temperatura entre 1,5°C y 4,5°C como resultado del aumento del CO<sub>2</sub>. Esta situación podría desencadenar situaciones catastróficas tales como: fenómenos meteorológicos extremos, un previsible aumento del nivel del mar, cambios en los vectores de enfermedades, extinción de especies, disminución de la producción agrícola, pérdida de ecosistemas, etc. (IPCC, 2014).

Estos gases se producen en la naturaleza durante los procesos que tienen lugar en los ciclos biogeoquímicos, de manera que su concentración permanece en equilibrio, lo que ha permitido que se mantengan razonablemente constantes durante miles de años. Sin embargo, las alteraciones que las actividades humanas han introducido en estos ciclos ha provocado que la concentración de estos gases, principalmente el CO<sub>2</sub>, aumente o disminuya en el suelo, la atmósfera o en los océanos.

Desde la revolución industrial, las actividades humanas están liberando gases de efecto invernadero de forma exponencial (Figura 1). Se estima que la mitad de las emisiones de CO<sub>2</sub> procedentes de la quema de combustibles fósiles se acumulan en la atmósfera, la otra mitad es absorbida por los océanos y por los ecosistemas terrestres (principalmente en los bosques, y en los suelos) (de la Rosa, 2008).

Los suelos del mundo representan el tercer reservorio de carbono más importante después de los océanos y de los estratos geológicos y mucho mayor que la atmósfera y la biosfera, estimándose en 2.400 Gt (Lal, 2004). Esta gran capacidad de secuestro de carbono que tienen los suelos se puede incrementar o reducir mediante la intervención del hombre, resultando una interesante medida de mitigación del cambio climático (Tabla 1).

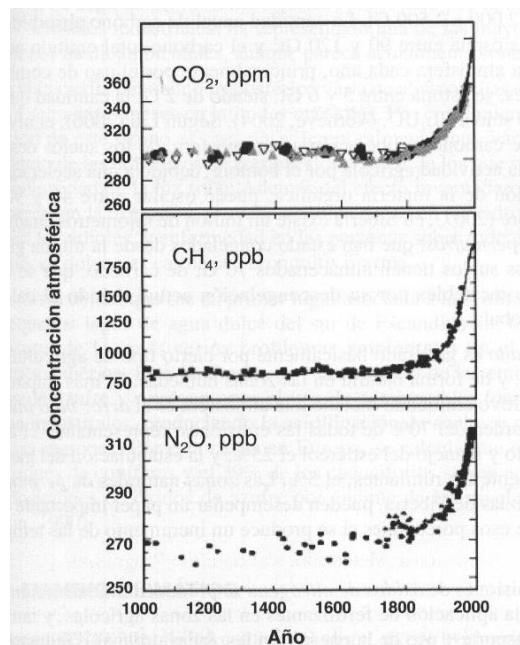


Figura 1: Concentración atmosférica global de los GEI. Fuente: de la Rosa, 2008.

Constituyente	Cantidad de carbono, Gt
Océanos	38.400
Estratos geológicos	4.130
Suelos (hasta un metro de profundidad)	2.400
Atmósfera	760
Vegetación	560

Tabla 1: Distribución del carbono en las principales esferas. Fuente y adaptación: de la Rosa, 2008.

Uno de los principales gases con efecto invernadero es el CO<sub>2</sub>, que supone más del 80% de las emisiones GEI. La mayor emisión de este gas proviene del suelo (cinco veces mayor que las emitidas por combustibles fósiles, González-Urbiena, 2015), sin embargo también es el suelo un gran reservorio de carbono terrestre (Almagro et al., 2009 y Lal, 2011), con un contenido total de 2.500 billones de toneladas (Gt) en los primeros dos metros de profundidad (Bajtes, 1998). Anualmente se vierte a la atmósfera entre 5 y 6 Gt con la quema de combustibles fósiles, mientras que los suelos agrícolas,

que presentan una acelerada mineralización, liberan a la atmosfera unos 40-90 Gt (de la Rosa et al., 2008).

Según Battle et al. (1996) y Keeling et al. (1996), la fijación biológica del CO<sub>2</sub> podría exceder a la tasa de mineralización de la materia orgánica, configurando los sistemas terrestres como sumideros de carbono. Por tanto se hace necesaria la búsqueda de estrategias para reducir las emisiones de carbono a la atmósfera o aumentar la captación de carbono en el suelo. Este proceso se conoce como “secuestro de carbono”: transformación de CO<sub>2</sub> atmosférico en carbono orgánico almacenado en el suelo y la biomasa, quedando así inmovilizado respecto a la circulación biogeoquímica durante largos periodos de tiempo.

El carbono puede mantenerse secuestrado durante más tiempo en el suelo si se ponen en práctica diversas estrategias que fomenten la formación de materiales recalcitrantes (materia orgánica muy persistente por su estabilidad o resistencia a los procesos de degradación microbianos o físico-químicos, y por tanto, no biodisponibles) y disminuyan la mineralización (proceso esencialmente microbiano en el que se descompone la materia orgánica en productos inorgánicos sencillos generando CO<sub>2</sub>). De esta manera, lo que se obtiene es la ralentización del ciclo del carbono en las etapas que conciernen al suelo.

Por ello, el análisis del ciclo del carbono en la naturaleza con especial énfasis en los procesos que tienen lugar en el suelo, nos puede proporcionar los conocimientos necesarios para elaborar estrategias que mejoren el secuestro de carbono, y frenar el cambio climático.

## 2. OBJETIVOS

El objetivo de este trabajo es analizar las estrategias para mejorar el secuestro de carbono en la materia orgánica del suelo mediante la revisión de dos aspectos:

- Los procesos de transformación de la materia orgánica en el suelo para establecer las posibles estrategias que ralenticen la emisión de carbono a la atmósfera.

- Eficacia de la aplicación de un residuo recalcitrante de carbono, como es el biochar, como estrategia para secuestrar carbono atmosférico en el suelo.

