



**ARTÍCULO DE REFLEXIÓN**

# EL CARBONO ORGÁNICO DEL SUELO EN EL ÁMBITO DE LA NATURALEZA Y LA SOCIEDAD

## *The organic carbon of the soil in the field of nature and society*

Hernán Burbano Orjuela<sup>1</sup>

### RESUMEN

*El suelo cumple funciones clave para la vida en la Tierra y hoy en razón de un fenómeno tan problemático como el cambio climático, el papel que desempeña el suelo cobra mayor interés porque este es el mayor sumidero terrestre de carbono. Con esta perspectiva, este artículo parte de unas concepciones generales sobre el tema objeto de examen, registra la importancia de los ciclos de la vida en el planeta y, posteriormente, analiza la presencia, condiciones, formas y efectos del carbono del suelo, así como las dificultades que se deben superar y las acciones a realizar para la preservación del suelo y del carbono que contiene, en el contexto de los cambios globales. Se plantea que es posible conciliar los intereses de la sociedad y la naturaleza si se empieza a pensar diferente, porque la conservación del suelo es un paso para la sostenibilidad de este recurso y de la naturaleza toda.*

### ABSTRACT

*Soil plays key roles for life on Earth and today because of such a problematic phenomenon as climate change, the role of soil is of greater interest because it is the largest terrestrial carbon sink. With this perspective, this article starts with some general conceptions about the subject under review, registers the importance of the cycles of life on the planet and, later, analyzes the presence, conditions, forms and effects of soil carbon, as well as the difficulties that must be overcome and the actions to be taken to preserve the soil and the carbon it contains in the context of global changes. It is argued that it is possible to reconcile the interests of society and nature if one begins to think differently, because soil conservation is a step towards the sustainability of this resource and of the whole nature.*

<sup>1</sup> Universidad de Nariño y  
Sociedad Colombiana de la  
Ciencia del Suelo.  
heman.burbano@googlemail.com

### Palabras clave:

Naturaleza, cambio climático,  
sumidero de carbono, materia  
orgánica del suelo

### Key words:

Nature, climate change,  
carbon sink, soil organic  
matter

Rec.: 28.09.2016

Acep.: 25.10.2016

## INTRODUCCIÓN

La presencia del suelo tal como hoy los seres humanos lo conocen y lo utilizan para su provecho es el resultado de un trabajo milenario de la naturaleza que, al final, entregó un cuerpo natural que es un sistema de tres fases, sólida -orgánica y mineral-, líquida y gaseosa cuyos constituyentes se extienden en una matriz heterogénea (Buol et al., 1981, Burbano, 2009).

Hoy, infortunadamente, el suelo y otras ofertas de la naturaleza, definitivas para la vigencia de la vida en el planeta están seriamente comprometidos. Ya pasaron los días de una naturaleza que se daba en abundancia, de acuerdo con los cánones de la economía, al presente lo que prima es la escasez global que se enfrenta a una “ley límite” de la naturaleza al decir de Leff (2008), problema que, a lo mejor, se puede resolver por la vía científico-tecnológica. El mismo autor, apelando a la condición de solidaridad y de ética, manifiesta que la superficie del planeta no solo es de las personas, sino que debe servir para todas las expresiones de vida y de los ecosistemas, conjunto que regula el clima y la propia composición de la Tierra.

El término Antropoceno se viene utilizando cada vez más para señalar a la era actual de la historia de la Tierra, donde las actividades humanas han llegado a convertirse en el mayor determinante del cambio ambiental. Dicho término fue acuñado por el ecólogo Eugene F. Stoermer e introducido en la literatura científica por Paul J. Crutzen en 2012, quien fue Premio Nobel en 1995, justamente por su investigación sobre la química atmosférica y por la disminución del ozono estratosférico. Hoy la sociedad vive el calentamiento de la Tierra que se halla superpoblada y seriamente deforestada, con muchos de suelos productivos en franco proceso de desaparición, todo esto a unas tasas sin precedentes. Así entonces, el futuro inmediato tiene muchos retos, aunque también presenta muchas oportunidades para innovar y cambiar (Tate y Theng, 2014). Es por tanto la hora de dar un giro a un estilo de vida planetario que tiene en suspenso la viabilidad de la vida en este hogar Tierra.

Con la irrupción de cambio climático, la degradación de la tierra y la pérdida de biodiversidad, los suelos han llegado a convertirse en uno de los re-

ursos más vulnerables del mundo. Los suelos son el mayor reservorio de carbono de la Tierra, como que contienen más carbono que la atmósfera y la vegetación terrestre en conjunto. El carbono orgánico del suelo (COS) es dinámico, sin embargo, los impactos antropogénicos en el suelo pueden convertirlo en un sumidero neto o una fuente neta de gases de efecto invernadero (GEI). Se ha logrado un enorme progreso científico en la comprensión y explicación de la dinámica COS, sin embargo, la protección y el monitoreo de los depósitos de COS en lo nacional y global tiene retos complicados que obstaculizan el diseño efectivo de políticas y la adaptación e implementación sobre el terreno (Lefèvre et al., 2017).

En la idea de este escrito de relacionar la acción que cumple el suelo en la naturaleza y de los problemas que debe enfrentar la sociedad mundial para reducir o mitigar los efectos negativos del cambio climático, es desalentador saber que “el suelo es un elemento importante -y a menudo descuidado- del sistema climático (Agencia Europea del Medio Ambiente. 2015). Urge incorporar con mirada científica el suelo y su componente biorgánico, por las relaciones inherentes de éste con el ciclo global del carbono en la naturaleza.

Se requiere un cambio de paradigma hacia sistemas agropecuarios y alimentarios que sean más resilientes, más productivos, y más sostenibles, en donde la agricultura en sentido amplio y el uso y sobre todo el manejo del suelo, contribuyan a bajar su alta participación en las emisiones de GEI promotores del calentamiento global (FAO, 2015), cuya participación dentro del conjunto de acciones antropogénicas que soportan este fenómeno rondan el 50 por ciento (Fernández, 2013). Se debe pensar y poner en funcionamiento un sistema que impulse un manejo integral de los suelos que ayude a conjurar los problemas ambientales mundiales (Montiel e Ibrahim, 2015). Por eso, para que las acciones destinadas a la captura de carbono en el suelo tengan éxito, deberán contar con un robusto componente de desarrollo sostenible que conduzca a mejorar las condiciones de vida de los agricultores porque se consigue aumentar la productividad agrícola que, se opina, debe apoyarse en actividades en curso a cargo de instituciones y organizaciones ya establecidas (FAO, 2002).

