

Carbono Negro en los Suelos de la Reserva de la Biosfera de la Mariposa Monarca Black Carbon in Soils of the Monarch Butterfly Biosphere Reserve

Isabel Reyes-Avilés¹ , Rodolfo Serrato-Cuevas² ,
Francisco Gutiérrez-Rodríguez² y Erasto Domingo Sotelo-Ruiz^{1*}

¹ Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias (INIFAP). Carretera Toluca-Zitácuaro km 4.5, Vialidad Adolfo López Mateos, Col. Los Ángeles. 51350 Zinacantepec, Estado de México, México; (I.I.R.A.), (E.D.S.R.).

* Autor para correspondencia: soteloruiz2607@gmail.com

² Universidad Autónoma del Estado de México, Facultad de Ciencias Agrícolas, Centro de Investigaciones y Estudios Avanzados en Fitomejoramiento. Carretera Toluca-Ixtlahuaca km 14.5. El Cerrillo Piedras Blancas. 50200 Toluca, Estado de México, México; (F.G.R.), (R.S.C.).

RESUMEN

El Carbono Negro (CN) en los suelos o también llamado carbono (C) pirogénico es un material producto de la combustión incompleta de la biomasa. En los bosques, los incendios son eventos frecuentes y forman parte de su dinámica natural. Estos eventos incorporan CN en el suelo a través del tiempo, y el efecto es el de retener nutrientes sobre su superficie porosa y generar actividad microbiana que promueve alta fertilidad en el suelo durante siglos; además mejora las propiedades físicas, químicas e incrementa la infiltración de agua en el suelo. La capacidad del CN para almacenarse depende del tipo de vegetación, topografía y clima. El objetivo de este trabajo es estimar el Carbono Negro en los suelos de la Reserva de la Biosfera de la Mariposa Monarca (RBMM). Se realizaron 37 perfiles de suelo que fueron georreferenciados. Se determinó la cantidad de CN en el suelo por hectárea a partir del permanganato de potasio (KMnO_4). El método de interpolación espacial fue la ponderación de distancia inversa (IDW: inverse distance weighted). Los resultados obtenidos muestran que el total de CN encontrado en los 37 perfiles fue de 13 000 g ha⁻¹. El perfil 7 almacenó más CN con 2555 g ha⁻¹, lo cual indica los incendios forestales ocurridos en la RBMM y, además, el C que no fue emitido a la atmósfera. La presente investigación es la primera en estudios sobre Carbono Negro en los suelos forestales de México y los resultados corroboran que dichos suelos son almacenes de carbono.

Palabras clave: combustión incompleta, edafología, incendio forestal, recalcitrante, variabilidad climática.

SUMMARY

Black Carbon (BC) in soils, also called pyrogenic carbon (C), is a material produced by the incomplete biomass combustion. In forests, fires are frequent events and part of their natural dynamics. These events incorporate BC into soil over time, and the effect is to retain nutrients on its porous surface, generating microbial activity that promotes high soil fertility for centuries; additionally, physical and chemical properties improve and increases water infiltration into the soil. The capacity of BC to be stored depends on the type of vegetation, topography and climate. The objective of the present research is to estimate Black Carbon in the soils of the Monarch Butterfly Biosphere Reserve (MBBR), making and georeferencing 37 soil profiles. The amount of BC in soil per hectare was determined from potassium permanganate (KMnO_4). The spatial interpolation method was the inverse distance weighting (IDW: inverse distance weighted). The results obtained show that the total CN found in 37 profiles was 13 000 g ha⁻¹. Profile 7 stored more CN with 2555 g ha⁻¹, which indicates the forest fires that occurred in the RBMM, and in addition, the C that was not emitted to the atmosphere. The present research is the first in studies on Black Carbon in forest soils in Mexico, and the results corroborate that forest soils are carbon stores.

Index words: incomplete combustion, edaphology, wildfire, recalcitrant, climatic variability.



Cita recomendada:

Reyes-Avilés, I., Serrato-Cuevas, R., Gutiérrez-Rodríguez, F., & Sotelo-Ruiz, E. D. (2025). Carbono Negro en los Suelos de la Reserva de la Biosfera de la Mariposa Monarca. *Terra Latinoamericana*, 43, 1-9. e2109. <https://doi.org/10.28940/terra.v43i.2109>

Recibido: 22 de octubre de 2024.

Aceptado: 19 de marzo de 2025.

Artículo. Volumen 43.

Agosto de 2025.

Editor de Sección:

Dr. Fabián Fernández Luqueño

Editor Técnico:

Dr. Fermín Pascual Ramírez



Copyright: © 2025 by the authors.

Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC ND) License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

INTRODUCCIÓN

Los niveles atmosféricos de dióxido de carbono (CO_2) van en aumento desde la época preindustrial, de 280 mg kg^{-1} hasta un valor promedio de $423.28 \text{ mg kg}^{-1}$, reportado el 13 de septiembre de 2024 (NOAA/ESR, 2024). El CO_2 es la forma de las emisiones de C más estudiada ya que es importante conocer los almacenes de CO_2 en el suelo (Schmidt y Noack, 2000). El Carbono Negro (CN) en el suelo, es un término que se usa en las ciencias del suelo, el cual ha recibido poca atención y estudio. El CN es una fracción importante de la materia orgánica asociada a los coloides minerales del suelo (Kopecký *et al.*, 2021), es incorporado directamente de los incendios de la vegetación al suelo, y esta enriquecida con componentes aromáticos (lignina) por lo cual el CN es una fracción que se encuentra en los suelos terrestres y acuáticos en todo el mundo (Masiello, 2004) y tiene un papel importante en el ciclo del carbono (Liang *et al.*, 2010) debido a su recalcitrancia (Nguyen *et al.*, 2008). En los suelos forestales, se origina a partir de los incendios. A escala mundial, los bosques templados presentan mayor perturbación por incendios, una de las variables climáticas esenciales en las investigaciones del calentamiento global, debido entre otros factores, a los gases de efecto invernadero (GEI) que generan y los cuales van en aumento debido al calentamiento global (Huang *et al.*, 2018).

