

Determinación del carbono orgánico del suelo en los bosques de Argentina

Pablo L. Peri¹, Juan Gaitán, J.², Matías Mastrangelo³, Marcelo Nosetto⁴, Pablo E. Villagra⁵, Ezequiel Balducci⁶, Martín Pinazo⁶, Roxana P. Eclesia⁶, Alejandra Von Wallis⁶, Sebastián Villarino⁷, Marina Gonzalez Polo⁸, Silvina Manrique⁹, Pablo A. Meglioli¹⁰, Marie C. Aravena¹¹, Leonardo Tenti¹², Martín Mónaco¹³, Jimena E. Chaves¹⁴, Ariel Medina¹⁵, Ignacio Gasparri¹⁶, María P. Barral¹⁷, Axel von Müller¹⁸, Norberto M. Pahr¹⁸, Marina Morsucci¹⁹, Juan M. Cellini²⁰, Leandro Alvarez²¹, Hernán Colomb²², Ludmila La Manna²³, Sebastián Barbaro²⁴, Cecilia Blundo²⁵, Ximena Sirimarco²⁶, Gualberto Zalazar²², Esteban Kowaljaw²⁷, Guillermo Martinez Pastur²⁸

Palabras clave: cambio climático – contenido de carbono – bosques nativos

Introducción

El carbono orgánico del suelo (COS) es un componente muy dinámico y clave para el funcionamiento de los ecosistemas (productivos y naturales) y los servicios que pueden brindar. La capacidad de almacenamiento del COS depende de diversos factores, entre ellos las características intrínsecas del suelo (textura y contenido de minerales), el ambiente donde evolucionan (temperatura, precipitación y su estacionalidad), el cambio de uso de la tierra, y los sistemas de producción o diferentes estrategias de manejo de suelos (agrícola, forestal), cambiando la dirección de los flu-

jos de C en el sistema suelo-atmósfera (Duarte-Guardia et al. 2019).

El alcance y la magnitud del cambio climático es mayor que lo estimado en evaluaciones anteriores respecto al aumento de temperatura presentadas en el Quinto Informe del IPCC. Teniendo en cuenta los cinco escenarios de emisiones evaluados por el Grupo I del IPCC, existe al menos una probabilidad superior al 50 % de que el calentamiento global alcance o supere los 1,5 °C a corto plazo (2021-2040), incluso bajo el escenario de muy bajas emisiones de gases de efecto invernadero (IPCC 2021). En particular, América Central y del Sur se encuentran altamente expuestas, vulnerables y fuertemente impactadas por el cambio climático, situación amplificadas por la desigualdad, la

1 Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA); Universidad Nacional de la Patagonia Austral (UNPA) - Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET). Contacto: peri.pablo@inta.gob.ar.

2 Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA); CONICET- Universidad Nacional de Luján.

3 Grupo de Estudio de Agroecosistemas y Paisajes Rurales (GEAP), Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Mar del Plata-CONICET.

4 Centro Científico Tecnológico (CCT) CONICET de San Luis.

5 Instituto Argentino de Nivología, Glaciología y Ciencias Ambientales (IANIGLA), CCT CONICET Mendoza, Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Cuyo.

6 Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA); Universidad Nacional de la Patagonia Austral (UNPA) - Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET).

7 Grupo de Estudio de Agroecosistemas y Paisajes Rurales (GEAP), Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Mar del Plata-CONICET.

8 Instituto de Investigaciones en Biodiversidad y Medioambiente (INIBIOMA) - CONICET, Bariloche.

9 Instituto de Investigaciones en Energía no Convencional, CCT CONICET Salta-Jujuy.

10 Instituto Argentino de Nivología, Glaciología y Ciencias Ambientales (IANIGLA), CCT CONICET Mendoza, Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Cuyo.

11 Laboratorio de Recursos Agroforestales, Centro Austral de Investigaciones Científicas (CADIC) - CONICET, Ushuaia, Tierra del Fuego.

12 Instituto de Suelos, CIRN, INTA.

13 Dirección Nacional de Bosques, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de la Nación.

14 Laboratorio de Recursos Agroforestales, Centro Austral de Investigaciones Científicas (CADIC) - CONICET, Ushuaia, Tierra del Fuego.

