

# Protocolo adaptado para la medición de carbono orgánico del suelo



**AACS**  
ASOCIACION ARGENTINA  
CIENCIA DEL SUELO



**Aapresid**



# Índice

<b>Autores</b> .....	<b>4</b>
<b>Agradecimientos</b> .....	<b>4</b>
<b>2 Introducción</b> .....	<b>5</b>
<b>3 Elementos necesarios</b> .....	<b>6</b>
<b>4 Diseño de muestreo</b> .....	<b>8</b>
4.1 Gestión de la heterogeneidad espacial.....	8
4.2 Método de muestreo.....	9
4.2.1 Muestreo sistemático.....	9
4.2.2 Muestreo en estaciones.....	10
4.2.2.1 Propuesta para vegetación herbácea.....	10
4.2.2.2 Propuesta para vegetación leñosa.....	11
<b>5 Toma de muestra</b> .....	<b>12</b>
5.1 Profundidad.....	12
5.2 Proceso de muestreo y tamaño de la muestra.....	13
5.3 Momento de muestreo.....	13
5.4 Frecuencia.....	14
5.5 Tratamiento de muestras.....	14
<b>6 Determinación de la concentración de COS</b> .....	<b>15</b>
6.1 Laboratorios.....	15
6.2 Método de determinación de COS en las muestras.....	15
<b>7 Determinación de densidad aparente</b> .....	<b>16</b>
7.1 Zonas no rocosas.....	16
7.2 Zonas rocosas.....	17
7.3 Cálculo.....	17
<b>8 Cálculo de reserva de COS</b> .....	<b>18</b>
8.1 Cálculo de masa equivalente.....	19
<b>9 Referencias bibliográficas</b> .....	<b>20</b>





**AACCS**  
ASOCIACION ARGENTINA  
CIENCIA DEL SUELO

 **Aapresid**

**CREA**



## Autores

---

**Por AACCS:** Roberto Álvarez, Juan Galantini, Alicia Irizar, Sebastián Vangeli, Guillermo Studdert.

**Por Aapresid:** Rodolfo Gil, Andrés Madias, Florencia Moresco, Guillermo Peralta.

**Por CREA:** Luis Arias Usandivaras, Gonzalo Berhongaray, Diana de Salazar, Federico Fritz, Guillermo García.

## Agradecimientos

---

Desde Aapresid y CREA queremos expresar nuestro agradecimiento a las empresas que nos acompañan en diferentes iniciativas vinculadas a la temática de carbono en suelos, especialmente a:



**LAND INNOVATION FUND**  
FOR SUSTAINABLE LIVELIHOODS

El soporte económico de este fondo ha permitido el desarrollo de este protocolo, útil para avanzar en la medición de carbono en suelos.

Aapresid desea agradecer a Bayer, Galicia Agro, Macro Rural, Plataforma Puma, Profertil, Santander Agronegocios, Syngenta y Yara por la confianza y el acompañamiento en los diversos proyectos que condujeron a la validación del protocolo.

Además, desde CREA queremos extender el agradecimiento a ARCOR y UPL por su valioso apoyo en la validación de este trabajo.

## 2 Introducción

---

Los suelos son la base para la producción de alimentos y un recurso clave para la mitigación y adaptación al cambio climático, ya que constituyen el principal reservorio de carbono orgánico en los ecosistemas terrestres. El mantenimiento y/o incremento del carbono orgánico de suelo (COS) mejora la salud general del mismo y su fertilidad física, química y biológica, además de favorecer el almacenamiento del agua, aumentar el potencial de producción de alimentos y sostener otras funciones ecosistémicas.

**El principal objetivo de este protocolo es ofrecer a los usuarios una herramienta metodológica unificada y de fácil adopción que ayude a medir de manera confiable y exitosa las reservas de COS bajo diversos usos (agrícola, ganadero, forestal y/o silvopastoril) y que facilite la medición de los cambios registrados a través del tiempo.** Las determinaciones podrán servir tanto para comparar diferentes tratamientos a nivel de ensayos, como para reportar reservas de COS en toneladas por hectárea (t/ha) a nivel de lote o predio. Este protocolo técnico/orientador ha sido desarrollado en forma conjunta y voluntaria por AAPRESID, CREA y la Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo (AACCS), para favorecer la adopción de prácticas sostenibles de manejo de suelos que permitan maximizar las reservas de COS.



