

Depositi di carbonio e gestione agronomica (*Carbon pools and agronomic management*)

Laura Ercoli, Gaia Piazza, Elisa Pellegrino

Scuola Superiore Sant'Anna

Introduzione

Il suolo rappresenta un'enorme riserva di carbonio organico (SOC): in Europa è stato stimato che ne contenga circa 75 miliardi di tonnellate. Mappe disegnate dal Joint Research Centre (JRC) indicano che il 45% dei suoli europei ha un ridotto contenuto di sostanza organica (meno del 2%), ed esistono chiare evidenze di ulteriori diminuzioni in molti suoli (Jones et al., 2005) (Fig. 1b). In Italia, circa l'80% dei suoli ha un tenore di carbonio organico minore del 2%; di questi una elevata percentuale ha un tenore minore dell'1%. Questo declino è riconosciuto come una delle otto minacce per il suolo, definite nella European Union Thematic Strategy for Soil Protection (EC, 2006, 2012).

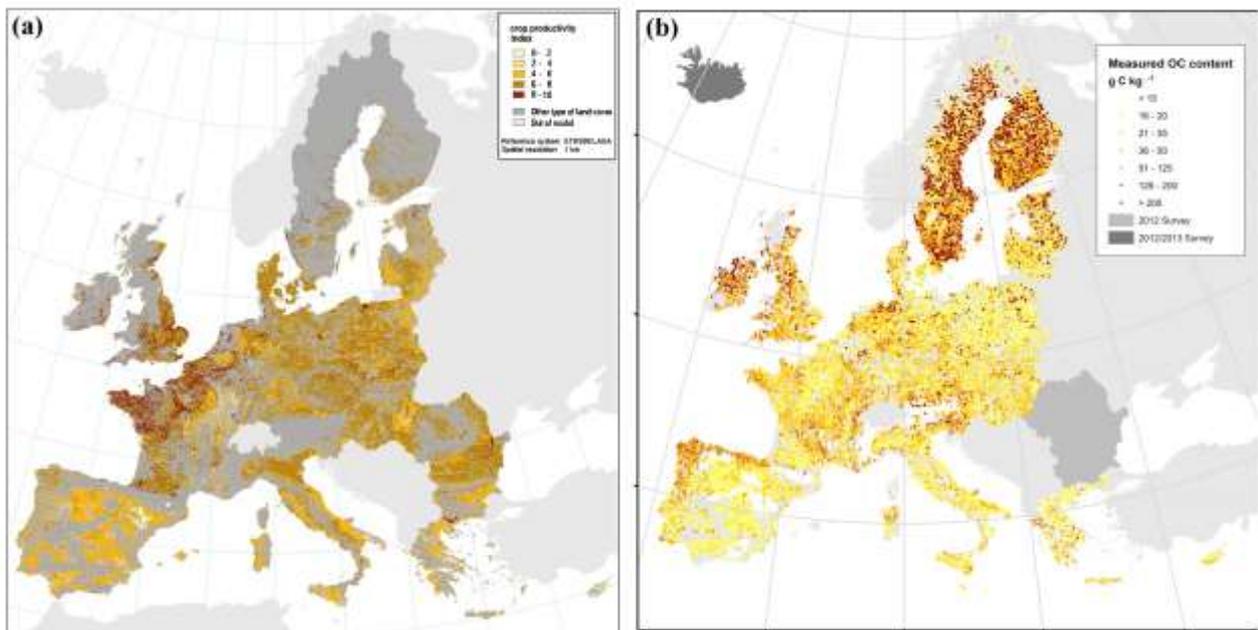


Fig. 1. Stima della produttività (a) e del contenuto di carbonio organico (b) dei suoli nell'Unione Europea (da Tóth, 2012; de Brogniez et al., 2015).

