



Módulo COLCX para la estimación de Carbono Orgánico del Suelo (COS)

Versión 1.0



Módulo para la estimación de Carbono Orgánico del Suelo (COS)

Versión 1.0

® Canal Clima – COLCX

No es permitida la reproducción parcial o total de este documento o su uso en cualquier forma o por cualquier medio, electrónico o mecánico, incluyendo escaneo, fotocopiado y microfilmación, sin el permiso de Canal Clima - COLCX. Derechos reservados.

Contenido

1	INTRODUCCIÓN	5
2	ALCANCE	6
3	ACTIVIDADES APLICABLES	6
4	ELEGIBILIDAD	7
4.1	Áreas elegibles	7
4.2	Áreas no elegibles	7
5	LIMITES TEMPORALES Y ESPACIALES	8
5.1	Límites temporales	8
5.2	Límites espaciales	8
6	CUANTIFICACIÓN DE CARBONO ORGÁNICO DEL SUELO (COS)	9
6.1	Métodos de cuantificación de COS	9
6.1.1	Muestreo directo	9
6.1.2	Modelos de predicción de existencias	17
6.1.3	Métodos analíticos para la estimación de COS	18
6.1.4	Uso de factores por defecto	20
6.2	Línea Base	20
6.3	Proyecto	21
6.4	Otras emisiones	22
7	MONITOREO	22
7.1	Parámetros para monitorear	22
7.2	Calidad y aseguramiento de los datos	23
8	REFERENCIAS	24

Lista de figuras e ilustraciones

Ilustración 1. Proceso de estratificación del área del proyecto.	10
Ilustración 2. Esquema de determinación de la línea base para proyectos en etapa de implementación	21
Figura 1 Esquema de la extracción de muestras al interior de la unidad muestral.	11

Lista de ecuaciones

Ecuación 1. Cálculo del volumen de la fracción gruesa.....	13
Ecuación 2. Cálculo de volumen de raíces gruesas.....	13
Ecuación 3. Cálculo de la densidad aparente de la fracción orgánica.	14
Ecuación 4. Cálculo del volumen de fracciones finas.	14
Ecuación 5. Cálculo de la densidad aparente de las fracciones finas.....	14
Ecuación 6. Cálculo de reservas de carbono para una profundidad determinada con la inclusión de la fracción orgánica.....	15
Ecuación 7. Cálculo de reservas de carbono por parcela o unidad muestral.	16
Ecuación 8. Cálculo de las reservas promedio de carbono para el estrato i.....	16
Ecuación 9. Existencia de dióxido de carbono equivalente total en el proyecto presente en el carbono orgánico del suelo para el proyecto en el tiempo $t = i$	17
Ecuación 10. Cálculo de la proporción de la materia orgánica del suelo para la muestra i propuesta por Schulte y Hopkins en 1996. (Barrezueta-Unda, S. et al., 2020)	19
Ecuación 11. Cambio en las reservas de carbono orgánico en el suelo.	21

Términos y definiciones

Calicata: Excavación vertical en el suelo, generalmente de 1 a 2 metros de profundidad, realizada con fines de observación, descripción y muestreo del perfil del suelo. Permite identificar horizontes, evaluar características físicas y químicas, y tomar muestras para análisis de suelos de distintos tipos.

Carbono Orgánico del Suelo: Fracción de carbono contenida dentro de la materia orgánica del suelo que se puede expresar en porcentaje y/o unidad de masa.

Densidad aparente específica: Densidad aparente de las diferentes fracciones del suelo, relacionando el volumen específico que ocupan estas dentro de la muestra. Esta expresada en g/cm^3 o Mg/m^3 .

Estratificación: Distribución y agrupación del suelo en unidades homogéneas de acuerdo con características físicas, químicas o biológicas distintas o geográficas que sugieren similitud y disminuyen la variabilidad de los resultados.

Fracción fina: Partículas del suelo menores a 2 mm, es la fracción utilizada para analizar el contenido de carbono orgánico, textura, pH, entre otros. No incluye piedras, gravas, ni restos vegetales grandes.

Fracción gruesa: Partículas del suelo mayores a 2 mm, incluye grava, piedras, raíces o restos vegetales grandes. No se considera en el análisis directo del SOC, pero se debe cuantificar para calcular correctamente el volumen total y ajustar la densidad aparente.

Fracción orgánica: Componentes del suelo derivados de materia orgánica en distintos grados de descomposición, como residuos vegetales, raíces, microorganismos y humus, también puede ser mencionada como MOS.

Método de cuantificación: Consiste en un proceso para determinar datos específicos (magnitudes) que permitirán estimar cambios en COS, ya sea por medición directa, modelado o una combinación.

Suelo: Capa superficial de la corteza terrestre formada por minerales, materia orgánica, agua, aire y organismos vivos; resultante de la meteorización de minerales y rocas y la acumulación de materiales orgánicos.

Reserva de COS: Cantidad total de carbono orgánico almacenado en el suelo por unidad de área y profundidad específica.

Adicional a las definiciones mencionadas anteriormente, el PMGEI debe considerar la *Guía de términos y definiciones* del Programa COLCX en su versión más actualizada.

1 INTRODUCCIÓN

El cambio climático es un fenómeno global que ha comprometido a la humanidad y sus medios de vida, así como la estabilidad de las cadenas de valor; la magnitud de este impacto ha fomentado la búsqueda de alternativas de mitigación de emisiones de GEI y adaptación a sus efectos, y dentro de este contexto se han desarrollado proyectos enfocados en la reducción y remoción de emisiones de GEI en múltiples ámbitos sectoriales como la industria, manufactura, energía y con gran potencial el suelo y sus usos agrícolas, forestales o pecuarios.

El suelo representa uno de los reservorios más grandes de carbono en el sistema terrestre, calculándose que contiene más de 3 billones de carbono orgánico en los primeros dos metros de profundidad¹, siendo hasta 4 veces mayor al secuestrado por la biomasa y 3 veces mayor al carbono atmosférico², incluso siendo mayor que la vegetación y la atmosfera en conjunto³; convirtiéndose, como uno de los principales reservorios de carbono en el mundo. Así, cualquier cambio en los reservorios de este tipo puede traducirse en significativas alteraciones de las concentraciones atmosféricas de CO₂, y, por ende, constituirse o no como un acelerador del cambio climático⁴.

En el suelo las proporciones de carbono secuestradas estarán determinadas entonces por sus propiedades específicas dada la actividad microbiana, la cantidad de residuos orgánicos que se incorporan a la matriz edáfica, la lixiviación, entre otras. Además, estos contenidos de carbono estarán sujetos a cambios en las prácticas de manejo y uso que se efectúen en las diversas actividades productivas que se desarrollen permitiendo al suelo ser fuente o reservorio de GEI (CO₂, N₂O, CH₄).

