

## Can Landuse Intensification Decrease Soil Carbon Stock in Upstream Sumber Brantas Watershed?

Anita Dwy Fitria<sup>1\*</sup> & Syahrul Kurniawan<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Program Studi Agroteknologi, Fakultas Pertanian, Universitas Siliwangi, Tasikmalaya, Indonesia;

<sup>2</sup>Program Studi Ilmu Tanah, Fakultas Pertanian, Universitas Brawijaya, Malang, Indonesia;

### Article History

Received : March 16<sup>th</sup>, 2023

Revised : April 24<sup>th</sup>, 2023

Accepted : May 20<sup>th</sup>, 2023

\*Corresponding Author:

**Anita Dwy Fitria,**

Program Studi Agroteknologi,  
Fakultas Pertanian, Universitas  
Siliwangi, Tasikmalaya,  
Indonesia;

Email: [anitadfitria@unsil.ac.id](mailto:anitadfitria@unsil.ac.id)

**Abstract:** Upper Brantas watershed with volcanic ash soil has potentially high carbon stock. However, land-use intensification in the upstream watershed area is the potential deterioration of soil quality, mainly degradation. The study aimed to assess the effect of land-use intensification in the upper Sumberbrantas watershed on soil carbon stock. The study was conducted in the upper Sumber brantas watershed, particularly in Kali kungkuk micro watershed, Batu City, East Java – Indonesia. Soil samples were taken at 0-30 cm and 30-100 cm on 4 land uses (i.e., forest, agroforestry, cropland, and shrubland) with three replications. The variable measured include basal area, standing litter mass, soil bulk density, and soil organic C. The results showed that land-use intensification strongly impacted soil carbon stock at 0-30 cm and 30-100 cm depth of soil. The soil carbon stock degradation of around 60% to 67% in the intensive cropping systems and in the post-cropping cultivation was covered by a shrub as compared to the forest soil, especially at a depth of 0–30 cm. The correlation value ( $p < 0.05$ ) between the basal area (0.65) and standing litter mass (0.42) on soil carbon stock, especially at a depth of 0-30 cm, indicated that the basal area and standing litter mass increase soil carbon stock. The result was in line with the soil bulk density by ANOVA test at a depth of 0-30 cm and 30-100 cm showing the effect ( $p < 0.05$ ) where intensive land use consisting of treeless (i.e., cropland and shrubland) increases the soil bulk density.

**Keywords:** bulk density, carbon stock, landuse intensification, soil quality.

### Pendahuluan

Alih fungsi lahan dari hutan menjadi pertanian intensif memberikan pengaruh jangka panjang pada penurunan kualitas lahan. Lahan dengan berbagai jenis tanaman memberikan fungsi layanan jasa ekosistem berupa keanekaragaman hayati dan biomassa. Biomassa merupakan faktor penting dalam menilai produktivitas ekosistem, cadangan karbon, dan keseimbangan hara (Chapin *et al.*, 2011). Hutan dengan tutupan berupa tegakan atau pepohonan memiliki peranan besar bagi ekologi. Salah satu peran hutan adalah menyerap CO<sub>2</sub>, hutan merupakan penyerap CO<sub>2</sub> terbesar di atmosfer dibandingkan penggunaan lahan lainnya. Hutan menyimpan CO<sub>2</sub> dalam bentuk biomassa dan karbon organik tanah dalam waktu yang lama (Milne

*et al.*, 2015). Pohon berkontribusi terhadap peningkatan biomassa dengan menyerap karbon dari atmosfer ke dalam jaringan tanaman (Mathews *et al.*, 2000).

Konversi hutan alami ke hutan produksi dan lahan pertanian menurunkan cadangan C pada tanah (Mayer *et al.*, 2020). Rendahnya C yang tersimpan pada penggunaan lahan dan tanah akan menyebabkan tingginya kepadatan tanah karena minimnya bahan organik di dalam tanah sehingga, meningkatkan penurunan kualitas tanah dan produktivitas lahan (Lorenz *et al.*, 2019; Harbo *et al.*, 2020). Tanah yang memiliki kandungan C organik rendah menyebabkan tingginya (bobot isi) BI tanah. Hal tersebut akan memudahkan tanah tererosi sehingga mengikis bagian yang subur. Sebuah penelitian yang dilakukan oleh BALITAN pada tanah mineral dengan BI 1,2 g/cm<sup>3</sup> dan

kandungan C organik 2% menyebabkan kehilangan C sebesar 240 kg C akibat erosi. Kehilangan C organik tanah dalam skala global mencapai 0,2-2,4 Gt C per tahun akibat perpindahan fisik tanah dan dekomposisi C (Lal, 2005). Meningkatnya penyerapan C tanah menyebabkan meningkatnya produktivitas tanaman (Kowalska *et al.*, 2020).