## LOS CICLOS NATURALES Y SU RELACIÓN CON LA VIDA

Cuando se alteran los ciclos naturales, entre los cuales están los correspondientes a los nutrientes como el carbono, el nitrógeno, el fósforo, etc. estas afectaciones conducen a la degradación de los ecosistemas. Estos fenómenos, por ejemplo, son los que conducen a la merma de la materia orgánica del suelo (MOS) y desde luego del contenido de carbono orgánico del suelo (COS) y que en cascada originan baja en la fertilidad del suelo -debido al mal uso y a un manejo errado de este recurso-, disminución de biomasa y de las aguas superficiales y subterráneas. Lo anterior, en el mediano o largo plazo conduce a una evidente disminución de la producción agrícola y, en últimas, a la degradación global de la naturaleza o medioambiente como lo testimonian el cambio climático y la pérdida de hábitats, entre otros (Gabathuler et al. 2009, Lal, 2003, Pla Sentis, 2010).

Al interior del ciclo terrestre del carbono, el COS conforma la mayor reserva en interacción con la atmósfera y se valora en cerca de 1.500 Pg C a un metro de profundidad y de aproximadamente 2.456 a dos metros de profundidad (1 Pg =  $10^{15}$  g). En esta contabilidad el carbono inorgánico representa cerca de 1700 Pg y es fijado en formas más estables como el carbonato de calcio. La vegetación (650 Pg) y la atmósfera (750 Pg) almacenan considerablemente menores cantidades de carbono que los suelos (Caviglia et al., 2016, PNUMA-ORPALC / FS-UNEP Centre, 2014). De otra parte, los flujos entre el COS o terrestre y la atmósfera resultan de importancia y pueden ser positivos cuando se fijan o capturan o negativos cuando se emiten en forma de CO<sub>2</sub> (FAO, 2002).

En la naturaleza se da el intercambio del carbono terrestre y el atmosférico merced a los procesos como la fotosíntesis y la respiración, lo mismo que a la emisión de gases causada por la acción humana. En la fotosíntesis la fijación del carbono sucede porque las plantas absorben energía solar y CO<sub>2</sub> de la atmósfera, produciendo oxígeno y carbohidratos que los utilizan para su crecimiento; el carbono entonces se fija en la biomasa vegetal que junto a sus residuos -madera, hojarasca-, conforma un depósito natural de carbono. Con la respi-

ración se da el proceso contrario -la emisión de carbono en forma de CO<sub>2</sub>- a cargo de las plantas, los microorganismos y animales del suelo- que intervienen en la descomposición orgánica que es la forma de respiración de bacterias y hongos edáficos. A estos procesos se agrega la emisión de GEI por acciones antrópicas que contribuyen al desequilibrio del ciclo del carbono. De todas maneras no hay que perder de vista que el CO<sub>2</sub> sigue siendo indispensable para preservar la vida en la Tierra (Rügnitz et al., 2009, Blasco y Burbano, 2015)

En el planeta han venido ocurriendo drásticas modificaciones ambientales asociadas a los intereses parcializados de la sociedad. Es en estas circunstancias que hoy el mundo debe lidiar con el cambio climático, porque éste afecta la vida de las personas en todos los órdenes. Si bien la interacción de lo social con la biofísica no es nueva, lo novedoso a partir del siglo XX es que las modificaciones fueron cada vez más intensas e impulsadas por el rápido crecimiento de la población y por el desarrollo tecnológico que demanda cada vez más energía, alimentos, agua y ocupación de territorios (Pla Sentis, 2010a, Orellana et al., 2012).

Durante la década de los 70 del siglo XX los científicos acuñan el término calentamiento global para referirse a ese evidente y progresivo aumento de la temperatura en la Tierra, si bien para el gran público se hace alusión al cambio climático (Pardos, 2010). Dicho calentamiento global se origina en el incremento de los GEI como CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, sobre cuya dinámica el suelo como depósito de carbono juega un papel fundamental. Estos gases dificultan la salida hacia la estratosfera de las radiaciones infrarrojas que se producen al chocar los rayos del sol con la superficie terrestre, gases que son atrapados en las moléculas de los GEI en la atmósfera y que conducen a elevar su temperatura y la de la Tierra. De ahí que se deba contar con tecnologías que tiendan a bajar la emisión de CO<sub>2</sub> y a proponer manejos que propendan por la captura de carbono y reduzcan su liberación a la atmósfera. Esto significa que, en el peor de los casos se mantengan los contenidos del COS, aunque lo ideal es que estos se incrementen (Martínez et al., 2008). Como estos fenómenos crecerán en el futuro, hay preocupación en el mundo por esta situación que compromete la vida, por eso hay que tener en cuenta

que el cambio ambiental y el carbono están intrínsecamente relacionados para orientar acciones que mitiguen el problema que hoy vive la población mundial (Fuentes et al., 2012, Vela Correa et al., 2012, Urquiaga et al., 2005, Convención de las Naciones Unidas de lucha contra la Desertificación, 2015).

Una contribución clave para paliar o mitigar los efectos nocivos del cambio climático se encuentra en la agricultura, porque esta actividad juega un papel importante en la dinámica de los flujos de dióxido de carbono y de esta forma, puede convertirse en un medio para desacelerar la emisión de gases de efecto invernadero, mediante la fijación o el secuestro de carbono con sistemas de producción agrícola sustentables. Con este propósito, se requiere identificar y utilizar en los agroecosistemas las mejores prácticas de manejo que traigan consigo el secuestro y la estabilización del carbono en el suelo (Cotler et al., 2016).

## EL CARBONO ORGÁNICO DEL SUELO

### El suelo y su relación con el carbono

Según Lal (2014) el suelo es “la base y la esencia de toda la vida en la Tierra”, pues de acuerdo con este autor quien se remite a la hipótesis Gaia de James Lovelock, “todos los organismos y su entorno inorgánico en la Tierra están estrechamente relacionados y forman un único y completo sistema autorregulado, que mantiene las condiciones de vida en el planeta”. Además, el suelo es un recurso central para la oferta de numerosos bienes y servicios integrales para los ecosistemas y para el bienestar de las personas. Por lo mismo, se impone la preservación o la mejora del suelo en el mundo, porque este ayuda a satisfacer la necesidad de alimentos, agua y seguridad energética, sin perder de vista que cada vez más por la presión de la población se deberá producir cantidades mayores de alimentos, fibras y combustibles a fin de alcanzar la seguridad alimentaria con un suelo que, inexorablemente, estará sujeto a más intensas presiones (Lefèvre et al., 2017).

