

Avances en la producción de biocarbón en chacras tradicionales amazónicas como técnica de eliminación de carbono

Advances in biochar production in traditional Amazonian shifting cultivation fields as a technique for carbon removal

Anders Henrik Sirén¹ 

Siembra 13 (2) (2026): e10068

DOI: [10.29166/siembra.v13i2.10068](https://doi.org/10.29166/siembra.v13i2.10068)

Recibido: 17/04/2026

Revisado: 07/07/2026

Aceptado: 04/09/2026



¹ Universidad Intercultural de las Nacionalidades y Pueblos Indígenas Amawtay Wasi, Carrera de Agroecología y Soberanía Alimentaria. Av. Colón E5-56 y Juan León Mera, Edif. Ave María, Torre B. Quito, Pichincha, Ecuador.

Correspondencia: anders.siren@uaw.edu.ec

Resumen

La elaboración de biocarbón - utilizando como materia prima la biomasa leñosa de los árboles de barbecho en la agricultura itinerante - y su posterior aplicación como enmienda al suelo, ha sido identificada anteriormente como una técnica prometedora para la eliminación de carbono [C] de la atmósfera. Se realizaron ensayos en campos de agricultura itinerante tradicional de la nacionalidad indígena kichwa en la Amazonía ecuatoriana con el objetivo de evaluar la viabilidad práctica de esta técnica. Con base en los resultados, se pudo descartar la preocupación previa de que, en el ambiente muy húmedo de la Amazonía occidental, fuera difícil secar suficientemente la materia prima para evitar emisiones excesivas del potente gas de invernadero metano [CH₄]. La proporción de materia seca en la materia prima fue de entre 78 y 81%, muy por encima del límite recomendado de 75%. En promedio, se necesitaron 391 horas de trabajo por tonelada de carbono capturada en biocarbón. Teniendo en cuenta el salario mínimo oficial de Ecuador, este coste es relativamente alto en comparación con otros métodos de eliminación de carbono. En muchos otros países donde se practica la agricultura itinerante, sin embargo, los niveles del salario mínimo son más bajos, lo que implica que allí esta técnica podría ser ya no solo técnicamente sino también económicamente factible. También se estableció que el grosor de los trozos de leña afectaba poco a su proporción de materia seca luego del secado, lo que sugiere que podrían reducirse las horas de trabajo dedicadas a la fragmentación de la materia prima, disminuyendo así el costo de producción.

Palabras clave: agricultura itinerante, Amazonía, barbechos, cambio climático, CO₂, eliminación de carbono.

Abstract

The production of biochar - using woody biomass from fallow trees in shifting cultivation as feedstock - and its subsequent application as a soil amendment has previously been identified as a promising technique for removing carbon [C] from the atmosphere. Field trials were conducted on traditional shifting cultivation plots of the Kichwa indigenous people in the Ecuadorian Amazon to evaluate the practical feasibility of this technique. Based on the results, previous concerns that, in the highly humid environment of the western Amazon, it would be difficult to sufficiently dry the feedstock to prevent excessive emissions of the potent greenhouse gas methane [CH₄] were ruled out. The dry matter content of the raw material ranged from 78 to 81%, well above the recommended threshold of 75%. On average, 391 labor-hours were required per metric

SIEMBRA

<https://revistadigital.uce.edu.ec/index.php/SIEMBRA>

ISSN-e: 2477-8850

Periodicidad: semestral

vol. 13, núm 2, 2026

siembra.fag@uce.edu.ec



© Los Autores 2026

Esta obra está bajo una licencia internacional Creative Commons Atribución - NoComercial

ton of carbon sequestered in biochar. Given Ecuador's official minimum wage, this cost is relatively high compared to other methods for carbon removal. In many other countries where shifting cultivation is practiced, however, minimum wage levels are lower, which means that this technique could be not only technically but also economically feasible there. It was also found that the thickness of the feedstock had little effect on its dry matter content after drying, suggesting that the number of hours spent splitting the firewood could be reduced, thereby lowering production costs.

Keywords: Amazon, carbon removal, climate change, CO₂, fallows, shifting cultivation.

1. Introducción

El biocarbón es el material sólido con alto contenido de carbono elemental [C] obtenido de la conversión termoquímica de la biomasa en condiciones de oxígeno limitado (International Biochar Initiative, 2015). Cuando se incorpora al suelo, puede permanecer ahí durante cientos o incluso miles de años sin descomponerse. De esta manera, impide que el carbono regrese a la atmósfera en forma de CO₂ mediante el proceso natural de descomposición biológica, contrarrestando así el cambio climático global causado principalmente por la quema de combustibles fósiles (Figura 1). Por ello, se considera un enfoque prometedor para la eliminación de carbono de la atmósfera (Jia et al., 2019; Liu et al., 2023; Weng y Cowie, 2025). Otras ventajas son que las enmiendas de biocarbón suelen mejorar la calidad del suelo, lo que incrementa el crecimiento de los árboles (Ríos Guayasamín et al., 2024) y el rendimiento de los cultivos (Coomes y Miltner, 2017; Islami et al., 2011; Jeffery et al., 2017). Además, pueden reducir la absorción de metales pesados en los cultivos (Bravo Medina et al., 2019; Virú-Vasquez et al., 2025). El incremento del crecimiento de las plantas en suelos enmendados con biocarbón no es, sin embargo, algo universal; por ejemplo, Valarezo et al. (2016) muestran un caso de la Amazonía ecuatoriana en el que la enmienda de biocarbón no tuvo ningún impacto consistente en el crecimiento de los árboles plantados.