15 Dirección Nacional de Bosques, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de la Nación.

16 Instituto de Ecología Regional - CONICET, Universidad Nacional de Tucumán.

17 Grupo de Estudio de Agroecosistemas y Paisajes Rurales (GEAP), Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Mar del Plata-CONICET.

18 Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA); Universidad Nacional de la Patagonia Austral (UNPA) - Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET).

19 Instituto Argentino de Nivología, Glaciología y Ciencias Ambientales (IANIGLA), CCT CONICET Mendoza, Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Cuyo.

20 Laboratorio de Investigaciones en Maderas (LIMAD), Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, Universidad Nacional de La Plata (UNLP).

21 IANIGLA CONICET.

22 Parque Nacional Los Alerces, Chubut.

23 Centro de Estudios Ambientales Integrados (CEAI), Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco (UNPASJB), CONICET Esquel, Chubut.

24 Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA); 2 Universidad Nacional de la Patagonia Austral (UNPA) - Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET).

25 Instituto de Ecología Regional - CONICET, Universidad Nacional de Tucumán.

26 Grupo de Estudio de Agroecosistemas y Paisajes Rurales (GEAP), Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Mar del Plata-CONICET.

27 Instituto Multidisciplinario de Biología Vegetal (UNC - CONICET).

28 Laboratorio de Recursos Agroforestales, Centro Austral de Investigaciones Científicas (CADIC) - CONICET, Ushuaia, Tierra del Fuego.

pobreza, el crecimiento poblacional y la alta densidad poblacional. El cambio de uso de suelo, particularmente la deforestación con la consecuente pérdida de biodiversidad, la degradación del suelo, y la alta dependencia de las economías nacionales y locales sobre los recursos naturales para la producción de commodities, también contribuyen a esta vulnerabilidad (Castellanos et al. 2022). En este contexto, la contribución nacionalmente determinada (NDC) presentada por Argentina en el marco del Acuerdo de París, se alinea con las decisiones tomadas en el contexto de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático (CMNUCC) sobre la reducción de emisiones derivadas de la deforestación y la degradación forestal, así como la conservación de carbono de los bosques (REDD+). El Nivel de Referencia de Emisiones Forestales (NREF) es uno de los pilares del proceso REDD+, que define una línea de base para evaluar el desempeño de un país en la implementación de las actividades REDD+ en términos de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) en el sector forestal. A pesar de su importancia, el carbono orgánico contenido en el suelo de los bosques nativos no ha sido incorporado en los cálculos del NREF. Por lo tanto, el objetivo del presente trabajo fue asistir al Gobierno de Argentina en la cuantificación del contenido de carbono orgánico del suelo (COS) de los bosques nativos del país y relacionarlo con el tipo de bosque y los diferentes usos para contar con información en relación a las medidas de mitigación presentes en el Plan de Acción Nacional de Bosques y Cambio Climático (PANByCC).

Materiales y métodos

El área de estudio comprendió las regiones forestales Bosque Andino Patagónico, Espinal, Monte, Parque Chaqueño, Selva Misionera y Yungas representando una superficie de 46,8 millones de hectáreas, lo cual representa la totalidad de la superficie de bosques y tipos forestales según el Segundo Inventario Nacional de Bosques Nativos (INBN2, Dirección Nacional de Bosques, MAyDS). Para cada región forestal se utilizó una máscara de bosque que incluye las Tierras Forestales (TF) y Otras Tierras Forestales (OTF) del INBN2, a las cuales se les descontó las áreas desmontadas entre 2006 y 2021 (Sistema Nacional de Monitoreo de Bosque Nativo, Dirección Nacional de Bosques, MAyDS). Se generó una base con 1040 rodales (puntos de muestreo realizados en el campo) de COS en los primeros

30 cm de profundidad del suelo. Se seleccionaron además 52 posibles covariables de datos predictivos, las que representan factores clave para la distribución espacial del contenido de COS, como: clima, topografía, suelo (contenido de arcilla y erosión) e índices de vegetación. Los mapas de covariables se cargaron en la plataforma informática Google Earth Engine para su posterior modelado. La resolución espacial de las covariables originales se llevó a una resolución común de 200 m. Se seleccionó el algoritmo Random Forest (Breiman, 2001) para predecir y mapear los stocks de COS en el bosque nativo de Argentina en función de las covariables seleccionadas como significativas. El algoritmo de eliminación de características recursivas de Random Forest (RF-RFE) (Gregorutti et al., 2017) se usó para seleccionar el subconjunto de covariables que es más predictivo para el stock de SOC y que elimina iterativamente la variable explicativa más débil del modelo inicial de 52 covariables. En cada paso del algoritmo RF-RFE, se estimó la media del error cuadrático medio (RMSE) de validación cruzada de 10 veces y lo representamos frente al número de covariables restantes.