El suelo es el segundo reservorio de materia orgánica en importancia en el planeta después de los océanos y esto reitera su valía como almacén de carbono orgánico (Dimas y Gnacadja, 2009), por esta razón, hoy en el mundo se busca la optimización

del manejo del suelo a fin de incrementar la captura del carbono orgánico en este medio llevándola hasta  $2.0 \text{ Pg año}^{-1}$ , aunque se estima que unas mejoras sencillas en el manejo podrían significar aumentos de COS entre  $0.5$  y  $1.0 \text{ Pg año}^{-1}$  (Gallardo, 2002).

De acuerdo con Lavelle y Spain (2005), son tres los procesos que determinan la acumulación de la materia orgánica en el suelo.

1. La producción de biomasa de las plantas, que aporta la mayor parte de las entradas que dan lugar a este material.
2. La capacidad del suelo para estabilizar y almacenar materia orgánica, que depende de la profundidad del suelo, de la cantidad y tipos de arcilla y de otros minerales disponibles para formar compuestos organo-minerales estables.
3. La tasa de mineralización a través de la oxidación biológica que está determinada por una serie de factores organizados jerárquicamente, como clima, ciertas propiedades del suelo -tipo y cantidad de arcilla, pH-, y actividades biológicas, especialmente de los organismos más grandes.

La reserva de carbono en el suelo resulta de dos fuentes. Una, la del carbono orgánico en el suelo (COS), otra, la del carbono inorgánico del suelo (CIS) (Verhulst et al., 2015). En las actuales circunstancias de los cambios globales se está prestando especial atención al COS porque, en razón de su dinámica -impulsada por la biota del suelo-, es posible potenciar su acumulación o minimizar su descomposición bioquímica, por medio de prácticas de manejo del suelo o de lo que con una connotación más amplia se denomina gestión sostenible de la tierra (Convención de las Naciones Unidas de lucha contra la desertificación. UNCCD, 2015). Como complemento de lo anterior, se reconoce la importancia de la gestión para mejorar y sostener la reserva global de carbono, tanto COS como CIS, para poder contar con servicios de los ecosistemas y, sobre todo, para mitigar el cambio climático y avanzar en la seguridad alimentaria. En este ámbito, la recomendación del “4 por mil” en la COP21 en París en diciembre de 2015 es un claro ejemplo de la connotación política de este programa para

afrontar los problemas de la Tierra (Lal, 2016, Jahangir, 2016).

Los valores del COS son el resultado del balance entre los aportes resultantes de los residuos que dejan los cultivos, y las pérdidas que se originan de la descomposición de la materia orgánica. Entonces, el manejo para acumular COS necesita subir las entradas de carbono y paralelamente bajar la descomposición, así de sencillo en teoría pero igual de difícil de cumplir en la práctica. Los aportes de carbono pueden subir si se establecen rotaciones de cultivos, se baja la intensidad de la labranza y a la vez se preservan los residuos de los cultivos, y si se optimiza el uso de insumos como fertilizantes, materiales enalantes, plaguicidas y el agua para riego. De otra parte, la descomposición del carbono puede disminuir si se racionaliza el laboreo bajándole su intensidad y si, como consecuencia de la introducción de rotaciones, se establecen cultivos con residuos de lenta descomposición. De privilegiarse esta clase de manejos, se estima posible conseguir un “nuevo estado de equilibrio” en lapsos que van de los 20 a los 100 años. Este reto significa entrar en un proceso operativo muy grande que lleva consigo un cambio de paradigma en la agricultura, que como contrapartida va a conducir a la sostenibilidad no solo del COS sino del suelo como tal. En esta dirección cobra sentido considerar que, la forma en que se utilizan los suelos, influye en el contenido de carbono de estos (Verhulst et al., 2015, Agencia Europea del Medio Ambiente. 2015).

### **El almacenamiento y la pérdida del carbono del suelo**

En apoyo del propósito de almacenar carbono en el suelo se atienden en simultánea asuntos como la mitigación del cambio climático y las condiciones para reforzar la seguridad alimentaria, como consecuencia del incremento del rendimiento agrícola y la mayor eficiencia de los insumos. Se considera que lo anterior es posible si se utilizan “prácticas agrícolas adecuadas” que incluyan siembra sin labranza, cobertura del suelo, gestión integrada de los nutrientes, uso de “carbón vegetal”, rotación de cultivos, almacenamiento de agua que se recicla mediante riego localizado. De adoptarse esta estrategia, se estima que es posible fijar o capturar en el suelo de 200 a 1.000 kilogramos de C por hectárea

y por año. Resultados como estos en los ecosistemas podrían contribuir a la merma de 50 ppm en la concentración de dióxido de carbono atmosférico (Lal, 2009).

La pérdida de carbono de los suelos es multi-causal, aunque debe aceptarse que un factor central de la pérdida de la MOS radica en el desarrollo de la agricultura (Zambrano et al., 2004). Esta disminución se ha venido originando por los cambios a largo plazo de las prácticas para el manejo de los cultivos, orientadas solo por razones económicas; en este contexto se ubican la mecanización y “racionalización” de los sistemas de cultivo que han especializado la producción y simplificado la gestión, aunque sin tener en cuenta lo que pasaba con el suelo. Todo esto ha conducido a una baja paulatina de la MOS, situación que tiene efectos globales en la emisión dióxido de carbono y guarda relación con el cambio climático. A lo anterior se debe adicionar los cambios en los regímenes de lluvias y el incremento de las temperaturas medias que causa el cambio climático. Dicho incremento acelera la pérdida de carbono de los suelos y da como resultado un aumento en la concentración de CO<sub>2</sub> en la atmósfera. A su vez, los cambios en los patrones de lluvias intensifican la erosión de los suelos más susceptibles que ya de entrada pueden tener un bajo contenido de materia orgánica. Todos estos hechos hacen que la calidad y salud del suelo en la cual la MOS es un indicador central, continúen deteriorándose por efecto del cambio climático, con posibilidades de que crezcan las amenazas de degradación del recurso edáfico (Liu et al., 2006, Dimas y Gnacadja, 2009, Verhulst et al., 2015). Cabe mencionar en este punto una alternativa que ofrece el suelo para garantizar su propia calidad y para contribuir a la solución del cambio climático, que es la captura o fijación del carbono en el suelo que significa la transformación del CO<sub>2</sub> de la atmósfera en reserva de carbono o humus, mediante la reincorporación de residuos vegetales y de la biomasa en general (Lal, 2009).

