

Comparación de métodos analíticos para la determinación de materia orgánica en suelo con residuos de café

Angélica López-Gómez¹
Martha Rosales-Castro^{1,§}

¹ Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional-Instituto Politécnico Nacional-Unidad Durango. Calle Sigma 119, Fracc. 20 de noviembre II, Durango, México. CP. 34220. (angelicalogo0@gmail.com).

Autor para correspondencia: mrciidirdgo@yahoo.com.

Resumen

La materia orgánica es un indicador de la calidad y fertilidad del suelo, influye directamente en sus propiedades físicas, químicas y biológicas. Su análisis es fundamental para la producción agrícola y forestal. El método de Walkley-Black, es el estándar establecido en la normativa mexicana, aunque presenta desventajas ambientales al utilizar reactivos químicos tóxicos con características particulares de manejo. Por esta razón, se propone como alternativa el método de calcinación, que cuantifica directamente el contenido de materia orgánica en el suelo, mediante la determinación de la pérdida de peso de una muestra al someterse a altas temperaturas. En este estudio se compararon ambos métodos en muestras de suelos enriquecidos con residuo sólido de café y con compostela elaborada de rsc/estiércol bovino. Los datos fueron analizados estadísticamente para evaluar la equivalencia entre los métodos. Los resultados mostraron una alta correlación ($r= 0.951$) y ausencia de diferencias significativas ($p = 0.94$), lo que respalda la viabilidad de utilizar el método de calcinación como alternativa al método Walkley-Black por la alta correlación en los valores de materia orgánica al ser analizados por los dos métodos analíticos. Se sugiere la posibilidad de modificar la normativa vigente para incorporar el método de calcinación, ofreciendo una opción segura y ecológica para determinar materia orgánica en el suelo.

Palabras clave:

análisis de suelo, calcinación, fertilidad, normativa mexicana.



Introducción

La materia orgánica (MO) es un componente esencial en el suelo, proviene de residuos de origen vegetal y animal en diferentes etapas de descomposición, biomasa microbiana y sustancias orgánicas complejas como ácidos fulvicos, ácidos húmicos y huminas (Eyherabide *et al.*, 2014).

Es considerado uno de los principales indicadores de calidad y fertilidad del suelo, ya que influye directamente sobre sus propiedades físicas, químicas y biológicas (Ruiz *et al.*, 2023). La determinación de la MO es fundamental para comprender la productividad agrícola y forestal de los suelos.

El método más utilizado para medir este parámetro es el propuesto por Walkley y Black (1934), conocido como Walkley-Black (WB), el cual estima el contenido de carbono orgánico (CO) presente en el suelo, este análisis consistió en la oxidación de la muestra con dicromato de potasio en ácido sulfúrico. La reacción toma el calor de la disolución del ácido, lo que eleva la temperatura y logra la oxidación del carbono orgánico (Eyherabide *et al.*, 2014).

Para convertir las mediciones de CO en estimaciones de MO, se utiliza el factor Van Bemmelen, con un valor de 1.724 (Pribyl, 2010; Bautista y Hernández, 2021). Aunque se ha utilizado de forma universal durante muchos años, se menciona que el valor puede verse influenciado por factores como la cobertura vegetal, composición de materia orgánica, profundidad de perfil, cantidad de materia orgánica y arcilla en el suelo, así como el grado de descomposición, lo que puede reflejar diferencias reales en el contenido de carbono de la materia orgánica (La Manna *et al.*, 2007).

El método Walkley-Black tiene la desventaja de utilizar grandes cantidades de reactivos químicos, como el dicromato de potasio ($K_2Cr_2O_7$). Debido a su alta toxicidad este compuesto está clasificado como cancerígeno y puede ingresar al organismo por inhalación o contacto con la piel. Una vez dentro, los iones de cromo hexavalente (Cr^{6+}) pueden atravesar las membranas celulares y ser confundidos con aniones de sulfato (SO_4^{2-}), permitiéndoles alcanzar el núcleo y reaccionar con el ADN, causando mutaciones y daño genético (DesMarais y Costa, 2019).