Por otro lado, los valores medios de contenido de COS (Mg C/ha) por región forestal del país se cruzaron con las categorías del Ordenamiento Territorial de Bosques Nativos (OTBN) provinciales (categoría I: rojo correspondiente a sectores de muy alto valor de conservación que no deben transformarse, categoría II: amarillo corresponde a bosques de mediano valor de conservación adecuadas para actividades de restauración, aprovechamiento sostenible, turismo, recolección e investigación científica, y categoría III: verde correspondiente a sectores de bajo valor de conservación que pueden transformarse parcialmente o en su totalidad) y superficies de bosques sin categorizar.

Resultados y Discusión

A nivel de rodal, el COS medio de los bosques nativos fue de $6,10 \pm 2,94$ kg/m², con los valores máximos correspondiente a los bosques Andinos patagónicos ($13,97 \pm 2,30$ kg/m²) y los mínimos a la región forestal del Monte ($2,83 \pm 0,65$ kg/m²) (Fig. 1).

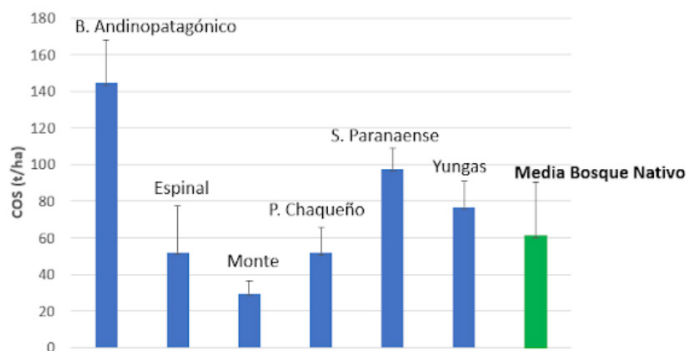


Figura 1. Promedios y desvíos estándar de los contenidos de carbono orgánico del suelo (COS) por región forestal a 0-30 cm de profundidad de suelo.

El modelo de predicción de COS ajustado incluyó 10 covariables, de las cuales las que tuvieron mayor importancia fueron variables relacionadas a temperatura (temperatura diurna de la superficie terrestre y estacionalidad de la temperatura), reflectancia superficial de la banda azul y precipitación anual (Figura 2). La reflectancia de la banda azul de longitud de onda más corta (0,43–0,45 μm) refleja un proxy del efecto de la vegetación sobre el COS ya que es destinada a mejorar la sensibilidad a la clorofila (Roy et al. 2014). Sanderman et al. (2017), quienes desarrollaron dos modelos predictivos, uno para las existencias históricas y otro para las existencias actuales de C en el suelo (es decir, antes y después de los cambios en el uso de la tierra), también encontraron que las variables más importantes en estos modelos estaban relacionadas a los atributos climáticos como la temperatura y la precipitación, además de variables topográficas.

Los resultados indican que, de la superficie total de bosque nativo, el COS total acumulado es de 2,81 Pg C (petagramos, 1015 gr), con un rango que fluctúa entre 2,71 y 2,94 Pg C considerando la incertidumbre estimada como la diferencia entre los percentiles 5 y 95 (es decir, intervalo de predicción del 90 %).

