

**REVISIÓN DE INFORMACIÓN SOBRE LA DETERMINACIÓN DEL CARBONO
ORGÁNICO DEL SUELO ASOCIADO A LA BIOMASA MICROBIANA EN
SISTEMAS PRODUCTIVOS DE CAÑA DE AZÚCAR PARA PRODUCCIÓN DE
PANELA *Saccharum officinarum* (Poaceae)**

PAULA ALEJANDRA CASTILLO ROJAS

Plan de Trabajo Profesionalizante para optar al título de Bióloga Ambiental

Supervisor

BELLANID HUERTAS CARRANZA

Investigadora Máster Agrosavia sede C.I. Tibaitatá

Tutor

LUIS ALEJANDRO ARIAS RODRÍGUEZ

Director Programa de Ciencias Marinas y Ambientales

**UNIVERSIDAD DE BOGOTÁ JORGE TADEO LOZANO FACULTAD DE
CIENCIAS NATURALES E INGENIERIA PROGRAMA DE BIOLOGÍA
AMBIENTAL**

BOGOTÁ

2019

CONTENIDO

- 1. RESUMEN**
- 2. PLANTEAMIENTO DEL PORBLEMA**
- 3. JUSTIFICACIÓN**
- 4. OBJETIVOS**
- 5. INTRODUCCIÓN**
- 6. METODOLOGÍA**
- 7. MARCO TEÓRICO**
 - 7.1. IMPORTANCIA DE LA BIOMASA MICROBIANA Y EL CARBONO ORGÁNICO DEL SUELO**
 - 7.1.1. Biomasa microbiana**
 - 7.2. CARBONO ORGÁNICO DEL SUELO (COS)**
 - 7.2.1. La importancia del carbono orgánico del suelo para los servicios de los ecosistemas derivados del suelo**
 - 7.3. CULTIVO DE CAÑA DE AZÚCAR Y MARCO LEGAL EN COLOMBIA**
 - 7.3.1. Cultivo de caña de azúcar**
 - 7.3.2. Legislación para el sector azucarero**
 - 7.4. MÉTODOS PARA EVALUAR LA DINÁMICA DEL CARBONO ORGÁNICO DEL SUELO**
 - 7.5. EVALUACIÓN DE BIOMASA MICROBIANA EN CAÑA DE AZÚCAR Y PRODUCCIÓN DE PANELA**
- 8. CONCLUSIONES**
- 9. BIBLIOGRAFÍA**

1. RESUMEN

El suelo es un ambiente complejo y dinámico en el cual la actividad biológica está en mayor medida dominada por la actividad de los microorganismos. Por ende, la diversidad microbiana es fundamental en el funcionamiento del ecosistema. Estos organismos microscópicos son los promotores de los grandes procesos fisicoquímicos que suceden en los suelos de los diferentes ecosistemas como la descomposición, los ciclos de nutrientes, la agregación del suelo, el antagonismo y la propia patogenicidad. En la agricultura y en sí, en campos afines a la misma, los estudios de los microorganismos y su relación con el sistema suelo-planta permiten generar lo que se denomina uso sostenible del suelo.

El suelo se ha convertido en uno de los recursos más vulnerables del mundo frente al cambio climático, la degradación de la tierra y la pérdida de biodiversidad. El suelo es una importante reserva de carbono, conteniendo más carbono que la atmósfera y la vegetación terrestre en conjunto. El carbono orgánico del suelo (COS) es dinámico, no obstante, los impactos antropogénicos sobre el suelo pueden convertirlo en un sumidero o fuente neta de gases de efecto invernadero (GEI). Una vez el carbono entra en el suelo en forma de material orgánico gracias a la fauna y flora del suelo, puede persistir en el suelo durante décadas, siglos o incluso milenios.

El cultivo de la caña de azúcar con destino a la producción de panela en Colombia se extiende en más de 25 departamentos y 511 municipios. Según el Dane, se sembraron más de 168.369 hectáreas y su producción en panela se estimó en 735.271 toneladas (2011). El sistema productivo de caña panelera se desarrolla en dos modelos definidos principalmente por condiciones socioeconómicas y que responden básicamente al sistema de corte o cosecha, definiendo así las regiones productoras de corte por entresaque y las regiones de corte por parejo. Gracias a estos sistemas productivos, existen entre dichas regiones grandes diferencias en la realización de prácticas de manejo agronómico como el sistema de siembra, los planes de fertilización y nutrición, el control de plagas, enfermedades y malezas y principalmente la renovación de lotes y sustitución de variedades tradicionales por nuevas variedades con mayor potencial productivo (Durán *et al.*, 2014).

De acuerdo a lo anterior, el propósito de esta revisión es brindar información que permita comprender algunas de las diferentes metodologías para la determinación de la biomasa microbiana asociada al carbono orgánico del suelo bajo cultivo de caña de azúcar *Saccharum officinarum* para producción de panela, así como sus ventajas y desventajas.

2. PLANTEAMIENTO DEL PORBLEMA

La biomasa microbiana (BM), es clave para la regulación del flujo de energía y el ciclo de nutrientes. Conduce procesos biogeoquímicos en los ciclos de carbono y nitrógeno, alcanza un porcentaje mínimo entre el 1% y 3% de la materia orgánica total del suelo (MOS) (Jiang *et al.*, 2013). Además, es importante en la sostenibilidad de los sistemas agrícolas debido a su papel en el ciclaje y la disponibilidad de nutrientes (Gálvez *et al.*, 2012). Es indicador de cambios tempranos en el contenido de MOS (Costantini *et al.*, 1996; Cosentino *et al.*, 1998) y sus efectos en la calidad de los mismos. Por ejemplo, su determinación puede mostrar alteraciones en la MOS antes de que puedan detectarse midiendo el carbono total (Jenkinson y Ladd, 1981; Powlson *et al.*, 1987), debido a que entre el 2 y 3% del carbono presente en el suelo está compuesto por la BM. Adicionalmente, existe una correlación directa entre la actividad microbiana, la productividad del suelo en ambientes naturales y en los suelos de cultivo (Cerri *et al.* 1992), el carbono de la biomasa microbiana y el carbono orgánico total del suelo evidencian procesos relacionados con las adiciones y transformaciones de la materia orgánica, así como también la eficaz conversión del carbono microbiano (Beare *et al.*, 2002).

De otro lado, se debe tener en cuenta que aproximadamente 147 billones de toneladas del carbono orgánico del suelo (COS) están almacenadas en el primer metro de suelo y alrededor de 2.500 billones de toneladas a dos metros de profundidad. La pérdida global de almacenamiento del COS desde 1850 se calcula en 66 billones de toneladas, debido al cambio en el uso del suelo (FAO, 2017). Esta es la razón principal, por lo cual el suelo puede operar como fuente o reservorio dependiendo de su uso y manejo (Lal *et al.*, 1990, Lal, 1997). Acorde con Reicosky (2002), se calcula que desde la incorporación de nuevos suelos a la agricultura hasta el establecimiento de sistemas intensivos de cultivo se producen pérdidas de COS que oscilan entre 30 y 50% del nivel inicial. La pérdida de material húmico de los suelos cultivados es mayor a la tasa de formación de suelos no

perturbados, por lo tanto, el suelo en condiciones de cultivo convencional puede ser una fuente de emisión de CO₂ a la atmósfera (Kern y Johnson, 1995; Gifford, 1994, & Reicosky, 2002). En años recientes el secuestro de carbono ha generado interés a nivel mundial, debido a que la mayoría de estos se encuentran por debajo de su capacidad máxima de almacenamiento (Lal, 2004). Al comparar el reservorio global edáfico, estimado en 2.500 Gt de carbono con el contenido de la atmósfera (760 Gt) y el del océano (38.000 Gt) (Lal, 2004 (b)), se hace evidente la importancia del suelo en el balance global, ya que la pérdida de este último así sea en una pequeña fracción podría generar cambios climáticos globales y graves consecuencias en la atmósfera (Oelbermann, 2004). No obstante, para analizar esta posibilidad es necesario cuantificar la capacidad y rapidez del suelo para secuestrar el carbono (Uriarte, 1991).

Por lo anterior, es importante analizar los cambios de uso de suelo bajo diferentes indicadores como la BM y la dinámica de carbono en los mismos, ya que los impactos por actividades antrópicas siguen avanzando y es importante mantener e incrementar la actividad de este reservorio a través de diferentes prácticas. Por ejemplo, estrategias de manejo de los suelos agrícolas pueden favorecer la actividad de la biomasa microbiana y el almacenamiento del carbono en el suelo. Sin embargo, es necesario evaluar estos procesos en cada uno de los sistemas agrícolas. Aspectos como la labranza cero y las coberturas verdes pueden aumentar o conservar la actividad microbiana e incrementar su biomasa y actividad metabólica en la dinámica del carbono.

En este contexto actividades de manejo en suelos dedicados a los sistemas de producción de caña panelera, en donde las actividades de conservación de suelos pueden incidir en la conservación y diversificación de la actividad microbiana, a que son consideradas alternativas de agricultura de conservación debido al nulo o poco uso de maquinaria para la preparación de los suelos, la baja entrada de fertilizantes, pesticidas o el sistema de corte por entresaque en la cosecha de la caña. Sin embargo, es necesario analizar su desempeño y características ya que después de la India, Colombia es el productor (Castro *et al*, 2017) más importante de panela en el mundo (ICA, 2014) y, por lo tanto, un sistema agrícola de suma importancia en el país, con aproximadamente 474.559 hectáreas de caña sembradas. En este contexto y teniendo en cuenta que la biomasa microbiana es un indicador sensible que responde a los cambios y manejo del suelo, más rápido que la materia orgánica total y

la mayoría de los otros depósitos de C en los suelos (Hu *et al.*, 1997; Powlson *et al.*, 1994; Trumbore *et al.*, 1996).