La aplicación de este método genera estos residuos peligrosos en grandes cantidades y en muchos casos, los laboratorios carecen de sistemas de tratamiento adecuados, lo que puede derivar en la liberación de estos desechos a cuerpos de agua, afectando tanto al medio ambiente como a la salud humana (Arévalo *et al.*, 2022). Las desventajas del método WB han impulsado la búsqueda de otros métodos para la estimación de MO del suelo.

Un enfoque alternativo que se ha propuesto es el método de calcinación, que cuantifica directamente el contenido de MO, ya que se basa en determinar la pérdida de peso de una muestra seca de suelo, al someterla a altas temperaturas (300 a 600 °C) en horno-mufla durante varias horas (2-6 h) (Abella y Zimmer, 2007). Este método es sencillo, no genera daños al medio ambiente y no requiere el uso de reactivos peligrosos.

La normativa mexicana, Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000 indica que para MO se debe utilizar el método WB. Considerando las desventajas mencionadas y con la finalidad de mostrar evidencia para una posible modificación en la norma mexicana, en este estudio se utilizaron dos técnicas analíticas para evaluar MO en muestras de suelo, enriquecido con residuo sólido de café (rsc). Además, se evaluaron mezclas de suelo con composta, elaborada de rsc/estiércol bovino (eb) 75/25 v/v. Mediante una prueba estadística descriptiva y una regresión lineal se analizaron sus diferencias.

Materiales y métodos

El trabajo experimental se realizó en los laboratorios del Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional, del Instituto Politécnico Nacional, Unidad Durango (CIIDIR-Durango).

Se recolectaron muestras de suelo en tres localidades del estado de Durango México, suelo 1(S1) en municipio de Durango, coordenadas 24° 03' 05.1" latitud norte 104° 36' 37.8" longitud oeste, suelo 2 (S2) en municipio de Cuencamé, 24° 55' 42.5" latitud norte 103° 48' 25.4" longitud oeste y suelo 3 (S3) en municipio de Durango, 24° 01' 50.9" latitud norte 104° 36' 57.1" longitud oeste.

A estos suelos se les adicionó residuo sólido de café (*Coffea spp.*). Este material es la parte insoluble del grano de café molido que no se disuelve en agua caliente y permanece después de la preparación de la bebida -café. El rsc se recolectó en una cadena de cafeterías en la ciudad de Durango, México.

Se prepararon diferentes mezclas todas en base seca v/v. A S1 se adicionó 5, 10, 20 y 30% de rsc; a S2 5, 10 y 20%, a S3 se le adicionó composta obtenida a partir del rsc con estiércol bovino (eb), en porcentajes de 10 y 20%. Con S3 se prepararon además mezclas con 30% rsc y 20% rsc +10% eb. Todas las muestras se molieron en un molino de laboratorio. Se analizaron 14 muestras por triplicado, tanto por la técnica de WB como por calcinación.

Para el análisis por el método WB la muestra se tamizo por una malla 80 mesh (0.18 mm). Se pesaron 0.5 g y se llevó a un matraz Erlenmeyer de 500 ml. Se adicionaron 10 ml de Dicromato de potasio (1N), después 20 ml de ácido sulfúrico concentrado y se dejó reposar por 30 min. Transcurrido el tiempo se agregaron 200 ml de agua destilada, 5 ml de ácido fosfórico y 5 gotas de indicador difenilamina. Este proceso también se realizó con un testigo, que no contenía muestra de suelo solo los reactivos. Después se procedió a titular las muestras con sulfato ferroso (1N), hasta obtener un cambio de color naranja a azul oscuro.

Para determinar el porcentaje de materia orgánica se calcula primero el CO, mediante la siguiente fórmula:

$$\% \text{Corgánico} = \frac{(B-T)N0.39mcf}{g}$$

B= volumen de sulfato ferroso gastado para valorar el blanco de reactivos (ml); T= volumen de sulfato ferroso gastado para valorar la muestra (ml); N= normalidad del sulfato ferroso; g= gramos de muestra; mcf= factor de corrección de humedad.

La MO se calculó con la fórmula:

$$\% \text{materiaorgánica} = \% \text{Corgánico} \times 1.724$$

El método de calcinación implica la destrucción de la materia orgánica en la muestra de suelo. Los ensayos se realizaron a partir de muestras molidas y tamizadas en malla 80 mesh (0.18 mm). Primeramente, los crisoles se llevaron a peso constante, utilizando una estufa a 105 °C durante 24 h. Después se agregó la muestra de suelo, se colocaron nuevamente en la estufa a 105 °C por 24 h para eliminar la humedad. Posteriormente se colocaron en la mufla a una temperatura de 550 °C por 5 h.