Del contenido total de COS para los bosques nativos del país (2,81 Pg C o 2810 millones toneladas C), la mayoría (47%) se encuentra en categoría amarillo y solo el 20% en categoría roja. Cabe destacar que alrededor del 16% de carbono del suelo está en categoría verde (sujetas a cambio de uso del suelo) y el restante 17% corresponde a bosques sin categorizar. Es decir, para una mejor valoración de los bosques desde el servicio ecosistémico de fijación de carbono es relevante cuantificar la pérdida de SOC al realizar un cambio de uso de suelo (transición bosque a cultivo) e incorpo-

rar a los OTBN los bosques sin categorizar. Por ejemplo, Villarino et al. (2017) demostró que el cambio de uso de suelo de bosque a cultivos de 10 años de laboreo en el Parque Chaqueño semiárido, el SOC (0-30 cm) disminuyó un 30% respecto al bosque.

Resulta relevante incorporar los valores de COS de los bosques nativos en los cálculos del Nivel de Referencia de Emisiones Forestales de Argentina, como así también analizar la relación entre el COS con el tipo de bosque y sus diferentes usos y/o el cambio de uso del suelo, para tenerlo en cuenta en los OTBN de cada provincia como variable de análisis.

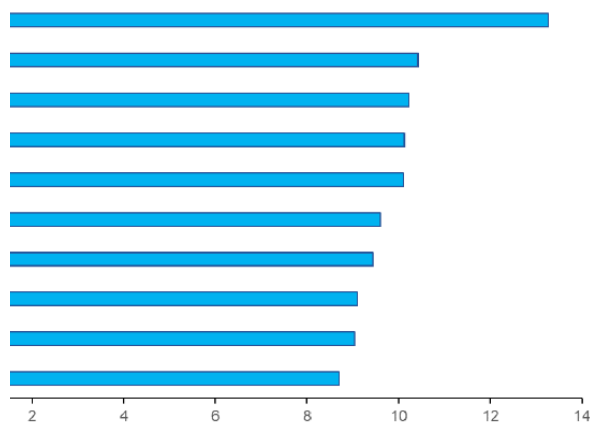


Figura 2. Importancia, en porcentaje relativo, de la contribución de las covariables utilizadas para predecir el contenido de carbono del suelo en los bosques nativos de Argentina.

Bibliografía citada

- Breiman, L. 2001. Random forests. *Machine learning* 45(1): 5-32.
- Castellanos, E., Lemos, M.F., Astigarraga, L.; Chacón, N.; Cuví, N.; Huggel, C.; Miranda, L.; Moncasim Vale, M.; Ometto, J.P.; Peri, P.L.; Postigo, J.C.; Ramajo, L.; Roco, L.; Rusticucci, M. 2022. Central and South America. En: *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama, Eds.). Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. 1689–1816.
- Duarte-Gaurdia, S.; Peri, P.L.; Borchard, N.; Ladd, B. 2019. Soils need to be considered when assessing the impacts of land use change of carbon sequestration. *Nature Ecology & Evolution* 3: 1642 doi:10.1038/

s41559-019-1026-8.

Gregorutti, B., Michel, B., Saint-Pierre, P. 2017. Correlation and variable importance in random forests. *Stat Comput.* 27: 659–78.

IPCC Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. S.l.: Cambridge University Press, 2021.

Roy D.P., Wulder, M.A., Loveland, T.R., Woodcock, C.E., Allen, R.G., Anderson, M.C., Helder, D., Irons, J.R., Johnson, D.M., Kennedy, R., Scambos, T.A., Schaaf, C.B., Schott, J.R., Sheng, Y., Vermote, E.F., Belward, A.S., Bindschadler, R., Cohen, W.B., Gao, F., Hipple, J.D., Hostert, P., Huntington, J., Justice, C.O., Kilic, A., Kovalsky, V., Lee, Z.P., Lyburner, L., Masek, J.G., McCorkel, J., Shuai, Y, Trezza, R., Vogelmann, J., Wynne, R.H., Zhu, Z. (2014) Landsat-8: Science and product vision for terrestrial global change research. *Remote Sensing of Environment* 145: 154-172.

Sanderman, J., Hengl, T., Fiske, G.J. 2017. Soil carbon debt of 12,000 years of human land use. *PNAS* 114: 9575-9580.

Villarino, S.H., Studdert, G.A., Baldassini, P., Cendoya, M.G., Ciuffoli, L., Mastrángelo, M., Piñeiro, G. 2017. Deforestation impacts on soil organic carbon stocks in the Semiarid Chaco Region, Argentina. *Science of the Total Environment* 575: 1056–1065.