

IL CONTRIBUTO DELLO STOCCAGGIO DI CARBONIO NEI SUOLI AGRICOLI ALLA MITIGAZIONE DEL CAMBIAMENTO CLIMATICO

Martino Bellieni^{1,*}, Stefano Brenna¹, Stefano Caserini², Marco Acutis³, Alessia Perego³, Calogero Schillaci³, Roberta Farina⁴, Franco Miglietta⁵, Marina Vitullo⁶

¹ Ente Regionale per i Servizi all'Agricoltura e alle Foreste (ERSAF), Milano

² Politecnico di Milano, Dipartimento di Ingegneria Civile ed Ambientale, Milano

³ Università degli Studi di Milano, Dipartimento di Scienze Agrarie e Ambientali, Milano

⁴ Consiglio per la ricerca in agricoltura e l'analisi dell'economia agraria (CREA), Roma

⁵ Istituto di Biometeorologia, Consiglio Nazionale delle Ricerche, Firenze

⁶ Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale (ISPRA), Roma

Sommario – Nell'ultimo decennio si è progressivamente consolidata la consapevolezza dell'importanza del ruolo dell'agricoltura, e in particolare dello stato di salute dei suoli, nelle strategie di contrasto del cambiamento climatico e di adattamento ai suoi effetti. I suoli agricoli, pur se soggetti a consistenti perdite di carbonio nel corso degli ultimi secoli a causa delle pratiche agricole, presentano un contenuto di carbonio pari a tre volte il contenuto attuale di carbonio dell'atmosfera e un incremento di appena qualche punto percentuale di tale contenuto potrebbe determinare importanti assorbimenti di CO₂ atmosferica. Per implementare tale potenziale di mitigazione occorre però approfondire la conoscenza dei processi di sequestro del carbonio nei suoli, individuandone i parametri determinanti e le limitazioni; queste informazioni sono fondamentali per formulare adeguate proposte politiche di gestione dei suoli ed efficaci metodologie di monitoraggio degli stock di carbonio terrestri nel tempo. In tale contesto, il presente articolo offre una rassegna dello stato dell'arte sul tema del legame fra il contenuto di carbonio nei suoli e le politiche di contrasto del cambiamento climatico. Dopo aver effettuato l'inquadramento del problema nel contesto generale delle politiche sul clima, sono presentate le diverse pratiche di gestione che possono determinare incrementi del contenuto di carbonio nei suoli in dipendenza da fattori climatici ed ambientali. Pur se l'entità del potenziale reale di stoccaggio di carbonio di alcune pratiche, come le coltivazioni no-till e l'utilizzo di biochar, è tuttora soggetto ad incertezze e a diverse valutazioni, l'elevato potenziale teorico e i numerosi co-benefici sulla resilienza del sistema agricolo rendono necessario migliorare il quadro conoscitivo affinché tali pratiche possano diventare un elemento chiave per le politiche sui cambiamenti climatici e la produzione di cibo dei prossimi decenni. Sono infine passate in rassegna diverse tipologie di iniziative politiche (accordi internazionali, regolamenti, tassazioni, sussidi, mercato volontario dei crediti di carbonio) che possono favorire l'implementazione delle pratiche di gestione agricola con maggior potenziale di mitigazione.

Parole chiave: suoli, cambiamenti climatici, agricoltura, carbonio, mitigazione, LULUCF.

* Per contatti: Piazza Città di Lombardia 1, 20124 Milano, Tel. 02.67404393, martino.bellieni@ersaf.lombardia.it.