Algunas investigaciones del CN están las de Schmidt y Noack, 2000; Masiello, 2004; Forbes, Raison y Skjemstad 2006; Lehmann, 2008; Nguyen *et al.* 2008; Shrestha, Traina y Swanston, 2010; Bird, Wynn, Saiz, Wurster y McBeath, 2015). Santín *et al.* (2016) y Turcios, Jaramillo, do Vale, Fearnside y Barbosa (2016), quienes mencionan efectos positivos al agregar CN al suelo; mejora la productividad del ecosistema, promueve el crecimiento y la actividad de los microorganismos que descompone los compuestos de C lábiles; además, mencionan que es inerte o resistente a la descomposición en ambientes terrestres, lo que significa que, tiene un tiempo de residencia largo, del orden de los miles de años y, por esto, es el material derivado de la biomasa más estable del ciclo del carbono.

La primera estimación global de CN producto de la quema de la biomasa fue realizada por Seiler y Crutzen, (1980) con $500\text{-}1700 \text{ Tg C año}^{-1}$. Kuhlbusch y Crutzen (1996) estimaron la producción global de CN de diferentes ecosistemas: bosque templado, boreal, pastizales quemados y residuos agrícolas, concluyeron que los residuos de CN de la biomasa quemada son alrededor de 44 a $194 \text{ Tg C año}^{-1}$. Más adelante, Bird *et al.* (2015) mencionan que las estimaciones más recientes de producción global de CN van de un rango de 63 y $140 \text{ Tg C año}^{-1}$. Por otra parte, Santín *et al.* (2016) señalan una producción de CN de 116 a $385 \text{ Tg C año}^{-1}$. Xu, Gao y Cui (2017) cuantificaron CN en la zona montañosa de Great Xing'an, donde hubo mayor acumulación en la superficie del perfil, y después disminuyó con el incremento de la profundidad. Por lo que aseguran, el potencial de secuestro de carbono en el suelo mejoraría debido a la existencia de CN. Bird *et al.* (2015) mencionan que en las regiones de bosque templado el 42% de CN es almacenado en la superficie del suelo. Downie, Van Zwieten, Smernik, Morris y Munroe (2010) hallaron que los suelos de clima templado de Australia y de Terra Preta Brasil son capaces de almacenar C en mayor cantidad y mejorar la productividad. Kane *et al.* (2010) cuantificaron CN en los suelos en los bosques boreales de Alaska, donde encontraron que el mayor almacén de CN se encuentra en los suelos con superficie mineral con una cantidad de $0.34 \pm 0.9 \text{ kg C m}^{-2}$. Liang *et al.* (2010) mencionan que los suelos ricos en CN son los Antrasoles. Lehmann *et al.*, (2021) menciona que debido a la importancia ambiental del CO_2 como gas de efecto invernadero, ha llevado a investigar sobre CN como un medio para secuestrar CO_2 atmosférico en los suelos.

Los estudios de carbono en el suelo son necesarios para estimar los almacenes y la dinámica de este elemento en ecosistemas templados y para tomar en cuenta el CN del suelo en los inventarios de almacén de carbono global; además, es importante debido a la obtención de proyecciones del cambio climático futuro (Mastrolonardo, Francioso y Certini, 2018), así como para evaluar el impacto que tienen las políticas públicas (plantaciones forestales maderables, labranza de conservación, sistemas de cultivo intercalado con árboles frutales, sistemas silvopastoriles) y en bosques con plan de manejo forestal (Galicia *et al.*, 2016). Conocer la distribución espacial del CN permite en un futuro desarrollar una metodología que dé cuenta del CN en los inventarios de gases de efecto invernadero, así como una mejor comprensión del papel que juega en el balance del ciclo del carbono. También es una herramienta para reconstruir la actividad del fuego de épocas pasadas y mejorar las propiedades físicas, químicas e incremento de infiltración de agua en el suelo en la actualidad. El objetivo de esta investigación fue estimar el Carbono Negro en los suelos de la Reserva de la Biosfera de la Mariposa Monarca (RBMM).

MATERIALES Y MÉTODOS

La Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca (RBMM), es una de las áreas naturales protegidas más importantes en México. Fue declarada Patrimonio de la Humanidad por la UNESCO en 2008. Se localiza en el Eje Volcánico Transversal (EVTM), entre las coordenadas geográficas 19° 20' 40" y 19° 42' 20" N y 100° 20' 20" y 100° 11' 40" O; es una región topográficamente accidentada y complicada por la diversidad de sus geoformas, el intervalo de altitud va de 2040 a 3640 m de altitud; se ubica en los límites del Estados de México y Michoacán (Figura 1). Tiene una superficie de 56259 ha (López-García, Manzo y Alcántara, 2014; INEGI, 2011).

El material parental, la altitud y lo accidentado del relieve hacen de la región una importante zona para la infiltración de la precipitación y la recarga de los acuíferos. Los principales tipos de suelo son Andosol, Vertisol y Acrisol. La vegetación predominante es de bosques de pino y oyamel; la mayor parte de la superficie presenta clima templado subhúmedo, dominando el clima semifrío en la parte alta de las montañas (INEGI, 2011).

Sin embargo, Pérez-Salicrup et al. (2016) mencionan que el régimen de fuego en la RBMM es caracterizado por ser de frecuencia baja y la severidad del fuego moderada.