La diminuzione del contenuto di SOC può limitare la capacità del terreno di fornire elementi nutritivi per una produzione vegetale sostenibile e, di conseguenza, ridurre le produzioni e incidere sulla sicurezza alimentare. Una minore quantità di SOC comporta inoltre una diminuzione dell'energia e della materia a disposizione degli organismi viventi terricoli riducendo pertanto la biodiversità e la funzionalità del terreno.

La gestione agronomica delle colture ed in particolare la lavorazione del terreno e la concimazione, minerale, organica e biologica, sono i principali fattori che determinano l'accumulo di carbonio (C) nei terreni coltivati. L'agricoltura conservativa, adottata su larga scala a partire dagli anni '90 del secolo scorso, è una tecnica di produzione che ha come obiettivi la conservazione e l'aumento del C stoccato nel terreno (Kirkegaard et al., 2013). Un obiettivo aggiuntivo è il miglioramento della fertilità del terreno e della produzione delle colture. L'agricoltura conservativa prevede l'adozione di (i) lavorazioni del terreno ridotte o assenti, (ii) diversificazione delle colture, (iii) copertura permanente del terreno con residui vegetali e colture di copertura.

Effetto delle pratiche di gestione agronomica sulla stabilizzazione del carbonio organico nel terreno

Recentemente è stata evidenziata l'importanza degli elementi minerali azoto (N), fosforo (P) e zolfo (S) nella stabilizzazione del SOC che potrebbe giustificare il suo lento accumulo nei sistemi di non lavorazione (NT) indipendente dalla quantità di residui immessi nel sistema (Kirkegaard et al., 2013). Diversi studi hanno evidenziato che incorporare residui colturali insieme ad un'adeguata fertilizzazione (N, P, S) può determinare incrementi consistenti dei livelli di SOC (Moran et al., 2005; CSIRO, 2010; Kirkby et al. 2013). Di contro, in assenza di applicazione di fertilizzazione organica o minerale, si osserva una riduzione della quantità di carbonio organico accumulato nel terreno (Aguilera et al., 2013). Kirkby et al. (2011, 2013) hanno evidenziato rapporti C:N:P:S relativamente costanti nella sostanza organica stabile del terreno, che ne dimostrano una prevalente origine microbica.

Aguilera et al. (2013) in una recente meta-analisi hanno evidenziato che l'applicazione di residui solidi urbani, ammendanti organici, e l'inserimento negli avvicendamenti di colture di copertura incrementano, in confronto con le pratiche convenzionali, il tasso di accumulo del carbonio organico di 5.3, 1.3, 0.3 Mg C ha⁻¹ anno⁻¹, rispettivamente. Di contro, l'applicazione di liquami non esplica effetti significativi. L'effetto dell'applicazione di letame è stato studiato nella meta-analisi di Maillard e Angers (2014), che ha evidenziato un effetto positivo sull'accumulo di carbonio organico nel suolo, che incrementa passando dalle zone tropicali a quelle temperato-calde e a quelle temperato-fredde.

In un'altra meta-analisi, è stato evidenziato che l'incorporamento di paglia nel terreno incrementa significativamente il carbonio organico nel terreno, con effetti maggiori sulle frazioni più labili, ad esempio il carbonio disciolto e quello contenuto nella biomassa microbica, nelle frazioni leggere e nel particolato (Liu et al., 2014). Rumpel (2008) ha confrontato la combustione e l'incorporamento nel terreno dei residui del frumento per 31 anni in Francia e nonostante l'elevata differenza nella quantità di residui rimasti (0.8 Mg ha⁻¹ anno⁻¹ contro 3.2 Mg ha⁻¹ anno⁻¹), non ha evidenziato alcuna differenza nel contenuto di SOC.