Prediksi ledakan penduduk pada tahun 2050 akan mencapai sembilan miliar jumlah penduduk hal ini akan mengancam ketahanan pangan dunia (Arif, 2021). Oleh karena itu, deforestasi semakin banyak dilakukan dengan mengkonversi hutan menjadi lahan pertanian intensif. Menurut data Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan di situs berita Lingkungan yang diterbitkan oleh Mongabay pada 2019, DAS Brantas bagian hulu berada dalam kondisi cukup kritis. Hal ini terlihat dari luas lahan kritis yang meliputi hutan seluas 925 ha dan di luar kawasan hutan di Kota Batu mencapai 1899 ha. DAS Mikro Kalikungkuk mengalami perubahan penggunaan lahan antara tahun 1995 dan 2019. Sekitar 27% dari hutan seluas 607,5 ha (atau penggunaan lahan lainnya) dikonversi menjadi tanaman pangan (395,36 ha), semak belukar (100,16 ha), dan agroforestri (112,07 ha) (Fitria *et al.*, 2021). Perubahan penggunaan lahan berdampak pada perbedaan input dan pengelolaan lahan sehingga berpotensi menurunkan cadangan C pada tanah. Pertanian tanpa olah lahan menghasilkan cadangan karbon 14% lebih tinggi dibandingkan dengan pertanian konvensional/intensif (Dechert, 2004; Abbas *et al.*, 2020).

Cadangan karbon pada tanah menjadi penting untuk keberlanjutan pengurangan emisi dan keberlanjutan ekologi (Gogoi *et al.*, 2022). Setiap tipe penggunaan lahan akan menghasilkan cadangan C yang berbeda (Fitria *et al.*, 2021, Kurniawan *et al.*, 2021) oleh karena itu, diperlukan penelitian untuk mengevaluasi dan mengetahui faktor-faktor yang mempengaruhi ketersediaan dan kehilangan karbon di dalam tanah akibat pola perubahan penggunaan lahan. Hal ini untuk meramalkan dampak merugikan dari kehilangan karbon tanah akibat perubahan penggunaan lahan. Selain itu, penelitian ini bertujuan untuk menjadi rekomendasi dalam perbaikan kualitas tanah yang berpengaruh

terhadap produktivitas tanaman. Studi lebih lanjut diperlukan untuk memperkirakan dengan lebih baik cadangan karbon tanah di luar penggunaan lahan hutan dan untuk memberikan informasi kepada petani tentang peran penting karbon untuk keberlanjutan pertanian khususnya pada Kawasan DAS Brantas.

## Bahan dan Metode

### Lokasi penelitian

Penelitian dilakukan di Kota Batu, Jawa Timur, Indonesia, di DAS Mikro Kalikungkuk, bagian dari DAS Sumber Brantas Hulu. DAS berada pada ketinggian antara 1000 dan 2000 meter di atas permukaan laut (mdpl). Kota Batu memiliki curah hujan rata-rata antara 1200 dan 2700 mm per tahun selama sepuluh tahun terakhir (2008–2018). Sebagian besar bahan induk tanah di lokasi penelitian berasal dari bahan vulkanik Gunung Anjasmoro.

Penelitian ini mengambil lokasi Kawasan hutan di dalam Taman Hutan Raya Raden Soerjo (TAHURA). Lokasi agroforestri dan lahan semak belukar berada di wilayah Perhutani Coban Talun. Petak penelitian lahan pertanian semusim ditanami tanaman hortikultura (*Daucus carota*, *Allium fistulosum*, *Brassica chinensis*), sedangkan petak penelitian agroforestri berupa agroforestri sederhana (pinus-*Brassica chinensis*, pinus-Lilium longiflorum, pinus-*Daucus carota*). Penelitian dilakukan pada masing-masing penggunaan lahan pada tiga posisi kemiringan 0-5%.