Muestreo de Suelo

Para la ubicación de los sitios de muestreo, se realizaron transeptos de acuerdo con la topografía, en donde se ubicaron 37 perfiles de suelo, que fueron georreferenciados y, en cada uno, se colectó muestra de suelo mineral en cada sitio. Los suelos forestales fueron considerados sin alteración, estuvieron caracterizados por cubierta de bosques de coníferas *Abies religiosa* y *pinus*; se consideraron suelos agrícolas cultivados con maíz y avena por al menos 10 años, para cada condición se seleccionaron al menos 5 perfiles, para poder realizar el análisis estadístico (ESRI, 2022).

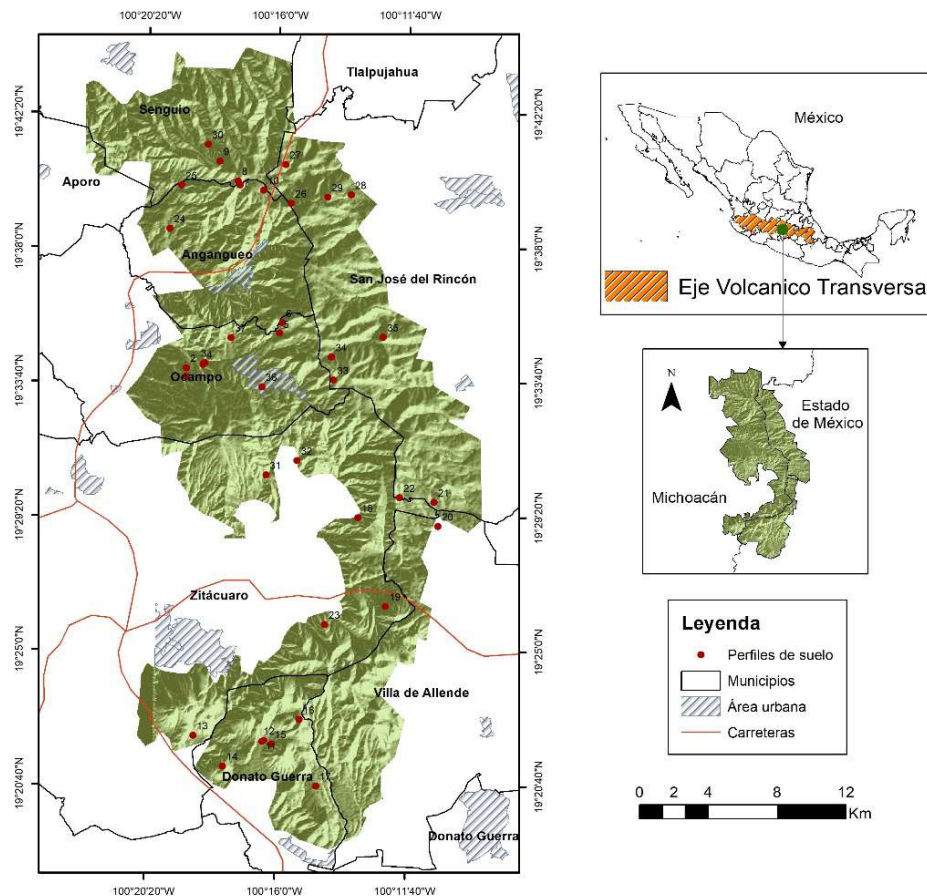


Figura 1. Ubicación geográfica de la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca.
Figure 1. Geographic location of the Monarch Butterfly Biosphere Reserve.

Preparación de las Muestras

Las muestras fueron procesadas en el laboratorio de suelos de la Facultad de Ciencias Agrícolas de la Universidad Autónoma del Estado de México. Cada muestra fue secada a temperatura ambiente, libre de corrientes de viento, extendida sobre papel estraza y en una superficie no contaminada. El suelo seco fue pasado por un tamiz de 20 mm y colocado en bolsas de plástico con etiqueta.

Determinación de Carbono Negro en las Muestras de Suelo

El CN se determinó de acuerdo con la metodología propuesta por Blair, Lefroy y Lisle (1995), el método define el C oxidable empleando una solución de permanganato de potasio (KMnO_4) 0.033 mol L^{-1} . El procedimiento se inicia pesando 1 g de suelo fino secado al aire y tamizado con una malla de 0.5 mm, en tubos de centrifuga de tapa roscada de plástico de 30 ml, se agregaron 25 ml de solución de (KMnO_4) $0.0333 \text{ mol L}^{-1}$ a cada vial. Los tubos de centrifuga se cerraron herméticamente y se agitaron durante una hora, a 12 revoluciones por minuto (rpm). Posteriormente, los tubos se centrifugaron durante cinco minutos a 2000 rpm ($\text{RCF} = 815 \text{ g}$). Después de la centrifugación, se pipeteo 1 ml del sobrenadante en un matraz volumétrico de 250 ml y se completó con agua destilada. Las absorbancias de las muestras diluidas y los estándares se leyeron en un espectrofotómetro a una longitud de onda de 565 nm (Blair et al., 1995).

Preparación de estándares. Se prepararon cuatro concentraciones estándar (0.005, 0.01, 0.015 y 0.02 M) a partir de la solución madre de KMnO_4 .