Como ya se había insinuado, la presencia del carbono orgánico en suelos “naturales” resulta de un balance dinámico entre los residuos vegetales que llegan al suelo y la pérdida de estos por descomposición o mineralización; en los agroecosistemas las prácticas de manejo modifican los flujos

de entradas y salidas de los residuos vegetales, circunstancias en las que el suelo obra como emisor de CO<sub>2</sub> y se implica en el cambio climático (Caviglia et al., 2016). Cuando el suelo está en condiciones aeróbicas, la mayor proporción de carbono que ingresa a este es lábil con poco tiempo de residencia, mientras que una mínima proporción, del orden del 1%, se incorpora a la fracción estable es decir al humus (FAO, 2002). En otras palabras, cuando las tasas de adición de residuos orgánicos al suelo son menores que las de descomposición, la MOS va a declinar, cuando ocurre lo contrario, la MOS se va a incrementar. Hay una tercera condición, cuando se alude al término “estado estable” de la MOS y ocurre cuando las tasas de adición de materiales orgánicos son iguales a las tasas de descomposición de estos (Bot y Benites, 2005, Docampo, 2010).

El contenido de carbono en un suelo también depende de las características de este y, por supuesto, del equilibrio entre la tasa de entrada de carbono orgánico que proviene de animales, vegetales, raíces y la tasa de salida representada por el CO<sub>2</sub> que resulta del metabolismo microbiano (Docampo, 2010).

La MOS está conformada por la totalidad de materia muerta de naturaleza eucariote y procariote y sus productos metabólicos orgánicos (Blasco y Burbano, 2015). Por ello, la integran una variedad de compuestos de complejidad variable que permanentemente se están transformando y que, generalmente, se halla mezclada o asociada con la fracción mineral del suelo. Comprende tanto los residuos vegetales y animales de reciente incorporación al suelo, como los materiales húmicos complejos resultado de muy largos periodos de transformación. De otra parte, esta MOS es la base de todas las transformaciones físicas, químicas, biológicas y ecológicas que ocurren en el suelo. Contiene cantidades variables de C, H, O, N, P y S por lo que no resulta fácil una evaluación directa de su contenido en el suelo. La analítica cuantifica el carbono orgánico y con esta base estima la materia orgánica utilizando factores de conversión (Galantini y Suñer, 2008, FAO, 2002, Lal, 2014).

Los tres componentes principales de la MOS son los siguientes: (1) residuos vegetales y animales y biomasa microbiana viva; (2) MOS activa o

lábil; y (3) MOS relativamente estable. La biomasa viva en un suelo sano y dinámico puede ser de hasta 5 Mg ha<sup>-1</sup> (Mg = megagramo = 10<sup>6</sup> g = 1 tonelada métrica) (Lal, 2016. Soil health and carbon).

### **Los grupos y reservorios de carbono orgánico en el suelo**

La MOS se puede dividir en grupos de acuerdo con el tiempo necesario para la descomposición completa y el tiempo de residencia en el suelo de los productos resultantes. La división se hace en: 1. Fracción activa, aquella que se transforma en meses o pocos años, es una fuente energética que mantiene las características químicas de su material de origen -carbohidratos, ligninas, proteínas, taninos, ácidos grasos- 2. Fracción pasiva o húmica estable, aquella que se transforma en miles de años (Martínez, et al., 2008). En el mismo sentido que la MOS, el COS también se categoriza en grupos que resultan del grado de estabilidad físico-química. Estos grupos son: 1. Fracción rápida (forma lábil o activa), que resulta después de adicionar carbono orgánico fresco al suelo, cuya descomposición origina una gran proporción de la biomasa inicial que se pierde en un lapso de 1 a 2 años. 2. Fracción intermedia, comprende el carbono orgánico procesado por la población microbiana, forma de carbono que es parcialmente estabilizado sobre las superficies minerales y protegida en agregados, con tiempos de rotación que van de 10 a 100 años. 3. Fracción lenta (forma refractaria o estable), que es un COS altamente estabilizado, cuya transformación se da en periodos de 100 a más de 1000 años (Lefèvre et al., 2017).

Los diferentes reservorios de carbono que existen en el suelo tienen, como ya se expresó, distintos tiempos medios de residencia variando de uno a pocos años, dependiendo de la composición bioquímica -por ejemplo, la lignina es más estable que la celulosa-, décadas a más de 1.000 años (fracción estable). También hay alguna conexión con la composición, pero principalmente con el tipo de protección o el tipo de uniones químicas. Para la fracción del carbono estable se debe hacer una distinción entre la protección física o la química o captura. Protección física significa un encapsulado de los fragmentos de la materia orgánica por las partículas de arcilla o por los macroagregados o microagregados del suelo. Pro-

tección química se refiere a uniones especiales de la materia orgánica con otros constituyentes del suelo -coloides o arcillas-, pero más a menudo esto se refiere a compuestos orgánicos del suelo muy estables (FAO, 2002).

Los diversos grupos de materia orgánica en los suelos son influenciados por distintos factores. Las partículas de materia orgánica libre y la biomasa microbiana de los suelos son controladas por el aporte de residuos, manejo de residuos de cultivos o cobertura del suelo y el clima. La agregación del suelo, la textura y la mineralogía controlan la materia orgánica en macroagregados y por lo tanto, la labranza tiene un gran efecto sobre el tamaño de esos reservorios. Los otros reservorios son menos afectados por los factores agronómicos pero lo son sobre todo por factores pedológicos como la microagregación y la composición de las arcillas (FAO, 2002). Complementado lo relativo a la relación entre la MOS y los agregados del suelo, es importante tener en cuenta que los macroagregados (>0,25 mm de diámetro) poseen una mayor concentración de carbono de la biomasa microbiana y del carbono mineralizable, que los microagregados, cerca de la superficie del suelo (Zambrano et al., 2004).