### Analisis laboratorium dan data

Analisis Laboratorium untuk C organik tanah menggunakan metode Walkey-Black. Sedangkan untuk mengukur bobot isi menggunakan metode piknometer. Stok hara tanah dinyatakan dalam  $\text{g.m}^{-2}$  atau  $\text{kg.m}^{-2}$  yang diperoleh dari persamaan 1.

$$\text{Cadangan Carbon Tanah} = \frac{Ec (\text{g/kg}) \times BD (\text{g/cm}^3) \times \Delta D (\text{cm}) \times 10000 \text{ cm}^2 / \text{cm}^3}{1000 \text{ g/kg}} \quad (1)$$

Keterangan: Ec = konsentrasi unsur hara tanah (C Organik), BD = *bulk density*/bobot isi (nilai yang digunakan dari kawasan hutan), dan  $\Delta D$  = kedalaman tanah.

Kemudian, stok unsur hara tanah ( $\text{g/m}^2$ ) dikonversi menjadi  $\text{kg/ha}$  atau  $\text{Mg/ha}$  sebagai unit akhir. Analisis data dilakukan untuk mengetahui pengaruh perubahan penggunaan lahan terhadap sifat karbon tanah dan BI pada setiap kedalaman tanah, dilakukan analisis statistik (0-30 cm, dan 30 – 100 cm). Untuk mengetahui korelasi antara parameter biomassa serasah, DBH, dan stok C pada kedalaman tanah 0-30 cm dan 30-100 cm, dilakukan uji statistik menggunakan software statistik R pada taraf nyata 5%.

## Hasil dan Pembahasan

### Karakteristik plot penelitian

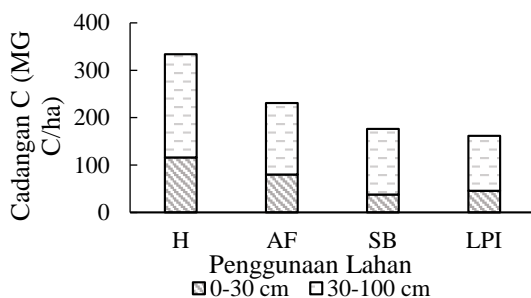
Perubahan penggunaan lahan dari hutan menjadi pertanian intensif tentunya mengurangi input biomassa berupa serasah biomassa dan simpanan karbon di dalam tanah (Melillo et al., 2017). Serasah, melalui siklus biokimia atau dekomposisi, terurai menjadi berbagai jenis unsur hara, salah satunya adalah C organik (Marty et al., 2017). Hal tersebut dapat dilihat pada Tabel 1. Sedangkan C organik di hutan berdampak pada nilai cadangan karbon yang tinggi (Gambar 1).

**Tabel 1.** Karakteristik plot penelitian

Penggunaan Lahan	C Organik (%)		Biomasa Permukaan Tanah (Mg/ha)	Populasi pohon/ha	LBD $\text{m}^2/\text{ha}$
	0-30 cm	30-100 cm			
Hutan	0,46	0,87	9,24	1227	31,75
Agroforestri	0,29	0,85	1,51	350	26,04
Semak Belukar	0,14	0,96	1,58	-	-
Lahan Pertanian Intensif	0,15	1,05	0,07	-	-

### Hasil cadangan C setiap penggunaan lahan untuk kedalaman 0-30 cm dan 30-100 cm

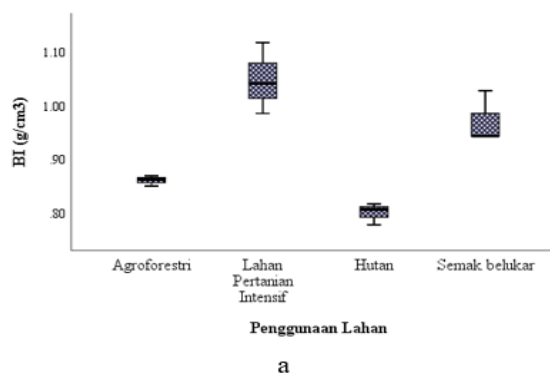
Hasil penghitungan cadangan karbon untuk setiap penggunaan lahan dan setiap kedalaman tanah ditunjukkan dengan cadangan C pada setiap kedalaman tanah pada Gambar 1. Peningkatan cadangan C tanah dari kedalaman 0-30 cm menjadi 30-100 cm adalah 1,8 kali lipat menjadi 3,6 kali. Sementara itu, penurunan cadangan C antara penggunaan lahan hutan dan penggunaan lahan tanpa tegakan atau pohon (yaitu semak dan lahan pertanian intensif) mencapai 60-67%.