Reconociendo la importancia del suelo como agente emisor o receptor de carbono, COLCIX concibe este módulo como una herramienta para la cuantificación del carbono orgánico en los suelos, posibilitando su inclusión en las iniciativas de mitigación del programa. Este constituye un instrumento complementario a las metodologías de COLCIX, las cuales promueven la rigurosidad en la cuantificación y monitoreo del carbono almacenado en los distintos reservorios, apoyándose en factores biofísicos, objetivos de intervención y limitaciones en campo.

¹ Kopittke, P. M. et al..(2024). 1 Petagramo = 1 billon

² Lal,R. (2004)

³Martínez H, Eduardo, et al.. (2008).

⁴ Lal, R et al.. (2021)

2 ALCANCE

Este módulo está orientado a titulares y proponentes que implementen actividades de manejo y uso de suelos de manera sostenible en el marco de implementación de iniciativas de mitigación de GEI y cuantifiquen las reservas de carbono en los suelos del proyecto.

Así mismo, este módulo es aplicable a iniciativas que reporten resultados con las metodologías de COLCX en actividades forestales y agrícolas, cumpliendo tanto con los lineamientos de la metodología empleada como los del presente modulo, en su totalidad⁵.

3 ACTIVIDADES APLICABLES

Este módulo aplica para todas las iniciativas de mitigación que dentro de los reservorios definidos tanto en línea base como en los escenarios con proyecto, incluyan el carbono orgánico del suelo.

Solo se cuantificarán remociones almacenadas en este reservorio; es decir, reducciones que se puedan generar por buenas prácticas agrícolas como menor uso de fertilizantes u otras, no podrán reportarse bajo este módulo, sin embargo, podrán contabilizarse dentro de los flujos totales de emisiones para el proyecto, según lo defina la metodología que adopte el PMGEI.

Las actividades aplicables son:

- Mecanismos de conservación de suelos en las practicas forestales y bosques: Terraceo, conservación de suelos susceptibles a la erosión y control de escorrentía.
- Desarrollo de prácticas de agroforestería y forestación que mejoren las condiciones en áreas con suelos degradados.
- Control de las dinámicas de pastoreo a través del manejo de rotación e intensidad de uso de potreros.
- Gestión de materia orgánica para la recuperación de suelos.⁶
- Cero labranzas y/o manejo de rastrojos.

Algunas actividades no aplicables son:

- Manipulación de áreas de turba o suelos orgánicos.
- Continuidad de prácticas convencionales que no contribuyen al aumento en las remociones.

⁵ Cuando exista confluencia de términos, la metodología tendrá prioridad frente a la presente herramienta.

⁶ La carga orgánica del producto, no puede ser el resultado final de cuantificación de COS en el perfil de suelo.

- Conservación pasiva de áreas naturales que no poseen disturbios o afectaciones en la estructura del suelo.
- Cuantificación de cambios en áreas donde no se han realizado actividades y se mantienen condiciones de línea base. Es decir, los cambios (perdidas o aumento) en el reservorio son por dinámicas propias del ecosistema y no por actividades del proyecto.

De igual manera las condiciones específicas de aplicabilidad para cada una de las iniciativas estarán también definidas en las metodologías que aplique cada una de estas, siendo complementadas con las dispuestas en este documento.

4 ELEGIBILIDAD

A continuación, se definen las condiciones de elegibilidad para las áreas en las que el módulo de cuantificación de COS es aplicable.

4.1 Áreas elegibles

Se determinan como elegibles todas aquellas áreas que se definan como aptas en los capítulos de elegibilidad de las metodologías del sector AFOLU de COLCX:

- *Metodología para Remoción De Gases De Efecto Invernadero En Plantaciones Forestales, Sistemas Agroforestales Y Actividades Agrícolas*
- *Metodología COLCX para Manejo de Pasturas y Suelo*
- *Metodología COLCX para Proyectos REDD+*

Y demás metodologías desarrolladas por COLCX para actividades ubicadas dentro del sector, todas en su versión más reciente.

4.2 Áreas no elegibles

Se determinan como no elegibles todas aquellas áreas que se mencionen como excluibles en la metodología que aplique a la iniciativa. Para esto tener en cuenta lo dispuesto en las metodologías del sector AFOLU de COLCX:

- *Metodología para Remoción De Gases De Efecto Invernadero En Plantaciones Forestales, Sistemas Agroforestales Y Actividades Agrícolas,*
- *Metodología COLCX para Manejo de Pasturas y Suelo*
- *Metodología COLCX para Proyectos REDD+*

y demás metodologías sectoriales que desarrolle COLCX, todas en su versión más reciente.

Adicionalmente para efectos de cuantificación de este módulo no se consideran elegibles las siguientes áreas, ya que corresponden a ecosistemas con condiciones especiales (humedad y anoxia), con dinámicas del ciclo del carbono particulares y con sensibilidad a la degradación por el desarrollo de actividades e intervenciones en su medio.

- Áreas definidas como turberas o zonas del mismo ecosistema que hayan sido drenadas o modificadas por prácticas agropecuarias.
- Zonas correspondientes a humedales naturales o artificiales que se ubiquen dentro del área de proyecto.
- Suelos orgánicos categorizados como Histosoles, presentes dentro del proyecto. Esto puede estar definido por cartografía oficial de suelos del país anfitrión o por la determinación de propiedades fisicoquímicas, P. e.j. los contenidos de materia orgánica en descomposición son muy altos (procesos de mineralización avanzados), están saturados o parcialmente saturados de humedad, sean suelos lodosos (o de turba) con formación de sustancias húmicas⁷ y/o normalmente tengan densidades aparentes inferiores a 1 g/cm³ (comúnmente oscilan entre 0.1 y 0.2 g/cm³)⁸

Estas áreas pueden ser consideradas elegibles para la cuantificación de COS únicamente cuando el objetivo de la iniciativa de mitigación y sus actividades sea la recuperación de estos ecosistemas (P. e.j. Re-humedecimiento, protección y/o preservación) y bajo parámetros particulares definidos para esas áreas dentro de metodologías correspondientes, así como el cumplimiento de las directrices del país anfitrión.

5 LÍMITES TEMPORALES Y ESPACIALES

El establecimiento de los límites temporales y espaciales permitirá la cuantificación clara y precisa del Carbono Orgánico del Suelo (COS) para las iniciativas, asegurando la consistencia técnica y trazabilidad de información para la cuantificación de reducciones o remociones totales.

5.1 Límites temporales

Las directrices específicas se señalan en la metodología correspondiente que aplica la iniciativa, así como en el programa y estándar de certificación. En todo caso, el COS tendrá el mismo horizonte temporal que la iniciativa que lo está reportando, o hasta que el reservorio se estabilice. Los límites temporales deben estar definidos y enunciados desde la estructuración del PMGEI, y ser reportados en la documentación presentada (DDP, RM, entre otros).