Para evitar consecuencias ambientales negativas, no se debe utilizar materia prima procedente de ecosistemas prístinos ni cultivar biomasa con el único propósito de producir biocarbón; la materia prima para la producción de biocarbón debe consistir exclusivamente en biomasa excedente o de desecho, cuyo contenido de C de todos modos habría regresado muy pronto a la atmósfera a través de la descomposición biológica o combustión. Ya hace dos décadas, la agricultura itinerante fue identificada como una de las mayores fuentes potenciales de materia prima para biocarbón a nivel mundial (Lehmann et al., 2006). La agricultura itinerante es un sistema agrícola muy extendido en las zonas tropicales. En este sistema, a un período de cultivo relativamente corto —normalmen-

te de 1 a 3 años— le sigue un período de barbecho más largo, tras el cual se vuelve a despejar el bosque en barbecho y se plantan de nuevo cultivos (véase Mertz et al. (2009) para un análisis de las diferentes variantes de este patrón básico). Las chacras tradicionales de los pueblos indígenas de la Amazonía ecuatoriana son un ejemplo de este tipo de agricultura.

Aunque se ha producido un aumento de las investigaciones sobre biocarbón elaborado a partir de materias primas derivadas de la agricultura industrial, las operaciones forestales, las aguas residuales, el estiércol y los residuos industriales (Fawzy et al., 2021; Lehmann et al., 2021), las investigaciones sobre biocarbón en la agricultura itinerante se han limitado principalmente a estudios de escritorio para cuantificar su potencial mundial de eliminación de carbono de la atmósfera (Lenton, 2010; Lehmann et al., 2006). La estimación más reciente de este potencial es de 0,42 Gt C año⁻¹ (Sirén, 2024), lo que corresponde a un 4% de las emisiones anuales actuales. Sirén (2024), además, incorporó experimentos prácticos, elaborando biocarbón de manera artesanal con motosierra, hachas y machetes para fraccionar la materia prima y realizando la pirólisis en hornos de cortina de llama consistentes en simples fosas de tierra (cf. Pandit et al., 2017). Con base en tales experimentos, calculó el coste en 355 USD t⁻¹ CO₂, dado el nivel del costo de mano de obra en Ecuador. También identificó los principales desafíos prácticos pendientes el asegurar un secado suficiente y optimizar el fraccionamiento de la materia prima, con el fin de reducir las horas de trabajo por tonelada de biocarbón producida y así reducir el costo correspondiente.

El secado es importante porque, si se utiliza materia prima húmeda, la pirólisis puede causar emisiones de metano, que es un potente gas de efecto invernadero, por lo que se agravaría el calentamiento global en lugar de mitigarlo (Cornelissen et al., 2023). Por lo tanto, se recomienda que la materia prima tenga una proporción de materia seca no inferior al 75% (Ithaka Institute, 2024). El fraccionamiento de la materia prima es necesario no solo para acelerar el secado, sino también para lograr una pirólisis eficiente, independientemente de su contenido de humedad.