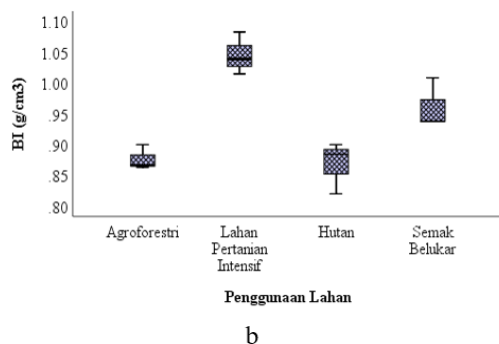


Keterangan: H= Hutan; AF= Agroforestri; SB= Semak Belukar; LPI = Lahan Pertanian Intensif

**Gambar 1.** Cadangan C tiap kedalaman tanah

Hasil uji ANOVA dan uji LSD cadangan C pada masing-masing penggunaan lahan menunjukkan nilai signifikansi ( $p < 0,05$ ) pada kedalaman tanah 0-30 cm. Ada perbedaan nilai cadangan karbon yang signifikan pada setiap penggunaan lahan. Lahan yang memiliki naungan pohon seperti hutan memiliki nilai beda nyata paling tinggi dibandingkan dengan lahan semak dan lahan pertanian intensif. Namun dapat dilihat juga bahwa sistem agroforestri berbasis penanaman pohon memiliki cadangan C yang mirip dengan hutan (Gambar 2).

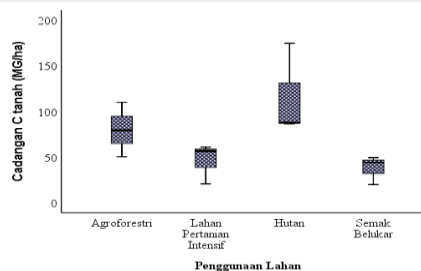




**Gambar 2.** Uji LSD Cadangan C tanah tiap penggunaan lahan kedalaman 0-30 cm

### Hasil bobot isi (BI di kedalaman tanah 0-30 cm dan 30-100 cm

Hasil kepadatan tanah yang ditunjukkan dengan nilai BI menunjukkan berbeda nyata, lahan pertanian intensif memiliki nilai BI lebih tinggi dibandingkan dengan penggunaan lahan hutan, agroforestri, dan semak belukar pada kedalaman 0-30 cm dan 30-100 cm.



**Gambar 3.** Bobot isi (BI) kedalaman a) 0-30 cm dan b) 30-100 cm

### Hasil korelasi karakteristik plot dengan cadangan C tanah kedalaman 0-30 cm dan 30-100 cm

Hasil korelasi antar parameter disajikan dalam Tabel 2. Hasil korelasi menghasilkan hubungan yang signifikan antara LBD dengan hasil biomassa permukaan tanah yang dihasilkan penggunaan lahan. Begitu juga hubungan antara LBD, biomassa permukaan tanah dengan cadangan C menghasilkan korelasi positif yang signifikan.

**Tabel 2.** Hasil korelasi antar parameter

Parameter korelasi	LBD (m <sup>2</sup> /ha)	Biomassa permukaan tanah (Mg/ha)	Cadangan C 0-30 cm	Cadangan C 30-100 cm
LBD (m <sup>2</sup> /ha)		0,814**	0,649*	0,249
Biomassa permukaan tanah (Mg/ha)			0,691**	0,419
Cadangan C 0-30 cm				0,702**
Cadangan C 30-100 cm				

Keterangan: \* (sig. 0.05); \*\* (sig.0.01)

## Pembahasan

### Perbandingan cadangan C tanah setiap penggunaan lahan

Hasil uji LSD (Gambar 2) menunjukkan bahwa hutan memiliki nilai cadangan C yang lebih tinggi dibandingkan dengan penggunaan lahan agroforestri, ladang, dan semak pada kedalaman tanah 0-30 cm. Sedangkan pada sistem agroforestri nilai cadangan C memiliki kemiripan dengan lahan hutan dan lahan pertanian intensif, hal ini dikarenakan agroforestri memiliki sistem tanam berbasis pohon dan pertanian intensif (Rüegg et al., 2019). Sistem agroforestri diperkirakan dapat menyimpan 16 Mg C/ha dan menyerap 5,3 Mg C/ha/tahun (Lasco dan Suson, 1999). Studi lain menjelaskan bahwa agroforestri antara gmelina-kakao menghasilkan biomassa dan kerapatan

karbon 258 Mg/ha dan 185 Mg C/ha yang tersimpan di dalam tanah, biomassa pohon, nekromas, tumbuhan bawah, dan akar (Lasco et al., 2001).