3. JUSTIFICACIÓN

El incremento poblacional y económico son factores que ejercen una presión considerable sobre el suelo a nivel global. Sin embargo, los suelos son el fundamento para la producción de alimentos. Estos, contienen más carbono que toda la vegetación sobre la tierra, por lo tanto, regulan la emisión de dióxido de carbono y otros gases de efecto invernadero; y hospedan una gran diversidad de organismos clave para los procesos de los ecosistemas. Las presiones humanas y prácticas agrícolas deficientes sobre el recurso suelo está llegando a límites críticos. El papel del COS y la biodiversidad del suelo en el incremento de la disponibilidad de alimentos se encuentran unidas -incremento en el COS y la biodiversidad son generalmente beneficiosos para la producción agrícola, y las disminuciones en ambos son igualmente perjudiciales para los cultivos; sin embargo proporcionar evidencia para estas cualitativas afirmaciones y el establecimiento de relaciones predictivas ha sido difícil porque el crecimiento del cultivo depende de una serie de factores que interactúan. Además, el carbono orgánico del suelo amortigua el impacto de los fenómenos climáticos extremos en los suelos y los cultivos por (i) la regulación del suministro de agua para las plantas, (ii) la reducción de la erosión a través de la disminución de la escorrentía, y (iii) proporcionando sitios para la retención y liberación de nutrientes. En consecuencia, es necesario determinar la diversidad microbiana asociada al carbono en suelos agrícolas y de este modo, aportar información valiosa para implementar prácticas agrícolas sostenibles en pro de mejorar la calidad del suelo, la capacidad de secuestrar carbono y proteger su biodiversidad.

4. OBJETIVO

Identificar la información reportada para la determinación de la biomasa microbiana asociada al carbono en suelos productivos de caña de azúcar *Saccharum officinarum* (Poaceae) para producción de panela, con el propósito de generar una visión general de los diferentes métodos utilizados para indicadores de calidad de suelos agrícola

5. INTRODUCCIÓN

Durante el ciclo de desarrollo de un cultivo se producen cambios en la humedad, temperaturas edáficas, se incorporan raíces y productos rizosféricos que pueden tener gran influencia sobre el tamaño, constitución y actividad de la biomasa microbiana (Sterren *et al.*, 2002). La actividad microbiológica es esencial para mantener la calidad de los suelos y los sistemas agroforestales surgen como alternativa, para el manejo agroecológico y sostenible del suelo (Pardo *et al.*, 2019). El carbono orgánico del suelo es uno de los más importantes indicadores de la calidad del suelo y está directamente relacionado con el mantenimiento de su estructura, infiltración, suministro y almacenamiento del agua, presencia de diferentes grupos de microorganismos, mineralización de la materia orgánica y la disponibilidad de nutrientes. La materia orgánica del suelo es una fuente de energía para los microorganismos, de disponibilidad y calidad de sustratos y la biodiversidad necesaria para mantener muchas de las funciones del suelo (Rapidel *et al.* 2015).

La calidad del suelo de los bosques depende de numerosas variables físicas, químicas, biológicas y bioquímicas. Dentro de estas variables, las microbiológicas (biomasa microbiana y respiración basal) y las bioquímicas (actividades enzimáticas) son las más sensibles, por lo tanto, pueden proveer información de los cambios ocasionados por el estrés ambiental y las actividades antrópicas. Si se tiene en cuenta que la actividad microbiológica es esencial para mantener la calidad de los suelos, la biomasa microbiana y su actividad son aspectos que deben ser considerados para determinar el estado de un sistema o para entender cómo la actividad humana altera los ciclos biogeoquímicos, al comparar zonas naturales y degradadas (Bastida *et al.* 2008).

Para evaluar la calidad del suelo, se debe considerar que los microorganismos son fundamentales en el proceso de descomposición de los residuos orgánicos del suelo e influyen sobre los ecosistemas y su fertilidad, interviniendo, tanto en el establecimiento de los ciclos biogeoquímicos como en la formación de la estructura del suelo (Hernández *et al.* 2003). En este sentido, la biomasa microbiana se considera el principal agente para la descomposición de la materia orgánica del suelo (MOS), las transformaciones de nutrimentos (Brookes *et al.* 2008), la estabilidad estructural y como indicador de contaminación del suelo (Wright e Islam 2006).

6. METODOLOGÍA

El tipo de estudio del presente trabajo, se considera descriptivo crítico, en la medida que permite interpretar los reportes científicos consultados, para la generación de una revisión actualizada a cerca de los métodos para medir y evaluar la dinámica del carbono orgánico del suelo.

Para realizar el presente estudio se procedió a la búsqueda en diferentes fuentes de la información, sobre los reportes bibliográficos existentes para el carbono orgánico del suelo, la biomasa microbiana y el cultivo de caña de azúcar para producción de panela. Por tanto, para la mejor comprensión y utilización de la literatura encontrada, se dividió en tres capítulos que permitieron visualizarla, a saber:

1. Importancia de la biomasa microbiana y el carbono orgánico del suelo
2. Cultivo de caña de azúcar y marco legal en Colombia.
3. Métodos para medir y evaluar la dinámica del carbono orgánico del suelo
4. Evaluación de biomasa microbiana en caña de azúcar y producción de panela

La información tomada de manera predilecta fue aquella otorgada por las bases de datos vía internet más conocidas entre ellas las bases latinoamericanas SciELO y Redalyc, dos bases de datos especializadas en temas de ciencia y tecnología. SciELO es una iniciativa de FAPESP (Fundación de Apoyo a la Investigación del Estado de São Paulo) y de BIREME (Centro Latinoamericano y del Caribe de Información en Ciencias de la Salud) que desde el año 2002 ha buscado la manera de mantener a la vanguardia el desarrollo de metodologías de búsqueda, preparación, almacenamiento, disseminación y evaluación de la literatura científica en formato electrónico. Para la búsqueda en esta base de datos se implementaron varios filtros, el primero fue la introducción de la consulta utilizando las palabras “Biomasa microbiana del suelo” siendo el conector “del”. En esta búsqueda se arrojaron 150 resultados, así que para hacer la búsqueda más específica se le agregó una nueva palabra “en caña de azúcar”, una vez entrada la búsqueda los resultados se vieron notablemente disminuidos a 4. De estos 4 resultados se tomaron todos los artículos.

Redalyc, es la Red de Revistas Científicas de América Latina y el Caribe, España y Portugal creada por la Universidad Autónoma del Estado de México. Es una de las bases de datos más utilizadas en la búsqueda de material bibliográfico relacionado con las ciencias a fines a las de la tierra y la biotecnología. Para la búsqueda dentro de esta base de datos se ingresó la palabra clave “carbono orgánico del suelo” arrojando 60934 resultados que por obvias razones debía ser reducido para facilitar la búsqueda. Se aplicó un segundo filtro usando como nueva palabra de búsqueda “en cultivos de caña de azúcar” que arrojó 885 documentos. De esta base de datos se tomaron sólo 8 documentos.

ScienceDirect es una de las bases más utilizadas a nivel mundial por la calidad de documentos que suelen encontrarse allí; para la búsqueda en esta base se utilizaron los operadores booleanos “AND”. La primera búsqueda se realizó con las palabras “Soil Organic Carbon Dynamics” encontrando 47527 resultados, el segundo filtro fue la adición de las palabras “and sugar cane” hallando 843 resultados. También se hizo una segunda búsqueda en esta base de datos con el fin de encontrar documentos que proporcionaran indicios o respaldaran estudios acerca de las metodologías así que empleando el comando de búsqueda “methodologies to determine soil microbial biomass” se encontraron 163 resultados de los cuales sólo 10 eran de total interés y era posible acceder a ellos.

Para la búsqueda de las Normas Técnicas y demás documentos legales, se hizo uso de las bases de datos de la biblioteca Jorge Tadeo Lozano. Se eligieron los sectores:

- Medio Ambiente. Protección de la Salud. Seguridad
- Agricultura

Finalmente se utilizó Google Académico para realizar la búsqueda de documentos que pudieran complementar los estudios así que tras ingresar la consulta “determinación de carbono orgánico del suelo en caña de azúcar” se encontraron 14800 resultados, después de colocar el segundo filtro “En Colombia” se redujo la búsqueda a 4.130, de los cuales se tomaron varios documentos, entre ellos trabajos de grado y artículos.

7. MARCO TEÓRICO

7.1. Importancia de la biomasa microbiana y el carbono orgánico del suelo

7.1.1 Biomasa microbiana

Los microorganismos son los principales mediadores de la tasa de recambio del carbono en el suelo. Por definición ellos también son parte del carbono orgánico y del reservorio de nutrientes, y como tales, ellos son denominados *biomasa microbiana* (INSAM, 1990). Está se define como la parte de la materia orgánica en el suelo constituida por los microorganismos vivos, con tamaños entre 5 y 10 μm^3 y menores de 5 a 10 μm^3 (Alef y Nannipieri, 1995). La biomasa generalmente se expresa como mg de carbono por kilogramo de suelo, o también como μg de C por gramo de suelo seco.

El interés en estimar la biomasa microbiana se relaciona con su doble función como catalizador y como fuente (a través de la mineralización) /reservorio (a través de la inmovilización) en la transformación de nutrientes; su papel en la formación y estabilización de la estructura del suelo y como un indicador ecológico (Alef y Nannipieri, 1995). La biomasa microbiana del suelo (BMS) es uno de los componentes vivos esenciales de todos los ecosistemas terrestres. Esta regula muchos procesos críticos del ecosistema, incluyendo la descomposición de materiales orgánicos, su transformación y el reciclaje de nutrientes, además de la integración biofísica de la materia orgánica con las fases sólida, acuosa y gaseosa del suelo. A través de su interacción con otros organismos, por ejemplo, con la fauna y las raíces de las plantas, la biomasa microbiana del suelo también llega a ser vital en la regulación de la cantidad y calidad de componentes en el ciclo hidrológico y en las emisiones de los gases de invernadero. Debido a esos atributos, la biomasa microbiana debe ser considerada como un indicador importante en la determinación de la calidad del suelo (Franzluebbers, 1999).

Algunos factores ecológicos determinan la BMS y usualmente son responsables en gran parte de la variación espacial y temporal de la misma. La composición de las especies de plantas, principalmente a través de la producción primaria neta y de la calidad del

mantillo, puede afectar las mediciones de la biomasa microbiana junto con la cadena trófica en el suelo, donde las interacciones entre los distintos organismos pueden influir en la actividad microbiana (Carter *et al.*, 1999).

En general, las plantas sirven como una fuente de carbono para la comunidad microbiana y a su vez, los microorganismos proveen nutrimentos para el crecimiento de las plantas a través de la mineralización de los residuos de plantas y animales y de la materia orgánica del suelo (Srivastava & Singh, 1991).

La biomasa microbiana es el indicador más importante de la composición microbiana en el suelo, especialmente en combinación con un parámetro de actividad tal como la producción de CO₂ (Anderson & Domsch, 1993).