Cálculo de la masa de Carbono Negro para muestras de suelo desconocido. La cantidad de carbono oxidado es una función de la cantidad de permanganato reducido. En consecuencia, cuanto más altos sean los valores de CN, más baja será la absorbancia (intensidad del color de la solución). El cálculo para determinar CN se realizó usando la siguiente ecuación (Weil, Islam, Stine, Gruver y Samson, 2003):

$$\text{CN (mg kg}^{-1}\text{)} = [0.02 \text{ mol/L} - (a+b \times \text{Abs})] \times (9000 \text{ mg C/mol}) \times (0.02 \text{ L solución/peso}) \quad (1)$$

Dónde: 0.02 mol/L = concentración inicial de la solución, a = intersección de la curva estándar, b = pendiente de la curva estándar, Abs = absorbancia de lo desconocido, 9000 = miligramos de carbono oxidado por 1 mol de MnO_4 cambiando de Mn^{7+} a Mn^{2+} , 0.02 L = volumen de solución madre reaccionada, Peso = peso de la muestra de suelo secado al aire en kilogramos.

Análisis Espacial Geoestadístico

Los valores de CN se capturaron en una hoja de cálculo, con lo que se integró una base de datos georreferenciada, a partir de la cual se hizo una interpolación espacial mediante el método IDW con tamaño de pixel de 15 m en la plataforma de ArcGIS® 10.3 (ESRI, 2022).

Niveles de CN en el suelo de la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca. Se obtuvo un mapa que representa las áreas con diferentes concentraciones de CN en los suelos de la RBMM. No existe una referencia en donde se establezca dicha jerarquización de manera general, entonces, para fines de este trabajo, se consideraron los límites de los intervalos, en función de los valores máximos y mínimos de concentración de CN obtenidos en los análisis. Se consideraron cinco niveles de almacenamiento de CN; las categorías fueron: Muy alto (1022 a 2500 g ha^{-1}), Alto (740 a 1022 g ha^{-1}), Medio (560 a 740 g ha^{-1}), Bajo (370 a 560 g ha^{-1}) y Muy bajo (0 a 370 g ha^{-1}).

RESULTADOS Y DISCUSIONES

El contenido de Carbono Negro (CN) en el suelo fue de $13604.48 \text{ g ha}^{-1}$, que corresponde a 13.6 kg ha^{-1} . De los 37 perfiles de suelo muestreados, todos los de uso forestal almacenan CN, lo que no ocurrió en los suelos agrícolas debido a la perturbación por las labores de cultivo.

El mayor almacén de CN está en el perfil No. 7, con $2555.29 \text{ g ha}^{-1}$, ubicado en el municipio de Angangueo, localizado en el estado de Michoacán. Debido a que la pendiente es abrupta 13.45° (18.10°), tiene efecto sobre las características del perfil del suelo y la profundidad, por ende, mayor acumulación, por esta razón permite ser estable y resistente a la oxidación microbiana y abiótica, esto conlleva que, en la zona existe presencia de incendios forestales con mayor frecuencia que los demás perfiles.

Dentro de los sitios forestales, el almacén de CN es menor en el perfil No.1, en donde se observaron reforestaciones nuevas; además en el perfil 2, de pinos jóvenes de 6 a 8 años y en los perfiles 3 y 4, con pinos de 15 a 18 años, también se obtuvieron valores bajos. El perfil 4 presenta un incremento, aunque tiene una profundidad de 1.25 cm (menor al perfil 1), donde el almacén de CN es 1798.87 gramos por hectárea (Cuadro 1).

El almacén de CN es mayor en el perfil de suelo No. 7, con 2555.29 g ha⁻¹, donde la pendiente está orientada hacia el sur, además de ser una pendiente de 18.10 °, lo cual indica que es pendiente abrupta. Le sigue el perfil No. 11 con 2000.43 g de CN, (se encontraron 7 horizontes en el perfil), además de tener mayor profundidad, esto quiere decir que se encuentra en la zona más baja de la zona de estudio. Todos los perfiles presentan CN; en el caso del perfil No. 14, presenta 856.65 g ha⁻¹ (casi 1 kg) de CN (Cuadro 1). Con respecto a la topografía, las pendientes van de 10.31 a 20.11° que significa que son pendientes abruptas, los intervalos de altitud van de 3184 a 3280 m de altitud.

En los perfiles con uso de suelo agrícola, no se encontró CN (Cuadro 1), debido a que la destrucción de los agregados por los implementos agrícolas desprotege y expone a la intemperie a la materia orgánica que está oculta en pequeños agregados (Mattus, 1994), en donde CN puede oxidarse como dióxido de carbono (CO₂) (Bedard-Haughn *et al.*, 2006). El CN para los suelos agrícolas en la literatura se nombra como biocarbón (Escalante-Rebolledo *et al.*, 2016), que tiene mayor capacidad de intercambio de cationes (CIC) por unidad de carbono que la materia orgánica del suelo (Sombroek, Nachtergaele y Hebel, 1993). Por lo tanto, presenta mayor retención de nutrientes K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, portador de microorganismos, los cuales incrementan la población de hongos micorrizicos, por ello se ha incorporado en los trabajos de bioremediación de suelos. Al aplicar biocarbon al suelo se puede aumentar su permeabilidad al agua, reducir la escorrentía y los costos de riego (De Gryze, Cullen y Durschinger, 2010), mejora la aireación del suelo y hace más fácil el laboreo (Gathorne-Hardy, Knight y Woods, 2009).

Los perfiles 21, 25 y 27 están en suelo forestal, principalmente de pino y su almacén de CN va de 348.88 a 385.78 g ha⁻¹, que son muy bajo; además, los perfiles de suelo 19 y 22 presentan contenidos de almacén de CN de 633.39 a 685.78 g ha⁻¹ dentro de sus horizontes y corresponden a almacén medio (Figura 2).