Sistem agroforestri memiliki potensi lebih tinggi untuk menyerap C karena kemampuannya yang lebih besar untuk menangkap dan memanfaatkan cahaya, unsur hara, dan air sebagai bahan fotosintesis dibandingkan lahan pertanian intensif atau padang rumput. Diperkirakan simpanan C dalam sistem agroforestri adalah 0,29 hingga 15,21 Mg/ha/tahun di atas permukaan tanah. Pada kedalaman tanah 1 m menghasilkan simpanan 30-300 Mg C/ha (Jose dan Bardan, 2012; Nair et al., 2010). Perubahan penggunaan lahan berdampak pada penurunan tutupan lahan dan masukan biomassa yang berdampak pada penurunan cadangan unsur hara dalam tanah

(Allen et al., 2016). Hutan dengan populasi pohon dan tutupan kanopi yang lebih rapat, serta lebih banyak serasah di tanah dibandingkan penggunaan lahan lainnya menyebabkan hutan memiliki C organik yang lebih tinggi daripada agroforestri, semak, dan lahan pertanian intensif.

### **Hubungan Cadangan C dengan kedalaman tanah**

Cadangan karbon meningkat dengan bertambahnya kedalaman tanah hal ini ditunjukkan pada Gambar 1. Cadangan C meningkat 2 kali lipat di hutan dan agroforestri; meningkat 2,8 kali lipat di lahan pertanian; dan 4,3 kali lipat di semak belukar pada kedalaman 30-100 cm. Tanah menyimpan lebih banyak karbon dari biomassa dan atmosfer (Zomer *et al.*, 2017). Kedalaman tanah berperan penting dalam distribusi cadangan C, meskipun dalam beberapa kasus ketersediaan C menurun secara linier dengan bertambahnya kedalaman tanah (Gross dan Robert, 2019). Penelitian ini diketahui dari Gambar 1, lapisan atas (0-30 cm) menyumbang 23-47% cadangan karbon tanah dari seluruh lapisan tanah (0-100 cm) sisanya disumbang oleh cadangan C pada kedalaman 30-100 cm.

Mengacu pada penelitian yang dilakukan oleh (Gross and Robert, 2019) menyatakan bahwa secara umum cadangan C tersimpan >50% pada lapisan tanah yang lebih dalam. Sebagian besar C organik yang berasal dari organisme hidup tersimpan selama ratusan hingga ribuan tahun pada lapisan tanah di bawah 20 cm (Fontaine *et al.*, 2007; Schmidt *et al.*, 2011). Mekanisme utama penyumbang cadangan C selain biomassa akar dan mikroorganisme yang bersimbiosis dengan akar adalah alokasi C organik terlarut (DOC) ke lapisan tanah yang lebih dalam. Peristiwa curah hujan dan masukan bahan organik segar merupakan faktor pendorong penting dalam fluks DOC. Aliran air atau saturasi air menyerap mineral C dari permukaan atas dan melepaskan DOC (Sokol *et al.*, 2018).

### **Hubungan cadangan C dengan kepadatan tanah**

Kepadatan tanah meningkat dengan berkurangnya tutupan lahan yang terlihat pada lahan intensif seperti lahan pertanian (Gambar 3). Cadangan karbon tanah telah digunakan sebagai indikator oleh SDGs PBB untuk menilai

degradasi tanah (Robinson *et al.*, 2022). Hutan memiliki nilai BI tanah yang lebih rendah dibandingkan dengan lahan pertanian intensif dan agroforestri. Hal itu karena bahan organik dapat mereduksi BI tanah (Celik, 2005).

Penelitian lain di daerah yang sama di DAS Mikro Kalikungkuk oleh Kurniawan *et al.*, (2021) dijelaskan bahwa pada praktek penanaman hortikultura menunjukkan BI meningkat sebesar 27-40% dan penurunan hara C sebesar 17-56%. Bila mengikuti pengolahan tanah konvensional BI tanah dapat meningkat hingga 10% (Ellert dan Bettany, 1995). Bobot isi yang tinggi akibat pertanian intensif dan deforestasi menyebabkan lahan terdegradasi secara signifikan. Penanaman teh setelah 10-40 tahun deforestasi tidak hanya meningkatkan B tanah dan mengurangi porositas tanah tetapi juga menurunkan sifat-sifat tanah seperti kapasitas tukar kation, konduktivitas listrik, karbon organik tanah, N total, dan pH (Bahrami *et al.*, 2010).