El presente trabajo forma parte de un proyecto de

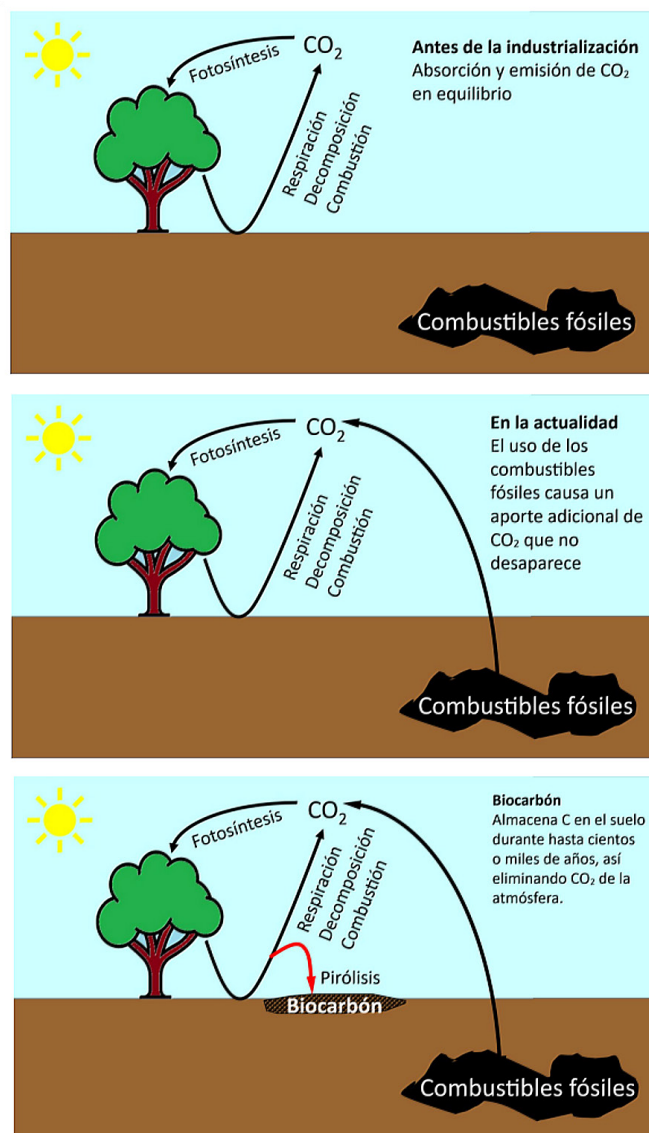


Figura 1. El principio de la eliminación de CO₂ de la atmósfera basada en la elaboración de biocarbón.

Figure 1. The principle of removing CO₂ from the atmosphere through the production of biochar.

investigación que tiene como objetivos generales: 1) desarrollar una metodología apropiada de mediciones de campo que permita evaluar la eficiencia de las diferentes estrategias de producción de biocarbón en la agricultura itinerante, y 2) establecer parcelas permanentes para comparar diferentes estrategias de producción de biocarbón y recolectar datos de línea de base. Específicamente se presentarán aquí resultados relacionados con la preparación de la materia prima y con el rendimiento de biocarbón en relación con las cantidades de biomasa y de mano de obra utilizadas.

2. Materiales y Métodos

El trabajo de campo se realizó en la comunidad indígena kichwa de Sarayaku (1°44' S, 77°29' W), en

la provincia de Pastaza, en la Amazonía ecuatoriana. Entre agosto y octubre de 2025, aprovechando la estación seca, se elaboró biocarbón en tres parcelas de agricultura itinerante tradicional amazónica, localmente conocidas como *chacras*. El trabajo contó con el permiso de los respectivos propietarios, quienes también participaron en las tareas de campo. Tras la tala del bosque de barbecho por parte de los propietarios, se establecieron cuatro parcelas de ensayo adyacentes de 12 × 12 metros en cada chacra. En esas parcelas, se midió el volumen de biomasa leñosa mediante el método de intersección planar (Van Wagner, 1982), trazando transectos con una densidad de 0,49 m⁻¹ para materia de un diámetro superior a 8 cm, de 0,17 m⁻¹ para un diámetro entre 4 y 8 cm, y de 0,06 m⁻¹ para un diámetro entre 1 y 4 cm. Para la materia de diámetro superior a 8 cm, se midió la circunferen-

cia con una cinta métrica. Además, se seleccionaron los diez troncos más voluminosos de cada parcela según una evaluación visual, los cuales se identificaron según la taxonomía local y se recolectaron muestras de madera de ellos para su posterior análisis en laboratorio con la finalidad de determinar la densidad de cada especie. Se cortó toda la madera en trozos de aproximadamente 40 cm de largo y luego se los partió en pedazos de leña, de unos 4 cm de grosor, con hachas mecánicas que permitieron trabajar más rápido que con una hacha normal (Figura 2). Los trozos de un diámetro inferior a unos 8 cm se dejaron sin partir. Luego se apiló la leña y se la dejó secar varias semanas en el lugar (Figura 3). Siguiendo los pronósticos del clima, se realizó la pirólisis siempre luego de que haya habido varios días de sol.

La pirólisis se realizó en las mismas chacras en hornos de cortina de llama, que consistían en una fosa

excavada en el suelo (Figura 4). El principio de dichos hornos es que las llamas en la superficie consumen todo el oxígeno, además de producir calor, así proveyendo a las capas inferiores las condiciones de alta temperatura y ausencia de oxígeno necesarias para que ocurra la pirólisis y se acumule el biocarbón. Una vez que la fosa se llenaba, se apagó el fuego, primero con agua cargada en hombros desde la fuente más cercana, y luego tapando la fosa con tierra. Varios días después se regresó para abrir la fosa, sacar el biocarbón y añadirlo al suelo en las parcelas de ensayo donde posteriormente se evaluará los efectos del biocarbón en el suelo y los cultivos (Figura 5). En una de las chacras no se logró apagar bien el fuego de la fosa, de manera que, al regresar, ya se había quemado aproximadamente la mitad del biocarbón, quedando solo cenizas. Por lo tanto, no se pudo recolectar los datos de campo completos para esta chacra.