5.2 Límites espaciales

Los límites espaciales del proyecto deben estar definidos desde la estructuración del PMGEI, y ser reportados en la documentación elaborada por la iniciativa (DDP, RM, entre otros). Las directrices específicas para la definición de estos corresponderán a lo

⁷ FAO. (2007). IUSS Grupo de Trabajo WRB. 2007. Base Referencial Mundial del Recurso Suelo. Primera actualización 2007. Informes sobre Recursos Mundiales de Suelos No. 103. FAO, Roma.

⁸ Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca – CAR (2017.). DIAGNÓSTICO Y MONITOREO DE DEGRADACIÓN DE SUELOS POR SALINIZACIÓN EN EL DMI COMPLEJO LAGUNAR FÚQUENE, CUCUNUBA Y PALACIOS, JURISDICCION CAR A ESCALA 1:25.000

dispuesto en la metodología que aplique la iniciativa, así como en el programa y estándar de certificación.

6 CUANTIFICACIÓN DE CARBONO ORGÁNICO DEL SUELO (COS)

En este capítulo, se otorgan directrices para la cuantificación de cambios en las existencias de COS – y se definen los posibles métodos de cuantificación, aceptados por este módulo:

1. Muestreo directo – medición directa
2. Modelación de existencias de carbono
3. Métodos analíticos para la estimación de COS a partir de la determinación de MOS.
4. Aplicación de factores de por defecto definidos por el IPCC o reportados por investigaciones científicas (indexadas).

6.1 Métodos de cuantificación de COS

Los métodos planteados están basados en lo propuesto en el “*Protocolo para la estimación nacional y subnacional de biomasa - carbono en Colombia*”⁹, así como en métodos técnica y científicamente validos de estimación y modelación; o a partir del uso de factores por defecto. La estimación y cuantificación del carbono orgánico para las proyecciones ex-ante y la cuantificación ex-post se desarrollan mediante el uso de cualquiera de estos (de acuerdo con la elección del proponente), según corresponda.

6.1.1 Muestreo directo

Para determinar el cambio en las reservas de carbono con este método, se deben considerar unidades de muestreo que se instalarán en el área del proyecto. Estas unidades de muestreo deben representar la dinámica de las existencias de carbono en el escenario con proyecto.

El monitoreo de las unidades de muestreo permitirá la determinación y actualización los valores de las existencias de carbono orgánico del suelo en el escenario con proyecto durante los diferentes eventos de monitoreo que realice el PMGEI.

El PMGEI que implemente este método de cuantificación debe cumplir el siguiente procedimiento:

Paso 1. Estratificación y diseño del muestreo

Se deben definir las variables o criterios que se incluirán en el proceso de estratificación para la definición de áreas homogéneas de muestreo, en busca de una reducción de la incertidumbre y aumento de la precisión en los valores estimados del

⁹ Yepes et al., IDEAM, 2011

carbono almacenado (Pearson et al., 2005). Así, las variables a considerar en el proceso de estratificación pueden ser:

- **Tipo de suelo:** Definir los tipos de suelos presentes dentro del área de proyecto, dado que cada tipo de suelo (arcilloso, arenoso, limoso) tiene distintas capacidades de secuestro de carbono (FAO, 2018).
- **Cobertura vegetal:** Determinar los tipos de cobertura tales como áreas forestales, agrícolas o con pasturas. Concordante con la clasificación realizada en el diseño de la iniciativa y bajo los lineamientos estipulados en la metodología que cobija la iniciativa.
- **Uso histórico de la tierra:** Delimitar áreas que tienen antecedentes de prácticas forestales, agrícolas o pecuarias, en una temporalidad superior a 5 años previo al inicio del proyecto, ya que sus dinámicas de uso pudieron condicionar las existencias de carbono.
- **Pendiente:** Definir clases de acuerdo con las unidades topográficas que presente el proyecto, puesto que las acumulaciones de COS varían de acuerdo con el nivel de pendiente, las áreas con pendientes pronunciadas pueden ser más susceptibles a la erosión afectando la retención de carbono (Lal, 2004; Madrigal Reyes et al., 2019)

Luego de esto, agrupar los suelos en las unidades homogéneas, dado los criterios o variables de estratificación que se definan para el muestreo, o de ser así, consistentes con estratificaciones previas realizadas por el PMGEI.

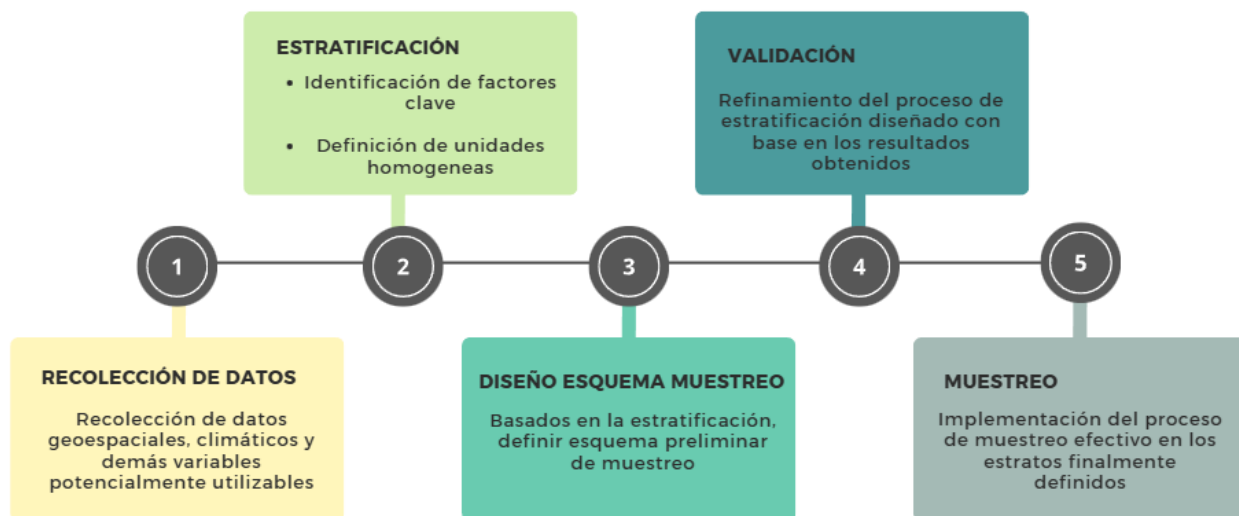


Ilustración 1. Proceso de estratificación del área del proyecto.

Diseño del muestreo: Se debe establecer un plan de muestreo¹⁰, que contemple los diferentes estratos definidos, que pueden estar asociados o no a estratificaciones previas realizadas con el PMGEI, en todo caso bajo criterios técnicos.

El muestreo empleado debe garantizar un error no mayor a 10% del valor promedio de carbono, con un nivel de confianza del 95%¹¹. Finalmente, se debe realizar una validación en campo del ejercicio de estratificación, para corroborar su validez.