De acuerdo con Pérez-Salicrup *et al.*, (2016) en la RBMM, los incendios han sido una perturbación histórica, principalmente para los bosques de coníferas. Por ejemplo, en los márgenes del río Catingón y San Pedro en Angangueo, Michoacán, se reportó que hubo al menos un incendio catastrófico en 1670, de alta intensidad, muy alta severidad, y que debió extenderse al menos por la cuenca de dichos ríos. Adicionalmente, el mismo estudio reporta al menos dos eventos de incendios regionales que debieron ser de severidad mixta durante el siglo XX: uno en 1942 y otro en 1999. La quema de biomasa produce la acumulación de material vegetal carbonizado en el suelo, el cual ha sido postulado como el origen de las sustancias húmicas. Sin embargo, Hubau *et al.*, (2012) señalan que en suelos originados a partir de cenizas volcánicas podría explicar el origen de ciertos tipos de ácidos húmicos (AH) altamente aromáticos. Por otra parte, Nguyen *et al.*, (2008) mencionan que las reservas de CN en el suelo disminuyen rápidamente en los primeros 30 años posteriores a su sedimentación y luego se estabilizan. El cambio en el almacén de CN implica una serie de procesos como: la descomposición, la erosión y el transporte por debajo de la profundidad de observación. La oxidación puede degradar el CN, pero la adsorción de materiales orgánicos e inorgánicos puede aumentar la protección del CN contra la descomposición al reducir la superficie expuesta al aire de las partículas de CN y la degradación oxidativa.

La idea central es que el CN almacenado en los suelos de la RBMM no es uniforme. Además, por ser una zona con topografía accidentada, se incrementa la escorrentía y los suelos están más propensos a la erosión hídrica. Por otra parte, Wagner, Ding y Jaffé (2017) mencionan que el CN es transferido al sistema acuático en la forma de CN disuelto, por tal motivo también pudiera presentarse en los ríos de esta reserva. Con respecto al efecto del cambio climático, el CN no contribuye al calentamiento global por su característica recalcitrante o por tratarse de un material muy refractario, por lo que es difícil de descomponer por los microorganismos. Al mismo tiempo, su presencia promueve el crecimiento de microorganismos y la descomposición de compuestos de carbono lábil. Además, es parte del ciclo del carbono, algunos autores como Masiello y Druffel (1998), Schmidt y Noack (2000), Druffel (2004) y Forbes *et al.* (2006), lo mencionan como el ciclo biogeoquímico del Carbono Negro. Otro aspecto importante es que la cantidad de CN en el suelo es igual a la suma de C contenido en los bosques y de CO₂ en el aire.

Para poder evaluar mejor la influencia del CN en el ciclo del carbono, se necesitan estudios con una mayor comprensión de las tasas de producción y degradación, para los ecosistemas que están expuestos a deforestación e incendios forestales; además, nos ayuda a evaluar el transporte fluvial y eólico del CN la escala fina, así como comprender mejor las tasas de degradación en los sedimentos terrestres y marinos. Esto permitirá desarrollar una metodología que nos permita evaluar los inventarios de gases de efecto invernadero y minimice las incertidumbres y discrepancias en relación con las estimaciones de los flujos de CN entre la atmósfera, la biosfera y los océanos. El resultado será un balance mundial del Carbono Negro más exacto y una comprensión mejorada del papel que tiene como sumidero potencial en el ciclo del C.

Cuadro 1. Sitios de muestreo.
Table 1. Sampling sites.

Municipio	Perfil	Coordenadas UTM		Profundidad	Topografía			Uso de suelo	Almacén CN
		X	Y		Metros de Altitud	Pendiente (Grados)	Orientación (Aspecto)		
Ocampo	1	361 823	2 163 744	1.35	2677	9.55	Noroeste	Forestal	10.08
	2	361 839	2 164 252	1.40	2624	4.60	Norte	Forestal	1470.10
	3	362 903	2 164 554	1.35	2675	12.73	Norte	Forestal	577.73
	4	362 799	2 164 459	1.25	2661	13.45	Oeste	Forestal	1798.87
	5	367 260	2 166 316	1.25	3061	13.52	Suroeste	Forestal	641.18
	6	367 411	2 166 935	1.55	3219	26.89	Oeste	Forestal	893.86
Angangueo	7	364 961	2 175 118	1.35	3280	18.10	Sur	Forestal	2555.29
Senguio	8	364 842	2 175 365	90	3324	20.10	Suroeste	Forestal	903.01
	9	363 786	2 176 540	85	3209	12	Norte	Forestal	996.01
Angangueo	10	366 332	2 174 812	1.35	3206	10.31	Sureste	Agrícola	0.00
Donato Guerra	11	366 218	2 142 040	1.60	2560	7.11	Sur	Forestal	2000.43
	12	366 326	2 142 085	1.00	2566	8.84	Suroeste	Forestal	902.93
Zitácuaro	13	362 208	2 142 399	89	2380	10.21	Sur	Forestal	279.82
	14	363 928	2 140 564	1.00	2602	26	Noroeste	Forestal	856.65
Donato Guerra	15	366 756	2 141 886	1.20	2589	11.11	Noroeste	Forestal	700.12
	16	368 393	2 143 325	1.40	3074	26.35	Oeste	Forestal	773.59
	17	369 352	2 139 373	64	2426	4.24	Sureste	Agrícola	0.00
Zitácuaro	18	371 809	2 155 322	55	2713	22.27	Norte	Forestal	145.57
	19	373 403	2 150 056	1.50	2869	16.20	Norte	Forestal	633.39
Villa de Allende	20	376 461	2 154 811	1.60	2918	10.17	Este	Agrícola	0.00
San José del Rincón	21	376 241	2 156 238	100	2940	1.03	NorEste	Forestal	385.26
Zitácuaro	22	374 230	2 156 529	1.50	3085	21.50	Este	Forestal	685.78
	23	369 874	2 148 980	1.11	2900	30.10	Este	Forestal	422.06
Angangueo	24	360 886	2 172 539	1.40	2444	7.55	Sur	Forestal	176.50
	25	361 564	2 175 127	1.50	2640	4.06	NorOeste	Forestal	351.55
	26	367 941	2 174 037	1.30	3261	20.11	Este	Forestal	1293.83
San José del Rincón	27	367 626	2 176 327	1.70	3184	18.75	NorEste	Forestal	348.88
	28	371 423	2 174 531	1.20	3076	7.10	Sur	Agrícola	0.00
Senguio	29	370 061	2 174 394	1.50	3288	10.43	SurEste	Forestal	124.69
	30	363 114	2 177 536	70	2980	3.97	NorEste	Forestal	228.83
Zitácuaro	31	366 461	2 157 892	95	2492	27.46	SurEste	Forestal	100.62
	32	368 267	2 158 727	1.40	2685	32.26	NorOeste	Forestal	756.55
San José del Rincón	33	370 391	2 163 520	75	3288	22.30	Sur	Forestal	969.11
	34	370 273	2 164 882	100	3382	13.05	Norte	Forestal	524.00
	35	373 285	2 166 060	90	3233	23.86	NorOeste	Forestal	944.33
Ocampo	36	366 220	2 163 129	1.60	2772	12.64	Norte	Agrícola	0.00
	37	364 434	2 166 044	1.30	2796	14.24	SurEste	Agrícola	0.00
TOTAL									13604.48