Como se ha expresado, el secuestro COS se alimenta del CO<sub>2</sub> atmosférico y es mediado por las plantas y sus residuos hasta que finalmente se almacena en el suelo en la fracción más lábil de este, fracción que exhibe la mayor tasa de rotación que va de días a pocos años e incluye residuos vegetales de reciente incorporación susceptibles a una rápida descomposición por la fauna edáfica que genera emisión de CO<sub>2</sub> a la atmósfera. En consecuencia, se requieren planes que a más de capturar el dióxido de carbono atmosférico, encuentre formas de retener C en la fracción lenta del COS. Por el contrario, se sabe que la fracción estable o recalcitrante tiene un potencial muy bajo para el secuestro de carbono, en razón de su resistencia al cambio y por ello se debe poner atención a su manejo (Lefèvre et al., 2017, Armas-Herrera, 2013).

Es evidente que las plantas para fotosintetizar extraen carbono de la atmósfera. Aunque este carbono atmosférico también afecta al suelo, porque el que no se utiliza para el crecimiento de las plantas en superficie se distribuye a través de las raíces y

se deposita al interior del suelo. Si no se altera, por ejemplo, mediante prácticas de manejo agrícola, este carbono se puede estabilizar y permanecer confinado o secuestrado en el suelo durante miles de años. Por eso desde esta perspectiva un suelo sano puede contribuir efectivamente a mitigar el cambio climático (Agencia Europea del Medio Ambiente, 2015).

También cabe mencionar que, con relación a los tiempos de residencia de los diferentes reservorios de carbono en el suelo, la actividad de la macrofauna del suelo influye en la formación de macro y microagregados. En efecto, las lombrices de tierra, hormigas y termitas -ingenieros de los ecosistemas- ingieren una mezcla de materia orgánica y suelo mineral que facilita la incorporación de los residuos en el suelo y, así, colaboran con los niveles de agregación. Por ejemplo, los excrementos de las lombrices de tierra contribuyen a la formación de complejos estables organo-minerales, cuya descomposición es más lenta y estimulan la estabilidad del suelo si se deja que se sequen o “envejecan”. La macrofauna del suelo también juega un papel clave en la formación de microagregados. Cuando los materiales orgánicos pasan por el tracto digestivo, se mezclan muy bien y se adhieren a la mucosidad, que da lugar a la formación de núcleos y la posterior conformación de microagregados (Verhulst et al., 2015).

Las categorizaciones de la MOS o del COS tienen aplicaciones que revelan los efectos de los manejos del suelo sobre su capacidad productiva. Por ejemplo, la relación C orgánico lábil: C orgánico total es un indicador del efecto de diferentes sistemas productivos sobre la fracción orgánica del suelo y se usa para evaluar los cambios de la MOS en dichos contextos. También la relación entre los valores del C en la fracción limo-arcilla y el C orgánico total -factor de enriquecimiento de C- es otro indicador que se relaciona con el manejo del suelo. La “razón de estratificación” de la MOS es otro indicador de calidad del suelo que considera que los suelos naturales de pradera o forestales tienen sus propiedades estratificadas en profundidad. El cálculo de la razón de estratificación de la MOS es,

$$\text{REMOS} = \text{MOS sup/MOS prof}$$

REMOS es la razón de estratificación de la materia orgánica, MOS sup es el contenido de MOS cercano a la superficie o, primer estrato de muestreo y MOS prof es el contenido de MOS en profundidad, en el límite de la capa arable. Tanto MOS sup como MOS prof se miden dentro de la capa arable. A mayor valor de REMOS mayor es la calidad del suelo (Martínez et al., 2008).

### **La valoración de las fracciones del carbono orgánico y la materia orgánica del suelo**

En las consideraciones que vienen a continuación, se hace uso de los criterios planteados por Galantini y Suñer (2008), en razón de la forma sistémica en que desarrollan los criterios que permiten tener una adecuada valoración de la MOS y sus fracciones, que dan luces acerca de su manejo.

Se sabe que la dinámica de la materia orgánica total (MOT) aporta muy poco para estudiar los efectos de las prácticas agronómicas en el corto plazo, ya que las fracciones orgánicas más abundantes en el suelo son las de ciclado más lento, por ello, se necesita gran cantidad de años para observar esas diferencias. Al contrario, las fracciones lábiles son más sensibles a los efectos del manejo del suelo, y pueden usarse como indicadores tempranos del efecto de la rotación de cultivos, de la fertilización o del sistema de labranza sobre la calidad del suelo.

Se considera que es de utilidad una visión integral que incluya la calidad y las transformaciones de las fracciones orgánicas, lo mismo que el ámbito donde interactúan el sustrato y los microorganismos. Por ello, la combinación de métodos de fraccionamiento y el conocimiento de los diferentes mecanismos de protección de la MO en el suelo resultan de interés porque modifican la velocidad de las transformaciones.

Para tener la mejor valoración posible de la MOS que permita posteriormente ejercer una acción positiva sobre la misma, es importante disponer de un balance de las diferentes fracciones de la materia orgánica como un indicador del “estado orgánico” del suelo, que considere tanto el ambiente físico como los factores que alteran el equilibrio, que se puede ilustrar con la acción de los factores naturales y de las prácticas de manejo del suelo que modifican su materia orgánica.

La denominación de las fracciones orgánicas que se separan por medios físicos, suelen asociarse con las características del material aislado, con los sistemas metodológicos o con la concepción teórica. Por eso surgen denominaciones como materia orgánica “joven” (MOJ), “liviana” (MOL), “particulada” (MOP), “libre”, “activa”, “macro-materia orgánica en otras. La definición resulta de todas estas denominaciones y, así, es el material orgánico más joven y activo del suelo, compuesto por partículas de mayor tamaño que el humus, en forma libre en la matriz mineral, y por eso resulta ser más liviano que los complejos órgano-minerales.