### 3 Elementos necesarios

---

Al momento de realizar el trabajo de campo, se recomienda utilizar los siguientes materiales de muestreo:

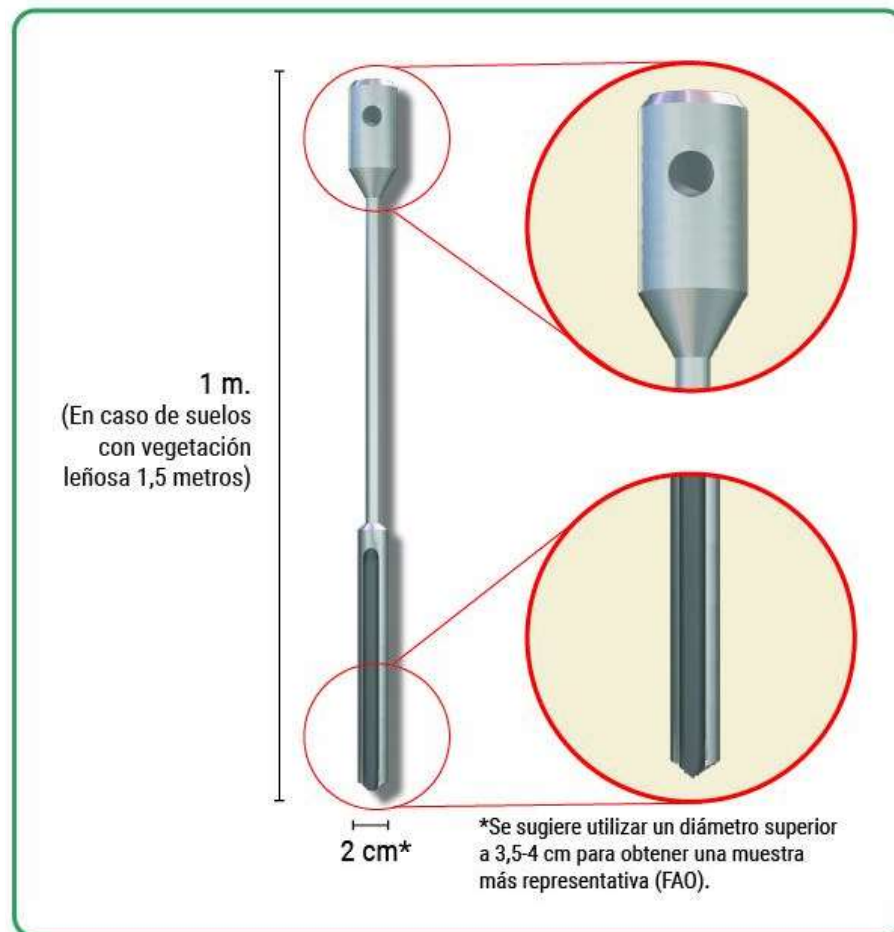
- 1- Barreno tubular de acero inoxidable de 1 metro de longitud para tomar muestras para el análisis de la concentración de COS. En el caso de suelos con vegetación leñosa se utilizará un barreno de 1,5 metros.
- 2- Masa minera grande antirrebote para introducir el barreno en el suelo.
- 3- Para efectuar mediciones de densidad aparente se podrán utilizar:
  - a. Cilindros metálicos muestreadores tipo anillo de acero (**Fig. 1**) con un volumen interior conocido y filo en la parte inferior. Se recomienda que el diámetro del cilindro sea de entre 5 y 10 cm, y que su altura no supere el diámetro. Además, se necesita un casco de acero o taco de madera adecuado para introducir los cilindros muestreadores en el suelo.



**Fig. 1:** Cilindro para medición de densidad aparente.



- b. Barreno tubular (**Fig. 2**). Como segunda opción se puede utilizar un barreno tubular sin anillo de punta, con un diámetro de corte mayor de 2 cm. De esta manera, la misma muestra podrá ser empleada para la determinación del contenido de COS y de la densidad aparente. Es importante tener en cuenta que, según recomendaciones internacionales (FAO, 2020; Australian Government Department of the Environment and Energy, 2018), se sugiere utilizar un diámetro superior a 3.5-4 cm para obtener una muestra más representativa.



**Fig. 2:** Barreno tubular.

- 4- Rollo de bolsas de plástico transparentes (25 cm x 35 cm o más) para reservar y homogeneizar muestras compuestas sin uso previo.
- 5- Recipientes de plástico grandes (ej. balde) debidamente etiquetados para almacenar el suelo muestreado mientras se recorre el campo.