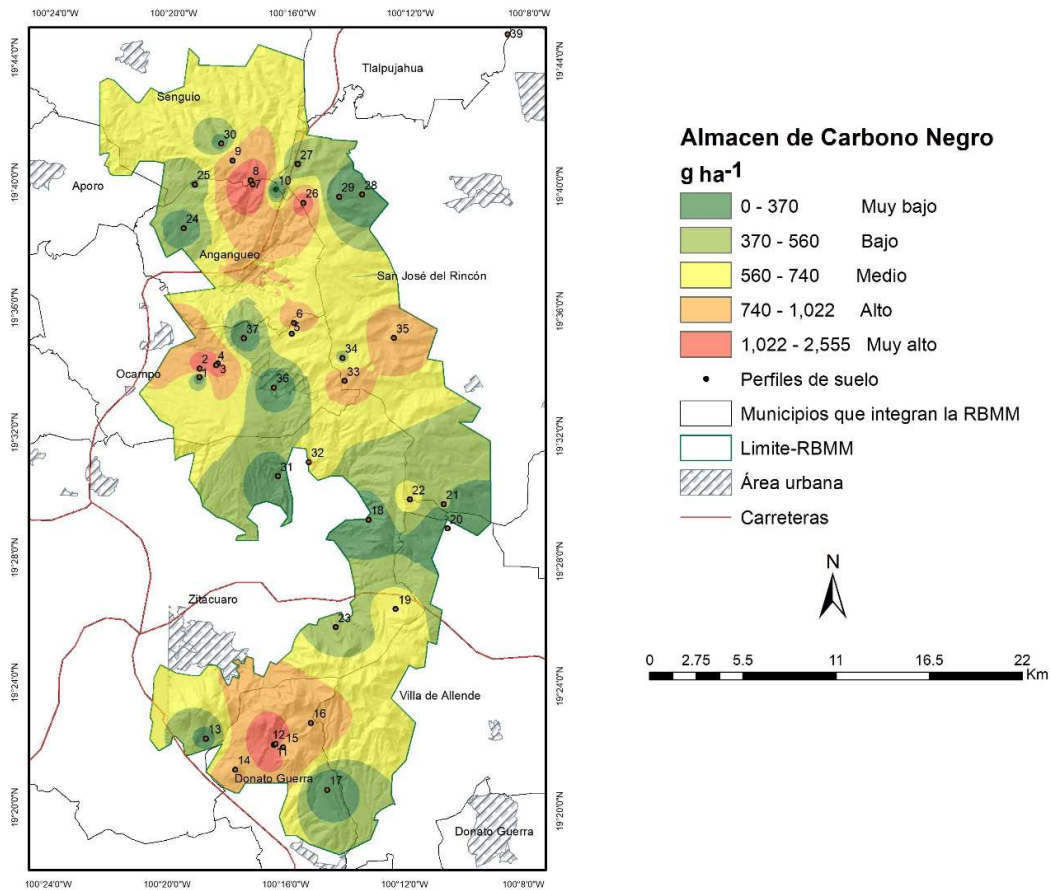


Figura 2. Distribución del Carbono Negro en los suelos de la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca.
Figure 2. Distribution of Black Carbon in the soils of the Monarch Butterfly Biosphere Reserve.

La cuantificación del CN en los suelos se complica porque la estructura química y tamaño son muy heterogéneos. Aunque la mayoría de la bibliografía consultada refiere estimaciones de CN en la atmósfera (Cruz-Núñez, 2019) y en los sedimentos marinos (Masiello y Druffel, 1998).

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos de la estimación de CN en la RBMM, en suelos de uso forestal, van de 10 a 2555 g ha⁻¹, que se encuentran en los diferentes perfiles de suelo. Destacan los contenidos con valores alto (740-1022 g ha⁻¹) con 8 perfiles de suelos, le siguen valores muy bajos (0-370 g ha⁻¹) con 8 perfiles y valores muy altos (1022 a 2555 g ha⁻¹) en 6 perfiles de suelos.

Los valores de CN en los suelos forestales de la RBMM están en el intervalo de valores altos y le siguen valores muy altos de CN, por lo cual aportan cantidades de 740 g ha⁻¹ a 2555 g ha⁻¹ de C al suelo. El CN se ha mantenido en el suelo debido a la encapsulación por partículas de suelo a través del tiempo, lo que contribuye a su estabilidad en el largo plazo. El CN ayuda a mantener la fertilidad natural de los suelos, el cual aporta nutrientes al suelo de áreas de bosque y agrícolas.