### 3. MATERIAL Y MÉTODOS

El trabajo se plantea como una revisión sistemática de artículos científicos. En primer lugar, se acudió a la página oficial de IPCC para obtener una idea global acerca del estado actual del cambio climático. Posteriormente, se ha llevado a cabo una búsqueda en Google Académico, de donde se obtuvieron varias referencias bibliográficas que posteriormente se revisaron, así como en Science direct. A su vez, en buscadores científicos como PubMed o Scielo se encontraron varios artículos útiles para este trabajo.

Las palabras claves utilizadas para las búsquedas fueron principalmente: “Recalcitrancia”, “Mineralización”, “Cambio Climático”, “Ralentización del ciclo del carbono”, “Secuestro de Carbono” y “Biochar”. Se analizaron además referencias bibliográficas de los artículos seleccionados, con el fin de indagar con mayor profundidad algunos temas.

Se han incluido todos los artículos y libros que por su procedencia (publicados en revistas indexadas, buscadores científicos, asociaciones o páginas web oficiales), aportaran una autenticidad a la información mostrada. Por el contrario, se excluyeron textos y documentos no oficiales y procedentes de páginas sin suficientes referencias.

Los datos e informaciones recopiladas se han incluido en el apartado de bibliografía donde se muestran las citas bibliográficas según las normas Vancouver.

### 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 4.1. Ciclo Global del carbono

El ciclo del carbono lo podemos dividir en un ciclo lento y otro rápido. Ambos confluyen en la atmósfera, que es la que va a sufrir la sobrecarga de carbono por emisiones antrópicas (Instituto Nacional de Ecología, 2007):

- Ciclo lento: El CO<sub>2</sub> atmosférico se disuelve en el agua de lluvia y forma ácido carbónico que reacciona con los minerales expuestos sobre la superficie terrestre. Los ríos acarrean los productos disueltos al océano. En el océano se forma el carbonato de calcio, éste se deposita en los sedimentos marinos que por el proceso de subducción entran a la corteza baja de la Tierra. En este proceso se reincorporan elementos a los minerales primarios de las rocas y el carbono regresa a la atmósfera como CO<sub>2</sub> por las emisiones volcánicas e hidrotermales. Este ciclo geoquímico ha ayudado a mantener la concentración del CO<sub>2</sub> atmosférico por debajo de 1% durante los últimos 100 millones de años.
- Ciclo rápido: En este ciclo dominan dos grandes transferencias anuales de C: el flujo de CO<sub>2</sub> de la atmósfera a las plantas como resultado de la fotosíntesis, y el regreso de CO<sub>2</sub> a la atmósfera como resultado de la descomposición de la materia orgánica y la respiración.

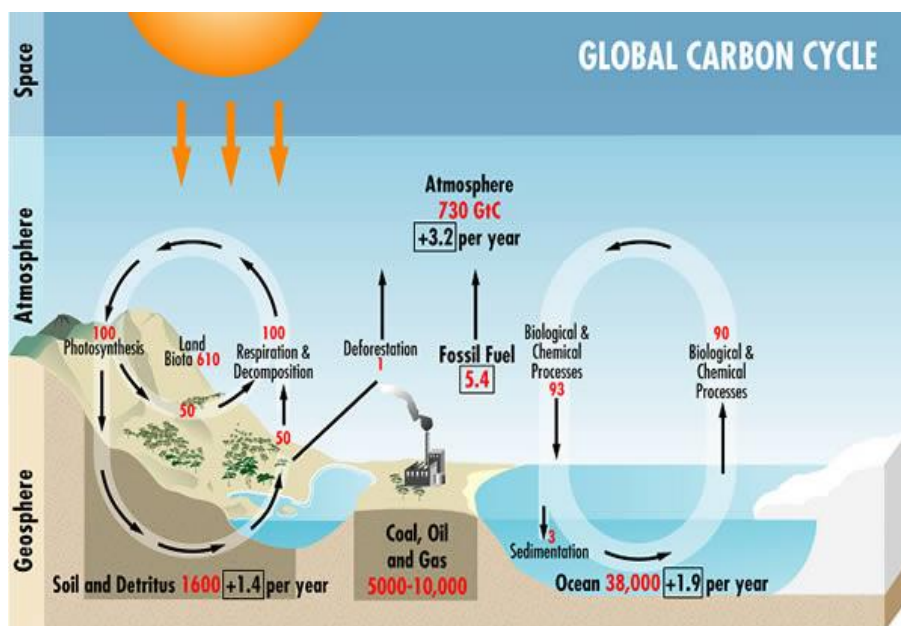


Figura 2: Ciclo del Carbono. Fuente: [www.bom.gov.au/info/climate/change/gallery/images](http://www.bom.gov.au/info/climate/change/gallery/images)

Cabe destacar que gran parte de este ciclo transcurre en el suelo (prácticamente todo el ciclo rápido). El suelo produce tanto emisiones como captaciones de CO<sub>2</sub>, para conseguir un secuestro de carbono es necesario que las captaciones superen a las emisiones. Como se aprecia en la Figura 2, dentro de los inputs contemplamos el uso de enmiendas orgánicas, humificación y la fotosíntesis, y en los outputs encontramos la

respiración de los microorganismos y plantas, descomposición y mineralización. Debemos poner especial atención en disminuir los procesos de emisión (outputs).

En el ciclo rápido, el carbono presente en la atmósfera en forma de  $\text{CO}_2$  es captado por la vegetación a través de la fotosíntesis y lo incorporan a sus estructuras. Únicamente los vegetales agrícolas fijan a sus estructuras 6.000 millones de toneladas de carbono. Posteriormente los restos de la planta son ingeridos por organismos superiores o caen al suelo, donde son transformados en materia orgánica, que será descompuesta por los microorganismos y hongos. Parte de esta materia será utilizada y descompuesta por los microorganismos, que incorporarán parte del carbono en sus estructuras, parte lo emitirán a la atmósfera como consecuencia de la respiración y otra será transformada hasta compuestos inorgánicos disponibles para las plantas (mineralización) o formará el humus estable cuya estructura compleja lo hace difícil de utilizar (material recalcitrante). En el proceso de mineralización y descomposición de la materia orgánica se emite  $\text{CO}_2$  a la atmósfera, mientras que durante el tiempo que el C está formando parte de las estructuras de la planta consideramos al carbono como retenido (sumidero de carbono), lo mismo ocurre con el carbono que forma parte de materiales recalcitrantes (humus) no biodisponibles. A más carbono retenido en plantas o suelo y durante más tiempo, menor es la cantidad que existirá en la atmósfera.