7.2. Carbono orgánico del suelo (COS)

El carbono orgánico del suelo está contenido en materiales que se han derivado de una variedad de fuentes biológicas (Johns *et al.* 2015). Gran parte del COS se deriva de las plantas y, en particular, de sus raíces, mientras que los microorganismos del suelo y los animales y sus excretas también contribuyen al stock de COS. El término COS a menudo se usa indistintamente con el término materia orgánica del suelo (MOS), a menudo conocido como humus, que se ha descrito como "el recurso natural más importante de nuestro mundo" (Paul 2016). Por lo tanto, COS es un proxy para SOM.

El carbono ingresa al stock de COS a través de los aportes de C a partir de la fijación fotosintética del dióxido de carbono atmosférico (CO₂) por la vegetación, la deposición de residuos microbianos y vegetales y las enmiendas orgánicas (estiércol animal, biosólidos) a los suelos agrícolas. El principal aporte de C al suelo es la producción primaria neta (NPP) como una fracción importante del CO₂ fijado durante la fotosíntesis de la planta por la producción primaria bruta (GPP) que se respira autotróficamente y se devuelve a la atmósfera. La NPP ingresa al suelo por rizodeposición y descomposición de la hojarasca de la planta, y la fracción principal se convierte de nuevo en CO₂ por la respiración del suelo y parte se pierde como metano (CH₄). Además de la descomposición microbiana mejorada por la alteración del suelo (por ejemplo, labranza), las pérdidas de C de los suelos están asociadas con la erosión, el

fuego, la cosecha y la lixiviación (Ciais *et al.* 2010). Los factores específicos del sitio (p. Ej., Clima, características fisicoquímicas, manejo del suelo y la vegetación) determinan el equilibrio entre la entrada de C y las pérdidas del suelo (Lorenz & Lal, 2016).

La dinámica del COS no se entiende completamente como el uso del suelo y los cambios en la cobertura del suelo, y el cambio climático afecta el stock de COS. Sin embargo, alrededor del 25 al 30% de las existencias de COS almacenadas en el metro superior del suelo pueden liberarse mediante el cultivo de suelos nativos, ya sea bajo vegetación de bosque o pradera (Houghton 2010). Por ejemplo, las reservas de COS a 1 m de profundidad disminuyen en un 42% cuando el bosque nativo y en un 59% cuando el pasto se convierte en tierra de cultivo, respectivamente (Guo & Gifford 2002). Por ejemplo, en las regiones tropicales, las pérdidas de COS de 25% a 36 cm de profundidad y de 30% a 48 cm de profundidad pueden ocurrir por la conversión del bosque primario en cultivos de tierra o cultivos perennes, respectivamente (método de masa de suelo equivalente; Don *et al.* 2011). Se han reportado pérdidas del 21% del COS a 39 cm de profundidad cuando el bosque tropical secundario se convierte en tierra de cultivo, pero no se observan cambios a 51 cm de profundidad cuando se convierte en cultivos perennes. Sin embargo, el 10.4% del COS puede perderse a una profundidad de 38 cm cuando las praderas tropicales se convierten en tierras de cultivo. En algunas situaciones, las existencias de COS aumentaron entre un 17.5% y una profundidad de 35 cm y entre un 50.3% y una profundidad de 44 cm cuando los pastizales o las tierras de cultivo se convierten en bosques secundarios, respectivamente. Cuando las tierras de cultivo tropicales se convierten en pastizales o barbechos, las reservas de COS pueden aumentar en un 25,7% a 40 cm de profundidad y en un 32,2% a 20 cm de profundidad, respectivamente (Don *et al.* 2011).

7.2.1. La importancia del carbono orgánico del suelo para los servicios de los ecosistemas derivados del suelo

Los ecosistemas proporcionan servicios ecosistémicos (SE) que se definen y clasifican de manera diferente. La Evaluación de los Ecosistemas del Milenio de 2005 agrupó los SE en cuatro categorías: (i) servicios de aprovisionamiento (alimentos directos o indirectos para humanos, agua dulce, madera, fibra y combustible); (ii) servicios de

regulación (regulación de gas y agua, clima, inundaciones, erosión, procesos biológicos como polinización y enfermedades); (iii) servicios culturales (estéticos, espirituales, educativos y recreativos); y (iv) servicios de apoyo (ciclo de nutrientes, producción, hábitat, biodiversidad) (MEA 2005). Se han realizado muchos estudios sobre el suelo y los SE con la mayoría de los estudios centrados en el aprovisionamiento y la regulación de los ES, y la mayoría de las investigaciones realizadas en Europa (Adhikari & Hartemink 2016). Los SE del suelo pueden definirse como los beneficios que las personas obtienen de los suelos (Dominati et al. 2010). Se deriva un valor económico significativo de los ES del suelo (Jónsson & Davíðsdóttir 2016). Los SE aprovisionados por los suelos están determinados principalmente por las propiedades centrales, incluidas la textura, la mineralogía y la materia orgánica (MO) (FAO e ITPS 2015).

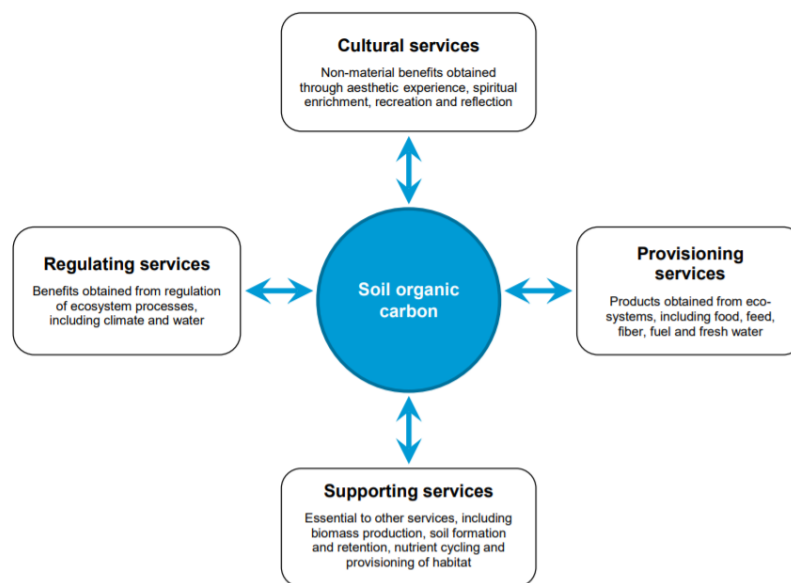


Figura 1. Categorías de servicios de los ecosistemas (SE) respaldados por carbono orgánico del suelo. Modificado de Franzluebbbers (2010), Millennium Ecosystem Assessment (2005) y Smith et al. (2015)

Las reservas de COS generan servicios ecosistémicos esenciales derivados del suelo, que incluyen filtración de agua, control de erosión, resistencia y estabilidad del suelo, conservación de nutrientes, desnaturalización e inmovilización de contaminantes, hábitat y fuente de energía para organismos del suelo, regulación de plagas y enfermedades, y adaptación y mitigación del cambio climático por secuestro de CO₂ atmosférico (Adhikari & Hartemink 2016; Franzluebbbers 2010; Lal et al. 2012) (Fig.1)

7.3. Cultivo de caña de azúcar y marco legal en Colombia

7.3.1. Cultivo de caña de azúcar

Existen diferentes versiones en cuanto al origen de la caña (*Saccharum officinarum L.*), por lo que algunos autores sostienen que pudo ser de países como la India, Nueva Guinea o Indochina (Osorio, 2007). Se habla de que a Colombia fue introducida por la ciudad de Cartagena en 1538; asimismo en el siglo XVI Sebastián de Belalcázar la trajo desde la isla de Santo Domingo y la sembró en el Valle del Cauca; en cuanto a la caña criolla se revela que llegó de las Guayanas en 1808, y en 1933 entró la variedad POJ 2878, una de las más importantes en el proceso panelero en el país actualmente (Patiño, 1976). Ahora bien, comparando la caña de azúcar y la panelera, se dice que no hay diferencias marcadas en cuanto a las variedades; no obstante, sí difiere la tecnología empleada y el objetivo en el proceso productivo (Sena-Corpoica, 1998). Sin embargo, en la producción de caña panelera se busca que las variedades tengan ciertas características como: un cultivo con resistencia al volcamiento, baja o nula floración, resistencia a la sequía, buenos rendimientos de caña, resistencia a plagas y enfermedades, alto contenido de sacarosa y alto contenido de jugos (Osorio, 2007).

En cuanto al proceso productivo en la caña panelera, se presentan en su mayoría cultivos en áreas menores y prevalece la mano de obra familiar; en la producción de caña de azúcar existe una mayor tecnificación, evidenciando un alto uso de insumos, y la cosecha se realiza por corte parejo, pues en la caña panelera se emplea el entresaque y algunos productores más tecnificados practican el corte parejo (DANE, 2017). En esta forma, una de las características más relevantes del cultivo de la caña panelera en el país es su área sembrada; según cifras de la Encuesta Nacional Agropecuaria para el año 2015, dentro de los cultivos permanentes, excluyendo a los frutales, se ubicó como tercero luego del café y el plátano, reportando un total de 167.711 hectáreas (ha) plantadas, y de estas 146.957 (ha) en edad productiva, de donde se obtuvo un total 990.908 toneladas (t) de panela. En Antioquia se registró la mayor participación en cuanto a producción con el 43,11 %, seguido de Cundinamarca con un 9,60 %, Santander con 9,51 %, Boyacá con 8,31 %, Nariño con 7,06 %, y Huila con un 4,59 %; los demás departamentos registraron participaciones inferiores al 3,80 %, tales como Cauca, Caldas, Norte de Santander, Tolima, Valle del

Cauca, Cesar, Risaralda, Quindío, Bolívar, Córdoba, La Guajira, Magdalena, Meta y Sucre (DANE, 2017).

Así, el cultivo se desarrolla bien en regiones con altitudes entre los 700 y 2.000 m. s. n. m., lo que corresponde a temperaturas que oscilan entre los 25 y 27 °C, pero con tolerancia a rangos que van de los 20 a 30 ° C. Además, es importante que se dé una precipitación o se suministre agua entre los 1.500 y 1.750 mm/año, preferiblemente con suelos francos y franco-arcillosos, profundos y bien drenados, con pH entre los 6,1 y los 7,7. En cuanto al brillo solar, la planta requiere en promedio de 5 a 8 horas diarias para una óptima actividad fotosintética, lo que contribuye a buenos rendimientos (DANE, 2017).