Paso 2. Muestreo de suelo

Extracción de muestras: El PMGEI debe definir el número de muestras y/o submuestras¹² (en caso de realizar muestras compuestas), contemplando diferentes profundidades, comúnmente en intervalos de 0-10 cm, 10-20 cm, 20-50 cm, u otras que considere el PMGEI. Se debe contemplar la colecta de muestras hasta los 30 cm de profundidad como mínimo, procurando la profundidad máxima posible para incrementar la certidumbre sobre los contenidos de COS en el perfil (Véase Figura 1).

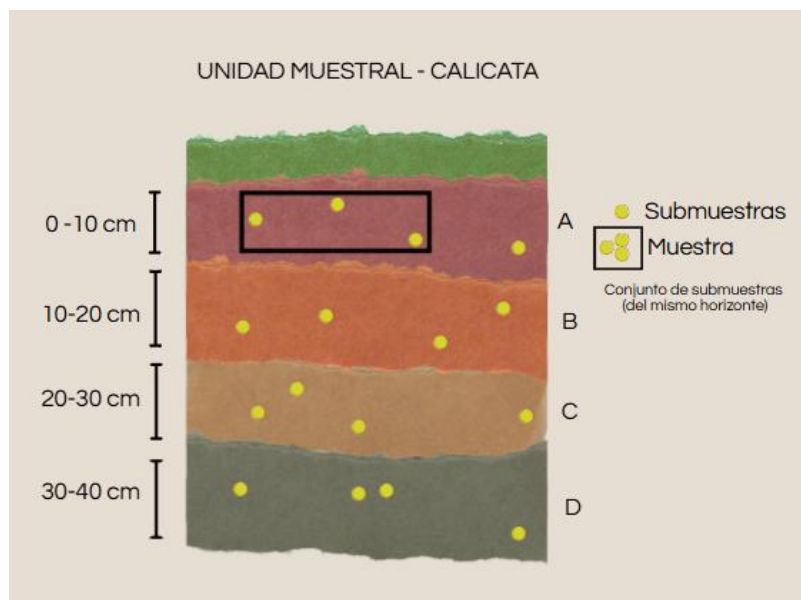


Figura 1 Esquema de la extracción de muestras al interior de la unidad muestral.

Se sugiere realizar la colecta de muestras a partir de la elaboración de calicatas de 1 m x 1 m x 1 m (1m³) para la recolección a las diversas profundidades seleccionadas. En este punto se recomienda la recolección de muestras mediante cilindros de 5 a 10 cm de

¹⁰ Se pueden seleccionar diversos métodos de muestreo, siempre y cuando se cumpla con los parámetros estadísticos válidos definidos por la metodología.

¹¹ Para determinar la cantidad de unidades muestrales se recomienda utilizar la herramienta *Calculation of the number of sample plots for measurements within A/R CDM project activities*. Disponible en: <https://cdm.unfccc.int/methodologies/ARmethodologies/tools/ar-am-tool-03-v2.1.0.pdf>

¹² Las muestras se extraerán de la unidad muestral (calicata), y las submuestras pueden ser varias colectas, en el mismo horizonte que pueden mezclarse para componer una sola muestra.

diámetro que tengan volumen definido facilitando el posterior cálculo de la densidad aparente, u otra alternativa que permita conocer de manera clara y precisa el volumen recolectado.

Cada una de las muestras deben contar con la información geográfica del punto donde fueron tomadas.

Conservación y transporte: Las muestras de suelo deben conservarse de manera adecuada para evitar la pérdida de humedad y otros cambios que puedan alterar los parámetros físicos y químicos a evaluar.

Paso 3. Análisis en laboratorio

Este paso tiene como fin determinar la materia orgánica del suelo y realizar la posterior conversión a carbono equivalente. El PMGEI debe garantizar y soportar que los análisis de las muestras de suelo se realizan en un laboratorio que cumpla con las siguientes características:

- Estar acreditado por entidades reconocidas nacional o internacionalmente, que certifiquen la calidad de los procesos y técnicas analíticas empleadas, bajo la norma ISO 17025 (norma sobre los requisitos para los laboratorios de ensayo y calibración, garantizando su competencia técnica y la fiabilidad de sus resultados).
- Contar con equipos específicos para el análisis de carbono orgánico en suelo, tales como analizadores de carbono orgánico total (TOC) o equipos de combustión seca.
- Protocolos rigurosos de control de calidad, incluyendo el uso de muestras de referencia, duplicados y controles en blanco.

La determinación de los contenidos de carbono orgánico (CO) estará determinada por el tipo de método que se seleccione:

- El método de combustión seca es el más preciso para la determinación de COS, aunque presenta limitaciones en suelos calcáreos debido a la posible no diferenciación entre carbono orgánico e inorgánico (Apesteguía, M et al., 2018), además de requerir materiales y equipos especializados que elevan su costo (Dos Santos et al., 2008).
- El método de combustión húmeda propuesto por Walkley y Black en (1934) es comúnmente el más utilizado, sin embargo, se estima que este solo representa un 75% a 85% del CO determinado por el método de combustión seca, por lo que normalmente se subestima el contenido de CO, y por ende se requieren factores de ajuste de acuerdo con el tipo de suelo (Apesteguía, M et al., 2018).

- Existen otros métodos basados en espectrofotometría o termogravimetría que se presentan como otra alternativa que puede ser más rápida y menos invasiva en su naturaleza, aunque requieren una calibración suficiente para obtener resultados precisos.

Paso 4. Cuantificación de COS

La cuantificación de carbono orgánico en el suelo estará determinada por la proporción de carbono que contiene el suelo a una profundidad determinada, ajustada a partir de información de volúmenes y densidades de materia orgánica, fracciones finas y gruesas, rocas y otros elementos de la muestra. Parte de esta información es determinada en el análisis de laboratorio.

Cálculo del volumen de la fracción gruesa

Las ecuaciones para el cálculo del volumen y la densidad de las muestras deben aplicarse a cada profundidad muestreada dentro de la misma calicata, siguiendo el protocolo establecido por Burton & Pregitzer (2008) citado por Yepes et. Al. (2011). El volumen de rocas (fracciones gruesas) se calcula de la siguiente forma:

Ecuación 1. Cálculo del volumen de la fracción gruesa

$$V_{fg} = \frac{M_R}{D_R}$$

Donde:

V_{fg} = Volumen de rocas o fracción gruesa (cm^3)

M_R = Masa de las rocas (g) (Incluye rocas y fracción del suelo > 2 mm)

D_R = Densidad de las rocas o de la fracción gruesa (g/cm^3) (Esta densidad debe determinarse mediante el método de desplazamiento de agua)¹³

Cálculo de volumen y densidad aparente de la fracción orgánica

Para el cálculo de la densidad aparente específica de la muestra se necesita conocer el volumen que ocupa y la masa que tiene esa fracción orgánica. Así, el volumen de raíces gruesas (raíces > 2 mm de diámetro) se calcula de la siguiente forma:

Ecuación 2. Cálculo de volumen de raíces gruesas

$$V_{fo} = \pi \times r^2 \times l$$

¹³ Este método consiste en ubicar las rocas dentro de un cilindro con graduación volumétrica (P. ej. una probeta) y determinar el volumen de agua desplazado al introducir las rocas. En caso de no poder determinarlo por este método, se debe asumir la densidad de algún elemento, que, para el caso, está determinado por el tipo de roca.