Il mantenimento o l'incremento del contenuto di SOC è considerato un beneficio associato con la riduzione dell'intensità delle lavorazioni del terreno (Kirkegaard et al., 2013). Franzluebbbers (2005) ha stimato un incremento del tasso di accumulo del SOC di 0.42 ± 0.46 Mg ha⁻¹ anno⁻¹ in assenza di lavorazione del terreno in confronto con la lavorazione convenzionale (CT), mentre la meta-analisi di Luo et al. (2010) ha evidenziato in assenza di lavorazione (NT) un accumulo di carbonio organico nello strato superficiale del terreno (<10 cm), una diminuzione nello strato 20-40 cm e nessuna variazione negli strati 10-20 cm e 40-60 cm. Similmente, la conversione da CT a NT ha provocato un accumulo di SOC in superficie e una perdita di SOC nello strato sotto-superficiale (7.5–30 cm) (Stewart et al., 2017).

Un recente lavoro di sintesi ha messo in discussione la capacità della non lavorazione del terreno di accumulare nel terreno quantità significative di carbonio organico per la mitigazione del cambiamento climatico (Powlson et al., 2014). Il carbonio accumulato, infatti, è principalmente in forma labile e non entra a far parte dei componenti del SOC legati alla fertilità del terreno ed alla stabilità del C. In passato la stabilizzazione della sostanza organica nel terreno era stata associata ad una protezione di tipo chimico, mentre recenti studi hanno dimostrato l'importanza della protezione fisica del SOC negli aggregati del terreno (Schimdt et al., 2011). Di conseguenza, la struttura e dinamica degli aggregati del terreno giocano un ruolo fondamentale nel controllo della stabilizzazione non solo del C ma anche dell'N. Secondo la teoria gerarchica degli aggregati proposta da Tisdall and Oades (1982) e successivamente perfezionata da Six et al. (2004) i diversi agenti che cementano gli aggregati (cementi labili, temporanei e persistenti) agiscono a stadi gerarchici di aggregazione. Le particelle primarie e gli aggregati di diametro inferiore a 53 µm sono legati insieme a formare i microaggregati (53-250 µm) da cementi persistenti (sostanza organica umificata e

complessi polivalenti di cationi metallici) e da ossidi e alluminosilicati amorfi. Questi microaggregati stabili sono a loro volta legati insieme per formare i macroaggregati (>250 μm) da cementi temporanei (ife fungine e radici) e labili (polisaccaridi di origine microbica e vegetale). Secondo questo modello, i macroaggregati contengono sostanza organica più labile e meno trasformata rispetto a quella contenuta nei microaggregati. La lavorazione del terreno causa la degradazione del SOC contenuta nei macroaggregati, mentre non modifica quella contenuta nei microaggregati. I microaggregati all'interno dei macroaggregati formano infatti un micro-ambiente ideale per i microorganismi e proteggono il SOC dalla degradazione. La quantità di microaggregati all'interno dei macroaggregati è un indicatore della stabilità del terreno e cioè della sua resistenza all'erosione e della presenza di sostanza organica stabile e quindi della fertilità del terreno nel lungo periodo (Six et al., 2000). Di contro, i macroaggregati contengono SOC facilmente degradabile e agiscono come deposito temporaneo di nutrienti. La loro quantità è quindi legata alla fertilità del terreno nel breve periodo.

Esperienze di ricerca sull'impatto della lavorazione e della fertilizzazione azotata sulla stabilizzazione della sostanza organica del terreno

La ricerca è stata condotta con lo scopo di valutare gli effetti della lavorazione e della fertilizzazione azotata sull'aggregazione del suolo, sulle dinamiche del SOC e sulla diversità e funzionalità microbica. Per raggiungere tale scopo è stato utilizzato un esperimento di lungo periodo su un avvicendamento soia-frumento avviato nel 1993 in area mediterranea presso il centro Interdipartimentale di Ricerche Agro-Ambientali Enrico Avanzi (San Piero a Grado, Pisa; 43°40' lat. N; 10°19' long. E; 1 m sopra il livello del mare (Fig. 2) (Bonari et al., 2001).



Fig. 2. Mappa del sito sperimentale.