- 6- Marcadores indelebles para etiquetar las bolsas de muestra y/o etiquetas de papel para colocar entre ambas bolsas. También pueden utilizarse etiquetas adhesivas para colocar en las bolsas de muestreo.
- 7- Pala de punta para la extracción de los cilindros muestreadores de densidad aparente del suelo.
- 8- Cuchillo/espátula para retirar del suelo excedente de los cilindros metálicos.
- 9- Elementos de limpieza para barrenos y cilindros metálicos luego del muestreo (cepillos, toallas, etc).
- 10- Cinta métrica para medir la profundidad de las capas del suelo.
- 11- Guantes de trabajo para martillar y manipular las muestras.
- 12- Lapicera y anotador.
- 13- Dispositivo de medición GPS.
- 14- Equipo personal: agua y alimentos, calzado resistente, repelente de mosquitos, protector solar, etcétera.

## 4 Diseño de muestreo

---

### 4.1 Gestión de la heterogeneidad espacial

Para realizar el muestreo de COS es importante **delimitar áreas homogéneas (en adelante áreas de intervención)**. El grado de detalle de la ambientación será definido en función del objetivo del muestreo. Desde el punto de vista del potencial de captura o de la condición del carbono en el suelo, un ambiente homogéneo debe considerar, al menos, las siguientes variables: tipo de suelo, clase textural, relieve, tipo de cobertura (vegetación) e historia de uso y manejo.

Para definir las áreas de intervención se sugiere utilizar:

1. Cartas o mapas de suelo.
2. Mapas de altimetría.
3. Historia de uso y manejo.
4. Imágenes satelitales.
5. Mapas de rendimiento.

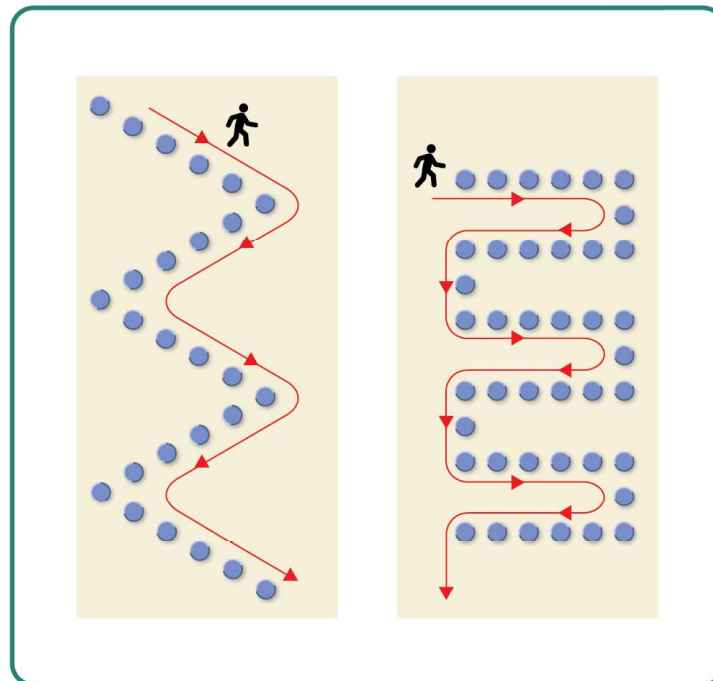


## 4.2 Método de muestreo

### 4.2.1 Muestreo sistemático

Para caracterizar el COS del lote o unidad de manejo, el método de muestreo de suelos más sencillo es un diseño de recorrido en banda griega o zigzag. Este método permite obtener muestras representativas de manera eficiente y sistemática, minimizando posibles sesgos y garantizando una cobertura uniforme del área de interés.

El procedimiento consiste en recorrer el área seleccionada en forma de banda griega o zigzag dentro de la unidad de muestreo para tomar submuestras a lo largo del trayecto. En la **Fig. 3** se pueden observar recorridos de muestreo en banda griega o zigzag, donde cada punto azul es un pique a realizar, mientras que las flechas indican la dirección del muestreo. Se recomienda tomar alrededor de 25 submuestras por unidad de manejo para caracterizar el COS.



**Fig. 3:** Patrones de recorrido de lotes para el muestreo de suelos. Izquierda: en zig-zag; derecha: en banda griega. Los rectángulos indican el área a muestrear en cada caso.