El contenido de MO se calculó con la fórmula:

$$\% \text{MO} = \frac{P1 - P2}{P1 - C} * 100$$

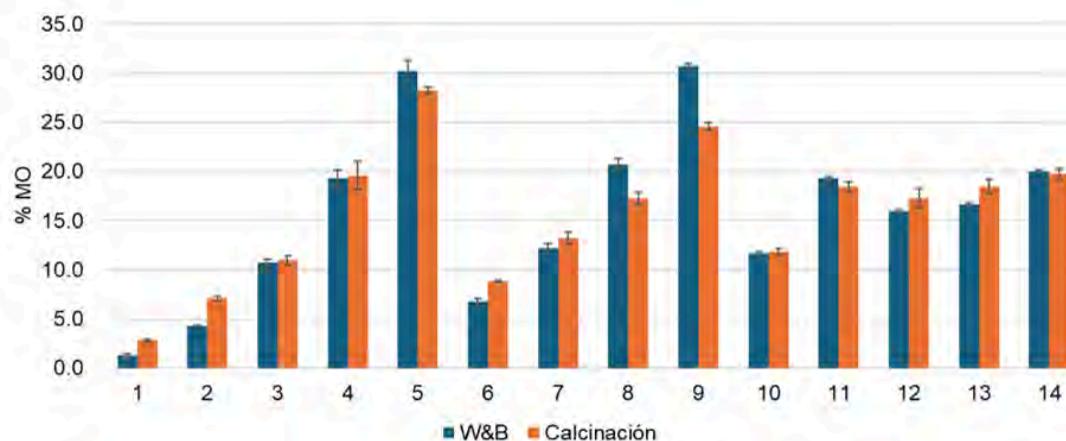
P1= peso suelo seco; P2= peso suelo después de calcinación; c = peso del crisol.

Para el análisis estadístico, en primer lugar, se verificó la normalidad de los datos mediante la prueba de Shapiro-Wilk. Una vez confirmada la normalidad, se aplicó la prueba t de Student para evaluar diferencias significativas entre los métodos. Posteriormente, se comprobó la homocedasticidad mediante la prueba de Levene para verificar la igualdad de varianzas entre los grupos comparados. Para evaluar la relación entre ambos métodos, se calculó el coeficiente de correlación de Pearson y se llevó a cabo un análisis de regresión lineal con el fin de examinar la relación entre los resultados obtenidos por ambos métodos y determinar la posible equivalencia entre las mediciones. Todos los análisis se realizaron en Microsoft Excel utilizando el complemento Real Statistics.

Resultados y discusión

Los resultados del contenido de MO en los suelos se muestran en la Figura 1. Con respecto a la adición de rsc al suelo, en S1 se tuvo la mejor respuesta de incremento de MO, la adición de 5% aumenta tres veces la cantidad de MO respecto al valor inicial. En S2 la mejor respuesta se obtuvo con la adición de rsc 20%. En S3 que tuvo la mayor cantidad de MO inicial, la adición de composta (20% y 10%), así como de 30% rsc de forma directa (sin compostar) y 20 % rsc+10 % eb, también de forma directa, el aumento en MO fue similar en todos los tratamientos.

Figura 1. Contenido de MO en suelos analizados por WB y por calcinación. 1(S1), 2(S1+5% rsc), 3(S1+10% rsc), 4(S1+20%rsc), 5(S1+30% rsc), 6(S2), 7(S2+5% rsc), 8(S2+10% rsc), 9(S2+20% rsc), 10(S3), 11(S3+20% composta), 12(S3+10%composta), 13(S3+30% rsc), 14(S3+20% rsc+10% eb).