El cultivo de la caña panelera generalmente se siembra de dos formas: una mediante cajuelas,³ a la que se le practica el entresaque, con muy poca o sin mecanización, con bajas dosis o sin fertilización y pendientes fuertes; normalmente emplean mano de obra familiar y en áreas de 3 a 7 hectáreas. El otro sistema es con siembra en chorrillo,⁴ cosecha con corte parejo, mecanización en diferentes labores, uso de fertilizantes en mayores dosis, pendientes leves, cultivos con áreas superiores a 7 hectáreas y rendimientos mayores por su nivel tecnológico (Fedepanela, 2009). En cuanto al manejo agronómico, en el cultivo de la caña panelera se debe realizar en primer lugar la preparación del terreno, que consiste en la limpieza del lote, nivelación, construcción de canales, drenajes, surcos y, según el tipo de siembra, se hace la preparación sitio. Algunas de estas labores se pueden hacer de forma mecanizada, con tracción animal o manual, ya que la pendiente del terreno es un factor que determina su implementación. Entre tanto, en muchas zonas del país es necesario controlar el pH, ya que cuando los niveles son menores a 4,5 se toma la decisión de aplicar cal a fin de promover el buen desarrollo del cultivo (Tarazona, 2011).

El siguiente paso es realizar la siembra, para lo que es necesario contar con semilla seleccionada que normalmente se obtiene del mismo cultivo cortando los tallos en trozos, los cuales deben tener buenas condiciones sanitarias; estas cañas se disponen en el terreno dependiendo el sistema de siembra empleado, el nivel tecnológico y las condiciones topográficas del terreno, ya que se presenta en chorrillo o cajuelas. Existen diferentes variedades de caña desarrolladas por institutos y empresas del país o traídas del extranjero y se emplean básicamente de acuerdo con características de adaptabilidad, resistencia a plagas, enfermedades y producción. Entre las más empleadas están la POJ28- 78,

sembrada en los departamentos de Boyacá, Santander, Cundinamarca y Norte de Santander; RD75-11, SP701284, MZC74-275 y PR62-88, que se siembran en Antioquia, Llanos Orientales y algunas regiones de Santander; y otras como la CC8475 y la CC8592, cultivadas en el Valle del Cauca (DANE, 2017).

Es frecuente que algunos productores no realicen la fertilización o que esta se haga de manera orgánica aplicando gallinaza o pollinaza, entre otros acondicionadores que promueven un buen drenaje y aireación del suelo. En relación con la fertilización con compuestos de síntesis química, estos se suministran en diferentes dosis a los 3 o 4 meses de sembrado el cultivo, empleando principalmente urea para el aporte de nitrógeno, cloruro de potasio que suministra potasio y fosfato diamónico (DAP) para el fósforo (DANE, 2017).

7.3.2. Legislación para el sector azucarero y panelero del país

Erazo (2014) reporta en su trabajo que la guía ambiental para el subsector de caña de azúcar, en su versión final, emitido por ASOCAÑA y revisado por el Ministerio del medio ambiente, se ha convertido en una herramienta ágil que incide en el mejoramiento de la planeación y gestión ambiental de los productores de azúcar de caña, al tiempo que se constituye en un instrumento de apoyo para el control por parte de las autoridades ambientales competentes. Continúa diciendo que según ASOCAÑA, “el sector azucarero colombiano, desde los años 70’s, ha venido trabajando en forma concertada con las autoridades ambientales, en actividades de control y mejoramiento ambiental. El concepto de sostenibilidad resalta la importancia de mirar cualquier actividad productiva a largo plazo. El crecimiento de hoy no debe hacerse a costa del crecimiento del futuro y esto es válido en un negocio como el azucarero donde la rentabilidad es a largo plazo. Para lograr resultados económicos y efectivos en el manejo ambiental se impone la autoevaluación dentro de un mejoramiento continuo. Cumplir la norma hoy, no es suficiente para mejorar las condiciones de los recursos naturales. La optimización continúa en el uso del agua para riego, la regulación y las alternativas a las quemas de caña, el control biológico de plagas, variedades resistentes, el manejo racional de los agroquímicos, que incluye la aplicación de maduradores y fertilizantes, la optimización en los consumos de agua en fábrica, el control de las emisiones atmosféricas de las chimeneas y utilización de subproductos; son algunas actividades realizadas por el sector. Otro ámbito de trabajo importante es lo relacionado con la conservación de las fuentes de aguas o cuencas hidrográficas, donde

se trabaja en la participación comunitaria, la educación ambiental y los sistemas de producción sostenibles. El sector azucarero colombiano en noviembre de 1996 firmó el convenio de concertación para una producción limpia con el Ministerio del Medio Ambiente, las Corporaciones Autónomas Regionales de Cauca, Valle del Cauca y Risaralda y la Sociedad Civil representada por la Comunidad de Palmira. Posteriormente, adhirió la Corporación Autónoma Regional de Caldas. Este ha sido uno de los logros más importantes dentro del campo ambiental para este sector y está orientado a lograr las presiones sobre el medio ambiente aplicando las mejores prácticas ambientales y la eco – eficiencia. Como parte de este proceso, el Ministerio y la Sociedad de Agricultores de Colombia (SAC) suscribieron un convenio de cooperación con el objeto de elaborar un conjunto de guías ambientales para diversos subsectores agropecuarios, en el marco de “Política Ambiental Nacional de Producción Más Limpia”.

POLITICA AMBIENTAL PARA EL SUBSECTOR PANELERO

El subsector panelero en Colombia tiene en la actualidad varios instrumentos de política ambiental en procura de proteger los recursos naturales y asegurar la sostenibilidad de las actividades productivas. A continuación, se presentan los principales instrumentos y estrategias en materia ambiental.

GUÍA AMBIENTAL PARA EL SUBSECTOR PANELERO

Convenio Ministerio del Medio Ambiente, Sociedad de Agricultores de Colombia (SAC) y la Federación Nacional de productores de Panela (FEDEPANELA), en el año 2000, que buscaba en su momento:

- Involucrar a los productores paneleros en el mejoramiento ambiental de la actividad y la disminución de los impactos ambientales.
- Unificar criterios para la gestión ambiental del subsector
- Facilitar la gestión de las autoridades ambientales
- Presentar los aspectos relevantes de la planificación ambiental panelera

- Presentar medidas típicas para manejar, prevenir, mitigar y corregir, los impactos ambientales generados por la actividad en cada una de las etapas.
- Difundir y propiciar entre los productores el conocimiento y cumplimiento de la legislación ambiental
- Proponer opciones tecnológicas de manejo para alcanzar una producción más amigable con el medio ambiente.

NAMA – PANELA

Esta Estrategia se encuentra en implementación desde el año 2011 y en formulación al año 2017, tiene como principal objetivo ejecutar estrategias de mitigación de Gases Efecto Invernadero (GEI) y efectos contaminantes en el subsector panelero, por medio de la reconversión productiva en la siembra y el manejo de cultivos, la reconversión tecnológica de trapiches, y el aprovechamiento de subproductos, teniendo en cuenta variables energéticas, técnicas, ambientales, económicas y sociales asociadas a la cadena de procesamiento de la caña panelera.

RESOLUCIÓN SANITARIA NÚMERO 779 DE 2006

Esta resolución tiene por objeto establecer el reglamento técnico a través del cual se señalan los requisitos sanitarios que deben cumplir los establecimientos denominados trapiches paneleros y centrales de acopio de mieles procedentes de trapiches que fabriquen, procesen, envasen, transporten, expendan, importen, exporten y comercialicen la panela con destino al consumo humano, en el territorio nacional, con el fin de proteger la salud y seguridad humana y prevenir las prácticas que puedan inducir al error a los consumidores. Esta Resolución ha sido modificada parcialmente por otras resoluciones como la 3462 de 2008 sobre condiciones sanitarias de los trapiches y requisitos de

exportación de la panela, la 3544 de 2009 sobre empaques y rotulado y la 4121 de 2011 hace precisiones sobre las especificaciones sanitarias que deben cumplir los trapiches y en septiembre de 2011 entró a regir la obligatoriedad del empaque individual de la panela.

CONSTITUCIÓN POLÍTICA NACIONAL DE COLOMBIA DE 1991

La cual recoge gran parte de los enunciados sobre el manejo y conservación del medio ambiente Las Leyes del Congreso de la República, derechos con fuerza de ley y decretos ley del Gobierno Nacional, constituyen las normas básicas y políticas a partir de las cuales se desarrolla la reglamentación específica o normativa. La competencia para los trámites ambientales ante las autoridades competentes, las cuales regulan y establecen requerimientos específicos para la ejecución de proyectos agrícolas. La Constitución, establece un conjunto importante de derechos y deberes del Estado, las instituciones y los particulares, en materia ambiental, enmarcado en los principios del desarrollo sostenible. Este mandato constitucional, propició así mismo la expedición de la Ley 99 de 1993, que creó el Sistema Nacional Ambiental y el Ministerio del Medio Ambiente (Erazo, 2014).

APROBACIÓN DEL CÓDIGO NACIONAL DE LOS RECURSOS NATURALES RENOVABLES Y DE PROTECCIÓN AL MEDIO AMBIENTE (1974)

Se dio inicio a la gestión ambiental en el país en cabeza del Inderena. Posteriormente, con el Código Sanitario Nacional aprobado en 1978, se establecieron los lineamientos generales en materia de regulación de la calidad del agua y el aire, así como en el manejo de los residuos Ambiente (Erazo, 2014).

EL SISTEMA NACIONAL AMBIENTAL (SINA)

Representa un conjunto de orientaciones, normas, actividades, recursos, programas e instituciones que permiten la puesta en marcha de los principios generadores ambientales. Del SINA no forman parte solamente las autoridades ambientales como las corporaciones

autónomas regionales o los DAMAS, sino también todas aquellas instituciones que de manera directa o indirecta se relacionan con la gestión ambiental Ambiente (Erazo, 2014).

7.4. Métodos para evaluar la dinámica del carbono orgánico del suelo

Idealmente, las existencias de COS deben medirse mediante un método que no requiera muestreo de suelo, implique costos relativamente bajos y cubra grandes áreas con precisión (Johns *et al.* 2015). Sin embargo, analizar el COS por un método único que se puede aplicar en una amplia gama de situaciones diversas es un desafío importante. Además, el COS no se distribuye uniformemente en grandes áreas, profundidades, tipos de suelo y posiciones del paisaje (Jandl *et al.* 2014). Por lo tanto, existe un gran interés en desarrollar varios métodos para medir y evaluar la dinámica del COS.