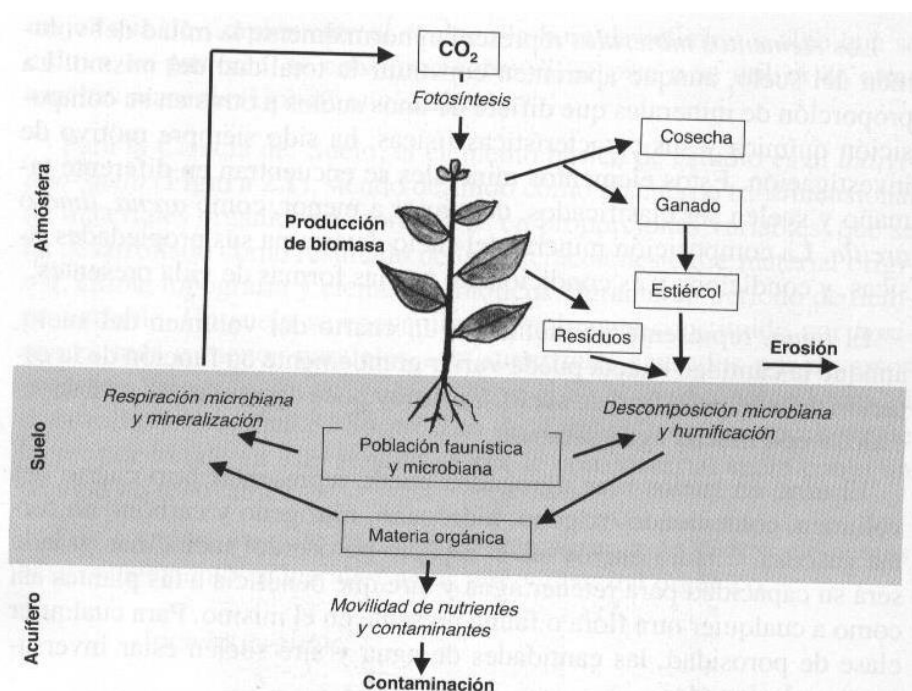


Figura 3: Diagrama de un ecosistema agrícola mostrando los aspectos más relevantes del ciclo del carbono. Fuente: de la Rosa, 2008.

## 4.2. Ciclo del carbono en el Suelo: Procesos de transformación de la materia orgánica del suelo

Los suelos se forman a partir de un material original (rocas y sedimentos) que mediante la acción del clima (precipitación, temperatura) proporciona la fracción mineral (arenas, limos, arcillas) que es colonizado por la vegetación, quien, junto con los organismos que viven en el suelo, aportan la fracción orgánica. La materia orgánica fresca procedente de las plantas, animales y microorganismos y sus productos de alteración, constituyen un amplio abanico de substratos (son los precursores de la materia orgánica incorporada al suelo).

Los compuestos orgánicos que caen al suelo van a sufrir una serie de reacciones de descomposición (lisis de las paredes celulares, proteólisis, lignólisis, etc...), que conducen a la liberación de diferentes polifenoles. Estos compuestos posteriormente sufren reacciones de policondensación de núcleos, y van incorporando a sus estructuras componentes nitrogenados. Son estos compuestos de nueva síntesis junto con otros de estructuras complejas los que permanecen en el suelo durante tiempo variable. Podemos clasificar la materia orgánica en función del grado de modificación estructural en el que se encuentre en:

- Materia orgánica fresca (no humificada): que servirá para la formación de sustancias húmicas. Está integrada por la necromasa procedente de plantas, animales, masa microbiana y microfauna.
- Humus: se encuentra constituido por sustancias resultantes de la alteración (desnaturalización, desorganización y cambios en la funcionalidad) de productos sintetizados por las plantas y los microorganismos:
  - Materia orgánica heredada: sustancias no húmicas, biomacromoléculas con características químicas reconocibles: azúcares, aminoácidos, proteínas, grasas (Schnitzer y Khan, 1978). Son fácilmente biodegradables por enzimas, por lo que persisten poco tiempo en el suelo.
  - Materia orgánica humificada: sustancias húmicas propiamente dichas, son resultado de los procesos de humificación, estas sustancias han perdido las características químicas de sus



precursores por la acción de los microorganismos o procesos abióticos. Es la fracción más activa y la que más influye en las propiedades del suelo: propiedades físicas (estructura), químicas (CIC, poder de depuración...) y biológicas (reserva de energía metabólica...), por lo que constituye un indicador importante de la calidad del suelo y de su productividad. Pueden ser biomacromoléculas de nueva síntesis o con estructuras caóticas no específicas.

Tal y como se ve en la Figura 4, la materia orgánica puede tomar diferentes caminos según su origen y composición. Los compuestos más biodisponibles (materia orgánica heredada) serán utilizados por los microorganismos (mineralización y/o asimilación microbiana). El carbono orgánico que no haya sido mineralizado (menor biodisponibilidad) puede permanecer en moléculas heredadas (celulosa, lignina, proteínas y lípidos) o bien sufrir el proceso de humificación pasando a formar parte de la materia orgánica humificada (material altamente recalcitrante que tardara siglos en mineralizarse). Por tanto, lo que interesa en este punto es conseguir una materia orgánica rica en materiales recalcitrantes en sí mismos, o bien, fomentar la formación de éstos por los microorganismos.