Figura 2. Partiendo la leña con una hacha mecánica.

Figure 2. Splitting the feedstock wood with a mechanical log splitter.

Mientras se añadía leña al horno, se tomaron muestras de leña de la tercera capa desde abajo y de la tercera capa desde arriba en las pilas correspondientes a los árboles previamente enumerados. Se midió su grosor y se guardaron en bolsas de plástico tipo Ziploc para el posterior análisis de su proporción de materia seca. Al vaciar el horno para añadir el biocarbón al suelo en las parcelas de ensayo se contabilizó cada balde, para así calcular el volumen del biocarbón producido. También se tomaron muestras de biocarbón para medir posteriormente su densidad seca en el laboratorio y poder calcular el peso total de biocarbón producido.

En el laboratorio, primero se pesaron las muestras y se presecaron a 87 °C durante varias horas y luego se secaron a 105 °C hasta que su peso cambiara menos de un 0,1% por hora, momento en el cual se registró su peso seco. A partir de estos datos, se calculó su proporción de materia seca y su contenido de carbono. Valores estimados de las fracciones de C en la materia prima y en el biocarbón se obtuvo de la literatura. Con base en estos datos de entrada se realizó varios cálculos, para llegar a estimar, particularmente, la fracción de C en la materia prima convertida en C en el biocarbón, las horas de mano de obra empleada por volumen



Figura 3. Materia prima apilada para su secado.
Figure 3. Feedstock wood stacked for drying.



Figura 4. Pirólisis en un horno de cortina de llama.
Figure 4. Pyrolysis in a flame curtain kiln.



Figura 5. Parcela experimental con biocarbón añadido (derecha) y parcela testigo sin biocarbón (izquierda).

Figure 5. Experimental plot with added biochar (right) and control plot without biochar (left).

de materia prima y por masa de C en el biocarbón y, finalmente el costo por masa de C o CO_2e en el biocarbón. Este último es particularmente importante en el sentido de que corresponde al costo de proveer el beneficio climático de eliminar gases de invernadero de la atmósfera. Los datos de entrada y las fórmulas aplicadas están detalladas en la Tabla 1. Notar que debido a la falta de algunos de los datos de campo para la Chacra 3, no se pudo realizar para ella todos los cálculos que se realizó para las demás chacras.

3. Resultados y Discusión

Los resultados principales se presentan en la Tabla 1. Un resultado importante fue que la leña resultó estar suficientemente seca, con una proporción de materia seca del 78 al 81% en las tres chacras, por encima del nivel mínimo propuesto del 75% (cf. Ithaka Institute, 2024), aunque todavía falta para alcanzar el nivel ideal del 85%. Cabe señalar, sin embargo, que hubo algunos valores atípicos, en los que algunos trozos de leña presentaron una proporción de materia seca mucho más baja, llegando incluso hasta apenas 36%. No está del todo clara la causa de estos valores atípicos, que representan trozos de leña mucho más húmedos de lo permisible, pero evidentemente hay margen para mejorar los procedimientos de secado. La densidad media de la madera varió moderadamente en las tres chacras debido a la variabilidad de la composición de las diferentes especies de árboles, aunque la especie

de *pigüe* (*Piptocoma discolor*) dominaba en todas ellas, representando aproximadamente el 51% de la biomasa leñosa total. La variabilidad en cuanto a la densidad del biocarbón producido fue bastante marcada, desde 0,084 hasta 0,129 toneladas m^{-3} . Incluso el mayor de estos valores, además, fue inferior al valor de 0,140 toneladas m^{-3} que anteriormente Sirén (2024) había utilizado como valor estándar para sus cálculos, basado en Werdin et al. (2020).

La proporción de carbono de la materia prima que quedó secuestrada en el biocarbón fue del 43% y del 40%, respectivamente, los cuales son valores bastante normales para la pirólisis en hornos de cortina de llamas (cf. Cornelissen et al., 2016). El tiempo de trabajo requerido para procesar cada metro cúbico de materia prima se redujo considerablemente, pasando de las 48 horas registradas previamente (Sirén, 2024) a tan solo 24 y 32 horas, respectivamente, en las dos chacras. Esto se atribuye, por una parte, al uso de las hachas mecánicas, que ahorraron mucho tiempo, y también a la experiencia acumulada, que cada vez ha permitido optimizar mejor los procedimientos.

La cantidad de trabajo requerida por tonelada de C en el biocarbón resultante varió de 308 a 476 horas, es decir, de 38 a 60 días. Si se calcula con el salario mínimo actual oficialmente establecido en el Ecuador, esto implica un costo de 246 y 381 USD $\text{t}^{-1} \text{CO}_2\text{e}$, respectivamente, en las dos chacras. Esta cantidad puede compararse con los precios de los créditos de carbono basados en biocarbón en el mercado voluntario, los cuales últimamente han oscilado entre 130 y 150

Tabla 1. Resultados de los ensayos.**Table 1.** Test results.