La materia orgánica lábil es de significativa importancia para el funcionamiento del sistema suelo, porque es fuente de energía primaria para los organismos heterótrofos y una reserva de nutrientes. A su vez, la relación MOP/MOT es un indicador clave acerca del efecto de distintos manejos que alteran el aporte de carbono o su velocidad de descomposición, siempre en contexto y considerando las características del suelo, el ambiente que modifica la producción y aporte de materia seca o su velocidad de transformación. Además, la materia orgánica estable está significativamente correlacionada con la fracción fina del suelo y es menos sensible a las prácticas de manejo. Sin embargo, la MOP está más relacionada con el manejo y los efectos son más evidentes en los suelos de textura fina. De ahí que se propongan relaciones entre MOT, MOP y arcilla como indicador del efecto de las prácticas agrícolas sobre el suelo.

El recorrido realizado en estos últimos párrafos, con la guía de Galantini y Suñer (2008), pone de presente que hay conceptualización y metodologías para conocer el complejo entramado de la MOS del suelo y para trabajar en pro de su preservación, sin embargo también es evidente que el conocimiento al respecto es limitado, circunstancia que revela un problema aunque también, y este es el punto, oportunidades para trabajar sobre un tema de incuestionable importancia en medio de los problemas ambientales que vive la sociedad planetaria.

### **Dificultades a superar y acciones a realizar para preservar el suelo y su carbono**

Por lo acabo de señalar, la eficiencia de las acciones que se hagan con el propósito de reducir

el CO<sub>2</sub> atmosférico, en función del uso de la tierra, depende de la capacidad para estimar las cantidades de carbono secuestradas por el suelo y la emisión de CO<sub>2</sub> hacia la atmósfera. Lo anterior significa que la realización actividades para mantener un balance positivo de carbono -con mayor absorción que emisión- necesita que tenga todo el conocimiento posible acerca de la dinámica del carbono (Orellana-Rivadeneira, 2012). Sin este presupuesto resulta muy difícil lograr acciones efectivas para mermar, a través de proyectos de uso del suelo, la presencia de CO<sub>2</sub> en la atmósfera.

Hay soporte científico que explica cómo la tasa de producción de CO<sub>2</sub> es importante porque se constituye en una evidencia de la tasa de descomposición de la materia orgánica presente en el suelo y de la congrua pérdida de carbono del suelo. De otra parte, la respiración del suelo es una fuente sobresaliente de CO<sub>2</sub> atmosférico, porque contribuye con 100 billones de toneladas métricas al año al ciclo global del carbono. Por tanto, las evaluaciones de la respiración del suelo sirven para medir la contribución del suelo al balance del CO<sub>2</sub> en la atmósfera; en la práctica es relativamente fácil medir la evolución del CO<sub>2</sub> que se origina en el suelo, tanto en el laboratorio como en el campo (Lessard et al., 2006).

Para Lefèvre et al. (2017), quienes en su libro se refieren al carbono orgánico del suelo como un “potencial oculto”, admiten y reconocen que hay dificultades para medir y evaluar los cambios del carbono del suelo. Entre otras restricciones reconocen las siguientes:

Muchos mapas disponibles y las estimaciones globales del COS se apoyan en bases de datos históricas, y no en información actual o reciente, por eso se requiere desarrollar líneas de base nacionales para el COS en apoyo al logro de los objetivos de desarrollo sostenible y evaluaciones relacionadas con los efectos del cambio climático. Debe disponerse en todos los países de métodos innovadores para el monitoreo frecuente de las existencias de COS. Para los informes sobre el estado y las tendencias del COS hay el desafío de abordarse con metodologías armonizadas, técnicas normalizadas de muestreo y modelización, soluciones innovadoras para recopilar e intercambiar datos, y prácticas de campo establecidas a diferentes escalas.

Se necesita también conseguir recomendaciones adecuadas, resultado de investigación para mantener o aumentar las existencias de COS mediante prácticas ponderadas a diferentes escalas y para todos los tipos de uso del suelo. A la par, se precisa mejores formas que superen los obstáculos a la adopción de prácticas de secuestro de COS para establecer e implementar políticas al respecto.

Es de reciente data la iniciativa “4 por 1000” que tiene como objetivo mejorar el contenido en materia orgánica y propiciar la captura de carbono en los suelos del mundo (Ministerio de agricultura, sector agroalimentario y bosques. Francia. 2015). Esto ocurrió en París, en diciembre de 2015, en la COP21 cuando oficialmente se lanzó el Proyecto “4 por mil de suelos para la seguridad alimentaria y el clima”.

Se arguye que la iniciativa es ambiciosa, aunque se resalta que es la primera ocasión en que se determina un objetivo mundial para promover un buen manejo del suelo que pueda contribuir a mitigar el cambio climático. La reflexión hecha al proponer la iniciativa fue que las áreas agrícolas tienen en el suelo a un metro de profundidad alrededor de 600 Gt de C, entonces, el incremento del COS para estas áreas por 4 por mil -cerca de 2,5 Gt C año<sup>-1</sup> podría compensar aproximadamente un 30% de las emisiones de gases de efecto invernadero. Los estudiosos de este tema han planteado desafíos para la iniciativa “4 por mil” como la escasez de datos científicos, la capacidad finita de los sumideros de carbono en el suelo, la permanencia de agricultores de escasos recursos económicos y pequeños propietarios, así como los compromisos financieros y los esfuerzos que demanda la implementación (Minasny, Budiman, Malone, Brendan P. McBratney, Alex B. et al., 2017).

## REFLEXIÓN DE CIERRE

Para proteger la naturaleza con miras a conseguir un desarrollo sostenible, donde se concilien los intereses de la sociedad y de esa naturaleza, se requiere pensar de manera diferente, porque ni los fenómenos naturales ni los fenómenos sociales son lineales, más bien son fenómenos emergentes resultado de la interacción de los elementos de un gran sistema. Esa nueva forma de pensar, debe considerar que la vida toda es un entramado y que para

aprehenderla y comprenderla, los seres humanos deben repensarla con una visión amplia y generosa bordeada por un fuerte y genuino componente ético (Loló, 2008).

A una escala menor pero como parte de la naturaleza, el suelo también amerita una mirada de conjunto, que reconozca su complejidad y, en los tiempos presentes, su papel crucial frente al cambio climático, toda vez que el suelo es el mayor sumidero terrestre de carbono y puede influir positivamente en dicho cambio al controlar la emisión de los gases de efecto invernadero. Para ello, se requiere una nueva visión conceptual y operativa que permita a los seres humanos, con conocimiento de causa, conjurar los fenómenos ambientales que hoy amenazan a la sociedad y a todas las formas de vida en el Planeta.