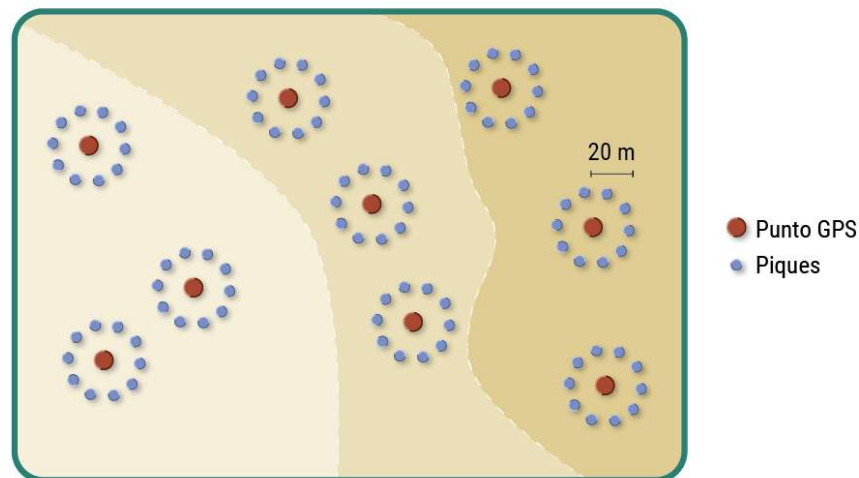
## 4.2.2 Muestreo en estaciones

El muestreo en estaciones permite obtener un registro y seguimiento de COS asociado a una coordenada espacial específica. En gabinete se deberán definir las estaciones de muestreo dentro de cada ambiente homogéneo y registrar sus coordenadas (Ej: -33.56854; -60.65874). También facilita la integración de tecnologías de mapeo digital del suelo (DSM) para la cuantificación de COS, tal como proponen determinados estándares, como Verra (Verra, 2024). En un sistema de MRV (monitoreo, reporte y verificación) de una certificadora para la generación de créditos de carbono en el suelo, cada estándar cuenta con su propia metodología y debe adherirse a las especificaciones establecidas.

Esta metodología es también ideal para ensayos, donde cada área de intervención representa una parcela o unidad experimental. Además, al dividir el área de estudio en estaciones de muestreo se puede obtener una toma que represente de manera precisa la variabilidad espacial del carbono orgánico en el suelo. Esto es especialmente útil en áreas con heterogeneidad en características como textura, vegetación y topografía, entre otros.

### 4.2.2.1 Propuesta para vegetación herbácea

El número de las estaciones deberá ser definido en función del tamaño del área de intervención en cada ambiente homogéneo (**Tabla 1**). En cada estación, se realizan 10 piques distribuidos al azar, en un radio de 20 metros (**Fig. 4**).

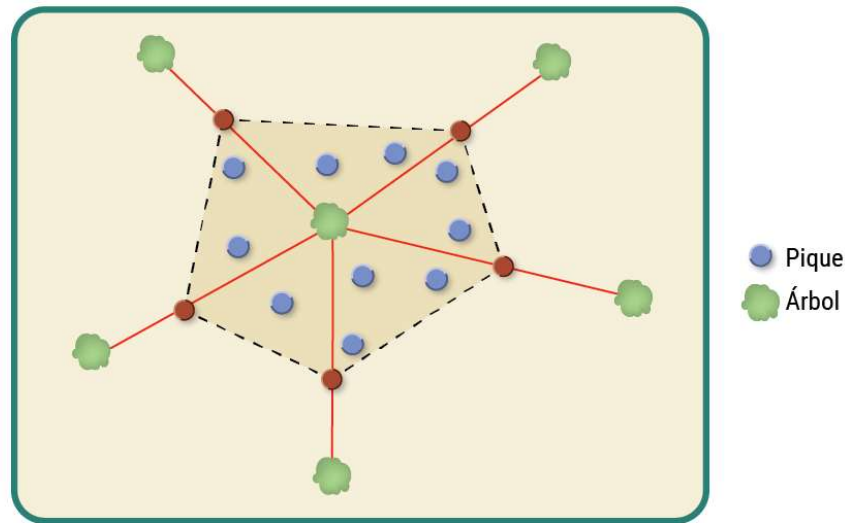


**Fig. 4:** Patrones de muestreo en estaciones. Propuesta para vegetación herbácea. Las superficies de distintos colores representan las áreas de intervención. Los puntos marrones representan el punto georreferenciado de cada estación. Los puntos azules representan cada submuestra dentro de cada estación.