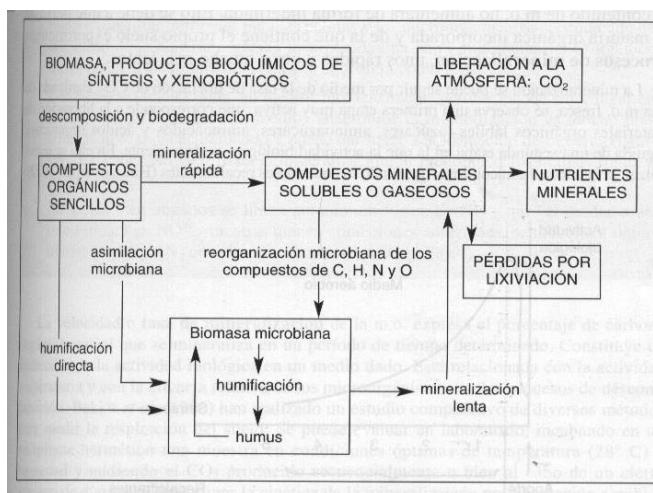


Figura 4: Esquema general de la evolución de la materia orgánica. Fuente: Porta, 2003.

Según la composición química y la matriz en la que se encuentre (accesibilidad física), la descomposición de la materia orgánica puede producirse a diferentes velocidades, cuanto mayor sea la complejidad, aromaticidad y dificultad para llegar a ella, más laborioso le resultará su utilización a la microbiota del suelo. Así se consigue que el C quede retenido más tiempo en el suelo, y la transformación de la materia orgánica en CO<sub>2</sub> por los microorganismos se haga más lenta o casi inexistente.

Esto explica la intensa actividad biológica cuando se aporta materia orgánica al suelo, ya que los materiales lábiles son utilizados rápidamente. La presencia de C fácilmente mineralizable favorece el crecimiento de la biomasa microbiana y la producción de sustancias extracelulares. Más tarde le sigue una etapa con actividad biológica más lenta donde se mineralizan otros materiales más difíciles de descomponer por los microorganismos, donde existe menos carbono a su disposición y, como consecuencia, menor respiración. Finalmente quedan en el suelo los materiales recalcitrantes existentes en la biomasa y los de nueva síntesis (humus) (Figura 5), que irán acumulándose en el suelo, dándole estabilidad al resto de la materia orgánica (Jorge-Mardomingo, 2015).

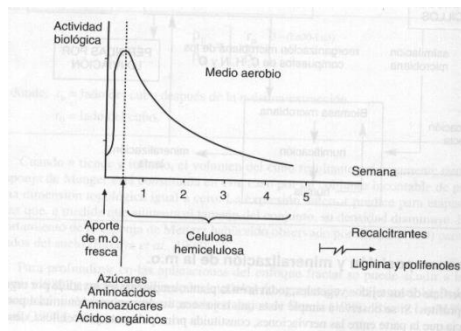


Figura 5: Actividad biológica tras aporte de materia orgánica. Fuente: Porta, 2003.

Dentro de los materiales recalcitrantes se encuentran las sustancias húmicas que pueden perdurar en el suelo miles de años, resistiendo la degradación y la mineralización debido a su desorden estructural (Almendros 2003) ya que no existen enzimas específicas que reconozcan sus estructuras, además son capaces de formar complejos protegiendo su N proteico de los microorganismos (Duchaufour, 2001) y pueden proteger sus grupos funcionales dentro de agregados en el suelo. La humificación es el proceso en el que se generan macromoléculas condensadas de compuestos aromáticos (más resistentes a la degradación) y alifáticos (más degradables).

Las sustancias húmicas tienen numerosos grupos funcionales (Figura 6). Esto les permite presentar diferente grado de oxidabilidad, (grupos carboxílicos y fenólicos principalmente). Estos grupos, a su vez, les otorgan una acidez determinada. El humus es un coloide con numerosas cargas negativas en su matriz, que le hace capaz de presentar una elevada capacidad de intercambio iónico (CIC) (reteniendo nutrientes y pesticidas que presenten

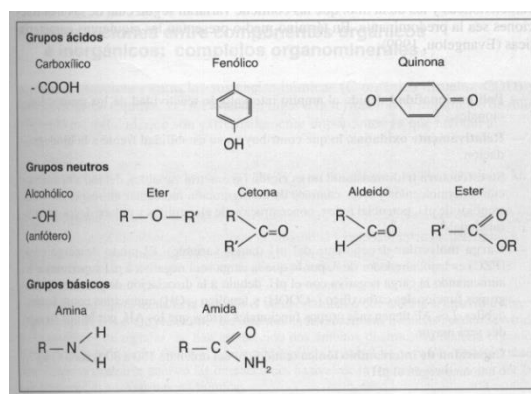


Figura 6: Grupos funcionales de las sustancias húmicas. Fuente: Porta, 2003.

carga positiva en su estructura). Por tanto, las sustancias húmicas pueden entrar en contacto con los constituyentes minerales produciendo intercambio iónico, adsorción de moléculas a su superficie o complejando metales (como pueden ser metales pesados contaminantes, dejándolos menos disponibles).

En definitiva, el carbono incorporado a la materia orgánica del suelo aporta el sustrato para la actividad microbiana y favorece la mejora de las propiedades físicas que se derivan de ello (Vallejo et al. 2005). También es importante la fracción mineral, sobre todo la arcilla, que junto a la materia orgánica son los componentes más determinantes de una de las propiedades físicas del suelo decisiva como es la estructura (tamaño y manera de agregarse las partículas del suelo de forma natural y estable, Porta, 2008).

La estructura depende de la resistencia de los agregados, que a su vez, viene condicionada por los componentes y características físico-químicas de las moléculas. Una buena estructura del suelo permite que este funcione de manera más eficiente como sumidero. Con una mayor porosidad y capacidad de intercambio iónico se puede conseguir una mayor fertilidad de los suelos, fomentando el secuestro de C en las plantas, además de aumentar la retención del agua. Por otro lado, los macro y microagregados del suelo van a determinar la disponibilidad física de la materia orgánica, ralentizando y dificultando su utilización por los microorganismos.

La existencia de agregados (unión de partículas orgánicas y minerales de forma estable) en un horizonte implica un espacio de huecos. Existen unos de grandes dimensiones (macroporos) que permiten la transmisión de agua, aire, crecimiento de raíces y son útiles para la colonización por microorganismos, además disminuyen la erosión por control de la velocidad del movimiento del agua. Por otro lado, existen poros menores a 250  $\mu\text{m}$  (microporos) en los que se almacena agua.