## REFERENCIAS

- AGENCIA EUROPEA DEL MEDIO AMBIENTE. 2015. El suelo y el cambio climático. Copenhague. 9 p. <http://www.eea.europa.eu/es/senales/senales-2015/articulos/el-suelo-y-el-cambio-climatico>. Consulta 16 01 2017
- ARMAS-HERRERA C.M., MORA J.L., ARBELO C.D. Y RODRÍGUEZ-RODRÍGUEZ A. 2013. Labile carbon pools and biological activity in volcanic soils of the Canary Islands. *SJSS. Spanish Journal of Soil Science* (3) 1: 7-27.
- BLASCO, MARIO Y BURBANO, HERNÁN. 2015. La vida en el suelo. Notas sobre su bioquímica y microbiología. Pasto, Impresos La Castellana. 365 p.
- BOT, ALEXANDRA Y BENITES, JOSÉ. 2005. The importance of soil organic matter. Key to drought-resistant soil and sustained food production. *FAO Soils Bulletin* 80. 78 p.
- BUOL, S.W., HOLE, F.D. Y MCCracken, R.J. 1981. Génesis y clasificación de suelos. 1ª. ed. Trad. del inglés por Agustín Contin. México, Trillas. 417 p.
- BURBANO, HERNÁN. 2009. Introducción. En: Unigarro, Alberto, Insuasty, Ruth Liliana y Chaves, Germán. Manual de prácticas de laboratorio. Suelos Generales. Universidad de Nariño, Pasto. 125 p.
- CAVIGLIA O.P., WINGEYER A.B. Y NOVELLI L. E. 2016. El rol de los suelos agrícolas frente al cambio climático. Serie de Extensión INTA Paraná 78:27-32.
- CONVENCIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS DE LUCHA CONTRA LA DESERTIFICACIÓN. UNCCD. 2015. Informe Político-Científico N° 01: 1-6.
- COTLER, H., M. MARTÍNEZ Y J. D. ETCHEVERS. 2016. Carbono orgánico en suelos agrícolas de México: Investigación políticas públicas. *Terra Latinoamericana* 34: 125-138.
- DIMAS, STRAVOS Y GNACADJA, LUC. 2009. Prefacio. En: Cambio climático: ¿el suelo puede cambiar las cosas? Informe de la conferencia. Bruselas 12 de junio de 2008. Luxemburgo, Comisión Europea. pp. 7-8. [http://ec.europa.eu/environment/archives/soil/pdf/report\\_conference\\_es.pdf](http://ec.europa.eu/environment/archives/soil/pdf/report_conference_es.pdf). Consulta 15 de enero de 2017
- DOCAMPO, ROBERTO. 2010. La importancia de la materia orgánica del suelo y su manejo en producción frutícola. Serie Actividades de Difusión N° 687. INIA Las Brujas-Estación Experimental "Wilson Ferreira Aldunate". Pp. 81-88. <http://www.ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/1199/1/128221131113111309.pdf>. Consulta 14 de enero de 2017
- FAO. 2002. Captura de carbono en los suelos para un mejor manejo de la tierra. Basado en el trabajo de Michel Robert. Informes sobre recursos mundiales de suelos. 61 p.
- FAO. 2015 El trabajo de la FAO sobre cambio climático. Conferencia de las Naciones Unidas sobre el cambio climático. 31 p. <http://eird.org/ran-sendai-2016/presentaciones-evento-paralelo/documentos-de-interes/El-trabajo-de-la-FAO-sobre-Cambios-Climatico-2015.pdf>. Consulta 17 01 2017
- FERNÁNDEZ, MERY ESPERANZA. 2013. Efectos del cambio climático en la producción y rendimiento de cultivos por sectores. Evaluación del riesgo agroclimático por sectores. Bogotá, FONADE-IDEAM 49 p.
- FUENTES-PONCE, M. H., ETCHEVERS-BARRA J.D Y BRIONES O. 2012. El papel del programa mexicano del carbono en México en relación a los suelos. In: Paz, Fernando, Bazán, Maira, Saynes, Vinisa eds. Dinámica del carbono en el suelo 2012. Serie Avances Temáticos del Ciclo del Carbono y sus Interacciones. Programa Mexicano del Carbono en colaboración con la Sociedad Mexicana de Ciencias del Suelo. Texcoco, Estado de México, México. pp. 45-50.
- GABATHULER, ERNST, LINIGER, HANSPETER, HAUERT, CHRISTINE, GIGER, MARKUS. 2009. Beneficios de la gestión sostenible de la tierra. Wachs,