#### 4.2.2.2 Propuesta para vegetación leñosa

La vegetación leñosa determina una heterogeneidad espacial que se da a otra escala, distinta a la de las áreas de intervención. En estos casos, las estaciones de muestreo no serán circulares, sino que seguirán un diagrama de Voronoi, que proporciona una forma eficiente de distribuir los puntos de muestreo y garantiza una cobertura completa y representativa del área de estudio.

Cada estación se definirá con un polígono de Voronoi (10 piques por estación de muestreo). En la **Fig. 5** cada punto rojo representa un árbol. Se trazan rectas desde un árbol central hacia los árboles más cercanos (líneas rojas llenas). Luego, se establece la mitad de la distancia de cada recta (puntos negros). Entre los puntos negros se trazan rectas que determinan los límites del Polígono de Voronoi (líneas rojas punteadas). Finalmente, dentro de cada Polígono de Voronoi se distribuyen los 10 puntos de muestreo al azar (puntos azules).



**Fig. 5:** Patrones de muestreo en estaciones. Propuesta para vegetación leñosa  
Las figuras verdes representan un árbol o arbusto; las líneas continuas representan la distancia entre el árbol central y los circundantes; los puntos marrones representan la mitad de la distancia entre árboles, y la línea punteada representa el polígono formado limitando el área de muestreo. Cada punto azul representa un pique.



En ambas situaciones (vegetación herbácea o leñosa), el número de las estaciones se definirá en función del tamaño del área de intervención (**Tabla 1**).

**Tabla 1: Número mínimo de estaciones de muestreo recomendado por superficie del área de intervención.**  
Referencia: Zhang et al. 2011

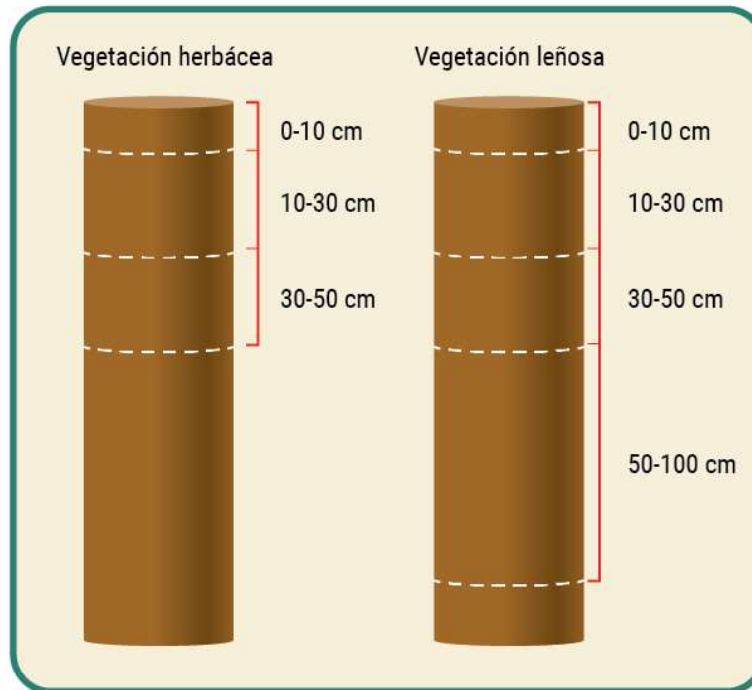
Superficie del área de intervención (ha)	Número de estaciones de muestreo
0-50	3
50-100	4
100-200	5
200-10.000	6

## 5 Toma de muestra

### 5.1 Profundidad

Las muestras deberán tomarse en los estratos de 0-10, 10-30 y 30-50 cm. En el caso de lotes con cultivos perennes o forestales se recomienda profundizar hasta el estrato de 50-100 cm (**Fig. 6**).





**Fig. 6:** Profundidades de muestreo en el perfil de suelo según tipo de vegetación

## 5.2 Proceso de muestreo y tamaño de la muestra

En cada punto de muestreo, previo a la incorporación del barreno o cilindros, se debe despejar la superficie de todos los residuos orgánicos (mantillo, rastrojos, etc.) sin afectar al suelo.

Evitar tomar muestras de suelo para COS y densidad aparente en áreas con excretas, caminos de animales, áreas de tránsito evidente, áreas muy próximas a puntos de riego o áreas con evidencia de erosión, alambrados y cortafuegos.

Se deberá tomar una muestra compuesta, cuya cantidad de submuestras dependerá del método de muestreo elegido. La muestra compuesta debe contener al menos 500 gramos de suelo.