Tipo de dato	Variable y cálculo	Definición	Chacra 1	Chacra 2	Chacra 3
Datos de campo	V_m	Volumen de materia prima (m ³)	2,15	2,06	9,19
	V_b	Volumen de biocarbón (m ³)	2,22	2,17	
	H_t	Tiempo total de mano de obra empleada (h)	51,6	65,5	
Datos de laboratorio	D_m	Densidad de materia prima (t m ⁻³)	0,365	0,331	0,393
	F_s	Fracción de materia seca en la materia prima	81%	78%	78%
	D_b	Densidad de biocarbón (t m ⁻³)	0,100	0,084	0,129
Datos de la literatura*	F_m	Fracción de C en la materia prima		50% ¹	
	F_b	Fracción de C en el biocarbón		75,5% ²	
	S	Sueldo mínimo en Ecuador (USD h ⁻¹)		\$2,94 ³	
Resultados calculados	$C_m = V_m \times D_m \times F_m$	Masa de C en materia prima (t)	0,39	0,34	1,81
	$C_b = V_b \times D_b \times F_b$	Masa de C en el biocarbón (t)	0,168	0,138	
	$F_c = C_b / C_m = (V_b \times D_b \times F_b) / (V_m \times D_m \times F_m)$	Fracción de C en la materia prima convertida en C en el biocarbón	43%	40%	
	$M_v = H_t / V_m$	Mano de obra empleada por volumen de materia prima (h m ⁻³)	24	32	
	$P_t = H_t \times S$	Costo total de mano de obra (USD)	\$152	\$193	
	$H_b = H_t / C_b = H_t / (V_b \times D_b \times F_b)$	Mano de obra empleada por masa de C en el biocarbón (h t ⁻¹)	308	476	
	$P_c = P_t / C_b = (H_t \times S) / (V_b \times D_b \times F_b)$	Costo por masa de C en el biocarbón (USD t ⁻¹)	\$904	\$1.398	
	$P_e = P_c / 3,67 = (H_t \times S) / (V_b \times D_b \times F_b \times 3,67)$	Costo por masa de CO ₂ e en el biocarbón (USD t ⁻¹)	\$246	\$381	

* Cifras en letra cursiva indican valores de la literatura utilizados para los cálculos. Vea el texto principal para explicaciones.

* Values in italics indicate literature values used for the calculations. See the main text for explanations.

Fuente: ¹ Saatchi et al. (2011), ² Cornelissen et al. (2016), y ³ Acuerdo Ministerial Nro. MDT-2024-300, y suponiendo 160 horas de trabajo al mes.

Source: ¹ Saatchi et al. (2011), ² Cornelissen et al. (2016), and ³ Acuerdo Ministerial No. MDT-2024-300, and assuming 160 working hours per month.

USD t⁻¹ CO₂e (Puro Earth, 2025), así como con los impuestos al carbono, que en la actualidad alcanzan un máximo de 135 USD t⁻¹ CO₂e en Uruguay (Richie y Rosado, 2022). Es decir, que el coste sigue siendo relativamente alto. Sin embargo, hay que tener en cuenta que el Ecuador, donde se realizó estos ensayos, es un país de ingresos medios-altos y con una economía dolarizada, lo que implica que el costo de la

mano de obra es mucho mayor que en la mayoría de los países donde se practica la agricultura itinerante. En muchos países de África tropical y el sur de Asia, el salario mínimo es entre 4 y 15 veces menor que en Ecuador (World Population Review, 2026), por lo que ahí la producción de biocarbón en la agricultura itinerante podría ser un método de eliminación de carbono que ya no solo es técnicamente, sino también

económicamente, factible. Por otra parte, se observó que la proporción de materia seca aumentaba ligeramente con un menor grosor y en horas más tardías del día. Sin embargo, al eliminar tres valores atípicos del análisis, estos efectos prácticamente desaparecieron (Figura 6). Es decir, por lo menos hasta los 50 mm,

el grosor de la leña muy poco afectaba el secado e investigaciones posteriores deben explorar si se puede aumentar el grosor aún más para así reducir las horas de trabajo dedicado a la fragmentación de la materia prima.