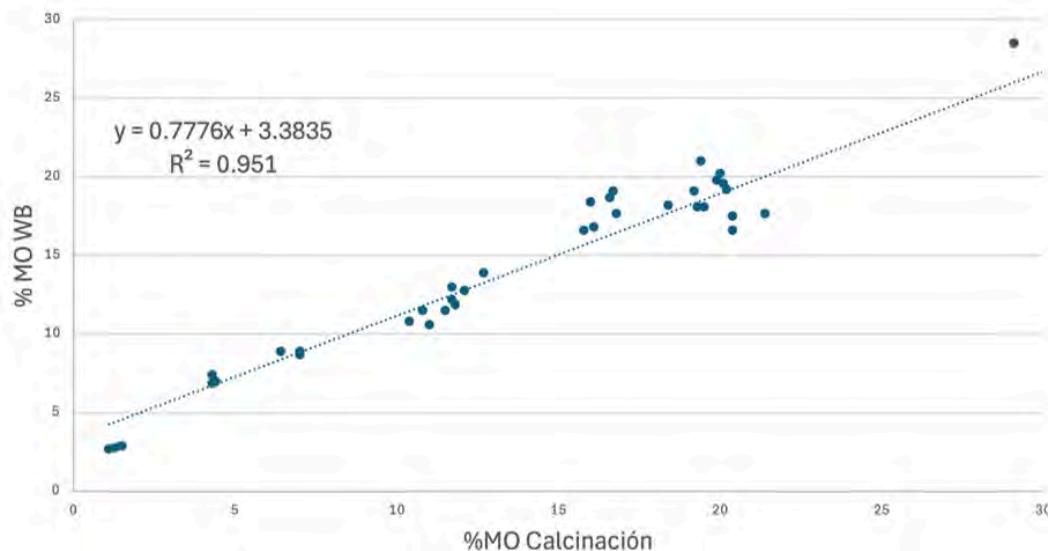
Para el análisis estadístico, en primer lugar, se evaluó la normalidad de los datos mediante la prueba de Shapiro-Wilk, obteniéndose coeficientes de 0.9487 y 0.9665 para los grupos de WB y calcinación respectivamente, con valores p de 0.0583 y 0.2508 ($p > 0.05$), lo que indica que ambos conjuntos siguen una distribución normal y permite el uso de pruebas paramétricas en el análisis.

Posteriormente, se verificó la homogeneidad de varianzas aplicando la prueba de Levene, que no mostró diferencias significativas en las varianzas entre los grupos (medias: $p= 0.2126$; medianas: $p= 0.1989$; medias recortadas: $p= 0.2095$), por lo que se asume homogeneidad de varianzas, confirmando la homocedasticidad entre los grupos.

Con estas condiciones cumplidas, se utilizó la prueba t de Student para muestras relacionadas, obteniéndose un valor p de 0.6957, lo que sugiere que no existen diferencias estadísticamente significativas entre los dos métodos analizados. Además, el análisis de correlación de Pearson mostró un coeficiente de correlación de 0.9752 ($p < 0.001$), evidenciando una relación positiva muy alta entre los resultados de ambos métodos analíticos.

Si bien los datos presentan cierta dispersión, el ajuste mediante regresión lineal muestra un coeficiente de determinación (R^2) del 95%, que indica una fuerte relación entre las variables analizadas (Figura 2). Este resultado sugiere que el método de calcinación es una alternativa viable para la determinación de MO, en lugar del método químico WB.



Figura 2. Relación lineal de MO en suelos analizados por WB y por calcinación.

Diversos estudios reportan comparabilidad entre los métodos de WB y calcinación para la determinación de MO. Un trabajo de investigación realizado por Ruiz *et al.* (2023) reportó una correlación (R^2) del 0.9 tras analizar cinco materiales orgánicos en nueve laboratorios, sin encontrar diferencias significativas.

En otro estudio Arévalo *et al.* (2022) analizó suelos con distintos contenidos de arcilla para determinar la variabilidad entre métodos, encontrando una correlación (R^2) de entre 0.7 y 0.82, dependiendo del contenido de arcilla. Menciona que independientemente de este factor, existe una relación confiable entre ambos métodos.

Por otra parte, Eyherabide *et al.* (2014) reporta una regresión de 0.98 en análisis de suelos con textura franca, sin observar diferencias significativas. En un análisis de 84 muestras de suelos agrícolas en Carolina del Norte, Roper *et al.* (2019) encontró una fuerte correlación entre los métodos WB, calcinación y combustión en seco, concluyendo que cualquiera de estos métodos es igual de eficiente para determinar el contenido de MO en el suelo. Estos resultados en conjunto respaldan la viabilidad del método de calcinación como una alternativa fiable y efectiva al método WB, sin importar la clasificación del suelo.