## 5.3 Momento de muestreo

El análisis de la evolución de COS requiere que las muestras sean tomadas en el mismo momento del año (+/- 30 días). A su vez, se recomienda que el momento de muestreo contemple un suelo con buena humedad, cercana a capacidad de campo, e idealmente una menor actividad biológica (baja temperatura), evitando realizar los muestreos en campañas o en condiciones donde el suelo podría estar muy seco para la extracción de las muestras.

## 5.4 Frecuencia

La frecuencia recomendada para realizar evaluaciones de COS y densidad aparente va a depender de la profundidad del muestreo, tal como se advierte en la **Tabla 2**. En el caso de agricultura, se aconseja hacer coincidir el intervalo de muestreo con el tiempo de la rotación.

**Tabla 2:** Frecuencia recomendada entre muestreos según la profundidad de muestreo.  
Gruneberg *et al* 2010.

Profundidad de muestreo (cm)	Intervalo mínimo entre muestreos (años)
0-10	2
10-30	4 a 6
30-50	10
50-100	20

## 5.5 Tratamiento de muestras

Las muestras de suelo deben recolectarse en bolsas de plástico transparentes y ser correctamente identificadas. Su tratamiento dependerá del tiempo que se demore en enviarlas al laboratorio.

Si el envío es inmediato: cerrar las bolsas herméticamente y conservar en heladera (no congelar).

Si el envío demora más de 3 días: dejar las bolsas abiertas para secar el volumen de suelo al aire y removerlo periódicamente para favorecer la pérdida de humedad.

Cada muestra debe etiquetarse con la siguiente información:

1. Nombre del campo o lote donde se tomó.
2. Identificación del ambiente.
3. Ubicación GPS (coordenadas).
4. Uso actual de suelo.

5. Fecha de muestreo.
6. Profundidad de muestreo (0-10 cm, 10-30 cm, 30-50 cm, 50-100 cm).
7. Tipo de análisis a realizar (COS, DAP).

## 6 Determinación de la concentración de COS

---

Cuando el análisis de muestras está orientado a determinar el cálculo de stock se debe utilizar la masa de tierra fina (<2mm), excluyendo fragmentos gruesos.

### 6.1 Laboratorios

Se recomienda enviar las muestras a laboratorios que estén registrados en el Sistema de Apoyo Metodológico a Laboratorio de Análisis de suelo, aguas, vegetales y enmiendas orgánicas (SAMPLA) del Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca (ver link en Referencias Bibliográficas), y que habiendo participado del PROINSA hayan obtenido un certificado de desempeño “satisfactorio” en, al menos, tres de los últimos cinco años. Utilizar el mismo laboratorio para realizar todas las evaluaciones de seguimiento de indicadores (COS, DAP).

### 6.2 Método de determinación de COS en las muestras

1° opción: COS total por analizador elemental con extracción de carbonatos.

Se trata del método de combustión seca de Dumas (Bremner, 1996), que implica determinar el carbono orgánico total (COT) mediante el uso de un analizador elemental que realiza una combustión seca de la muestra. Ésta es incinerada a altas temperaturas, por lo que el carbono presente se convierte en dióxido de carbono, que es luego cuantificado para determinar la cantidad de carbono orgánico. En suelos con alto contenido de carbonatos es necesario extraer con ácido los carbonatos presentes en la muestra, antes de enviarlos al analizador elemental.

Este método es ampliamente utilizado por diversos entes internacionales y certificadoras debido a la determinación precisa del carbono orgánico total.

**2° opción:** Método de oxidación húmeda (Walkley y Black, 1934).

Esta opción implica la oxidación húmeda de la materia orgánica presente en la muestra mediante la utilización de una solución oxidante, como el dicromato de potasio en ácido sulfúrico. El carbono orgánico presente se convierte en dióxido de carbono, y luego se titula el excedente de dicromato para determinar la cantidad de carbono orgánico.

Este método es práctico, de bajo costo, y puede ser utilizado repetidas veces, aunque es menos preciso que el método anterior, ya que mide el carbono fácilmente oxidable, por lo que es necesario utilizar un factor de oxidación que es muy variable. Es importante aclarar que el método descrito para combustión húmeda es de baja seguridad y cancerígeno debido a los reactivos que utiliza.

## 7 Determinación de densidad aparente

---

En caso de utilizar el método del cilindro se deberá realizar la medición en el centro de cada estrato de profundidad (tipo escalera). Si se emplea un barreno sin anillo habrá que usar una misma muestra por estrato, tal cómo indica la Fig. 1.