### **Hubungan jenis penggunaan lahan dengan ketersediaan cadangan C**

Hubungan antara LBD dan biomasa permukaan tanah merupakan faktor penting dalam peningkatan cadangan karbon yang ditunjukkan pada Tabel 2. Hasil korelasi menunjukkan bahwa semakin tinggi LBD dan biomasa permukaan tanah, semakin tinggi pula cadangan C tanah ( $p < 0,05$ ) terutama pada kedalaman 0-30 cm (tanah lapisan atas). Perbedaan penggunaan lahan mengakibatkan perbedaan tutupan tanah, input serasah, dan pengelolaan lahan akan berdampak pada cadangan C dalam tanah (Kurniawan *et al.*, 2019).

Mengacu pada (Paoli dan Curran, 2008) menyatakan bahwa penggunaan lahan yang berbeda menghasilkan jumlah input serasah yang berbeda (Tabel 1). Studi lain menyatakan bahwa penanaman berbasis pohon seperti agroforestri lebih baik dibandingkan dengan sistem tanpa pohon. Pohon menyimpan lebih banyak C di lapisan tanah yang lebih dalam. Kandungan C yang tinggi dikaitkan dengan keanekaragaman spesies dan kerapatan pohon yang lebih tinggi memberikan kontribusi cadangan C yang lebih banyak. Praktek pertanian dengan sistem agroforestri diharapkan dapat mengurangi konsentrasi CO<sub>2</sub> dengan menyerap C.

Agroforestri menawarkan potensi besar untuk menyerap C dan menghasilkan biomassa yang lebih besar sehingga meningkatkan cadangan C dalam tanah (Nair *et al.*, 2010; Jose dan Bardan, 2012). Studi lain yang dilakukan di DAS Mikro Kalikungkuk, Batu menemukan bahwa vegetasi sebagai penutup lahan merupakan faktor yang dapat memperkirakan degradasi tanah dilihat dari simpanan unsur hara, termasuk cadangan C (Fitria *et al.*, 2020). Studi ini menggambarkan bahwa tutupan lahan yang rendah dan perubahan lahan dari berbasis pohon menjadi lahan pertanian intensif atau semak mengurangi cadangan C dalam tanah dan menyebabkan tingginya BI tanah.

### Kesimpulan

Intensifikasi pertanian menyebabkan penurunan kualitas tanah, hal ini dapat dilihat dari penurunan stok C dalam tanah dan peningkatan BD tanah dalam tanah. Tutupan lahan berbasis pohon seperti hutan dan agroforestri penting untuk meningkatkan cadangan C dan mengurangi kepadatan tanah (BI) tanah. Praktek pertanian tanpa pohon cenderung menghasilkan kualitas lahan yang mengakibatkan degradasi lahan.

### Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terimakasih kepada Taman Hutan Raya R. Soerjo Jawa Timur dan Perum Perhutani Divisi Regional Jawa Timur.