Il disegno sperimentale era uno split-plot nel quale la lavorazione del terreno era nella parcella principale e la fertilizzazione azotata nelle parcelle secondarie, con tre repliche per trattamento. I trattamenti testati erano (i) lavorazione ridotta (MT): lavorazione principale con erpice a dischi a 15 cm di profondità; lavorazione convenzionale (CT): aratura a 25 cm di profondità, seguita da un passaggio con erpice a dischi a 15 cm di profondità; (ii) fertilizzazione azotata al frumento: 200 kg N ha⁻¹ (N200); controllo non concimato (N0). Nella primavera 2016 prima della semina della soia è stato eseguito un campionamento

del terreno negli strati 0-15 cm e 15-30 cm di profondità. In ciascuna parcella sono stati prelevati 4 sottocampioni, che sono stati successivamente mescolati per le successive analisi fisiche, chimiche e biologiche. Il SOC è stato determinato mediante un analizzatore elementare CHN (Leco, Italia). Il frazionamento dei campioni di suolo è stato eseguito mediante il metodo descritto da Six et al. (1999, 2000), utilizzando uno strumento costruito presso il Land Lab (Istituto di scienze della Vita, Scuola Superiore Sant'Anna; <http://www.santannapisa.it/it/istituto/scienze-della-vita/land-lab>). La funzionalità microbica del terreno è stata determinata mediante la misura dell'attività enzimatica del suolo con il metodo dei substrati fluorogenici (Marx et al. 2001; Vepsäläinen et al. 2001). Nello specifico è stata determinata l'attività enzimatica relativa al ciclo del C: β -cellobioidrolasi (cellulasi), N-acetil- β -glucosaminidasi (chitinasi), β -glucosidasi, α -glucosidasi, e β -xilosidasi. Le analisi sono

state eseguite sul suolo setacciato a 2 mm, prima del frazionamento e sui microaggregati all'interno macroaggregati (mM). Inoltre, la diversità dei funghi micorrizici arbuscolari (AMF) è stata determinata mediante estrazione del DNA dai campioni di suolo setacciati a 2 mm, successiva amplificazione con primers specifici per la determinazione a livello di specie (Kruger et al., 2009), ligazione, clonaggio, purificazione da plasmide e sequenziamento con metodo Sanger (Pellegrino et al., 2012). Analisi bioinformatiche e filogenetiche sono state usate per determinate le unità tassonomiche operative (OTU).

Per quanto riguarda i risultati, le frazioni di suolo a 0-15 cm e 15-30 cm, la frazione limo ed argilla (< 53 μm ; s+c) variavano tra il 30% ed il 60% in MTN200 (minimum tillage-N200) e CTN200 (conventional tillage-N200), rispettivamente, mentre i microaggregati rappresentavano la porzione maggiore, e cioè tra il 50% ed il 20% in tutte le tesi. La frazione LM (*large macroaggregates*) rappresentava invece meno del 3%. Alla profondità 0-15 cm le frazioni di terreno erano così distribuite:

- **MTN0:** 36% s+c, limo ed argilla (< 53 μm); 49% μm , microaggregati (tra 53 e 250); 13% sM macroaggregati di dimensione tra 250 μm e 2 mm; 2% LM, macroaggregati di dimensione > 2 mm.
- **MTN200:** 37% s+c; 46% μm ; 16% sM; 1% LM.
- **CTN0:** 44% s+c; 40% μm ; 14% sM; 2% LM.
- **CTN200:** 64% s+c; 25% μm ; 10% sM; 1% LM.

L'interazione tra lavorazione del terreno e fertilizzazione azotata ha avuto un effetto statisticamente significativo sulla frazione s+c, e la lavorazione del terreno sulla frazione μm , mentre nessun effetto è stato osservato sulle frazioni sM e LM. Nello specifico, nella frazione s+c sono state evidenziate differenze statisticamente significative nella tesi MTN0 vs CTN0, e tra le tesi MTN0, MTN200, CTN0 vs CTN200, mentre MTN0 e MTN200 avevano valori simili. Inoltre, l'intensità della lavorazione del terreno determinava una riduzione statisticamente significativa della frazione μm , con valori pari al 33% nelle tesi CT e valori pari al 47% nelle tesi MT.