Donde:

V_{fo} = Volumen de la fracción orgánica es decir de las raíces gruesas (cm^3)

π = Constante pi (adimensional)

r = Radio de la raíz (cm)

l = Longitud de la raíz (cm)

Ecuación 3. Cálculo de la densidad aparente de la fracción orgánica.

$$D_{om} = \frac{M_{om}}{V_{fo}}$$

Donde:

D_{om} = Densidad aparente de la fracción orgánica del suelo (g/cm^3)

M_{om} = Masa seca total de las raíces gruesas y demás materiales orgánicos (g) (Incluye raíces y excluye trozos de madera muerta).

V_{fo} = Volumen de la fracción orgánica es decir de las raíces gruesas (cm^3) (Este volumen incluye todos los materiales mencionados en M_{om}) (cm^3)

Cálculo del volumen y densidad aparente de la fracción fina

Para el cálculo del volumen de fracciones finas que es el volumen ocupado por el material que pasa por un tamiz de 2 mm, así como por el material orgánico que no incluye raíces gruesas se calcula de la siguiente forma:

Ecuación 4. Cálculo del volumen de fracciones finas.

$$V_{ff} = V_T - V_{fg} - V_{fo}$$

Donde:

V_{ff} = Volumen de fracciones finas (cm^3)

V_T = Volumen total (cm^3), volumen del cilindro de muestreo

V_{fg} = Volumen de rocas (cm^3)

V_{fo} = Volumen de raíces gruesas (cm^3)

La densidad de las fracciones finas se calcula de la siguiente manera:

Ecuación 5. Cálculo de la densidad aparente de las fracciones finas.

$$D_F = \frac{M_{ff}}{V_{ff}}$$

Donde:

D_F = Densidad de fracciones finas (g/cm^3)

M_{ff} = Masa seca total de las fracciones finas (g)

V_{ff} = Volumen de fracciones finas (cm^3)

En caso de no presentar raíces gruesas la densidad de la fracción fina de las muestras se puede calcular a partir del descuento exclusivo del volumen de la fracción gruesa.

En caso de que la muestra no contenga fracción gruesa (rocas > 2mm), ni raíces gruesas, se pueden omitir los pasos de cálculo de volumen de fracción gruesa y fracción orgánica (Ecuación 1 a Ecuación 4), entonces la densidad aparente de las fracciones finas corresponderá a la densidad aparente de toda la muestra, es decir, se determinará con base en el volumen total del cilindro de extracción utilizado o volumen conocido de la muestra.

Cálculo del contenido de COS en la muestra

Para poder realizar el cálculo de las reservas totales de carbono en los suelos de las muestras analizadas, se deben considerar las diferentes fracciones de los materiales presentados para cada una de las profundidades de muestreo. Para ello se tiene en cuenta la concentración de carbono en fracciones de suelos finos, en material orgánico, en raíces gruesas y el volumen total de la muestra analizada para obtener el valor total de carbono almacenado. Todos los cálculos se han realizado mediante la siguiente fórmula:

Ecuación 6. Cálculo de reservas de carbono para una profundidad determinada con la inclusión de la fracción orgánica.

$$RC_p = E \times \left(10000 \frac{\text{cm}^2}{\text{m}^2} \right) \times \left(\left(\left(\frac{C_{ff}}{1000} \right) \times D_F \right) + \left(\left(\frac{C_{om}}{1000} \right) \times D_{om} \right) \right)$$

Donde:

RC_p = Reserva de carbono (gC/m^2), es decir, la cantidad total de carbono almacenado para cada profundidad muestreada.

E = Espesor del horizonte muestreado (cm)

C_{ff} = Concentración de carbono en las fracciones finas de suelo (gC/kg), es decir, el carbono presente en los materiales que pasan por un tamiz de 2 mm. (Dato proporcionado por laboratorio) (Si la concentración es dada en %, no se debe dividir en 1000)

D_F = Densidad aparente de las fracciones finas (g/cm^3)

C_{om} = Concentración de carbono en el material orgánico de diámetro mayor a 2mm (gC/kg).

D_{om} = Densidad aparente de la fracción orgánica del suelo (g/cm^3)

10000 = Conversión de unidades de área de cm^2 a m^2 para homogenizar las unidades de la ecuación.

Este proceso debe realizarse para cada profundidad muestreada dentro de la calicata. Así, es posible calcular las reservas de carbono en distintas capas del suelo, obteniendo una estimación más precisa del contenido de carbono en todo el perfil de suelo de la parcela o calicata. Los valores obtenidos deben extrapolarse a toneladas por hectárea.

Ecuación 7. Cálculo de reservas de carbono por parcela o unidad muestral.

$$ROS_{t=i} = \left(\frac{\left(\sum_{i=n}^{np} RC_{pi} \right)}{1000000} \right) \times \frac{10000}{AM}$$

$ROS_{t=i}$ = Reserva de carbono (tC/ha) por unidad muestral (calicata) para el estrato i .

RC_{pi} = Reserva de carbono (gC/m^2), para la profundidad p , en el estrato i por parcela.

np = Número total de profundidades muestreadas en la parcela.

AM = Área de la unidad de muestreo (m^2).

1000000 = Factor de conversión de gramos a toneladas.

10000 = Conversión de unidades de área de m^2 a hectárea.

En cada parcela establecida, se realiza la iteración, y se evalúa la reserva promedio de carbono (tC/ha) para esa parcela y se extrapola a la superficie de la total del estrato (tC/estrato).

Ecuación 8. Cálculo de las reservas promedio de carbono para el estrato i

$$ROSE_i = \left(\frac{\left(\sum_{i=n}^{npe} ROS_{t=i} \right)}{n} \right) \times A_i$$

Donde

$ROSE_i$ Reserva promedio de carbono (tC) para todo el estrato i en el proyecto.

$ROS_{t=i}$ = Reserva de carbono por parcela o unidad muestral (tC/ha) (calicata) para el estrato i

n = Número total de unidades muestrales por estrato.

A_i = Área del estrato i (ha).

Posteriormente, si la cuantificación se ha realizado para diversos estratos, se deben sumar las reservas de cada estrato para obtener la estimación total de la reserva de carbono en toda el área del proyecto para el año t .

Ecuación 9. Existencia de dióxido de carbono equivalente total en el proyecto presente en el carbono orgánico del suelo para el proyecto en el tiempo $t=i$.

$$PCOS_{t=i} = \left(\sum_{i=n}^N ROSE_{t=i} \right) \times \frac{44}{12}$$

Donde

$PCOS_{t=i}$ Carbono orgánico del suelo para el proyecto en el tiempo $t=i$ después del inicio del proyecto en CO_2 equivalente (tCO_2e)

$ROSE_{t=i}$ Reserva promedio de carbono del estrato i (tC).