- Ted & Thobault, Marlene, eds. Bern, WOCAT, CDE & University of Berne. 16 p. [http://www.unccd.int/Lists/SiteDocumentLibrary/Publications/CSD\\_Cover\\_Benefits\\_SLM%20spanisch.pdf](http://www.unccd.int/Lists/SiteDocumentLibrary/Publications/CSD_Cover_Benefits_SLM%20spanisch.pdf) Consulta 12 de enero de 2017
- GALANTINI, J.A. Y L. SUÑER. 2008. Las fracciones orgánicas del suelo: análisis en los suelos de la Argentina. *AgrisScientia* 25 (1): 41-55.
- GALLARDO, JUAN. 2002. El agotamiento de la reserva orgánica del suelo y su relación con el secuestro de carbono atmosférico. Octavo Congreso Ecuatoriano de la Ciencia del Suelo. Resúmenes. pp. 1-6. <http://www.secsuelo.org/wp-content/uploads/2015/06/1-Agotamiento-de-la-reserva-organica-Gallardo-J.pdf>. Consultado 15 de enero de 2017
- JAHANGIR MMR. 2016 Soil: a weapon for food security and climate change adaptation and mitigation. *Adv Plants Agric Res* 3(2): 00095. DOI: 10.15406/apar.2016.03.00095
- LAL, RATTAN. 2003. Métodos y normas para evaluar el uso sostenible de los recursos suelo y agua en el trópico. Trad. del inglés por Corpoica. Bogotá, Corpoica-Produmedios. 96 p.
- LAL, RATTAN. 2009. La función de la materia orgánica del suelo en el ciclo global del carbono. En: Cambio climático: ¿el suelo puede cambiar las cosas? Informe de la conferencia. Bruselas 12 de junio de 2008. Luxemburgo, Comisión Europea. pp. 19-20. [http://ec.europa.eu/environment/archives/soil/pdf/report\\_conference\\_es.pdf](http://ec.europa.eu/environment/archives/soil/pdf/report_conference_es.pdf) Consulta 15 de enero de 2017
- LAL, RATTAN. 2014. Societal value of soil carbon. *Journal of Soil and Water Conservation*. 69 (6): 186A-192A. doi:10.2489/jswc.69.6.186A.
- LAL, RATTAN. 2016. Soil health and carbon management. *Food and Energy Security* 2016; 5(4): 212-222. doi: 10.1002/fes3.96
- LAVELLE, P. & SPAIN, A. V. 2005. Soil ecology. 2nd. Printing. Dordrecht, Netherlands, Springer. 654 p.
- LEFÈVRE, CLARA, REKIK, FATMA, ALCANTARA. VIRIDIANA Y WIESE, LIES. 2017. Soil organic carbon. The hidden potential. Rome, Food and Agriculture Organization of the United Nations. FAO. 77 p.
- LEFF, ENRIQUE. 2008. Discursos sustentables. Siglo XXI editores. México 272 p.
- LESSARD, ROBERT, GIGNAC, L. DENNIS, ROCHETTE, PHILIPPE. 2006. El ciclo del carbono: Midiendo el flujo del CO<sub>2</sub> del suelo. Traducción de Manuel Antonio Fernández Domínguez. 7 p.
- LIU, X, HERBERT, S.J., HASHEMI, A.M., ZHANG, G. DING, G. 2006. Effects of agricultural management on soil organic matter and carbon transformation-a review *Plant Soil Environ.*, 52, 2006 (12): 531-543.
- LOLÓ, MANUEL ANTONIO. 2008. El desarrollo sostenible y el nuevo pensamiento de la complejidad: un modo nuevo de pensar la sostenibilidad. *Revista Futuros* 20 (6): 1-21.
- MARTÍNEZ H., EDUARDO, FUENTES E. JUAN PABLO, ACEVEDO H., EDMUNDO. 2008. Carbono orgánico y propiedades del suelo. *R.C. Suelo Nutr. Veg.* 8 (1): 68-96.
- MINASNY, BUDIMAN, MALONE, BRENDAN P. MCBRATNEY, ALEX B. et al. 2017. Soil carbon 4 per mille. *Geoderma* 292: 59-86.
- MINISTERIO DE AGRICULTURA, SECTOR AGROALIMENTARIO Y BOSQUES. FRANCIA. 2015. La iniciativa 4 por 1000. 2015. Los suelos como base de la seguridad alimentaria y el clima. 7 p. <http://www.neiker.net/wp-content/uploads/2015/11/4POR100.pdf> Consulta 14 02 2017
- MONTIEL, KAREN E IBRAHIM, MUHAMMAD. 2015. Manejo integrado de suelos para una agricultura resiliente al cambio climático. San José, Costa Rica, Instituto de Cooperación para la Agricultura IICA. 30 p.
- ORELLANA-RIVADENEYRA, GUSTAVO, SANDOVAL-SOLÍS, MARÍA L., LINARES-FLEITES, GLADYS, GARCÍA CALDERÓN, NORMA E. Y TAMARIZ-FLORES, JOSÉ V. 2012. Descripción de la dinámica de carbono en suelos forestales mediante un modelo de reservorios. *Avances en Ciencias e Ingeniería* 3(1): 123-135.
- PARDOS, JOSÉ ALBERTO. 2010. Los ecosistemas forestales y el secuestro de carbono ante el calentamiento global. Madrid, Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria (INIA). Ministerio de Ciencia e Innovación. 253 p.
- PLA SENTIS, ILDEFONSO. 2010. Retos para el futuro de la ciencia del suelo frente al cambio global. *Suelos Ecuatoriales* 39: 111-118.
- PLA SENTIS, ILDEFONSO. 2010a. Ciencia del suelo y cambio climático, perspectivas para el futuro. XII Congreso Ecuatoriano de la Ciencia del Suelo. Santo Domingo, Ecuador, 17-19 de noviembre de 2010. Resúmenes. pp. 1-10. <http://www.secsuelo.org/4159->

xii-co1ngreso-ecuadoriano-de-la-ciencia-del-suelo.html Consulta 17 de enero de 2017

PNUMA-ORPALC / FS-UNEP CENTRE. 2014. La agricultura andina frente al cambio climático. Documento del proyecto Microfinanzas para la adaptación basada en Ecosistemas (MEbA). Panamá. 64 p.

RÜGNITZ, M. T.; CHACÓN, M. L.; PORRO R. 2009. Guía para la determinación de carbono en pequeñas propiedades rurales. 1. ed. Lima, Perú.: Centro Mundial Agroforestal (ICRAF) / Consórcio Iniciativa Amazônica (IA). 79 p. [http://www.katoombagroup.org/documents/cds/redlac\\_2010/resources/ICRAF\\_GuiaDeterminacionCarbono\\_esp.pdf](http://www.katoombagroup.org/documents/cds/redlac_2010/resources/ICRAF_GuiaDeterminacionCarbono_esp.pdf). Consulta 15 de enero de 2017

TATE, KEVIN R. & THENG, K. G. 2014. Climate change. An underfoot perspective? En: Churchman, G. Jock & Landa, Edward R. The soil underfoot. Infinite possibilities for a finite resource. Boca Raton, CRC Press. pp. 3-16.

URQUIAGA, S., JANTALIA, C. P., LUZIO, W., ALVES, B. Y BODDEY, R. M. 2005. El horizonte del suelo. R.C. Suelo Nutr. Veg. 5(2): 46-60.

VELA CORREA, GILBERTO, LÓPEZ BLANCO, JORGE Y RODRÍGUEZ GAMIÑO, MARÍA DE LOURDES. 2012. Niveles de carbono orgánico total en el Suelo de Conservación del Distrito Federal, centro de México. Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM. 77: 18-30

VERHULST, NELE, FRANÇOIS, ISABELLE, GOVAERTS, BRAM. 2015. Agricultura de conservación y captura de carbono en el suelo: Entre el mito y la realidad del agricultor. México, CIMMYT. 19 p.

ZAMBRANO, ALEXIS; FRANQUIS, FÉLIX; INFANTE, ÁNGEL. 2004. Emisión y captura de carbono en los suelos en ecosistemas forestales. Rev. For. Lat. 35: 11-20.