Alla profondità 15-30 cm le frazioni di terreno erano così distribuite:

- **MTN0:** 43% s+c; 45% μm ; 11% sM; 1% LM.
- **MTN200:** 38% s+c; 43% μm ; 18% sM; 1% LM.
- **CTN0:** 45% s+c; 40% μm ; 14% sM; 1% LM.
- **CTN200:** 54% s+c; 31% μm ; 13% sM; 2% LM.

A tale profondità, in modo analogo a quanto osservato precedentemente, l'interazione tra lavorazione del terreno e fertilizzazione azotata ha avuto un effetto statisticamente significativo sulla frazione s+c, e la lavorazione del terreno sulla frazione μm , mentre nessun effetto è stato osservato sulle frazioni sM e LM. Nello specifico, sulla frazione s+c sono state evidenziate differenze statisticamente significative nella tesi MTN0 vs MTN200, MTN200 vs CTN0, MTN0 vs CTN200, MTN200 vs CTN200, CTN0 vs CTN200, mentre MTN0 e CTN0 avevano valori simili. Inoltre, l'intensità della lavorazione del terreno determinava una riduzione statisticamente significativa della frazione μm , con valori pari al 36% nelle tesi CT e valori pari al 44% nelle tesi MT.

All'interno dei macroaggregati di dimensione tra 250 μm e 2 mm (sM) sono state determinate le componenti limo ed argilla dei macroaggregati (< 53 μm ; s+cM), i microaggregati all'interno dei macroaggregati (tra 53 e 250 μm ; mM), e la materia organica grossolana (> 250 μm ; cPOM). Nello strato 0-15 cm la lavorazione del terreno e la fertilizzazione azotata non hanno determinato alcuna variazione statisticamente significativa tra tesi, mentre nello strato 15-30 cm la lavorazione del terreno ha determinato un decremento della frazione mM (CT vs MT: 46% - 56%) e un incremento della frazione s+cM (CT vs MT: 33% - 24%).

Le analisi sul carbonio organico nel suolo hanno evidenziato che la lavorazione convenzionale del terreno (CT), e cioè l'aratura a 25 cm di profondità, rispetto alla lavorazione minima (MT) causava

nel lungo periodo un decremento significativo del SOC nel suolo setacciato a 2 mm e nei microaggregati all'interno dei macroaggregati (mM) nello strato superficiale (0-15 cm). La stessa risposta si osserva nello strato profondo (15-30 cm). In dettaglio, nello strato 0-15 cm il passaggio da CT a MT determinava un cambiamento nel contenuto di carbonio organico totale (TOC) pari a 2,2 Mg C ha⁻¹, mentre nello strato 15-30 cm un cambiamento pari a 1,6 Mg C ha⁻¹. Il contributo nell'accumulo di C da parte microaggregati contenuti nei macroaggregati è importante e corrisponde al 66% nello strato 0-15 cm e al 67% nello strato 15-30 cm.

Per quanto riguarda l'attività enzimatica relativa al ciclo del C, il passaggio da CT a MT e da N0 a N200 hanno determinato un incremento significativo della β -cellobioidrolasi (cellulasi) nel suolo setacciato a 2 mm sia alla profondità di 0-15 cm che a quella di 15-30 cm. L' α -N-acetil- β -glucosaminidasi (chitinasi) e la β -glucosidasi contenute nel suolo setacciato a 2 mm nello strati 0-15 cm e 15-30, rispettivamente, aumentavano in maniera significativa al passaggio in un caso da CT a MT e nell'altro da N0 a N20, rispettivamente (Fig. 3).