N = Número total de estratos.

$\frac{44}{12}$ = Relación entre el peso molecular del dióxido de carbono y el carbono (Adimensional).

6.1.2 Modelos de predicción de existencias

En este método se deben desarrollar y/o emplear modelos de cuantificación de las existencias de carbono en el suelo, contemplando información relacionada con el tipo de suelos y contenidos proyectados de los mismos dentro de los límites espaciales considerados por el PMGEI. Es esencial que estos modelos consideren factores como condiciones geográficas, unidades de suelo, características físicas y/o químicas, así como otros aspectos edáficos y climáticos que puedan influir en la acumulación de carbono.

Los datos que se utilicen para desarrollar estos modelos deben provenir directamente de los límites espaciales considerados por el PMGEI. Asegurando que las predicciones del modelo sean precisas y coherentes con la dinámica del territorio.

Una vez desarrollado el modelo, se deberá presentar y justificar detalladamente los datos empleados en su construcción. Esto incluirá la explicación del origen de los datos, los métodos de recolección y su representatividad.

El proponente tiene la opción de utilizar modelos ya establecidos o desarrollar su propio modelo, siempre que cumpla con los criterios de rigurosidad y representatividad descritos a continuación, además de ser avalados por los mecanismos de validación de tercera parte:

1. El modelo debe demostrar, como mínimo, las siguientes métricas estadísticas para evaluar su precisión y consistencia:
 - Coeficiente de determinación (R^2): El modelo debe alcanzar un valor de R^2 superior al 0.85, indicando que este explica al menos el 85% de la variabilidad en los datos.
 - Error cuadrático medio (ECM): El ECM debe ser lo suficientemente bajo como para garantizar una mínima desviación entre los valores predichos y los observados.

2. Se debe realizar un proceso de validación cruzada, utilizando al menos el 10% de los datos para la prueba (datos en campo) y garantizando que el modelo no esté sobre ajustado.
3. El modelo debe mostrar estabilidad en sus resultados cuando se aplique a datos de diferentes periodos o a distintos conjuntos de datos de manera continua.
4. Los residuos del modelo (diferencias entre los valores predichos y los reales) deben mostrar una distribución aleatoria sin patrones sistemáticos, evidenciando que el modelo no está sesgado.
5. El modelo debe ser probado bajo diferentes condiciones de entrada para evaluar su robustez y capacidad de respuesta ante variaciones en los datos.

Se pueden emplear modelos ampliamente conocidos como RothC o SOCrates, que emplean variables específicas del área para cuantificar los cambios en las existencias, de acuerdo con procesos de mineralización y transformación de fracciones en el suelo.

6.1.3 Métodos analíticos para la estimación de COS

Dentro de estos métodos se pueden encontrar métodos termogravimétricos en donde por una combustión determinada o continua se determina el porcentaje o peso las fracciones orgánicas e inorgánicas del suelo, para así, posteriormente determinar COS y CIS (Carbono inorgánico del suelo). Estos métodos se sustentan en la diferencia que tienen los contenidos orgánicos e inorgánicos en reacciones exotérmicas y endotérmicas que generan su descomposición, cuando se someten a dinámicas de calcinación (Apesteguia, M et al., 2018)

Estos métodos de estimación de COS son permitidos por el IPCC en los niveles Tier 2 y Tier 3 y son aceptados como métodos indirectos para la estimación de COS, aunque se considera pueden subestimar o sobrestimar los contenidos de carbono ya que la pérdida de peso puede estar asociada a múltiples factores y no simplemente a la combustión de materia orgánica.

6.1.3.1 Método de pérdida por ignición(LOI¹⁴)

Este método consiste en la determinación de materia o fracción orgánicas del suelo a partir de la pérdida de peso de una muestra, luego de un proceso de calcinación¹⁵ (Barrezueta-Unda, S. et al., 2020).

En este se escogen varias muestras del suelo de acuerdo con la estratificación realizada, además, se deben elegir pesos diferentes (de muestras), las cuales después de un secado inicial a aproximadamente 105°C se llevarán a un proceso de calcinación

¹⁴ Loss On ignition (LOI) por sus siglas en inglés.

¹⁵ La aplicación inicial de este método requerirá una calibración de tiempos y temperatura en comparación con resultados de TOC o una justificación clara con soporte científico además de corresponder a información equivalente al área o tipos de suelo.

a temperaturas superiores a los 220°C y comúnmente inferiores a los 600°C (Barrezueta-Unda, S. et al., 2020; Izquierdo, J. & Arévalo, J., 2021). En este método se deben calibrar las proporciones de pérdida de peso y contenidos de carbono orgánico, variando las temperaturas a aplicar en función del tipo de suelo. Se suelen manejar temperaturas entre los 350°C y 450° C (Izquierdo, J. & Arévalo, J., 2021), ya que se pueden generar sobre estimaciones si se utilizan temperaturas más altas, debido no a la calcinación de componentes orgánicos, sino a la deshidroxilación de arcillas (Apesteguía, M et al., 2018).

Ecuación 10. Cálculo de la proporción de la materia orgánica del suelo para la muestra i propuesta por Schulte y Hopkins en 1996. (Barrezueta-Unda, S. et al., 2020)

$$\%MOS = \frac{(PSI - PSC)}{PSI} * 100$$

Donde:

%MOS: Porcentaje de Materia Orgánica del Suelo de la muestra. Estará dado en %

PSI: Peso inicial de la muestra (secado de humedad inicial) – normalmente realizado a 105°C. o al aire, dado en gr o kg

PSC: Peso final de la muestra luego del periodo de calcinación – La temperatura y el tiempo de calcinación dependerá del protocolo y variables asociadas a este y al tipo de suelo. Estará dado en gr o kg.

Una vez determinado el contenido de Material Orgánico del suelo se utiliza un factor de conversión de acuerdo con el porcentaje de Carbono que contiene la materia o fracción orgánica (comúnmente relacionado a un 58%) (Barrezueta-Unda, S. et al., 2020).

La utilización de protocolos de calcinación, y selección de factores, debe estar soportada con referencias científicas y/o técnicas que respalden dichos datos, además de ser acordes al tipo de suelo y/o coberturas analizadas, manteniendo enfoques conservadores, asegurando la calidad de los datos de acuerdo con lo descrito en el numeral 7.2 de este módulo.

6.1.3.2 Otros métodos térmico-analíticos

Se pueden emplear diversos métodos de análisis o estimación de la fracción orgánica del suelo, y a partir de la cual se puede realizar la estimación final del contenido de Carbono Orgánico del suelo, basados en las reacciones exotérmicas que tienen estas fracciones a menores temperaturas que las fracciones inorgánicas. Dentro de estas alternativas se pueden utilizar TGA-Termogravimetría, DTA-Análisis Termal Diferencial, DSC-Calorimetría diferencial de barrido, pirólisis programado, análisis de gases evolucionados, TG-IR o MS o GS- termogravimetría acoplada a espectroscopia

infrarroja y de masas o cromatografía de gases (Apesteguía, M et al., 2018), entre otros métodos existentes o que surjan.