Los cambios temporales en el COS y su dinámica pueden evaluarse mediante inventarios de suelo repetidos o programas de monitoreo en sitios representativos (i) antes y después de los cambios en el uso del suelo y / o la cobertura del suelo o (ii) mediante el muestreo repetido del suelo durante intervalos regulares de tiempo cuando no tales cambios ocurrieron. La concentración total de carbono en el suelo (TSC) puede medirse en un laboratorio (*ex situ*) o mediante mediciones regulares utilizando métodos de campo *in situ* no destructivos, pero no existe un enfoque estandarizado (Olson *et al.* 2014). De manera similar, tampoco existen enfoques estándar para métodos de muestreo de suelo eficientes a escala de unidad de granja o paisaje (Stockmann *et al.* 2013). Los inconvenientes también están asociados con la extrapolación de los datos de COS de varios sitios de muestreo dentro de un área en la medida deseada (de Gruijter *et al.* 2016). Un desafío importante de cualquier programa de monitoreo de COS es la contabilidad creíble de la variabilidad a pequeña escala de las propiedades del suelo, como el contenido de fragmentos de roca, la densidad aparente y la concentración de C (Jandl *et al.* 2014). Además, no hay consenso sobre la profundidad del suelo a la que se deben realizar mediciones y estimaciones de las existencias de COS (Lal *et al.* 2000). La mayoría de los suelos se muestrean a una profundidad de 0.3 m o menos, y los muestreos por debajo de 1 m son una excepción. Sin embargo, el conocimiento sobre el stock de COS y su dinámica a profundidades más profundas del subsuelo es importante para varios tipos de suelos y biomas. Por lo tanto, los

horizontes del subsuelo también se deben muestrear para una evaluación robusta de las reservas de COS en todo el suelo (Jandl *et al.* 2014).

Después del muestreo, los suelos se preparan para análisis de laboratorio mediante la eliminación de restos de tejidos de plantas y animales, se muelen suavemente y se tamizan a través de un tamiz de 2 mm. Las muestras de suelo procesadas se secan al aire o en un horno a temperaturas <40 °C. Las muestras se muelen a bolas y se homogenizan antes de medir la concentración de COS.

Las mediciones de la densidad aparente del suelo, los incrementos de profundidad para el muestreo del suelo y los fragmentos de rocas y raíces son necesarios para la expresión de los datos de COS en base al área, es decir, para el cálculo del stock de COS (Mg C ha⁻¹). La densidad aparente del suelo puede estimarse / medirse *ex situ* o predecirse (por ejemplo, mediante funciones de pedotransferencia, (Calhoun *et al.* 2001). Sin embargo, las funciones de pedotransferencia tienen errores más grandes que los métodos de estimación y medición (Walter *et al.* 2016). Recientemente, se propuso una técnica que combina la atenuación de rayos gamma y la espectroscopía visible de infrarrojo cercano (vis-NIR) para medir *ex situ* la densidad total de núcleos de suelo de 1 m que se muestrean recientemente, húmedos y en condiciones de campo (Lobsey & Viscarra Rossel, 2016). Sin embargo, también debe desarrollarse un método práctico y robusto para detectar grava. Una evaluación precisa del volumen del suelo y densidad aparente son tan importantes como las de la concentración de C del suelo a granel (Jandl *et al.* 2014).

Tabla 1. Métodos para medir COS sus ventajas, desventaja y aplicaciones actuales. Extraída de: Chatterjee *et al.* 2009; Johns *et al.* 2015

MÉTODO	VENTAJAS	DESVENTAJAS	MEJORES APLICACIONES ACTUALES	REFERENCIA
<i>Walkley-Black oxidación húmeda</i>	Estándar previamente utilizado; barato; pequeñas interferencias de carbonatos	Mide la porción COS; oxidación incompleta - se necesita factor de oxidación; químicos dañinos; interferencias de cloruros, óxidos de Mn y Fe ²⁺	Evaluación aproximada rápida	Walkley y Armstrong Black (1934)

<i>Pérdida de peso por ignición oxidación seca</i>	Barato	Mide la porción COS; interferencias de carbonatos (> 400 °C) y del agua entre redes de estructuras arcillosas y minerales	Disponibilidad del equipo está restringida; suelos salinos;	Ball (1964)
<i>Combustión en seco automatizada.</i>	Estándar actual: confiable, rápido	Medidas TSC; costoso; alto uso de energía; interferencias de carbonatos	Gran cantidad de muestras; suelos no calcáreos; suelos sin limas añadidas	Liebig (1831)
<i>Espectroscopía de reflectancia de infrarrojo medio (MIR) y infrarrojo cercano (NIR)</i>	Alto rendimiento; uso potencial en el campo y para teledetección	Mide la porción de COS; se necesitan datos de laboratorio de referencia apropiados, correctos y coincidentes; además, se necesita un número relativamente grande de muestras para la calibración; incapacidad para tratar directamente con interferencias de muestras de origen desconocido de cuarzo, caolín y carbonatos (MIR), y de componentes que no son SOC (NIR)	Gran cantidad de muestras; análisis en tipos de suelo similares; donde la molienda del suelo (MIR) y la precisión no son un problema crítico (NIR).	Bowers & Hanks (1965)
<i>Espectroscopía de descomposición inducida por láser (LIBS)</i>	Alto rendimiento; uso potencial en el campo	Medidas TSC; Numerosas curvas de calibración dependientes de otro método; pequeño volumen de suelo analizado; riesgos para la salud; interferencias de carbonatos, hierro y agua	Análisis rápido secado, muestras molidas; suelos no calcáreos	Ebinger & col. (2003)
<i>Dispersión de neutrones inelásticos (INS)</i>	Análisis en el campo	Medidas TSC; mejores resultados para suelos ricos en C; riesgos para la salud; interferencias de carbonatos.	Análisis directamente sobre TSC a escala de campo.	Wielopolski <i>et al.</i> (2008)

Teledetección en el aire	Usar sobre un área grande	Mide la superficie COS; índices sustitutos necesarios	Aplicaciones a gran escala en suelos desnudos.	Chen <i>et al.</i> (2000)
--------------------------	---------------------------	---	--	---------------------------

Los métodos *ex situ* implican la medición de la concentración de C mediante métodos de oxidación secos o húmedos (Tabla 1; Chatterjee *et al.* 2009). Los métodos de oxidación representan la mayoría de los análisis de COS, pero tienen varias limitaciones e interferencias que deben abordarse para obtener mediciones precisas de COS (Johns *et al.* 2015). Los métodos de oxidación húmeda implican la oxidación de COS mediante soluciones acidificadas o alcalinas de permanganato o dicromato, o peróxido de hidrógeno junto con ácido crómico (Johns *et al.* 2015). El CO₂ evolucionado se mide por métodos gravimétricos, titrimétricos o manométricos. Por ejemplo, el método Walkley-Black, ampliamente utilizado anteriormente, implicaba calentar la muestra de suelo con una mezcla K₂Cr₂O₇-H₂SO₄-H₃PO₄ (Walkley & Black 1934). El exceso de dicromato se titula nuevamente con sulfato de amonio ferroso. Sin embargo, entre las principales desventajas de este método están los problemas con la eliminación segura o el tratamiento de los restos de cromo VI (carcinógeno y oxidante fuerte) y, lo más importante, la recuperación variable de COS debido a interferencias. Otros métodos de oxidación húmeda tampoco son lo suficientemente precisos. De manera similar, el método de oxidación en seco de pérdida de peso por ignición (LOI) ampliamente utilizado anteriormente no es confiable, porque los carbonatos a temperaturas > 400 °C y el agua entre redes de estructuras de arcilla y minerales interfieren con las mediciones de COS (Johns *et al.* 2015).

Actualmente, el método estándar o de referencia más confiable es la técnica de combustión seca automatizada. Este método implica mezclar la muestra con catalizadores o acelerador y calentar en un horno de resistencia o inducción entre 950 °C y 1800 °C en una corriente de O₂ para convertir todo el COS en CO₂. El CO₂ puede determinarse por conductividad térmica, gravimétrica o por espectrometría de absorción infrarroja (Nelson & Sommers 1996). Sin embargo, el método de combustión seca mide las concentraciones de COS con precisión solo en ausencia de SIC (Loeppert & Suarez 1996). Por lo tanto, algunos instrumentos están diseñados para un tratamiento automatizado de muestras (acidificación) que contienen SIC para la determinación de COS por la diferencia (Johns *et al.* 2015). Además, las principales desventajas de los modernos instrumentos de combustión en seco

son los altos costos iniciales, el costo de los consumibles y la alta energía utilizada para operar la cámara de reacción a temperaturas de 950 °C o más (Johns *et al.* 2015).

Los métodos analíticos *in situ* se basan en el color (reflectancia visible), mediciones espectroscópicas en el campo o por teledetección (Tabla 1; Chatterjee *et al.* 2009). Las imágenes de cámaras digitales, incluidas las obtenidas con teléfonos móviles, tienen cierto potencial para la determinación del COS por el enfoque del color, pero también se enfrentan a varias limitaciones (Johns *et al.* 2015). Los métodos espectroscópicos incluyen espectroscopía de reflectancia visible en el suelo, infrarrojo cercano y medio (Vis-NIR-MIR) (McCarty *et al.* 2002), espectroscopía de ruptura inducida por láser (LIBS; Ebinger *et al.* 2003) y dispersión inelástica de neutrones (INS; Wielopolski *et al.* 2008).

Entre los métodos de espectroscopía de reflectancia, se podrían lograr predicciones menos exitosas de COS con la región Vis (Soriano Disla *et al.* 2014). En contraste, se han reportado calibraciones moderadamente exitosas principalmente para fracciones C basadas en modelos combinados de NIR-MIR con regresión de mínimos cuadrados parciales (PLSR). En general, las predicciones de MIR para C (inorgánico), COS y MOS, según los informes, funcionan mejor que NIR y Vis-NIR. Además, se informan predicciones moderadamente exitosas de COS utilizando dispositivos portátiles Vis-NIR y NIR en condiciones de campo (Soriano-Disla *et al.* 2014).