Los microagregados son agrupaciones de coloides floculados hasta un tamaño de 200-250  $\mu\text{m}$ , que se unen a partículas de limo y arena fina. Esta unión se produce mediante compuestos orgánicos altamente polimerizados (ácidos húmicos) y es la que origina la formación del denominado complejo arcillo-húmico, son más estables en el tiempo y que se generan de forma lenta. Por el contrario, los macroagregados son agrupaciones de microagregados con un tamaño superior a 250  $\mu\text{m}$  cuyos agentes de

unión pueden ser materiales orgánicos “jóvenes” (ácidos fúlvicos y polihidroxicarboxílicos), fácilmente degradables por los microorganismos (polisacáridos, péptidos, ácidos polihidroxicarboxílicos, exudados de raíces y hongos, ácidos fúlvicos, etc.) o cementantes como óxidos y carbonatos, son de formación más rápida y de menor estabilidad.

En definitiva, lo que nos interesa para la estabilidad del carbono en el suelo es la existencia de microagregados que dificulten el acceso de los microorganismos a este carbono.

### 4.3. Estrategias que influyen en el secuestro de carbono en el suelo

#### ➤ Accesibilidad de los microorganismos al Carbono del suelo

La velocidad a la que el C puede ser metabolizado está limitada por la capacidad de los microbios para acceder a él.

La materia orgánica puede estar protegida física y químicamente, ralentizándose la utilización de esta fuente de energía por las poblaciones microbianas. La protección física y la capacidad de descomposición de la materia orgánica han sido reconocidas como un control de la materia orgánica en el suelo (Schimel, 2012), es decir, la biodisponibilidad del C no depende únicamente de su estructura (Gonzalez-Ubierna, 2013).

Los microporos existentes entre los microagregados van a fomentar la inaccesibilidad de los microorganismos y enzimas a los sustratos atrapados en ellos. Se ha visto que los suelos de textura fina tienen contenidos de C orgánico y N mayor que los suelos de textura gruesa. Esto se debe únicamente a la protección física que ofrecen las fracciones de limo y arcilla, y afectan a las cantidades de

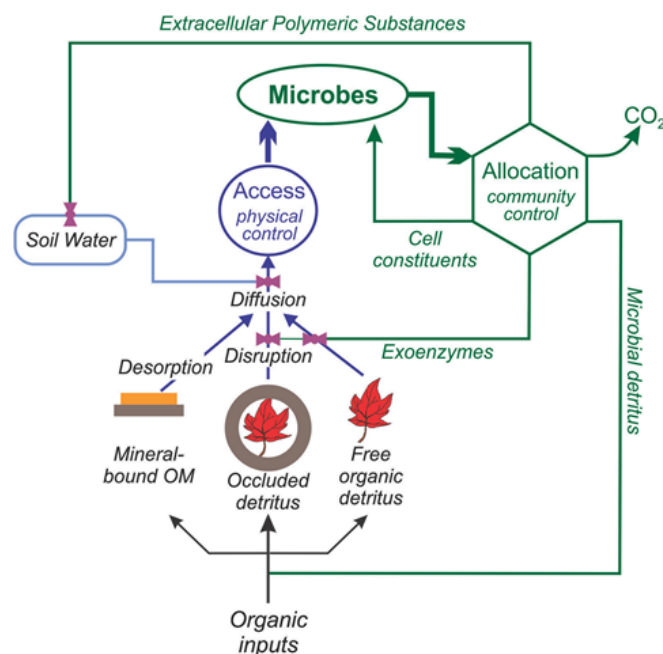


Figura 7: Control de la biodisponibilidad de la materia orgánica por los microorganismos. Fuente: Schimel, 2012.



carbono estabilizado que existe en el suelo (Gonzalez-Ubierna, 2013). La biomasa bacteriana necesita dos pasos para procesar el material, un paso en el que se rompe el agregado (retrasa, todavía más, el metabolismo de la materia orgánica) y posteriormente una etapa enzimática, donde las exoenzimas rompen los polímeros (Navarro-García, 2011).

#### ➤ *Aumento de la recalcitrancia*

Los microorganismos del suelo representan la fracción viva de la materia orgánica, y de ellos va a depender, en gran parte, la obtención de materiales recalcitrantes. Existen materiales como la lignina, que son más resistentes a la degradación biótica por su naturaleza, pero otra gran parte de la materia orgánica es transformada por los microorganismos hasta convertirse en materia orgánica recalcitrante.

Incrementando la recalcitrancia es posible ahorrar 1.0-1.3 Gt anuales según EEA-UNE, además la microestructura y la química del suelo juegan un papel muy importante en el secuestro de carbono, como se ha explicado anteriormente (por la biodisponibilidad que puede generar).

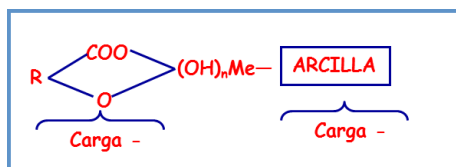
Todo material orgánico acabará siendo mineralizado, la diferencia es el tiempo que puede tardar en hacerlo. Por ello, aplicar materiales recalcitrantes en suelos o fomentar su producción por parte de los microorganismos puede ser una estrategia de secuestro de carbono.

#### ➤ *Formación de complejos órgano-minerales*

Los diferentes tamaños de partícula de la fracción mineral desempeñan diferentes roles en la estabilización de la materia orgánica del suelo. La mayor parte de la materia orgánica se asocia con las fracciones de la arcilla y el limo (Ohm et al., 2007), que al tener un tamaño de partícula excesivamente pequeño protegen físicamente la materia orgánica que se encuentra formando agregados con ellos.

Por ello, la protección química está relacionada con la adsorción de la materia orgánica a superficies minerales (Schimel, 2012) y los diferentes tipos de uniones intermoleculares (puentes catiónicos polivalentes, uniones de intercambio o quelación) entre la materia orgánica y los componentes inorgánicos del suelo. Un ejemplo de ello

es la formación de complejos órganominerales que dejan iones inaccesibles para su utilización por las plantas (que se irán liberando de forma gradual) o la protección de materia orgánica heredada (como carbohidratos, que en sí mismas son fáciles de degradar) por compuestos lipídicos que los protegen (Porta, 2008). Los complejos más estables son aquéllos que resultan de enlaces tipo iónico, que dan lugar a procesos de adsorción del grupo funcional de la materia orgánica con la superficie del mineral arcilloso.