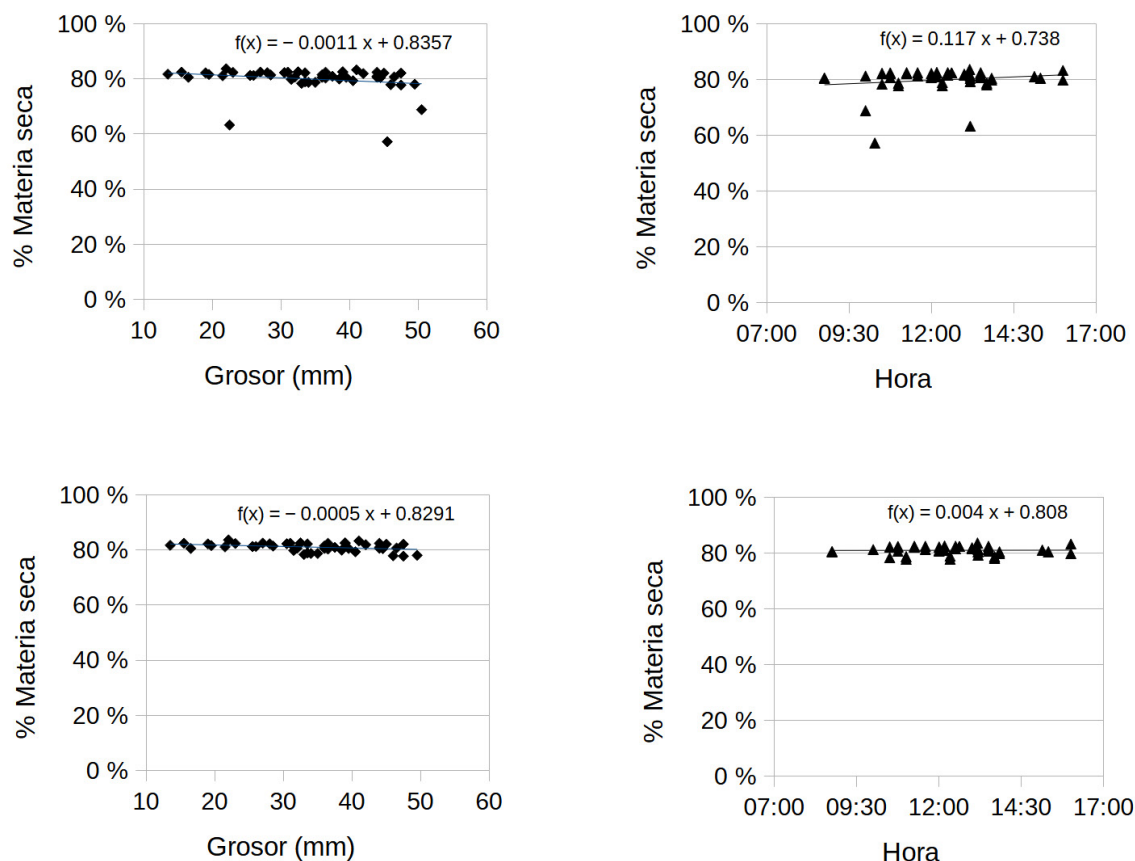


Figura 6. Efectos en la proporción de materia seca de la materia prima en función del grosor de la leña (izquierda) y de la hora del día (derecha), para los datos completos (arriba) y tras eliminar tres valores atípicos (abajo).

Datos exclusivamente de leña de *Piptocoma discolor*.

Figure 6. Effects on the dry matter content of the feedstock as a function of thickness (left) and hour (right), for the complete dataset (top) and after removing three outliers (bottom). Data are exclusively for feedstock wood of *Piptocoma discolor*.

4. Conclusiones

La preocupación de que podría ser difícil secar la materia prima lo suficiente para evitar emisiones excesivas de CH_4 se ha disipado. De hecho, se ha comprobado que probablemente se podría fragmentar la materia prima mucho menos sin arriesgar que el secado sea insuficiente, lo que también implicaría una reducción considerable de las horas de trabajo y, por tanto, del coste por tonelada de carbono capturado en el biocarbón. Los resultados confirman que la producción de biocarbón en las parcelas de agricultura itinerante tiene un gran potencial como técnica para la eliminación

de carbono de la atmósfera. Las investigaciones adicionales previstas aclararán cómo afecta la enmienda de biocarbón a los suelos y los cultivos en la agricultura itinerante. Finalmente, es importante señalar que la posibilidad de eliminar cierta cantidad de CO_2 de la atmósfera mediante la producción de biocarbón no debe jamás utilizarse como pretexto para seguir emitiendo CO_2 . Muy por el contrario, para detener el cambio climático global sigue siendo indispensable eliminar rápidamente el uso de los combustibles fósiles. El biocarbón, sin embargo, podrá servir para remediar parcialmente el daño climático causado por las emisiones acumuladas.

Agradecimientos

Brayan Gualinga, Lorgio Gualinga, Majawali Gualinga, Nestor Gualinga, Pablo Gualinga, Ricardo Gualinga, Shingo Manya, Frumen Santi, Stalin Shiguango y Tulio Viteri asistieron en el trabajo de campo junto con Carlos Aranda, Cesar Illanes y Bairon Gualinga quienes, además, pusieron sus chacras a disposición para la realización de los ensayos. El Consejo de Gobierno del Pueblo Originario Kichwa de Sarayaku (TAY-JA-SARUTA) facilitó el trabajo de campo en el territorio. Dr. Rommel Montúfar y Dr. Álvaro Pérez pusieron a disposición las facilidades del laboratorio de genética poblacional y el herbario, respectivamente, de la Pontificia Universidad Católica del Ecuador, para la realización de los análisis de las muestras de materia prima y de biocarbón.