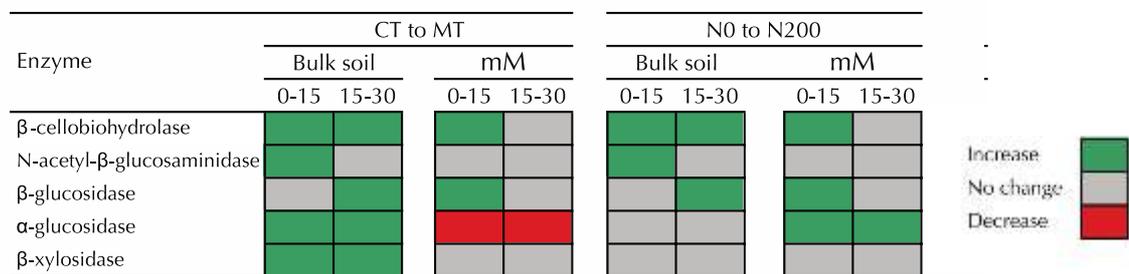


Fig. 3. Attività enzimatica relativa al ciclo del carbonio nel suolo setacciato a 2 mm e nei microaggregati contenuti nei macroaggregati (mM) nel passaggio da lavorazione convenzionale (CT) a lavorazione minima (MT) e da non concimato (N0) a fertilizzazione azotata (N200). Gli strati studiati sono 0-15 cm e 15-30 cm.

Incrementi significativi sono stati osservati nell' α -glucosidasi e β -xilosidasi contenute nel suolo setacciato a 2 mm sia a 0-15 cm che a 15-10 cm. Un comportamento opposto si osservava invece nei microaggregati contenuti nei macroaggregati (mM), dove l' α -glucosidasi decresceva in maniera significativa negli strati 0-15 cm e 15-30 cm nel passaggio da CT a MT, mentre incrementava da N0 a N200 (Fig. 3). Infine, nello strato 0-15 cm all'interno dei mM la β -cellobioidrolasi (cellulasi) e la β -glucosidasi sono aumentate significativamente nel passaggio da CT a MT e da N0 a N200.

Nel suolo setacciato a 2 mm la riduzione dell'intensità della lavorazione del terreno ha determinato nello strato 0-15 cm un incremento della ricchezza delle unità tassonomiche operative di funghi micorrizici arbuscolari (AMF), mentre la fertilizzazione azotata (da N0 a N200) ha determinato nello strato 15-30 un aumento della ricchezza di OTU di AMF in MT e un decremento in CT. In totale sono state rilevate 27 OTU di AMF. Nello strato 0-15 cm si osserva come la riduzione dell'intensità della lavorazione e la fertilizzazione aumentino il numero di generi di funghi AMF rilevati nel suolo, e di conseguenza la funzionalità del terreno in termini nutritivi e protettivi dagli stress biotici e abiotici delle colture. Nello strato 15-30 cm è stata osservata una netta riduzione del numero di OTU di AMF in confronto con lo strato superficiale. In questo strato, la riduzione dell'intensità della lavorazione ha aumentato il numero di generi di funghi AMF rilevati nel suolo, mentre con l'incremento della fertilizzazione azotata si osserva un decremento della diversità degli AMF.

Concludendo, nel nostro clima mediterraneo, con la riduzione dell'intensità della lavorazione del terreno ed in suoli medio impasto-sabbiosi, i microaggregati contenuti nei macroaggregati sono una frazione misurabile e con un significato funzionale per la stima della stabilizzazione del carbonio organico del suolo. Inoltre l'attività enzimatica del suolo, e nello specifico quella legata al ciclo del

C, è anch'essa un indicatore misurabile e con un significato funzionale nella stima della mineralizzazione dei residui vegetali mediata dai microorganismi e della disponibilità di nutrienti per le colture. La diversità delle comunità dei funghi micorrizici arbuscolari infine rappresenta un ulteriore indicatore utile alla stima del *turnover* dei macroaggregati. Tali indicatori potrebbero essere utilizzati a scale di studio più ampie e in aree climatiche diversificate (i.e., aree temperate e subtropicali). Infine le tecniche di sequenziamento di nuova generazione (i.e., Hiseq e MiSeq Illumina, Minion, PacBio) potrebbero essere applicate con successo per studiare la diversità dei batteri, degli archaea, dei funghi totali e dei funghi micorrizici arbuscolari su un elevato numero di campioni al fine di gestire la lavorazione del terreno e la fertilizzazione azotata nell'ottica dei principi dell'agricoltura conservativa.