### ➤ Manejo sostenible del suelo agrícola

Una pérdida importante de materia orgánica se debe a los cambios de uso del suelo para dar respuesta a las necesidades derivadas del aumento de la población mundial con la expansión de tierras de cultivo. Esto se traduce en el uso de fertilizantes con posible contaminación de otras zonas por lixiviado, provocando contaminación de aguas y liberación del CO<sub>2</sub> acumulado en el suelo. Se estima que la agricultura ha contribuido en un 20% al calentamiento global y los cambios en uso de la tierra (a menudo para uso agrario) en un 14% adicional, mientras que las restantes actividades humanas contribuyen un 66% a las emisiones de GEI (Villalobos, 2009).

El manejo inadecuado del sistema agrícola provoca una liberación masiva de CO<sub>2</sub> debido a que se modifica la estructura del suelo y se produce un aumento de la mineralización por un mayor contacto materia orgánica-microbiota. Estas pérdidas pueden evitarse con una estructura del suelo estable y aplicando prácticas de conservación (siembra directa, laboro mínimo, etc.) que eviten la destrucción de la estructura y además eviten la erosión.

### ➤ Aplicación de enmiendas orgánicas adecuadas

El tipo de enmienda determina los cambios en la actividad microbiana, la tasa de descomposición y mineralización. Dependiendo de estos factores, la biomasa microbiana puede generar a partir de la materia orgánica que cae al suelo, materiales fácilmente mineralizables de materia orgánica o un mayor porcentaje de formas de

carbono recalcitrantes. Se ha visto que a mayor estabilidad de la materia orgánica, más constante es la actividad de los microorganismos y menor la tasa de mineralización (Porta, 2008).

La aplicación de residuos orgánicos biodegradables al suelo incrementa significativamente el contenido de carbono orgánico en todas las formas de carbono tanto formas lábiles como fracción recalcitrante. El tipo de residuo aplicado determina la intensidad de los procesos de humificación y mineralización. La aplicación de lodos frescos de depuradora, con un sistema de digestión aerobia, produce un aumento significativo del proceso de mineralización, por lo que se incrementan las formas lábiles y se reduce el carbono recalcitrante (Jorge-Mardomingo, 2013).

Sin embargo, la aplicación de compost estabilizado térmicamente, procedente de residuos urbanos, incrementa de forma significativa los procesos de humificación, por lo que este tipo de residuo favorece el almacenamiento del carbono en el suelo (González Ubierna, 2013). Con esto no solo se consigue una menor mineralización, sino también una menor utilización del nitrógeno (nitrificación, paso de amonio a nitratos, que se traduce en una menor emisión de  $N_2O$ ) presente en el suelo por su estabilización en el suelo (Jorge-Mardomingo, 2015).

En definitiva, la respiración del suelo está controlada por las variables climáticas y la disponibilidad, calidad y composición de la materia orgánica (Gonzalez-Urbiena, 2015). Por tanto, los diferentes tratamientos de las enmiendas van a marcar las tasas de respiración de los microorganismos, propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo (González-Urbiena, 2012). Así, a mayor estabilización de la materia orgánica, menor emisión de GEI (menor respiración y nitrificación por la menor biodisponibilidad del C y del amonio) y a mayor polimerización de la enmienda menor es la liberación de estos gases (González-Urbiena, 2012).

#### 4.4. El Biochar como estrategia potencial

Para mejorar las funciones de un suelo se puede pensar en incorporar alguna enmienda orgánica que mejore la protección física y química de la materia orgánica y sea a su vez sea recalcitrante, para potenciar el aumento de materia orgánica. Una



enmienda que se ajusta a estas condiciones puede ser el biochar, material que tiene el potencial para mejorar la fertilidad del suelo y reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (Gai, 2014).

El biochar es un residuo carbonoso de grano fino y poroso útil para uso como almacén de carbono. Se produce a partir de la transformación de distintos tipos de biomasa mediante la técnica denominada pirolisis, que consiste en la descomposición térmica de la materia orgánica bajo un aporte de oxígeno limitado. La ventaja del biochar es su producción, que se basa en la retirada de materia orgánica del suelo (que pueden provenir de lodos de depuradora o residuos sólidos urbanos) para transformarlo en un material carbonado muy resistente a la degradación, muy recalcitrante (Woolf, 2008).

Este material supone una estrategia potencial para ralentizar el ciclo del carbono en el suelo, ya que puede modificar las propiedades químicas y físicas del suelo, como la micro y macroagregación que se produce, el aumento de la capacidad de retención de agua, el crecimiento de la población microbiana y el aumento de capacidad de intercambio iónico (Woolf, 2015). Por su composición y estructura, tiene superficies activas (alta superficie específica con alta densidad de cargas) que modifican la dinámica de los nutrientes proporcionando además fertilidad al suelo.

Su porosidad aporta propiedades texturales beneficiosas, como mayor porcentaje de microagregados en comparación con los macroagregados, dificultando la accesibilidad de los microorganismos (Jenkins, 2009).

Un componente clave que establecerá la cantidad de carbono fijo contenida en el biochar y que es potencialmente estable durante un periodo largo de tiempo es la fracción de carbono recalcitrante. Ésta incluye el carbono aromático caracterizado por los grupos fenólicos en su estructura y por un alto grado de condensación, factores que determinan el grado de dificultad de descomposición microbiana. De hecho, debido a su naturaleza aromática y a la presencia de los núcleos condensados, este carbono puede tener un tiempo de residencia media en el suelo de más de 1.000 años, llegando hasta los 10.000 años, por lo que es útil como sumidero de carbono.