Contribuciones de los autores

- Anders Henrik Sirén: conceptualización, investigación, metodología, redacción - revisión y edición.

Disponibilidad de datos

Los datos estarán disponibles previa solicitud.

Declaración de preprint

Una versión previa de este manuscrito ha sido depositada como preprint en el repositorio EcoEvoRxiv, que puede ser consultado en el enlace: <https://ecoevorxiv.org/repository/view/12172/>.

Declaración de Uso de Inteligencia Artificial

Los autores declaran que NO se ha utilizado Inteligencia Artificial en la elaboración del manuscrito.

Implicaciones éticas

El autor declara que no existen implicaciones éticas.

Conflicto de interés

El autor declara que no existen conflictos de interés financieros o no financieros que podrían haber influido en el trabajo presentado en este artículo.

Referencias

- Acuerdo Ministerial Nro. MDT-2024-300. Que fija el salario básico unificado del trabajador en general para el año 2025. 17 de diciembre de 2024 (Ecuador). <https://www.trabajo.gob.ec/wp-content/uploads/2024/12/ACUERDO-MINISTERIAL-NRO.-MDT-2024-300-signed.pdf>
- Bravo Medina, C. A., Alemán Pérez, R. D., Freile Almeida, J. A., Reyes Morán, H. F., Andino Inmunda, M. W., Alba Rojas, J. L., Lazo Pérez, Y., y Marino Ibarra, E. (2019). Evaluación del uso de un biocarbón sobre la absorción de cadmio del suelo y la productividad del cultivo de cacao (*Theobroma cacao* L.) en la Amazonía ecuatoriana. *Revista Iberoamericana Ambiente & Sustentabilidad*, 2(1), 6–15. <https://doi.org/10.46380/rias.v2i1.33>
- Coomes, O. T., y Miltner, B. C. (2017). Indigenous charcoal and biochar production: potential for soil improvement under shifting cultivation systems. *Land Degradation & Development*, 28(3), 811–821. <https://doi.org/10.1002/ldr.2500>
- Cornelissen, G., Pandit, N. R., Taylor, P., Pandit, B. H., Sparrevik, M., y Schmidt, H. P. (2016). Emissions and char quality of flame-curtain “Kon Tiki” Kilns for farmer-scale charcoal/biochar production. *PLOS ONE*, 11(5), e0154617. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0154617>
- Cornelissen, G., Sørmo, E., de la Rosa, R. K. A., y Ladd, B. (2023). Flame curtain kilns produce biochar from dry biomass with minimal methane emissions. *Science of The Total Environment*, 903, 166547. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.166547>
- Fawzy, S., Osman, A. I., Yang, H., Doran, J., y Rooney, D. W. (2021). Industrial biochar systems for atmospheric carbon removal: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 19(4), 3023–3055. <https://doi.org/10.1007/s10311-021-01210-1>
- International Biochar Initiative. (2015). *Standardized product definition and product testing guidelines for biochar that is used in soil*. International Biochar Initiative. IBI-STD-2.1. https://biochar-international.org/wp-content/uploads/2020/06/IBI_Biochar_Standards_V2.1_Final2.pdf
- Islami, T., Guritno, B., Basuki, N., y Suryanto, A. (2011). Biochar for sustaining productivity of cassava based cropping systems in the degraded lands of East Java, Indonesia. *Journal of Tropical Agriculture*, 49, 40–46. <https://jtropag.kau.in/index.php/ojs2/article/view/235>
- Ithaka Institute. (2024). *Standard for Carbon Sink Certification for artisan biochar production - version 2.1A*. <https://www.carbon-standards.com/de/home>
- Jeffery, S., Abalos, D., Prodana, M., Bastos, A. C., van Groenigen, J. W., Hungate, B. A., y Verheijen, F. (2017). Biochar boosts tropical but not temperate crop yields. *Environmental Research Letters*, 12(5), 053001. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa67bd>
- Jia, G., Shevliakova, E., Artaxo, P., De Noblet-Ducoudré, N., Houghton, R., House, J., Kitajima, K., Lennard, C., Popp, A., Sirin, A., Sukumar, R., y Verhot, L. (2019). Land-climate interactions. En P. R. Shukla, J. Skea, E. Calvo Buendia, V. Masson-Delmotte, H. -O. Pörtner, D. C. Roberts, P. Zhai, R. Slade, S. Connors, R. van Diemen, M. Ferrat, E. Haughey, S. Luz, S. Neogi, M. Pathak, J. Petzold, J. Portugal Pereira, P. Vyas, E. Huntley, K. Kissick, M. Belkacemi, y J. Malley, (eds.), *Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157988.004>
- Lehmann, J., Cowie, A., Masiello, C. A., Kammann, C., Woolf, D., Amonette, J. E., Cayuela, M. L., Camps-Arbeshtain, M., y Whitman, T. (2021). Biochar in climate change mitigation. *Nature Geoscience*, 14(12), 883–892. <https://doi.org/10.1038/s41561-021-00852-8>