La densidad aparente es la masa de suelo seco por unidad de volumen de suelo muestreado.

### 7.1 Zonas no rocosas

El muestreo para densidad aparente consiste en (i) recolectar un volumen de suelo mediante la utilización de un cilindro de metal (de volumen conocido) o del barreno tubular propuesto (Fig. 2) y luego (ii) determinar su peso seco. Al momento de la toma, el suelo debe estar húmedo, óptimamente a capacidad de campo.

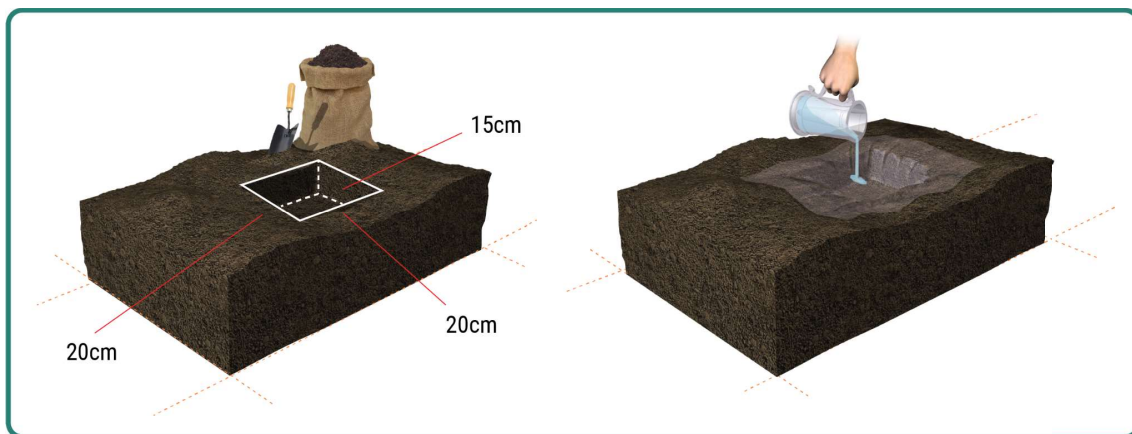
En caso de que el muestreo se efectúe con cilindro, para la primera profundidad se debe quitar el mantillo antes de introducirlo, preparando una superficie horizontal plana a la profundidad del muestreo. A continuación, se debe colocar el cilindro de acero sobre dicha superficie y empujar el implemento o bien martillar suavemente para favorecer su penetración de manera vertical. El suelo alrededor del cilindro se excava sin perturbar ni aflojar el contenido del cilindro, para luego enrasarlo con ayuda de un cuchillo. Las muestras recolectadas en cada profundidad se colocan en una bolsa y se secan en una estufa a 105° C hasta lograr un peso constante.



## 7.2 Zonas rocosas

En zonas rocosas se recomienda el método del hoyo, el cual consiste en excavar un pequeño pozo y conservar la tierra retirada como muestra. Luego, se calcula el volumen de la muestra vertiendo arena seca o agua en el hoyo del que se extrajo la muestra. Finalmente, la muestra de suelo retirada se seca para determinar su peso seco.

Se recomienda que la profundidad de muestreo sea la misma que para COS. A continuación, se presenta una figura estimativa que ejemplifica este método.



**Fig. 7:** Hoyo de 20 cm x 20 cm x 15 cm.

En la figura situada a la derecha se muestra como se introduce agua.

## 7.3 Cálculo

La densidad aparente (DAP) se calculará como:

$$DAP = \frac{PS}{VT}$$

DAP = densidad aparente (t m<sup>-3</sup>).

PS= Peso seco total (t).

VT= Volumen total (m<sup>3</sup>)

El volumen total será igual al volumen del cilindro o barreno por la cantidad de muestras realizadas (repeticiones).



## 8 Cálculo de reserva de COS

---

Las reservas de COS se calculan multiplicando la proporción de COS total (es decir, el porcentaje de masa de C) por la profundidad y por la densidad aparente (DAP).

$$COS_{reserva} = DAP \times C \times p \times 100$$

$COS_{reserva}$  = reserva de carbono orgánico del suelo ( $t\ ha^{-1}$ ).

DAP = densidad aparente ( $t\ m^{-3}$ ).

C = concentración de COS ( $kg\ 100\ kg^{-1}$ ).

p = profundidad del horizonte (m).