DECLARACIÓN DE ÉTICA

No aplicable.

CONSENTIMIENTO PARA PUBLICACIÓN

No aplicable.

DISPONIBILIDAD DE DATOS

Todos los datos generados o analizados durante este estudio se incluyen en este artículo publicado, pero están disponibles del autor correspondiente a solicitud razonable.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no tienen intereses en competencia en esta sección.

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Conceptualización: R.S.C. e I.R.A.; Metodología: R.S.C.; Software, I.R.A.; Validación: F.G.R. y E.D.S.R.; Análisis formal: R.S.C.; investigación, I.R.A.; recursos, R.S.C.; curación de datos, I.R.A.; escritura: preparación del borrador original, I.R.A.; escritura: revisión y edición, I.R.A y R.S.C.; supervisión, E.D.S.R.; administración del proyecto, I.R.A.

AGRADECIMIENTOS

Al SECIHTI por la beca posdoctoral.

LITERATURA CITADA

- Bedard-Haughn, A., Jongbloed, F., Akkerman, J., Uijl, A., De Jong, E., Yates, T., & Pennock, D. (2006). The effects of erosional and management history on soil organic carbon stores in ephemeral wetlands of hummocky agricultural landscapes. *Geoderma*, 135, 296-306. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2006.01.004>
- Bird, M. I., Wynn, J. G., Saiz, G., Wurster, C. M., & McBeath, A. (2015). The pyrogenic carbon cycle. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 43(1), 273-298.
- Blair, G. J., Lefroy, R. D., & Lisle, L. (1995). Soil carbon fractions based on their degree of oxidation, and the development of a carbon management index for agricultural systems. *Australian Journal of Agricultural Research*, 46(7), 1459-1466.
- Cruz-Núñez, X. (2019). Black carbon radiative forcing in south Mexico City, 2015. *Atmósfera*, 32, 167-179. <https://doi.org/10.20937/ATM.2019.32.03.01>
- De Gryze, S., Cullen, M., & Durschinger, L. (2010). *Evaluation of the opportunities for generating carbon offsets from soil sequestration of biochar*. Los Angeles, CA, USA: Climate Action Reserve.
- Downie, A. E., Van Zwieten, L., Smernik, R. J., Morris, S., & Munroe, P. R. (2011). Terra Preta Australis: Reassessing the carbon storage capacity of temperate soils. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 140(1-2), 137-147.
- Druffel, E. R. (2004). Comments on the importance of black carbon in the global carbon cycle. *Marine Chemistry*, 92(1-4), 197-200.
- Escalante-Rebolledo, A., Pérez-López, G., Hidalgo-Moreno, C., López-Collado, J., Campo-Alves, J., Valtierra-Pacheco, E., & Etchevers-Barra, J. D. (2016). Biocarbón (biochar) I: Naturaleza, historia, fabricación y uso en el suelo. *Terra Latinoamericana*, 34(3), 367-382.
- ESRI (2022). *ArcGis User's Guide. Released 10.3*. Redlands, CA, USA: Environmental Systems Research Institute.
- Forbes, M. S., Raison, R. J., & Skjemstad, J. O. (2006). Formation, transformation and transport of black carbon (charcoal) in terrestrial and aquatic ecosystems. *Science of the Total Environment*, 370(1), 190-206. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2006.06.007>
- Galicia, L., Gamboa C. A. M., Cram, S., Chávez, V. B., Peña, R. V., Saynes, V., & Siebe, C. (2016). Almacén y dinámica del carbono orgánico del suelo en bosques templados de México. *Terra latinoamericana*, 34(1), 1-29.
- Gathorne-Hardy, A., Knight, J., & Woods, J. (2009). Biochar as a soil amendment positively interacts with nitrogen fertiliser to improve barley yields in the UK. In IOP Conference Series. *Earth and Environmental Science*, 6(37), 1-3. <https://doi.org/10.1088/1755-1307/6/7/372052>
- Huang, W., Hu, Y., Chang, Y., Liu, M., Li, Y., Ren, B., & Shi, S. (2018). Effects of fire severity and topography on soil black carbon accumulation in boreal forest of Northeast China. *Forests*, 9(7), 408. <https://doi.org/10.3390/f9070408>
- Hubau, W., Van den, B. J., Kitin, P., Mees, F., Van, A. J., & Hans Beeckman, H. (2012). Charcoal identification in species-rich biomes: A protocol for Central Africa optimised for the Mayumbe forest. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 171, 164-178. <https://doi.org/10.1016/j.repalbo.2011.11.002>
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). (2011). *Censo de Población y Vivienda 2010: Resultados definitivos*. Consultado el 23 de marzo, 2024, desde <http://www.inegi.org.mx/est/contenidos/proyectos/ccpv/cpv2010/Default.aspx>
- Kane, E. S., Hockaday, W. C., Turetsky, M. R., Masiello, C. A., Valentine, D. W., Finney, B. P., & Baldock, J. A. (2010). Topographic controls on black carbon accumulation in Alaskan black spruce forest soils: implications for organic matter dynamics. *Biogeochemistry*, 100(1), 39-56. <https://doi.org/10.1007/s10533-009-9403-z>
- Kuhlbusch, T. A. J., & Crutzen, P. J. (1996). Black carbon, the global carbon cycle, and atmospheric carbon dioxide. En J. S. Levine (Ed.). *Biomass burning and global change: Remote sensing, modeling and inventory development, and biomass burning in Africa* (pp. 160-169). Cambridge, MA: The MIT Press. <https://doi.org/10.7551/mitpress/9780262122016.003.0010>
- Kopecký, M., Kolář, L., Váchalová, R., Konvalina, P., Batt, J., Mráz, P., & Dumbrovský, M. (2021). Black carbon and its effect on carbon sequestration in soil. *Agronomy*, 11(11), 2261. <https://doi.org/10.3390/agronomy11112261>
- Lehmann, J., Cowie, A., Masiello, C. A., Kammann, C., Woolf, D., Amonette, J. E., ... & Whitman, T. (2021). Biochar in climate change mitigation. *Nature Geoscience*, 14(12), 883-892. <https://doi.org/10.1038/s41561-021-00852-8>