Tiene potencial para modificar directamente la capacidad de retención de agua a largo plazo a través de sus macroporos. Parte de las moléculas que transcurren por estos

poros quedarán adsorbidas en ellos, como puede ser los nitratos, disminuyendo así la necesidad de fertilizantes. La capacidad de intercambio catiónico también mejora el almacenamiento de nutrientes y agua, además de dotarle de la capacidad de retener pesticidas iónicos evitando contaminación por la lixiviación y la escorrentía superficial. Estos huecos y el propio carbón conservan la humedad del suelo y son hospitalarios con los organismos del suelo, particularmente hongos.

El tipo de pirólisis usado implica la producción de biochar con diferentes características físicas y químicas, siendo la granulometría y la estructura interna de las partículas aspectos relevantes, así como la procedencia de la biomasa, que va a determinar la oxidabilidad, dando lugar diferentes tipos de biochar.

Se puede obtener a un rango de temperaturas muy amplio (350-600°C). Esto hace que existan diferencias entre unos y otros, ya que se ha visto que a 600°C tienen mayor porosidad (consecuencia de la volatilización de los compuestos orgánicos, dejando en su lugar aire) y la adsorción de moléculas es mayor frente al obtenido a

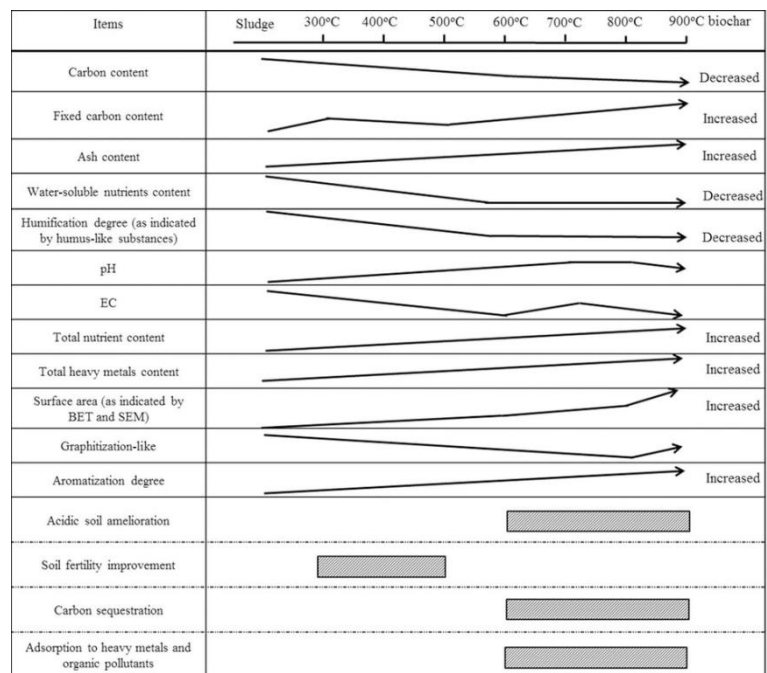


Figura 8: Características del biochar en función de su temperatura de obtención. Fuente: Zhang, 2015.

400°C. Se ha comprobado que las mezclas de suelo con biochar producido por pirólisis lenta son menos mineralizables en comparación a la materia orgánica de las mezclas de suelo y biochar de pirólisis rápida (Gai, 2014).

Los biochars de baja temperatura (250-400 °C) mantienen en su composición más grupos -CH, C = O, -OH fenólico y aromático que pueden servir como sitios de intercambio iónico. Esto se debe a que temperaturas demasiado altas pueden destruir estos grupos que participan en la CIC y la polaridad (Gai, 2014). Sin embargo, se ha

podido comprobar que biochar obtenido a 600°C es capaz de reducir más las emisiones de CO<sub>2</sub> desde el suelo en comparación con los obtenidos a 400°C por su grado de aromatización y porosidad. Estos desarrollan un área de superficie mayor, que mejora la retención de los contaminantes no polares en los suelos y disminuye la biodisponibilidad de metales pesados por su mayor CIC (Zhang, 2015).

Hay estudios que reflejan que el biochar actúa positivamente sobre la biomasa y actividad microbiana, aunque el efecto dependerá de las propiedades y tipo de biochar utilizado (Paz-Ferreiro, 2015). Cabe destacar que solo hay estudios en regiones templadas.

Además, el biochar es capaz de incorporar en su estructura formas oxidadas de nitrógeno, fósforo y azufre (nitratos, fosfatos y sulfatos) dentro de la matriz de carbono. Esto supone que añadir biochar en ciertos suelos evita las emisiones de metano y óxido nitroso que, en su ausencia, acaban en la atmósfera. Es posible debido a su capacidad de adsorción de N y la protección que le ofrece en su matriz estable, que evita pérdidas de este elemento en el suelo por impedir la nitrificación. Hollister et al observaron que la capacidad adsorbente de NO<sub>3</sub><sup>-</sup> era nula, trabajos posteriores han demostrado que depende del tipo de biochar la capacidad para adsorber NO<sub>3</sub><sup>-</sup> y NH<sub>4</sub><sup>+</sup> se modifica (Gai, 2014).

En definitiva, el tipo de biochar obtenido (a mayor o menor temperatura) y el material del que proviene van a determinar las características y potencialidades de este material (Figura 8) ya que se generan diferentes magnitudes de área de superficie, poros y grupos funcionales. Es necesario saber seleccionar el biochar adecuado para cada aplicación.

## 5. CONCLUSIONES

La revisión de los numerosos artículos consultados nos lleva a formular las siguientes conclusiones:

- La materia orgánica del suelo supone una importante reserva de carbono sobre la que se puede incidir para optimizar el secuestro de carbono. Los beneficios indirectos del secuestro de C en el suelo se reflejan en la mejora de la estabilidad



estructural, la capacidad de retención de agua, la disponibilidad de nutrientes en formas de liberación retardada, la actividad microbiana, entre otros. El incremento en la cantidad de C estabilizado junto con la fracción mineral del suelo aumentan la capacidad de éste para actuar como filtro ambiental con respecto a la lixiviación, degradación y biodisponibilidad de contaminantes orgánicos y minerales.