- Lehmann, J., Gaunt, J., y Rondon, M. (2006). Bio-char Sequestration in Terrestrial Ecosystems – A Review. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 11(2), 403–427. <https://doi.org/10.1007/s11027-005-9006-5>
- Lenton, T. M. (2010). The potential for land-based biological CO₂ removal to lower future atmospheric CO₂ concentration. *Carbon Management*, 1(1), 145–160. <https://doi.org/10.4155/cmt.10.12>
- Liu, Z., Deng, Z., Davis, S., y Ciais, P. (2023). Monitoring global carbon emissions in 2022. *Nature Reviews Earth & Environment*, 4(4), 205–206. <https://doi.org/10.1038/s43017-023-00406-z>
- Mertz, O., Padoch, C., Fox, J., Cramb, R. A., Leisz, S. J., Lam, N. T., y Vien, T. D. (2009). Swidden change in Southeast Asia: Understanding causes and consequences. *Human Ecology*, 37(3), 259–264. <https://doi.org/10.1007/s10745-009-9245-2>
- Pandit, N. R., Mulder, J., Hale, S. E., Schmidt, H. P., y Cornelissen, G. (2017). Biochar from “Kon Tiki” flame curtain and other kilns: Effects of nutrient enrichment and kiln type on crop yield and soil chemistry. *PLOS ONE*, 12(4), e0176378. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0176378>
- Puro Earth. (2025). *Biochar's Market Momentum: Leading the Carbon Removal Revolution Data as of June 11, 2025*. <https://puro.earth/biochar>
- Richie, H., y Rosado, P. (2022). *Which countries have put a price on carbon?*. Our World in Data. <https://ourworldindata.org/carbon-pricing>
- Ríos Guayasamin, P. D., Smith, S. M., y Thomas, S. C. (2024). Biochar effects on NTFP-enriched secondary forest growth and soil properties in Amazonian Ecuador. *Journal of Environmental Management*, 350, 119068. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.119068>
- Saatchi, S. S., Harris, N. L., Brown, S., Lefsky, M., Mitchard, E. T. A., Salas, W., Zutta, B. R., Buermann, W., Lewis, S. L., Hagen, S., Petrova, S., White, L., Silman, M., y Morel, A. (2011). Benchmark map of forest carbon stocks in tropical regions across three continents. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 108(24), 9899–9904. <https://doi.org/10.1073/pnas.1019576108>
- Sirén, A. H. (2024). The global potential for carbon removal through biochar in shifting cultivation systems. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 29(7), 75. <https://doi.org/10.1007/s11027-024-10170-0>
- Valarezo, C., Villamagua, M. A., Mora, R. M., Maza, H., Wilcke, W., y Nieto, C. (2016). Respuesta del pachaco (*Schizolobium parahybum* Vell. Conc) y la melina (*Gmelina arborea* Roxb.) a la aplicación de biocarbón y fertilización en el sur de la amazonia ecuatoriana. *Bosques Latitud Cero*, 6(1), 77–89. <https://revistas.unl.edu.ec/index.php/bosques/article/view/183>
- Van Wagner, C. E. (1982). *Practical aspects of the line intersect method*. Canadian Forestry Service. Information Report PI-X-12E. <https://ostrnrcan-dostrncan.canada.ca/handle/1845/241774>
- Virú-Vasquez, P., Pilco-Núñez, A., Tineo-Cordova, F., Madoño-Sulca, C. T., Quispe-Ojeda, T. C., Arroyo-Paz, A., Alvarez-Arteaga, R., Velasquez-Zuñiga, Y., Oscanoa-Gamarrá, L. L., Saldivar-Villaruel, J., Césare-Coral, M. F., y Nuñez-Bustamante, E. (2025). Integrated Biochar–Compost Amendment for *Zea mays* L. Phytoremediation in soils contaminated with mining tailings of Quiulacocha, Peru. *Plants*, 14(10), 1448. <https://doi.org/10.3390/plants14101448>
- Weng, Z. H., y Cowie, A. L. (2025). Estimates vary but credible evidence points to gigaton-scale climate change mitigation potential of biochar. *Communications Earth & Environment*, 6(1), 259. <https://doi.org/10.1038/s43247-025-02228-x>
- Werdin, J., Fletcher, T. D., Rayner, J. P., Williams, N. S. G., y Farrell, C. (2020). Biochar made from low density wood has greater plant available water than biochar made from high density wood. *Science of The Total Environment*, 705, 135856. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135856>
- World Population Review. (2026). *Minimum Wage by Country 2026*. <https://worldpopulationreview.com/country-rankings/minimum-wage-by-country>