Bibliografia

- AGUILERA E., LASSALETTA L., GATTINGER A., GIMENO B.S. (2013): *Managing soil carbon for climate change mitigation and adaptation in Mediterranean cropping systems: A meta-analysis*, «Agriculture, Ecosystems and Environment», 168, pp. 25-36.
- BONARI E., MAZZONCINI M., RISALITI R., PICCOTINO D., PEZZAROSSA B. (2001): *Modificazioni indotte da diversi tipi di lavorazione del terreno su alcune caratteristiche chimiche di un suolo Tipic Xerofluvent*, «Bollettino Della Societa' Italiana Della Scienza Del Suolo», pp. 193-202.
- CSIRO (2010): *Soil carbon sequestration potential: a review for Australian agriculture*, www.csiro.au/files/files/pwiv.pdf.
- DE BROGNEZ D., BALLABIO C., STEVENS A., JONES R.J.A., MONTANARELLA L., VAN WESEMAEL B. (2015): *A map of the topsoil organic carbon content of Europe generated by a generalized additive model*, «European Journal of Soil Science», 66(1), pp. 121-134.
- EC (2006): *Communication from the Commission to the Council, the European Parliament, the European Economic and Social Committee of the Regions. Thematic Strategy for Soil Protection*, (COM(2006) 231 final).
- EC (2012): *Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. The implementation of the Soil Thematic Strategy and ongoing activities* (COM(2012) 46 final).
- FRANZLUEBBERS A.J. (2005): *Soil organic carbon sequestration and agricultural greenhouse gas emissions in the southeastern USA*, «Soil and Tillage Research», 83(1), pp. 120-147.
- JONES C., MCCONNELL C., COLEMAN K., COX P., FALLOON P., JENKINSON D., POWLSON D. (2005): *Global climate change and soil carbon stocks; predictions from two contrasting models for the turnover of organic carbon in soil*, «Global Change Biology», 11(1), pp. 154-166.
- KIRKBY C.A., KIRKEGAARD J.A., RICHARDSON A.E., WADE L.J., BLANCHARD C., BATTEN G. (2011): *Stable soil organic matter: a comparison of C:N:P:S ratios in Australian and other world soils*, «Geoderma», 163(3), pp. 197-208.
- KIRKBY C.A., RICHARDSON A.E., WADE L.J., BATTEN G.D., BLANCHARD C., KIRKEGAARD J.A. (2013): *Carbon-nutrient stoichiometry to increase soil carbon sequestration*, «Soil Biology and Biochemistry», 60, pp. 77-86.
- KIRKEGAARD J.A., CONYERS M.K., HUNT J.R., KIRKBY C.A., WATT M., REBETZKE G.J. (2013): *Sense and nonsense in conservation agriculture: principles, pragmatism and productivity in Australian mixed farming systems*, «Agriculture, Ecosystems and Environment», 187, pp. 133-145.
- KRÜGER M., STOCKINGER H., KRÜGER C., SCHÜBLER A. (2009): *DNA-based species level detection of Glomeromycota: one PCR primer set for all arbuscular mycorrhizal fungi*, «New Phytologist», 183(1), pp. 212-223.
- LIU C., LU M., CUI J., LI B., FANG C. (2014): *Effects of straw carbon input on carbon dynamics in agricultural soils: a meta-analysis*, «Global change biology», 20(5), pp. 1366-1381.