### Referensi

- Abbas, F., Hammad, H.M., Ishaq, W., Farooque, A.A., Bakhat, H.F., Zia, Z., Fahad, S., Farhad, W. & Cerdà, A., (2020). A review of soil carbon dynamics resulting from agricultural practices. , 268, p.110319. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110319>
- Allen, K., Corre, M.D., Kurniawan, S., Utami, S.R. & Veldkamp, E. (2016). Spatial variability surpasses land-use change effects on soil biochemical properties of converted lowland landscapes in Sumatra, Indonesia. *Geoderma*, 284: 42–50. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.08.010>
- Arif, Ahmad (2021). *Masyarakat Adat dan Kedaulatan Pangan*. Kepustakaan Populer Gramedia: pp. 1-2.
- Bahrami, A., Emadodin, I., Ranjbar Atashi, M. & Rudolf Bork, H. (2010). Land-use change and soil degradation: A case study, North of Iran. *Agriculture and Biology Journal of North America*, 1(4), pp.600-605. <http://scihub.org/ABJNA/PDF/2010/4/1-4-600-605.pdf>
- Celik, I. (2005). Land use effects on organic matter and physical properties of soil in southern Mediterranean highland of Turkey. *Soil Tillage Res*, 83: 270–277. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2004.08.001>
- Chapin IIIFS, Matson PA & Vitousek P. (2011). Principles of terrestrial ecosystem ecology (*Berlin: Springer Science*). 2:529. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-9504-9>
- Dechert, G., Veldkamp, E. & Anas, I. (2004). Is soil degradation unrelated to deforestation? Examining soil parameters of land use systems in upland Central Sulawesi, Indonesia. *Plant and Soil*, 265, pp.197-209. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11104-005-0885-8>
- Ellert, B.H., & Bettany, J.R., (1995). Calculation of organic matter and nutrients stored in soils under contrasting management regimes. *Can. J. Soil Sci*, 75: 529–538. DOI: <https://doi.org/10.4141/cjss95-075>
- Fitria, A.D. & Kurniawan, S. (2021). Land-use changes and slope positions impact on the degradation of soil functions in nutrient stock within the Kalikungkuk micro watershed, East Java, Indonesia. *Journal of Degraded and Mining Lands Management*, 8(2), pp.2689-2702. DOI: [10.15243/jdmlm.2021.082.2689](https://doi.org/10.15243/jdmlm.2021.082.2689)
- Fontaine, S., Barot, S., Barré, P., Bdioui, N., Mary, B. & Rumpel, C. (2007). Stability of organic carbon in deep soil layers controlled by fresh carbon supply. *Nature*, 450(7167), pp.277-280. DOI: <https://doi.org/10.1038/nature06275>
- Gogoi, A., Ahirwal, J. & Sahoo, U.K., (2022). Evaluation of ecosystem carbon storage in

- major forest types of Eastern Himalaya: Implications for carbon sink management. *Journal of Environmental Management*, 302, p.113972. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113972>
- Gross & Robert (2019). The Case for Digging Deeper: Soil Organic Carbon Storage, Dynamics, and Controls in Our Changing World. 3(2): 28. DOI: <https://doi.org/10.3390/soilsystems3020028>
- Harbo, L.S., Olesen, J.E., Liang, Z., Christensen, B.T. & Elsgaard, L., (2022). Estimating organic carbon stocks of mineral soils in Denmark: Impact of bulk density and content of rock fragments. *Geoderma Regional*, 30, p.e00560. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2022.e00560>
- Jose, S. & Bardhan, S. (2012). Agroforestry for biomass production and carbon sequestration: an overview. *Agroforestry Systems*, 86(2), pp.105-111. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10457-012-9573-x>
- Kowalska, A., Grobelak, A., Almås, Å.R. & Singh, B.R. (2020). Effect of biowastes on soil remediation, plant productivity and soil organic carbon sequestration: A review. *Energies*, 13(21), p.5813. DOI: <https://doi.org/10.3390/en13215813>
- Kurniawan, S., Agustina, M.P., Wiwaha, R.A., Wijaya, A.Y. & Fitria, A.D. (2021). Soil quality degradation under horticulture practices in volcanic slope soil, East Java–Indonesia. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 648, No. 1, p. 012062). IOP Publishing. DOI: 10.1088/1755-1315/648/1/012062
- Kurniawan, S., Utami, S.R., Mukharomah, M., Navarette, I.A. & Prasetya, B. (2019). Land use systems, soil texture, control carbon and nitrogen storages in the forest soil of ub forest, Indonesia. *AGRIVITA, Journal of Agricultural Science*, 41(3), pp.416-427. DOI: <http://doi.org/10.17503/agrivita.v41i3.2236>
- Lal, R., (2005). Forest soils and carbon sequestration. *Forest ecology and management*, 220(1-3), pp.242-258. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2005.08.015>
- Lasco Rd, & Suson Pd. (1999). A *Leucaena leucocephala*-based indigenous fallow system in Central Philippines: the Naalad System. *Intl Tree Crops J* 10: 161-174. DOI: <https://doi.org/10.1080/01435698.1999.9753002>
- Lasco, R.D., Visco, R.G. & Pulhin, J.M. (2001). Secondary forests in the Philippines: formation and transformation in the 20th century. *Journal of Tropical Forest Science*, 13(4): pp.652-670. <https://www.jstor.org/stable/43582365>
- Lorenz, K., Lal, R. & Ehlers, K., (2019). Soil organic carbon stock as an indicator for monitoring land and soil degradation in relation to U nited N ations' S ustainable D evelopment G oals. *Land Degradation & Development*, 30(7), pp.824-838. DOI: <https://doi.org/10.1002/ldr.3270>
- Marty, C., Houle, D., Gagnon, C., & Courchesne, F. (2017). The relationships of soil total nitrogen concentrations, pools and C: N ratios with climate, vegetation types and nitrate deposition in temperate and boreal forests of eastern Canada. *Catena*, 152: pp.163-172. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.01.014>
- Matthews, E.; Payne, R.; Rohweder, M. & Murray, S. (2000). Forest ecosystem: Carbon stoarage sequestration. *Carbon Sequestration in Soil, Global Climate Change Digest*, 12 (2). URL: <http://www.wri.org/publication/pilot-analysis-global-ecosystems-forest-ecosystems>
- Mayer, M., Prescott, C.E., Abaker, W.E., Augusto, L., Cécillon, L., Ferreira, G.W., James, J., Jandl, R., Katzensteiner, K., Laclau, J.P. & Laganière, J. (2020). Tamm Review: Influence of forest management activities on soil organic carbon stocks: A knowledge synthesis. *Forest Ecology and Management*, 466, p.118127. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118127>
- Melillo, JM, Frey, SD, Deangelis, KM, Werner, WJ, Bernard, MJ, Bowles, FP, Pold, G., Knorr, MA, & Grandy, AS. (2017). Long-