- Liang, B., Lehmann, J., Sohi, S. P., Thies, J. E., O'Neill, B., Trujillo, L., & Luizão, F. J. (2010). Black carbon affects the cycling of non-black carbon in soil. *Organic Geochemistry*, 41(2), 206-213. <https://doi.org/10.1016/j.orggeochem.2009.09.007>
- López-García, J., Manzo-Delgado, L. L., & Alcántara-Ayala, I. (2014). Rural aquaculture as a sustainable alternative for forest conservation in the Monarch Butterfly Biosphere Reserve, Mexico. *Journal of Environmental Management*, 138, 43-54. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2014.01.035>
- Mattus, F. J. (1994). The distribution of soil organic matter of various aggregates size classes in arable soils. II. Residual organic ^{14}C , residual ^{14}N , microbial biomass ^{14}C and ^{14}N mineralization rates in a sand and a clay soil (pp. 99-114). En F. J. Mattus (Ed.). *Crop residues decomposition, residual soil organic matter and nitrogen mineralization in arable soils with contrasting textures*. Wageningen, The Netherlands: DLO Research Institute for Agrobiological and Soil Fertility.
- Masiello, C. A., & Druffel, E. R. M. (1998). Black carbon in deep-sea sediments. *Science*, 280(5371), 1911-1913. <https://doi.org/10.1126/science.280.5371.1911>
- Masiello, C. A. (2004). New directions in black carbon organic geochemistry. *Marine Chemistry*, 92(1-4), 201-213.
- Mastrolonardo, G., Francioso, O., & Certini, G. (2018). Relic charcoal hearth soils: A neglected carbon reservoir. Case study at Marsiliana forest, Central Italy. *Geoderma*, 315, 88-95.
- Nguyen, B.T., Lehmann, J., Kinyangi, J., Smernik, R., Riha, J. S., & Engelhard, H. M. (2008). Long-term black carbon dynamics in cultivated soil. *Biogeochemistry*, 89(3), 295-308. <https://doi.org/10.1007/s10533-008-9220-9>
- NOAA/ESR (2024) Mauna Loa Carbon Dioxide Recent Daily Average. Consultado el 13 de septiembre, 2024, desde https://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/gl_trend.html
- Pérez-Salícup, D. R., Cantú-Fernández, M., Carlón-Allende, T., Garduño-Mendoza, E., Jaramillo-López, P. F., Sáenz-Ceja, E., & Martínez-Torres, L. (2016). Restauración de un proceso: El fuego en la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca en los estados de México y Michoacán. En E. Ceccon & C. Martínez-Garza (Eds.). *Experiencias mexicanas en la restauración de los ecosistemas* (pp. 123-145). Ciudad de México, México: Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO)-Universidad Autónoma del Estado de Morelos-Universidad Nacional Autónoma de México.
- Santín, C., Doerr, S. H., Kane, E. S., Masiello, C. A., Ohlson, M., de la Rosa, J. M., ... & Dittmar, T. (2016). Towards a global assessment of pyrogenic carbon from vegetation fires. *Global Change Biology*, 22(1), 76-91. <https://doi.org/10.1111/gcb.12985>
- Seiler, W., & Crutzen, P. J. (1980). Estimates of gross and net fluxes of carbon between the biosphere and the atmosphere from biomass burning. *Climatic change*, 2(3), 207-247.
- Schmidt, M. W., & Noack, A. G. (2000). Black carbon in soils and sediments: analysis, distribution, implications, and current challenges. *Global Biogeochemical Cycles*, 14(3), 777-793.
- Shrestha, G., Traina, S. J., & Swanston, C. W. (2010). Black carbon's properties and role in the environment: A comprehensive review. *Sustainability*, 2(1), 294-320.
- Sombroek, W. G., Nachtergaele, F. O., & Hebel, A. (1993). Amounts, dynamics and sequestering of carbon in tropical and subtropical soils. *Ambio*, 22, 417-426.
- Turcios, M. M., Jaramillo, M. M., do Vale, J. F., Fearnside, P. M., & Barbosa, R. I. (2016). Soil charcoal as long-term pyrogenic carbon storage in Amazonian seasonal forests. *Global Change Biology*, 22(1), 190-197.
- Wagner, S., Ding, Y., & Jaffé, R. (2017). A new perspective on the apparent solubility of dissolved black carbon. *Frontiers in Earth Science*, 5, 75-83.
- Weil, R. R., Islam, K. R., Stine, M. A., Gruver, J. B., & Samson-Liebig, S. E. (2003). Estimating active carbon for soil quality assessment: A simplified method for laboratory and field use. *American Journal of Alternative Agriculture*, 18(1), 3-17.
- Xu, J. H., Gao, L., & Cui, X. Y. (2017). Black carbon content and distribution in different particle size fractions of forest soils in the middle part of Great Xing'an Mountains, China. *Ying Yong Sheng tai xue bao= The Journal of Applied Ecology*, 28(10), 3111-3118. <https://doi.org/10.13287/j.1001-9332.201710.014>