- LUO Z., WANG E., SUN O.J. (2010): *Can no-tillage stimulate carbon sequestration in agricultural soils? A meta-analysis of paired experiments*, «Agriculture, Ecosystems and Environment», 139(1), pp. 224-231.
- MAILLARD É., ANGERS D.A. (2014): *Animal manure application and soil organic carbon stocks: A meta-analysis*, «Global change biology», 20(2), pp. 666-679.
- MARX M.C., WOOD M., JARVIS S.C. (2001): *A microplate fluorimetric assay for the study of enzyme diversity in soils*, «Soil Biology and Biochemistry», 33(12), pp. 1633-1640.
- MORAN K.K., SIX J., HORWATH W.R., VAN KESSEL C. (2005): *Role of mineral-nitrogen in residue decomposition and stable soil organic matter formation*, «Soil Science Society of America Journal», 69(6), pp. 1730-1736.
- PELLEGRINO E., TURRINI A., GAMPER H.A., CAFA G., BONARI E., YOUNG J.P.W., GIOVANNETTI M. (2012): *Establishment, persistence and effectiveness of arbuscular mycorrhizal fungal inoculants in the field revealed using molecular genetic tracing and measurement of yield components*, «New Phytologist», 194(3), pp. 810-822.
- POWLSON D.S., STIRLING C.M., JAT M.L., GERARD B.G., PALM C.A., SANCHEZ P.A., CASSMAN, K.G. (2014): *Limited potential of no-till agriculture for climate change mitigation*, «Nature Climate Change», 4(8), p. 678.
- RUMPEL C. (2008): *Does burning of harvesting residues increase soil carbon storage?*, «Journal of Soil Science and Plant Nutrition», 8, pp. 44-51.
- SCHMIDT M.W., TORN M.S., ABIVEN S., DITTMAR T., GUGGENBERGER G., JANSSENS I.A., KLEBER M., KÖGEL-KNABNER I., LEHMANN J., MANNING D.A.C., NANNIPIERI, P., RASSE D.P., WEINER S., TRUMBORE S.E. (2011): *Persistence of soil organic matter as an ecosystem property*, «Nature», 478(7367), p. 49.
- SIX J., ELLIOTT E.T., PAUSTIAN K. (1999): *Aggregate and soil organic matter dynamics under conventional and no-tillage systems*, «Soil Science Society of America Journal», 63(5), pp. 1350-1358.
- SIX J., ELLIOTT E.T., PAUSTIAN K. (2000a): *Soil macroaggregate turnover and microaggregate formation: a mechanism for C sequestration under no-tillage agriculture*, «Soil Biology and Biochemistry», 32(14), pp. 2099-2103.
- SIX J., PAUSTIAN K., ELLIOTT E.T., COMBRINK C. (2000b): *Soil structure and organic matter: I. Distribution of aggregate-size classes and aggregate-associated carbon*. «Soil Science Society of America Journal», 64(2), pp. 681-689.
- SIX J., BOSSUYT H., DEGRYZE S., DENEK K. (2004): *A history of research on the link between (micro) aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics*, «Soil and Tillage Research», 79(1), pp. 7-31.
- STEWART C.E., HALVORSON A.D., DELGADO J.A. (2017): *Long-term N fertilization and conservation tillage practices conserve surface but not profile SOC stock under semi-arid irrigated corn*, «Soil and Tillage Research», 171, pp. 9-18.
- TISDALL J.M., OADES J. (1982): *Organic matter and water-stable aggregates in soils*, «European Journal of Soil Science», 33(2), pp. 141-163.
- TÓTH G. (2012): *Impact of land-take on the land resource base for crop production in the European Union*, «Science of the Total Environment» 435–436, pp. 202–214.
- VEPSÄLÄINEN M., KUKKONEN S., VESTBERG M., SIRVIÖ H., NIEMI R.M. (2001): *Application of soil enzyme activity test kit in a field experiment*, «Soil Biology and Biochemistry», 33(12), pp. 1665-1672.