La espectroscopía de reflectancia MIR (2500–25000 nm) y NIR (400–2500 nm) utiliza regiones espectrales en la radiación reflejada difusamente del suelo iluminado para cuantificar el suelo C (Chatterjee *et al.* 2009). La técnica se utiliza principalmente en el laboratorio, pero su aplicación *in situ*, así como desde sensores aéreos y espaciales, está creciendo (Nocita *et al.* 2015). Sin embargo, la capacidad de desarrollar una calibración confiable para C orgánico cuando los carbonatos están presentes sigue siendo una pregunta abierta (Bellon Maurel & McBratney 2011). Específicamente, los espectros MIR de la mayoría de los suelos están dominados por los espectros de fracciones inorgánicas como carbonatos, arcillas y sílice (Reeves 2012). Por lo tanto, la espectroscopía de reflectancia MIR puede no ser práctica para el uso en el sitio ya que las muestras de suelo deben procesarse (secarse y triturarse) en el laboratorio antes del análisis espectral (Reeves 2010). De manera similar, la principal limitación de la espectroscopía de reflectancia NIR es la necesidad continua de calibración y control de calidad (Bowers &

Hanks 1965). La precisión del modelo de predicción, en particular, actualmente es insuficiente para que la espectroscopía de reflectancia NIR reemplace el análisis de laboratorio de rutina y / o realice mediciones in situ, sea cual sea el tipo de suelo (Gobrecht *et al.* 2014). Además, la radiación IR penetra solo 0.2-1 cm en la matriz del suelo, y existe mucha incertidumbre sobre la determinación in situ a profundidades más profundas del suelo.

7.5. Evaluación de biomasa microbiana en caña de azúcar y producción de panela

El componente microbiológico del suelo contribuye al mejoramiento de las propiedades físicas, químicas y biológicas necesarias para el mantenimiento de la fertilidad (Sánchez y Gómez, 2001). Para su estudio se han desarrollado varias metodologías, entre las que se encuentran las siguientes. 1) métodos basados en siembra en placa con medios de cultivo; 2) métodos empleando microscopía (Zvyangintsev *et al.*, 1984); 3) respiración inducida por carbohidratos (Anderson & Domsch 1980); 4) método de fumigación con cloroformo en incubación o extracción con sulfato de potasio (Brookes *et al.* 1985, Azam *et al.* 2003) y 5) métodos empleando técnicas de biología molecular (Leckie *et al.* 2004; Dick 2009), entre los más importantes. La diversidad de métodos está relacionada con la complejidad que se presenta en el estudio de las comunidades microbianas del suelo y su actividad (Azam *et al.* 2003; Dick, 2009).

De acuerdo con lo anterior, el método de fumigación y extracción propuesto por Brookes *et al.* (1985), es de los más adecuados para la determinación de la biomasa microbiana en suelos sometidos a diferentes prácticas agrícolas y dosis de fertilizantes químicos (Franzluebbers *et al.*, 1995; Bouzaiane *et al.*, 2002; Dick 2009). Además, el incremento de la producción de residuos resultantes de la agroindustria exige la búsqueda de nuevas alternativas para su manejo. Por lo anterior, en un estudio de Rosero y colaboradores en 2013, evaluaron la biomasa microbiana (μg de C/g de suelo) a partir de muestras de 20 g de suelo seco, según el método de fumigación extracción con el objetivo de estudiar los efectos de vinazas sobre bacterias rizosféricas y en la actividad-CO₂ y biomasa-C microbiana de un suelo *Pachic Haplustoll*.

El principio del método de Fumigación y extracción de Brookes *et al.* (1985): para evaluar la biomasa microbiana en suelos agrológicos se basa en, la exposición de la microflora del suelo a una atmósfera de cloroformo por espacio de 24 horas, los microorganismos del

suelo son lizados, pero los componentes inanimados de la materia orgánica no se afectan. El C y N orgánico extraído en una solución de sulfato de potasio (0,5 M) es determinado en muestras de suelo fumigadas y no fumigadas, el incremento en las cantidades de C y N determinado en las muestras fumigadas con respecto a los controles es considerado como carbono y nitrógeno de la biomasa microbiana del suelo. El método es usualmente nombrado como “fumigación extracción”.

En este contexto, la investigación sobre los medios apropiados para la mantener la calidad del suelo tropical productivo ha aumentado significativamente. Esto permite encontrar prácticas prometedoras como la labranza y los sistemas de cobertura. De acuerdo con lo anterior, Sanginga *et al.* (1992) propone que un ambiente adecuado para la actividad biológica es producto del mantenimiento de la cobertura vegetal del suelo y un extenso crecimiento de raíces perennes. Además, la minimización de las perturbaciones bajo labranza cero y el retorno de hojarasca por medio del uso de leguminosas como coberturas verdes. Acorde con Singh & Yadava (2006) la distribución espacial de la biomasa microbiana en relación con el uso del suelo en zonas del subtrópico más específicamente en el noroeste de la India tiene un comportamiento estacional. Además, la adición de compuestos orgánicos como la vermicomposta a suelos agrícolas incrementa la capacidad de retención de carbono del suelo (Sosa, 2012). Estos agregados tienen un efecto positivo en el mejoramiento de la calidad del suelo. También, la entrada de residuos, por ejemplo, la quinua puede influir sobre la biomasa microbiana positivamente (Caballero, 2012). Así, el grado de la actividad microbiana tuvo una correlación positiva con el secuestro de carbono, comprobando la importancia de la BM como indicador de calidad de suelo. También, el purín de estiércol es una alternativa a los fertilizantes químicos y una fuente importante de nutrientes para algunos tipos de pastos perennes. El purín de estiércol entero es un material que contiene entre el 90% y 98% de agua y pequeñas cantidades de nutrientes. Este, se aplica a los forrajes en las granjas lecheras (Yichao, *et al.*, 2017). Las aplicaciones multianuales de purines de estiércol comparados con la aplicación de fertilizantes minerales pueden aumentar la biomasa y la actividad microbiana del suelo (Neufeld *et al.*, 2017).

Por otro lado, el efecto del carbono orgánico y el nitrógeno del suelo sobre la actividad microbiana del suelo a mayor profundidad está influenciado por la disminución de la entrada de materia orgánica (Cui & Holden, 2015). Las propiedades fisicoquímicas del suelo se

pueden considerar una herramienta importante para evaluar la salud del suelo, que además forma una base para la actividad biológica en el suelo. Estas propiedades del suelo son comparables en usos idénticos y, por lo tanto, reflejan propiedades microbianas similares del suelo. Sin embargo, los cambios en los tipos del suelo y sus efectos sobre las propiedades fisicoquímicas y microbianas del suelo son poco claros (Dong Liu *et al.*, 2018). Según estos autores, los diferentes usos del suelo como: tierras de cultivo, huertos, pastizales y tierras abandonadas sirven como factores horizontales, mientras que los suelos a 0-10 cm, 10-30 cm y 30-60 cm de profundidad son utilizados como factores verticales para acceder a las propiedades fisicoquímicas y microbianas. Los resultados indican además que, entre todas las propiedades del suelo en diferentes tipos de uso de la tierra, la conductividad eléctrica, el nitrógeno mineralizable y el carbono de biomasa microbiana son buenos índices discriminatorios. Finalmente, las diferencias en los tipos de uso del suelo se reflejan en las propiedades fisicoquímicas del suelo que son los impulsores reales de las propiedades microbianas del suelo. Por esto se consideran herramientas útiles en los estudios relacionados con la calidad del suelo, el manejo del suelo y su sostenibilidad a largo plazo (Yichao, *et al.*, 2017).

8. CONCLUSIONES

El COS es crucial para el desempeño de los ecosistemas terrestres.

El aumento de las existencias de COS aumenta la seguridad alimentaria y contribuye a la adaptación y mitigación del cambio climático.

La degradación del suelo debe evaluarse mediante un índice compuesto de degradación del suelo que incluya datos sobre COS entre otras propiedades del suelo y que además sea en lo posible un método *in situ*.

La degradación de la Tierra debe evaluarse mediante un índice compuesto de degradación de la tierra que incluya datos sobre COS entre otros datos sobre las propiedades del suelo, la cobertura del uso de la tierra y la productividad de la tierra.

9. BIBLIOGRAFÍA

- Adhikari, K., Hartemink, A.E. (2016): Linking soils to ecosystem services — A global review. *Geoderma* 262: 101-111.
- Alef, K. and P. Nannipieri. (1995). Microbial biomass. **In:** Alef, K. and P. Nannipieri. (Eds). *Methods in applied soil microbiology and biochemistry*. Academic Press. Arcourt Brace and Company, Publishers. p. 375.
- Anderson, T. H. and K. H. Domsch. (1993). The metabolic quotient for CO₂ (qCO₂) as a specific activity parameter to assess the effects of environmental conditions, such as pH, on the microbial biomass of forest soils. *Soil Biol. Biochem.* 25:393-395.
- Azam, F., Fenchel, T., Field, J.G., Gray, J.S., Meyer-Reil, L.A., Thingstad, F., 2003. The ecological role of water-column microbes in the sea. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 10, 257–263
- Ball, D.F. (1964): Loss-on-ignition as an estimate of organic matter and organic carbon in non-calcareous soils. *J. Soil Sci.* 15: 84–92.
- Bastida, F.; Zsolnay, A.; Hernández, T.; García, C. (2008). Past, Present and Future of soil quality indices: A biological perspective. *Geoderma.* 147:159-17.
- Beare, M; Wilson, P; Fraser, P; Butler, R. (2002). Management effects on straw decomposition. *Soil Science.American Society. (EE. UU) (66):* 848-857.
- Bellon-Maurel, V., McBratney, A. (2011): Near-infrared (NIR) and mid-infrared (MIR) spectroscopic techniques for assessing the amount of carbon stock in soils - Critical review and research perspectives. *Soil Biol. Biochem.* 43: 1398-1410.
- Bouzaiane, O; Hassen, A; Jedidi, N. 2002. Détermination de la biomasse C et N par la méthode de fumigation extraction dans un sol amende de résidus organiques. In *International Symposium on Environmental Pollution Control and Waste Management (Proceedings)*. EUPCOWM. Tunis. 416 p.
- Bowers, S.A., Hanks, R.J. (1965): Reflection of radiant energy from soils. *Soil Sci.* 100: 130–138.
- Brookes P., Cayuela M., Contin M., De Nobili M., Kemmitt S., Mondini C. (2008). The mineralisation of fresh and humified soil organic matter by the soil microbial biomass. *Waste Management* 28(4):716-722.
- Brookes, PC; Landman, A; Pruden, G; Jenkinson DS. 1985. Chloroform fumigation and the release of soil nitrogen; a rapid direct extraction method to measure microbial biomass nitrogen in soil. *Soil Biology and Biochemistry* 17:837-842