- Profundizar en el conocimiento de los procesos de transformación de la materia orgánica del suelo y de la acción reguladora de los microorganismos en los mismos, permite establecer estrategias eficaces en el secuestro de carbono como son: acceso de los microorganismos al carbono del suelo, incremento de la recalcitrancia, incremento de agregación, prevención de la erosión y manejo sostenible de los suelos mediante la aplicación de residuos orgánicos tratados.
- El biochar, debido a su compleja estructura permite secuestrar el carbono en su matriz. La recalcitrancia de este material frente a otras enmiendas orgánicas hace de este producto una enmienda adecuada para favorecer el secuestro de carbono en el suelo, contribuyendo además al incremento de la disponibilidad de nutrientes en el suelo, reducción de lixiviación del nitrógeno en las aguas subterráneas, aumento de la capacidad de intercambio catiónico, aumento de la retención de agua y un aumento del número de microbios beneficiosos del suelo por la estabilización de agregados.

## 6. BIBLIOGRAFÍA

- Almendros, G.: Investigaciones básicas sobre el origen y la estructura molecular de las formas estables de materia orgánica relacionadas con el proceso de secuestro de carbono en los suelos. *Edafología* [Internet]. 2004 [7 Abril 2015]; Vol. 11 (2): 229-249. Disponible en: <http://www.secs.com.es/data/Revista%20edafo/11-2/C-Edafolog%EDA%2011-2.pdf#page=115>
- De la Rosa, D.: Evaluación agro-ecológica de suelos. 1ª Edición. Madrid: Mundi-Prensa Libros, s.a., 2008.
- Gai, X.; Wang, H.; Liu, J. et al: Effects of feedstock and pyrolysis temperatura on biochar adsorption of ammonium and nitrate. *PloS One*. 2014. Vol. 3: 9 (12).
- González-Ubierna, S.; Jorge-Mardomingo, I.; Carrero-González, B.; de la Cruz, M.T.; Valverde, I.; Casermeiro, M.A.: Soil organic matter evolution after the application of high doses of organic amendments in a Mediterranean calcareous soil. 2012; Vol. 12 (8):1257-1268.
- González-Ubierna, S.; Jorge-Mardomingo, I.; de la Cruz, M.T.; Valverde, I.; Casermeiro, M.A.: Sewage sludge application in Mediterranean agricultural Soil: Effects of dose on the soil



- carbon cycle. *International Journal of Environmental Research. Journal os Soil and Sediments*. 2013; 7 (4): 945-956.
- González-Ubierna, S.; Jorge-Mardomingo, I.; de la Cruz, M.T.; I.; Casermeiro, M.A.: How do biodegradable organic residues affect soil CO<sub>2</sub> emissions? Case study of a Mediterranean agro-ecosystem. *Soil and Tillage Research*. 2015; Vol. 153:48-58.
- Instituto Nacional de Ecología [Internet]. México D.F.: Instituto Nacional de Ecología; 2007 [15 Noviembre 2007; 5 Abril 2015]. Disponible en: <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones/libros/437/jaramillo.html>
- IPCC [Internet]. Suiza: IPCC; 2013 [30 Enero 2014; citado 30 Abril 2015]. Cambio climático 2013; 2 páginas. Disponible en: [http://www.ipcc.ch/news\\_and\\_events/docs/ar5/ar5\\_wg1\\_headlines\\_es.pdf](http://www.ipcc.ch/news_and_events/docs/ar5/ar5_wg1_headlines_es.pdf)
- Jenkins, A.; Jenkinson, C.: Biochar basics. *Primefacts* [Internet]. 2009 [4 Abril 2015]. Artículo n° 963: 1-3. Disponible en: [http://www.dpi.nsw.gov.au/\\_data/assets/pdf\\_file/0016/304711/biochar-basics.pdf](http://www.dpi.nsw.gov.au/_data/assets/pdf_file/0016/304711/biochar-basics.pdf)
- Jorge-Mardomingo, I; Jiménez-Hernández, M.E.; Moreno, L.; de la Losa, A.; de la Cruz, M.T.; Casermeiro, M.A.: Application of high doses of organix amendments in a Mediterranean agricultural soil: An approach for assessing the risk of groundwater contamination. *Catena*. 2015; 131:74-83.
- Jorge-Mardomingo, I.; Soler Rovira, P.; de la Losa, L.; Casermeiro, M.A.; de la Cruz, M.T.; Polo, A.: Seasonal changes in microbial activity in semiarid soil after application of high dose of different organic amendments. *Geoderma*. 2013; 206:40-48.
- Paz-Ferreiro, J.; Liang, C.; Fu, S.; Mendez, A.; Gasco, G.: The Effect of Biochar and Its Interaction with the Earthworm *Pontoscolex corethrurus* on Soil Microbial Community Structure in Tropical Soils. *PloS One*. 2015. Vol. 21:10 (4).
- Porta, J.; López-Acevedo, M. y Poch, R. M.: *Introducción a la edafología: uso y protección del suelo*. 1ª Edición. Madrid: Mundi-Prensa Libros, s.a., 2008.
- Porta, J.; López-Acevedo, M. y Roquero C.: *Edafología para la agricultura y el medio ambiente*. 3ª Edición. Madrid: Mundi-Prensa Libros, s.a., 2003.
- Schimel, J. P. y Schaeffer, S. M.: Microbial control over carbon cycling in soil. *Front Microbiol*. 2012. Vol. 3 (348).
- Villalobos, F. J.; Mateos, L.; Orgaz, F. y Fereres, E.: *Fitotecnia: bases y tecnologías de la producción agrícola*. 2ª Edición. Madrid: Mundi-Prensa Libros, s.a., 2009.
- Woolf, D.: Biochar as a soil amendment: A review of the environmental implications. *Orgprints*. 2008; Vol. (3):1-31.
- Woolf, D.; Amonette, J. E.; Street-Perrott, F. A.; Lehmann, J. y Joseph, S.: Sustainable biochar to mitigate global climate change. *Nature Communications*. 2010; Vol. 56 (1): 1-9.
- Zhang, J.; Lü, F.; Zhang, H.; Shao, L.; Chen, D.; He, P.: Multiscale visualization of the structural and characteristic changes of sewage sludge biochar oriented towards potential agronomic and environmental implication. *Sci Rep*. [Internet]. 2015; Vol. 24 (5): 9406.