Conclusiones

Existe alta correlación en los valores de MO al ser analizados por dos métodos analíticos, WB y calcinación. Los resultados obtenidos en el estudio, en conjunto con la evidencia de investigaciones previas, respaldan la posibilidad de sugerir una modificación en la normativa NOM-021-RECNAT-2000 vigente, para incorporar el método de calcinación como una opción estándar para la determinación de MO en el suelo. Este método además de sostenible y amigable para el medio ambiente, es efectivo, seguro y de bajo costo.

Agradecimientos

La primera autora agradece la beca de doctorado otorgada por la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI), registro 860774. El financiamiento fue otorgado por el Instituto Politécnico Nacional, proyecto SIP20241466.

Bibliografía

- 1 Abella, S. R. and Zimmer, B. W. 2007. Estimating organic carbon from loss-on-ignition in northern Arizona forest soils. *Soil Science Society of America Journal*. 71(2):545-550.
- 2 Arévalo, G. E.; Sánchez-Amaya, J. M. y Guillen-Marquina, I. 2022. Estudio del contenido materia orgánica por dos métodos analíticos en suelos de Honduras. *Revista de Ciencias Ambientales*. 57(1):1-13.
- 3 Bautista, J. I. y Hernández, J. J. A. 2021. Determinación del carbono orgánico por el método químico y por calcinación. *Ingeniería y Región*. 26:20-28.
- 4 DesMarais, T. L. y Costa, M. 2019. Mechanisms of chromium-induced toxicity. *Current Opinion in Toxicology*. 14:1-7.
- 5 Eyherabide, M.; Saínz, R. H.; Hernán, B. P. y Echeverría, H. E. 2014. Comparación de métodos para determinar carbono orgánico en suelo. *Ciencia del suelo*. 32(1):13-19.
- 6 La Manna, L.; Buduba, C.; Alonso, V.; Davel, M.; Puentes, C. y Irisarri, J. 2007. Comparación de métodos analíticos para determinar materia orgánica en suelos de la región andino-patagónica: efectos de la vegetación y el tipo de suelo. *Ciencia del Suelo*. 25(2):179-188.
- 7 NOM-021-RECNAT-2000. Norma Oficial Mexicana. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). Establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. *Estudios, Muestreo y Análisis*.
- 8 Pribyl, D. W. 2010. A critical review of the conventional SOC to SOM conversion factor. *Geoderma*. 156(3-4):75-83.
- 9 Roper, W. R.; Robarge, W. P.; Osmond, D. L. and Heitman, J. L. 2019. Comparing four methods of measuring soil organic matter in North Carolina soils. *Soil Science Society of America Journal*. 83(2):466-474.
- 10 Ruiz, D. M.; Cori, C. E. C; Sosa, F.; Aular, L. M.; Mora, R.; Castillo, L. C.; Ortega, B.; Castillo E.; Ramírez-Iglesias, E.; Rodríguez, J.; León, M.; Sequera, C. S.; Tovar, M. R.; Martínez, A.; Reverón, A. M. and Gámez, F. 2023. Comparison of methods for analyzing organic matter in organic materials. *Brazilian Journal of Animal and Environmental Research*. 6(3):2331-2341.
- 11 Walkley, A. and Black, I. A. 1934. An examination of degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Sci.* 37(1):29-38.



Comparación de métodos analíticos para la determinación de materia orgánica en suelo con residuos de café

Journal Information
Journal ID (publisher-id): remexca
Title: Revista mexicana de ciencias agrícolas
Abbreviated Title: Rev. Mex. Cienc. Agríc
ISSN (print): 2007-0934
Publisher: Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias

Article/Issue Information
Date received: 1 November 2025
Date accepted: 1 December 2025
Publication date: 14 December 2025
Publication date: Nov-Dec 2025
Volume: 16
Issue: 8
Electronic Location Identifier: e3913
DOI: 10.29312/remexca.v16i8.3913

Categories

Subject: Nota de investigación

Palabras clave:

Palabras clave:

análisis de suelo
calcinación
fertilidad
normativa mexicana

Counts

Figures: 2

Tables: 0

Equations: 3

References: 11