La aplicación de estos métodos debe estar debidamente justificada y explicada de manera detallada, además de cumplir los criterios estadísticos y de calidad de los datos de acuerdo con lo descrito en el numeral 7.2 de este módulo.

6.1.4 Uso de factores por defecto

Se puede utilizar para la estimación de existencias, así como de cambios de los niveles de COS, los parámetros establecidos por el IPCC¹⁶. En este caso se deben tener en cuenta todas las directrices de aplicabilidad determinadas por el IPCC y aplicarse para toda el área del proyecto.

6.2 Línea Base

La definición del periodo de análisis histórico para la formulación del escenario de línea base va a estar determinado por la metodología aplicada por el PMGEI y corresponderá al escenario y condiciones del suelo en ausencia del proyecto. Para esto se deben tener en cuenta todas las consideraciones aplicables al reservorio que se indiquen en las metodologías correspondientes, y a su vez, las especificaciones para los dos escenarios descritos a continuación:

Escenario A: Si la iniciativa inicia su implementación en t0 debe hacer la formulación del escenario de línea base a partir de información histórica de COS que se reporte para el área (o áreas ecológicamente equivalentes) conforme el horizonte de tiempo indicado en la metodología seleccionada, a partir de información oficial o secundaria que sea técnica y/o científicamente soportada. En caso de evidenciarse ausencia de información sobre contenidos de carbono orgánico de suelo a nivel histórico en el área de proyecto, las existencias de COS para la línea base se podrán definir a partir de valores por defecto que asocien el contenido orgánico bajo el uso de la tierra previo a la implementación de la iniciativa (Ver Ilustración 2).

Escenario B: Si un proyecto en etapa de implementación reporta COS como uno de sus reservorios y realiza estimación de remociones asociadas, el valor de línea base corresponderá al promedio de los valores reportados en sus eventos de monitoreo previos hasta la vigencia, independiente del método de cuantificación (Ver Ilustración 2), teniendo en cuenta la existencia de COS dentro del límite de proyecto y su aumento posterior a la implementación de la actividad. Si no había reportado COS anteriormente y no existe información histórica del mismo, debe seleccionar un valor (por defecto o levantado) adecuado al uso del suelo durante el periodo crediticio ya implementado o a ese momento del tiempo.

El dato determinado en el escenario de línea base se deberá restar a la cuantificación obtenida en el escenario con proyecto para cada periodo de monitoreo. La

¹⁶ 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories

determinación de existencias de COS o emisiones asociadas a la afectación de este reservorio se deben cuantificar de la manera en que se describe en este módulo (Ver 6.4 Otras emisiones). Estas cuantificaciones de COS se deben integrar al cálculo de emisiones y/o remociones generales del proyecto, donde se harán los descuentos correspondientes (emisiones, línea base, fugas, etc.) para el cálculo final de emisiones y/o remociones totales para el periodo analizado.

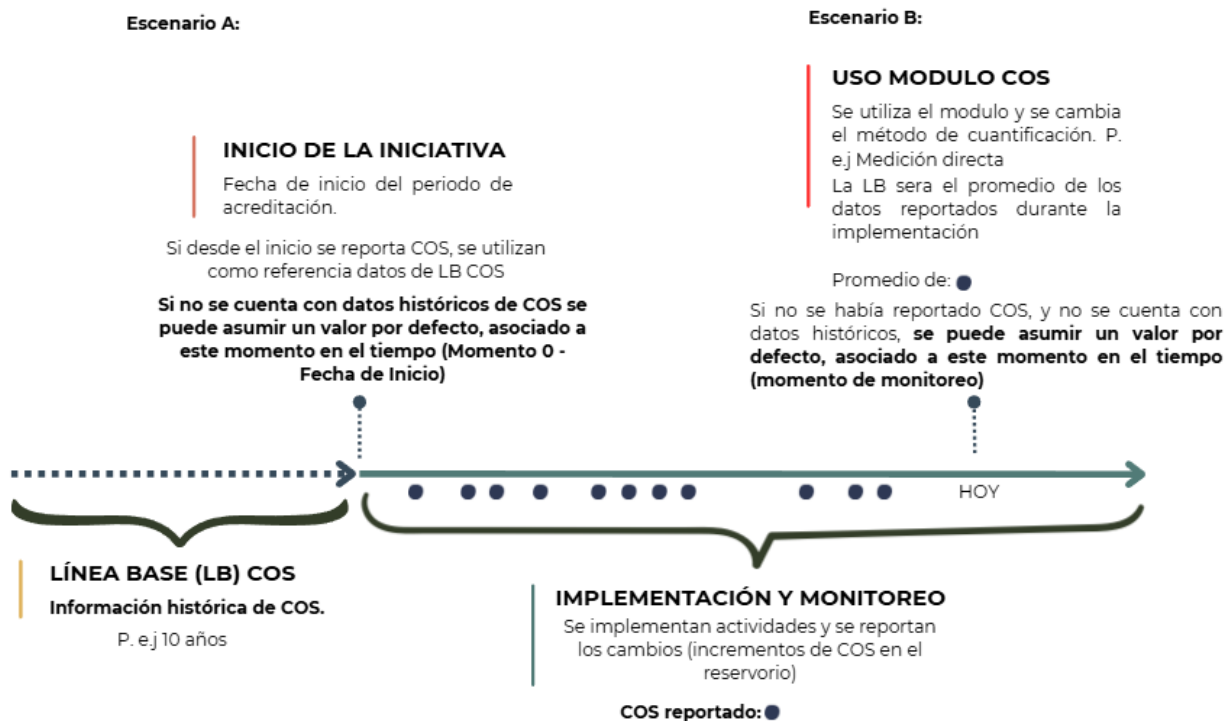


Ilustración 2. Esquema de determinación de la línea base para proyectos en etapa de implementación.

6.3 Proyecto

En el escenario con proyecto los reservorios de COS se deben cuantificar siguiendo los lineamientos de cálculo descritos anteriormente. Al igual que para línea base las cuantificaciones de COS, se deben integrar al cálculo de emisiones y/o remociones generales del proyecto, donde se harán los descuentos correspondientes para el cálculo final de emisiones y/o remociones totales de proyecto para el periodo analizado.