- term pattern and magnitude of soil carbon feedback to the climate system in a warming world. *Science*. Sains 358 (6359), 101–105. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.aan2874>
- Milne E, Banwart S A, Noellemeyer E, Abson D J, Ballabio C, Bampa F, Bationo A, Batjes N H, Bernoux M, Bhattacharyya T, .... & Black H. (2015). Soil carbon, multiple benefits. *Environmental Development*, 13: pp. 33-38. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envdev.2014.11.005>
- Mongabay (2019). *Berita Lingkungan: Lahan Terdegradasi di Sumber Brantas*: <https://www.mongabay.co.id/tag/kementerian-lingkungan-hidup-dan-kehutanan/>
- Nair, P.R., Nair, V.D., Kumar, B.M. & Showalter, J.M. (2010). Carbon sequestration in agroforestry systems. *Advances in agronomy*, 108, pp.237-307. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(10\)08005-3](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(10)08005-3)
- Paoli, G. D., Curran, L. M., & Slik, J. W. F. (2008). Soil nutrients affect spatial patterns of aboveground biomass and emergent tree density in southwestern Borneo. *Oecologia*, 155(2): 287-299. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00442-007-0906-9>
- Robinson, D.A., Thomas, A., Reinsch, S., Lebron, I., Feeney, C.J., Maskell, L.C., Wood, C.M., Seaton, F.M., Emmett, B.A. ... & Cosby, B.J. (2022). Analytical modelling of soil porosity and bulk density across the soil organic matter and land-use continuum. *Scientific reports*, 12(1), pp.1-13. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-022-11099-7>
- Rüegg, S.R., Buttigieg, S.C., Goutard, F.L., Binot, A., Morand, S., Thys, S. & Keune, H. eds. (2019). Integrated approaches to health: concepts and experiences in framing, integration and evaluation of one health and EcoHealth. *Frontiers Media SA*. p.7. DOI: [10.3389/fvets.2019.00155](https://doi.org/10.3389/fvets.2019.00155)
- Schmidt, M.W.I.; Torn, M.S.; Abiven, S.; Dittmar, T.; Guggenberger, G.; Janssens, I.A.; Kleber, M.; Kögel-Knabner, I.; Lehmann, J. ... & Manning, D.A.C. (2011). Persistence of soil organic matter as an ecosystem property. *Nature*, 478, 49–56. DOI: <https://doi.org/10.1038/nature10386>
- Sokol, N.W, Sanderman, J., & Bradford, M.A. (2018). Pathways of mineral-associated soil organic matter formation: Integrating the role of plant carbon source, chemistry, and point of entry. *Glob. Chang. Biol.* 12–24. DOI: <https://doi.org/10.1111/gcb.14482>
- Zomer, R.J., Bossio, D.A., Sommer, R. & Verchot, L.V. (2017). Global sequestration potential of increased organic carbon in cropland soils. *Scientific Reports*, 7(1), pp.1-8. DOI: [10.1038/s41598-017-15794-8](https://doi.org/10.1038/s41598-017-15794-8)