En el caso de suelos con fracciones > 2 mm (piedras) se debe utilizar la siguiente ecuación (Poeplau et al., 2017):

$$SF_{reserva} = \frac{M_{SF}}{Volumen\ total} \times espesor$$

$SF_{reserva}$  = reserva de suelo fino ( $t\ ha^{-1}$ ).

$M_{SF}$  = masa del suelo fino (t).

Volumen total = volumen total de la muestra ( $m^3$ ).

Espesor = espesor del suelo considerado (m).

$$COS_{reserva} = C_{SF} \times SF_{reserva}$$

$COS_{reserva}$  = reserva de carbono orgánico del suelo ( $t\ ha^{-1}$ ).

$C_{SF}$  = Concentración de COS en suelo fino ( $kg\ 100\ kg^{-1}$ ).

$SF_{reserva}$  = reserva de suelo fino ( $t\ ha^{-1}$ ).

## 8.1 Cálculo de masa equivalente

El cálculo de masas de suelo semejantes es fundamental para comparar situaciones en las que el manejo produce cambios diferenciales en la DAP. Este enfoque es esencial cuando el manejo provoca diferencias en la masa de suelo muestreada debido a variaciones en la DAP. Sin embargo, no se aplica si el cambio en la masa de suelo es resultado de procesos de erosión.

Por esto los stocks de carbono se deben expresar en unidades de masa equivalente como masa por unidad de área, por ejemplo en  $t\ ha^{-1}$ .

Para esto se recomienda utilizar la siguiente ecuación (Sisti et al., 2003):

$$COS_{reserva\ eq} = \sum_{i=1}^{n-1} COS_{T\ reserva\ i} + \left[ M_{T\ total\ n} - \left( \sum_{i=1}^n M_{T\ reserva\ i} - \sum_{i=1}^n M_{S\ reserva\ i} \right) \right] COS_{T\ concentración\ n}$$

$COS_{reserva\ eq}$  = reserva de carbono total en el suelo hasta una profundidad equivalente a la misma masa de suelo que en el suelo de referencia ( $t/ha^{-1}$ ).

$\sum_{i=1}^{n-1} COS_{T\ reserva\ i}$  = suma del contenido de carbono de las capas 1 (más superficial) a la n-1 (penúltima), en el suelo del tratamiento ( $t/ha^{-1}$ ).

$M_{T\ total\ n}$  = masa de suelo en la capa más profunda, en el suelo del tratamiento ( $t/ha^{-1}$ ).

$\sum_{i=1}^n M_{T\ reserva\ i}$  = suma de la masa de suelo en las capas 1 (más superficial) a n (más profunda), en el suelo del tratamiento ( $t/ha^{-1}$ ).

$\sum_{i=1}^n M_{S\ reserva\ i}$  = suma de la masa de suelo en las capas 1 (más superficial) a n (más profunda), en el suelo de referencia ( $t/ha^{-1}$ ).

$COS_{T\ concentración\ n}$  = concentración de COS de la capa más profunda del suelo del tratamiento ( $kg\ 100\ kg^{-1}$ ).



## 9 Referencias bibliográficas

---

Bremner, JM. (1996). Total Nitrogen. In: DL Sparks (ed). Methods of soil analysis. Part 3: Chemical methods. SSSA. pp:1149-1176.

FAO. (2020). A protocol for measurement, monitoring, reporting and verification of soil organic carbon in agricultural landscapes - GSOC-MRV Protocol. Rome. <https://doi.org/https://doi.org/10.4060/cb0509en>

Grüneberg, E.; Schöning, I.; Kalko, E.K.V.; Weisser, W.W. Regional organic carbon stock variability: A comparison between depth increments and soil horizons. *Geoderma* 2010, 155, 426–433

Poeplau C, Vos C, Don A. 2017. Soil organic carbon stocks are systematically overestimated by misuse of the parameters bulk density and rock fragment content. *Soil*, 3, 61–66.

SAMLA. (2023). Listado de laboratorio adheridos. Disponible en: <https://www.magyp.gob.ar/sitio/areas/samla/laboratorios/lista/index.php>

Sisti, C.P.J., dos Santos, H.P., Kohhann, R., Alves, B.J.R., Urquiaga, S., Boddey, R.M. (2004). Change in carbon and nitrogen stocks in soil under 13 years of conventional or zero tillage in southern Brazil. *Soil Till. Res.* 6: 39-58

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 method. *Soil science*, 37(1), 29-38.

Zhang W, Weindorf DC, Zhu Y. 2011. Soil organic carbon variability in croplands: implications for sampling design. *Soil Science*. 176: 367-371