- Caballero, A. 2012. Trabajo de grado para obtener el título de Ingeniera Agrónoma. Universidad mayor de San Andrés facultad de agronomía carrera de ingeniería agronómica. La Paz, Bolivia.
- Cui, J., Holden, N. 2015. The relationship between soil microbial activity and microbial biomass, soil structure and grassland management. *Soil and Tillage Research* 146.
- Calhoun, F.G., Smeck, N.E., Slater, B.L., Bigham, J.M., Hall, G.F. (2001) Predicting bulk density of Ohio soils from morphology, genetic principles, and laboratory characterization data. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 65: 811–819.
- Castro, R., Sierra, A., Mojica, J., Carulla, J., Lascano, C. (2017). Efecto de especies y manejo de abonos verdes de leguminosas en la producción y calidad de un cultivo forrajeo utilizado en sistemas ganaderos del trópico seco. *Archivos de Zootecnia*, 66 (253), 99-106.
- Carrillo, P. (1985). Manual de laboratorio de suelos. Federación Nacional de Cafeteros de Colombia. Centro Nacional de Investigaciones de Café. 111 p.
- Carter, M. R., E. G. Gregorich, D. A. Angers, M.H. Beare, G. P. Sparling, D. A. Wardle and R. P. Voroney. (1999). Interpretation of microbial biomass measurements for soil quality assessment in humid temperate regions. *Can. J. Soil. Sci.* 79:507-520.
- Chatterjee, A., Lal, R., Wielopolski, L., Martin, M.Z., Ebinger, M.H. (2009): Evaluation of Different Soil Carbon Determination Methods. *Crit. Rev. Plant Sci.* 28: 164-178.
- Chen, F., Kissel, D.E., West, L.T., Adkins, W. (2000): Field-scale mapping of surface soil organic carbon using remotely sensed imagery. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64: 746–753.
- Ciais, P., Wattenbach, M., Vuichard, N., Smith, P., Piao, S.L., Don, A., Luysaert, S., Janssens, I.A., Bondeau, A., Dechow, R., Leip, A., Smith, P.C., Beer, C., Van Der Werf, G.R., Gervois, S., Van Oost, K., Tomelleri, E., Freibauer, A., Schulze, E.D., CARBOEUROPE Synthesis Team (2010): The European carbon balance. Part 2: croplands. *Glob. Change Biol.* 16: 1409-1428.
- Centro Nacional de Investigaciones de Café (CENICAFÉ). Protocolo para determinar la materia orgánica. Caldas, Colombia. En línea: <http://biblioteca.cenicafe.org/bitstream/10778/803/4/C.%20Materia%20org%C3%A1nica.pdf>
- Cerri, C; Andreux, F; Eduardo, B. (1992). O Ciclo do Carbono no Solo. In: Cardoso, E; TSAL, S; NEVES, M. *Microbiología do Solo*. Campinas, Brasil. SBCS. 73-90 p.
- Cosentino, D; A Costantini; Un Segat & M Fertig. (1998). Variaciones en carbono orgánico, carbono de biomasa microbiana y su relación con algunas propiedades físicas de un suelo de pampa argentino bajo tres sistemas diferentes de labranza. *Pesquisa Agropecuária Brasileira* 33: 981-986.

- Costantini, A; D Cosentino & A Segat. (1996). Influencia de los sistemas de labranza en las propiedades biológicas de un suelo típico de Argiudoll en maíz continuo en el centro de Argentina. *Soil Till Res* 38: 265-271.
- Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE). (2017). Particularidades del cultivo de la caña panelera (*Saccharum officinarum* L) en Colombia. Boletín mensual Insumos y Factores Asociados a la Producción Agropecuaria. Núm 57. Recuperado de: https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/agropecuario/sipsa/Bol_Insumos_mar_2017.pdf
- de Gruijter, J.J., McBratney, A.B., Minasny, B., Wheeler, I., Malone, B.P., Stockmann U. (2016): Farm-scale soil carbon auditing. *Geoderma* 265: 120-130.
- Dick, R. (2009). Lecture on Soil Bacteria in Soil Microbiology, Personal collection of R. Dick, The Ohio State University School of Environment and Natural Resources, Columbus.
- Don, A., Schumacher, J., Freibauer, A. (2011): Impact of tropical land-use change on soil organic carbon stocks – a metaanalysis. *Glob. Change Biol.* 17: 1658-1670.
- Dominati, E., Patterson, M., Mackay, A. (2010): A framework for classifying and quantifying the natural capital and ecosystem services of soils. *Ecol. Econ.* 69: 1858–1868.
- Dong Liu, Yimei Huang, Shaoshan An, Hanyin Sun, Parag Bhople, Zhiwei Chen 2018. Soil physicochemical and microbial characteristics of contrasting land-use types along soil depth gradients, *CATENA*, Volume 162, Pages 345-353
- Ebinger, M.H., Norfleet, M.L., Breshears, D.D., Cremers, D.A., Ferris, M.J., Unkefer, P.J., Lamb, M.S., Goddard, K.L., Meyer, C.W. (2003): Extending the applicability of laser-induced breakdown spectroscopy for total soil carbon measurement. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 67: 1616–1619.
- Erazo J. Identificación de la Planeación Estratégica Financiera de la Inversión de Mitigación del Impacto Medio Ambiental Causado por el Ingenio Azucarero Manuelita, al Recurso Hídrico en el Valle del Cauca. Bogotá-Colombia. (2014). Universidad Militar Nueva Granada.
- FAO, ITPS (2015): Status of the World's Soil Resources (SWSR) – Main Report. Food and Agriculture Organization of the United Nations and Intergovernmental Technical Panel on Soils, Rome, Italy.
- FAO. (2017). Proceedings of the global symposium on soil organic carbon. <http://www.fao.org/3/a-i7565e.pdf>
- Federación Nacional de Productores de Panela, Fedepanela. (agosto de 2009). Manejo agronómico de la caña panelera. Bogotá.

- Franzluebbers, A., Fons, F., Zuberger, A. (1995). Tillage and Crop Effects on Seasonal Soil Carbon and Nitrogen Dynamics. *Soil Science Society of American Journal* (59) No 6: 1618-1624.
- Franzluebbers, A. J. (1999). Introduction to Symposium _ Microbial Biomass: Measurement and role in soil quality. *Can. J. Soil Sci.* 79:505-506.
- Franzluebbers, A.J. (2010): Will we allow soil carbon to feed our needs? *Carbon Manage.* 1: 237-251. Gardi, C., Tomaselli, M., Parisi, V., Petraglia, A., Santini, C. (2002): Soil quality indicators and biodiversity in northern Italian permanent grasslands. *Europ. J. Soil Biol.* 38: 103–110
- Galvez, A., Sinicco, T., Cayuela, M.L., et al., (2012). Short term effects of bioenergy byproducts on soil C and N dynamics, nutrient availability and biochemical properties. *Agric. Ecosyst. Environ.* 160, 3–14.
- Galvis, J., Ballesteros, M. (2005). Evaluación de parámetros de calidad para la determinación de carbono orgánico en suelos. *Revista Colombiana de Química.* Volumen 34, número 2. Pp 201-209. Bogotá, Colombia.
- Gifford, R.M., (1994). The global carbon cycle: A viewpoint on the missing sink. *Aust. J. Plant Physiol.* 21, 1-15.
- Guo, L.B., Gifford, R.M. (2002): Soil carbon stocks and land use change: a meta analysis. *Glob. Change Biol.* 8: 345-360.
- Hernández, T.; Garcia, C. (2003). Estimación de la respiración microbiana del suelo. *Técnicas de Análisis de Parámetros Bioquímicos en suelos. Medida de Actividades Enzimáticas y Biomasa Microbiana.* Editorial MundiPrensa. Madrid (España). p.322-324
- Houghton, R.A. (2010): How well do we know the flux of CO₂ from land-use change? *Tellus* 62B: 337-351.
- Hu, S., Coleman, D.C., Carroll, C.R., Hendrix, P.F., Beare, M.H., (1997). Labile soil carbon pools in subtropical forest and agricultural ecosystems as influenced by management practices and vegetation types. *Agric. Ecosyst. Environ.* 65 (1), 69–78.
- Insam, H. 1990. Are the soil microbial biomass and basal respiration governed by the climatic regime?. *Soil Biol. Biochem.* 22:525-532.
- Instituto Colombiano Agropecuario. (2014). Noticias en línea: El ICA capacitó a productores de caña panelera en manejo integrado de plagas en Cundinamarca. Recurso en línea: [https://www.ica.gov.co/Noticias/Agricola/2013-\(1\)/El-ICA-capacito-a-productores-de-cana-panelera-en.aspx](https://www.ica.gov.co/Noticias/Agricola/2013-(1)/El-ICA-capacito-a-productores-de-cana-panelera-en.aspx)
- Jandl, R., Rodeghiero, M., Martinez, C., et al. (2014): Current status, uncertainty and future needs in soil organic carbon monitoring. *Sci. Tot. Environ.* 468-469: 376-383.