El cambio en las reservas de carbono orgánico en el suelo del proyecto entre dos momentos se calcula de la siguiente manera:

Ecuación 11. Cambio en las reservas de carbono orgánico en el suelo.

$$\Delta C_{COS,ti} = \frac{C_{COS,ti} - C_{COS,tj}}{T}$$

Donde:

$\Delta C_{COS,ti}$	Cambio en el carbono total en el área del proyecto existente en el suelo en el tiempo i (tCO ₂ e/año)
$C_{COS,ti}$	Carbono total en el área del proyecto existente en el suelo en el tiempo i (tCO ₂ e)
$C_{COS,tj}$	Carbono total en el área del proyecto existente en el suelo en el tiempo j (tCO ₂ e)
T	Tiempo transcurrido entre dos mediciones sucesivas (años)
j	Año del actual monitoreo del proyecto (años)
i	Año del monitoreo preliminar del proyecto (años)

6.4 Otras emisiones

Si bien, algunas actividades del proyecto pueden influir en el aumento de los contenidos de COS, las emisiones o reducciones asociadas a la realización de prácticas de manejo de suelos, deben ser cuantificadas y contempladas por el PMGEI de acuerdo con las directrices expuestas en la metodología que se aplique. En consecuencia, este módulo no tiene en cuenta el cálculo de otros reservorios u otras actividades que generen o reduzcan emisiones, y está orientado únicamente a la cuantificación de COS en los diferentes PMGEI a los que sea aplicable.

7 MONITOREO

El proyecto debe reportar los cambios en las existencias de COS de acuerdo con el método de cuantificación seleccionado y en un periodo de tiempo específico.

En el caso de realizar muestreo directo, los datos a reportar corresponderán a los resultados obtenidos en cada ejercicio de muestreo realizado. En el caso de modelación de existencias, la tendencia dependerá de la cantidad y precisión de las existencias de carbono de este reservorio que estén disponibles, es decir, el número de mediciones con las que se construya y calibre.

En los distintos periodos de verificación y de acuerdo el método, se debe reportar y ajustar (en los distintos métodos de cuantificación) con información sobre los cambios en este reservorio, las existencias de carbono medidas durante cada periodo

7.1 Parámetros para monitorear

Para el monitoreo de los contenidos de COS en los suelos del área del proyecto, en cada reporte de monitoreo se deben evaluar y/o reportar como mínimo los siguientes parámetros:

- Variables de estratificación seleccionadas
- Usos y coberturas del suelo
- Mecanismos de muestreo utilizados para la cuantificación
- Métodos de extracción o recolección de muestras

- Densidades aparentes específicas – dependiendo de las fracciones que aparezcan en las muestras
- Ubicación de los sitios de muestreo – localización geográfica.
- Fecha de recolección y medición de las muestras.
- Contenidos de C en gramos (g) o porcentaje (%)
- Contenidos de carbono orgánico del suelo por profundidades, unidades muestréales, estrato, y, para la totalidad del área del proyecto.
- Prácticas de manejo efectuadas en los suelos del proyecto.

7.2 Calidad y aseguramiento de los datos

Se debe garantizar la calidad y coherencia en el manejo de información y captura de datos para contribuir a la integridad, trazabilidad y confiabilidad de los resultados. Para esto se deben implementar protocolos estandarizados de muestreo, manipulación y análisis de muestras de suelos, así como la calibración regular de equipos y la capacitación del personal técnico. Además, el desarrollador debe aplicar procedimientos de control de calidad como análisis duplicados, muestras testigo y uso de materiales de referencia certificados. Se debe documentar de manera detallada en el *“Reporte de Monitoreo”* (Sección C - *Información del sistema de monitoreo implementado*), desde la recolección en campo hasta el procesamiento en laboratorio y el análisis estadístico.

En el proceso de estimación, independientemente del método utilizado se debe realizar el cálculo de incertidumbre con base en los parámetros establecidos en la *“Guía para la identificación de reversiones, riesgos de no permanencia e incertidumbre”*, donde se detalla el procedimiento general para su estimación, los umbrales y demás consideraciones, basados en los lineamientos del IPCC. Adicionalmente, la inclusión de los resultados de este reservorio en las estimaciones totales debe tener en cuenta los parámetros de propagación de incertidumbre definidos.

8 REFERENCIAS

Apesteguia, M.; Plante, A.F.; Virto, I. (2018). Methods assessment for organic and inorganic carbon quantification in calcareous soils of the Mediterranean region. *Geoderma Regional*. Volume 12. Pages 39-48.

Barrezueta-Unda, S.; Cervantes-Alava, A.; Ullauri-Espinoza, M.; Barrera Leon, J.; Condoy-Gorotiza, A. (2020) Evaluación del método de ignición para determinar materia orgánica en suelos de la provincia el Oro-Ecuador. *FAVE - Ciencias Agrarias* 19 (2): 25-36. CC BY-NC-SA 4.0

Burton, A.J., Pregitzer, K.S. (2008). Measuring Forest Floor, Mineral Soil, and Root Carbon Stocks. In: Hoover, C.M. (eds) *Field Measurements for Forest Carbon Monitoring*. Springer, Dordrecht

FAO. (2018). Measuring and modelling soil carbon stocks and stock changes in livestock production systems – Guidelines for assessment (Draft for public review). *Livestock Environmental Assessment and Performance (LEAP) Partnership*, FAO, Rome, Italy.

IPCC. (2006). *Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. Volume 4: Agriculture, Forestry and Other Land Use.

Izquierdo, J. & Arévalo, J. (2021). Determinación de la materia orgánica del suelo (MOS) por el método químico y por calcinación. *Universidad Surcolombiana. Revista Ingeniería y Región*. Vol. 26

Kopittke, P. M., Dalal, R. C., McKenna, B. A., Smith, P., Wang, P., Weng, Z., van der Bom, F. J. T., & Menzies, N. W. (2024). Soil is a major contributor to global greenhouse gas emissions and climate change. *SOIL*, 10, 873–885.

Lal, R. (2004). Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science*, 304(5677), 1623-1627.

Lal, R., Monger, C., Nave, L., & Smith, P. (2021). The role of soil in regulation of climate. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*.

Madrigal Reyes, Susana, Cristóbal Acevedo, David, Hernández Acosta, Elizabeth, & Romo Lozano, José Luis. (2019). Influencia de la cobertura, pendiente y profundidad, sobre el carbono y nitrógeno del suelo. *Revista mexicana de ciencias forestales*, 10(51), 201-223. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v10i51.113>

Martínez H, Eduardo, Fuentes E, Juan Pablo, & Acevedo H, Edmundo. (2008). CARBONO ORGÁNICO Y PROPIEDADES DEL SUELO. Revista de la ciencia del suelo y nutrición vegetal, 8(1), 68-96. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-27912008000100006>

Pearson, T., Walker, S., & Brown, S. (2005). Sourcebook for Land Use, Land-Use Change and Forestry Projects. Winrock International.

Yepes A.P., Navarrete D.A., Duque A.J., Phillips J.F., Cabrera K.R., Álvarez, E., García, M.C., Ordoñez, M.F. 2011. Protocolo para la estimación nacional y subnacional de biomasa - carbono en Colombia. Instituto de Hidrología, Meteorología, y Estudios Ambientales- IDEAM-. Bogotá D.C., Colombia. 162

Historia del Documento

<i>Versión</i>	<i>Fecha</i>	<i>Descripción</i>
1.0	29/01/2026	Versión inicial.