- Jenkinson, D.S. y J.N. Ladd. (1981). Biomasa microbiana en el suelo: medición y rotación En: *Soil Biochemistry*, eds. E.A. Paul y J.N. Ladd. 415-471. Marcel Dekker: Nueva York
- Jiang, X., Shi, X., Wright, A.L., (2013). Seasonal variability of microbial biomass associated with aggregates in a rice-based ecosystem. *European Journal of Soil Biology* Eur.J. Soil Biol. 56, 84–88.
- Johns, T.J., Angove, M.J., Wilkens, S. (2015): Measuring soil organic carbon: which technique and where to from here? *Soil Res.* 53: 717-736.
- Johns, T.J., Angove, M.J., Wilkens, S. (2015): Measuring soil organic carbon: which technique and where to from here? *Soil Res.* 53: 717-736.
- Jónsson, J.O.G., Davíðsdóttir, B. (2016): Classification and valuation of soil ecosystem services. *Agr. Syst.* 145: 24-38.
- Kern, J. S., Johnson, M. G., (1993). Conservation tillage impacts on national soil and atmospheric carbon levels. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 57, 200- 210.
- Ladd J. N., van Geste1 M., Jocteur Monrozier L. and Amato M. (1990) Distribution of organic 14C and 15N in particle-size fractions of soils incubated with 14C, 15N-labelled glucose/NH, and legume and wheat straw residues. *Soil Biology & Biochemistry* 28, 893-905.
- Lal, R., Eckert, D. J., Fausey, N. R., Edwards, W. M., (1990). Conservation tillage in sustainable agriculture. In: C. A. Edwards, R. Lal, P. Madden, R. H. Miller and G. House, *Sustainable Agriculture Systems*. Soil and Water Conservation Society, Iowa, USA, pp. 203-225.
- Lal, R., Kimble, J.M., Follett, R.F., Stewart, B.A. (Eds.) (2000) *Assessment Methods for Soil Carbon*. CRC Press, Boca Rayton, FL, USA, 696 pp.
- Lal, R., (1997). Residue management, conservation tillage and soil restoration for mitigating greenhouse effect by CO₂ – enrichment. *Soil Till. Res.* 43, 81-107
- Lal, R. (2004) Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security, *Science* 304 (5677): 1623–7.
- Lal, R., Lorenz, K., Hüttl, R., Schneider, B. U., von Braun, J. (Eds.) (2012): *Recarbonization of the Biosphere*. Springer, Dordrecht, The Netherlands, 568 pp
- Leckie, D., Jay, C., Gougeon, F., Sturrock, R & Paradine, D. (2004). Detection and assessment of trees with *Phellinus weirii* (laminated root rot) using high resolution multi-spectral imagery. *International Journal of Remote Sensing* (25): 793-818.
- Liebig, J. (1831): Über einen neuen Apparat zur Analyse organischer Körper, und über die Zusammensetzung einiger organischen Substanzen. *Annalen der Physik* 21: 1-47
- Lobsey, C. R., Viscarra Rossel, R. A. (2016): Sensing of soil bulk density for more accurate carbon accounting. *Eur. J. Soil Sci.* 67: 504-513.

- Loeppert, R.H., Suarez, D.L. (1996): Carbonate and Gypsum, pp. 437-474 in: *Methods of Soil Analysis. Part 3. Chemical Methods—SSSA Book Series no. 5*, Soil Science Society of America and American Society of Agronomy, Madison, WI, USA.
- Lorenz, K., Lal, R. (2016): Impacts of land take and soil sealing on soil carbon. In Gardi, C. (Ed.): *Urban Expansion, Land Cover and Soil Ecosystem Services*. Taylor & Francis, London.
- McCarty, G.W., Reeves, J.B. III., Reeves, V.B., Follett, R.F., Kimble, J.M. (2002): Mid-infrared and near-infrared diffuse reflectance spectroscopy for soil carbon measurements. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 66: 640–646.
- MEA (2005): *Millennium Ecosystem Assessment: Ecosystems and Human Well-being 5*. Island Press Washington, DC.
- Nelson, D.W., Sommers, L.E. (1996): Total Carbon, Organic Carbon, and Organic Matter, pp. 961-1010 in: *Methods of Soil Analysis. Part 3. Chemical Methods—SSSA Book Series no. 5*, Soil Science Society of America and American Society of Agronomy, Madison, WI, USA.
- Neufeld, K.R., Grayston, S.J., Bittman, S., Krzic, M., Hunt, D.E., Smukler, S.M., 2017. Long-term alternative dairy manure management approaches enhance microbial biomass and activity in perennial forage grass. *Biol. Fertil. Soils* 53, 613–626.
- Nocita, M., Stevens, A., van Wesemael, B., et al. (2015): Soil Spectroscopy: An Alternative to Wet Chemistry for Soil Monitoring. *Adv. Agron.* 132: 139-159.
- Oelbermann, M., Voroney, R., Gordon, A., (2004). Carbon sequestration in tropical and temperate agroforestry systems: a review with examples from Costa Rica and southern Canada, *Agriculture, Ecosystems & Environment* 104 (3), 359-377.
- Olson, K.R., Al-Kaisi, M.M., Lal, R., Lowery, B. (2014): Experimental consideration, treatments, and methods in determining soil organic carbon sequestration rates. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 78: 348-360
- Osorio, G. (2007). *Manual técnico. Buenas Prácticas Agrícolas (BPA) y Buenas Prácticas de Manufactura (BPM) en la producción de caña y panela*. Corpoica, Gobernación de Antioquia, FAO.
- Pardo-Plaza, Y.J.; Paolini Gómez, J.E.; Cantero-Guevara, M.E. (2019). Biomasa microbiana y respiración basal del suelo bajo sistemas agroforestales con cultivos de café. *Rev. U.D.C.A Act. & Div. Cient.* 22(1):1144.
- Patiño, V. M. (1976). Esbozo histórico sobre la caña de azúcar. Recuperado de www.fedepanela.org.co/historia/panela
- Paul, E.A. (2016): The nature and dynamics of soil organic matter: Plant inputs, microbial transformations, and organic matter stabilization. *Soil Biol. Biochem.* 98: 109-126.

- Powlson, DS. (1994). La biomasa microbiana del suelo: antes, más allá y hacia atrás. *En: K Ritz; J Dighton y KE Giller (eds.). Más allá de la biomasa; composición y análisis funcional de las comunidades microbianas del suelo.* 3-20. John Wiley. Chichester.
- Rapidel, B.; Akkinne, C.; Cerdan, C.; Meylan, L.; Filho, E.V.; Avelino, J. (2015). Efectos ecológicos y productivos del asocio de árboles de sombra con café en sistemas agroforestales. *Sistemas agroforestales: funciones productivas, socioeconómicas y ambientales. Serie técnica. Informe técnico 402.* CATIE, Turrialba, Costa Rica. Editorial CIPAV, Cali (Colombia). p.5-19.
- Reicosky, D. C., (2002). Long – Term Effect of Moldboard Plowing on Tillage – Induced CO₂ Loss, in J. M. Kimble, R. Lal and R. F. Follet: *Agricultural Practices and Policies for Carbon Sequestration in Soil.* Lewis Publishers. Papers from symposium held July 1999 at Ohio State University, Columbus, Ohio, 87-96 p.
- Reeves, J.B. III (2010): Near- versus mid-infrared diffuse reflectance spectroscopy for soil analysis emphasizing carbon and laboratory versus on-site analysis: ¿Where are we and what needs to be done? *Geoderma* 158: 3-14. 49
- Reeves, J.B. III (2012): Mid-infrared spectral interpretation of soils: Is it practical or accurate? *Geoderma* 189-190: 508-513.
- Roseno, M., Vargas, W., Menjivar, J. (2013). Efectos de vinazas sobre bacterias rizosféricas y en la actividad-CO₂ y biomasa-C microbiana de un suelo Pachic Haplustoll. *Acta Agronómica.* 62 (2), p 165-173
- Sánchez de P. M. y Gómez, E. D. 2001. *El suelo, un sistema vivo.* Universidad Nacional de Colombia sede Palmira. p. 26.
- Sanginga, N., Mulongoy, K., Swift, M.J., 1992. Contribution of soil organisms to the sustainability and productivity cropping systems in the tropics. *Agric. Ecosyst. Environ.* 41 (2), 135–152.
- Sena-Corpoica. (1998). Buenas Prácticas de Manufactura (BPM) de la panela. Recuperado de <ftp://ftp.fao.org/docrep/fao/>
- Smith, P., Cotrufo, M.F., Rumpel, C., et al. (2015): Biogeochemical cycles and biodiversity as key drivers of ecosystem services provided by soils. *SOIL* 1: 665-685.
- Singh, L.I., Yadava, P.S., 2006. Spatial distribution of microbial biomass in relation to land-use in subtropical systems of north-east India. *Trop. Ecol.* 47 (1), 63–70.
- Sosa, V. 2012. Efecto de la adición de vermicomposta en la mineralización de carbono y biomasa microbiana en un suelo agrícola. Trabajo de grado. Instituto Politécnico Nacional. Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional Unidad Michoacán. México.

- Soriano-Disla, J.M., Janik, L.J., Viscarra Rossel, R.A., Macdonald, L.M., McLaughlin, M.J. (2014): The Performance of Visible, Near-, and Mid-Infrared Reflectance Spectroscopy for Prediction of Soil Physical, Chemical, and Biological Properties. *Appl. Spectrosc. Rev.* 49: 139-186.
- Srivastava, S. C. and J. S. Singh. 1991. Microbial C, N and P in dry tropical forest soils: effects of alternate land-uses and nutrient flux. *Soil Biol Biochem* 23:117-124.
- Sterren, M., Sánchez, C., Benintende, M., Benintende, S. (2002). Evolución de la biomasa microbiana del suelo en el ciclo del cultivo del maíz. *Revista Ceres*, 49 (286): 683 – 693.
- Stockmann, U., Adams, M.A., Crawford, J.W. et al. (2013): The knowns, known unknowns and unknowns of sequestration of soil organic carbon. *Agric. Ecosyst. Environ.* 164: 80-99.
- Tarazona, G. A. (2011). Manejo fitosanitario del cultivo de la caña panelera. Medidas para la temporada invernal. Bogotá D. C.
- Trumbore, S.E., Chadwick, O.A., Amundson, R., (1996). Rapid exchange between soil carbon and atmospheric carbon dioxide driven by temperature change. *Science* 272 (5260), 393–396.
- Uriarte, C., Grosse, H. (1991). Los bosques de lenga (*Nothofagus pumilio*). Una orientación para su uso y manejo; recopilación bibliográfica. Informe Técnico 126. CORFO-INFOR.
- Walkley, A., Black, I.A. (1934): An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration. *Soil Sci.* 37: 29–38.
- Walter, K., Don, A., Tiemeyer, B., Freibauer, A. (2016): Determining soil bulk density for carbon stock calculations – a systematic method comparison. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 80: 579–591.
- Wielopolski, L., Hendrey, G., Johnsen, K.H., Mitra, S. (2008): Nondestructive system for analyzing carbon in the soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 72: 1269–1277.
- Wright S., Islam K. (2005). Microbial biomass measurement methods, pp. 1067-1070. In: R. Lal (ed.). *Encyclopedia of Soil Science*, Second Edition. Taylor and Francis Group, New York.
- Yichao Shi, Noura Ziadi, Chantal Hamel, Shabtai Bittman, Derek Hunt, Roger Lalonde, Jiali Shang, Soil microbial biomass, activity, and community composition as affected by dairy manure slurry applications in grassland production, *Applied Soil Ecology*, 2017, ISSN 0929-1393.
- Zvyagintsev, DG; Lukin, SA; Lishinkina, GA; Kozhevin, PA. 1984. A method for more accurate quantitative determination of soil microorganisms. *Microbiology* 3:541-544.