CARBON STORAGE IN AGRICULTURAL SOILS TO MITIGATE CLIMATE CHANGE

Abstract – In recent years, the awareness of the key role played by agriculture and soil health in climate change mitigation and adaptation policies has increased. Although agricultural lands were subjected to relevant organic carbon losses during last centuries, they are globally characterised by a soil organic carbon (SOC) content that is three times higher than the atmospheric carbon pool; thus an increase in SOC content as low as a few percentage units can determine an important potential sink for atmospheric CO₂. To implement a mitigation action a significant effort in deepening scientific knowledge is needed, focusing on determining key parameters and main limitations affecting SOC content monitoring over space and time. Further researches on these topics could help develop effective policies regarding soil management practices and setting up an affordable SOC stocks monitoring methodology. The present publication presents a scientific review of the state of the art of the connection between the SOC stock and climate change mitigation policies. Following a preliminary thematic introduction, several soil management practices that may contribute to increase SOC content, depending on climatic and environmental local conditions, are presented. Although the magnitude of the effective carbon storage achievable with the implementation of best management practices (e.g. no-till or biochar application) is still debated because of uncertainties and methodological issues related to the SOC estimates, the high theoretical potential and the related co-benefits on the resilience of the agricultural system encourage a further development of national and regional policies in this direction. Finally, a review of different policies (international agreements, regulations, taxation systems, subsidies systems and carbon credits voluntary markets) that could foster the implementation of agricultural land management practices with high CO₂ sequestration potential is presented.

Keywords: Soils, climate change, agriculture, carbon, mitigation, LULUCF.

Ricevuto il 24-5-2017. Correzioni richieste il 27-6-2017. Accettazione il 14-7-2017.

1. INTRODUZIONE

L'aumento della temperatura media della superficie terrestre, causato dall'incremento nelle concentrazioni in atmosfera di CO₂ e degli altri gas climalteranti, ha determinato numerosi impatti sui sistemi antropici ed ecologici, documentati dai vari rapporti redatti dall'Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC, si veda ad esempio il 2° volume del 5° Rapporto di Valutazione, IPCC, 2014). Numerosi studi disponibili mostrano come l'agricoltura e la produzione di cibo siano intrinsecamente sensibili alla variabilità e ai cambiamenti del clima, sia che dipendano da cause naturali che dalle attività umane.

I cambiamenti climatici stanno altresì producendo impatti non trascurabili sullo stato di salute dei suoli a livello mondiale, provocando variazioni marcate del contenuto di sostanza organica in vaste aree della superficie terrestre. Per questo motivo, le strategie di mitigazione ed adattamento al cambiamento climatico a scala globale, europea, nazionale e regionale, considerano sempre più spesso il tema delle variazioni del contenuto di carbonio dei suoli. L'attenzione è posta sia sulla riduzione delle perdite di carbonio dai suoli, che su un possibile futuro ruolo dei suoli nella realizzazione di "emissioni negative" di CO₂, immagazzinando parte del carbonio perso negli scorsi secoli.

Nell'ambito della Convenzione sul Clima (UNFCCC), nella XXI Conferenza delle Parti (COP21) tenutasi a Parigi nel dicembre 2015 è stato ribadito da più parti come il settore agricolo possa giocare un ruolo significativo nel rispetto degli impegni presi in materia di contrasto al cambiamento climatico. È stato proposto dalla Presidenza francese l'avvio di un programma internazionale per lo sviluppo di modelli di gestione dei terreni agricoli capaci di immagazzinare carbonio nei suoli, che rappresenta un esempio di iniziativa per la valorizzazione del potenziale contributo dell'agricoltura su tale tematica. Tale iniziativa, denominata "4 per mille: Soils for Food security and Climate Change" (<http://4p1000.org/understand>) ha come obiettivo l'incremento dello 0.4% annuo del contenuto in carbonio dei suoli. A maggio 2017 l'iniziativa è stata già sottoscritta da più di 200 partner (tra cui nazioni, organizzazioni internazionali, università e centri di ricerca, organizzazioni di produttori, ONG, banche, fondazioni), rappresentando quindi un importante segno dell'interesse dei decisori politici nei riguardi del-

lo sviluppo di progetti legati al sequestro di carbonio nei suoli.

A livello europeo non esiste un riferimento giuridico comune per la protezione del suolo; la strategia tematica sul suolo fornisce un quadro strategico globale, ma la protezione e la gestione di questa risorsa sono affrontate come obiettivi secondari da diverse politiche settoriali. La gestione del carbonio del suolo è diventata un tema centrale nella politica climatica con l'introduzione, nel 2013, della decisione sul cosiddetto LULUCF (Land Use, Land Use Change and Forestry) accounting (529/2013/EU) che, per la prima volta a livello comunitario, sancisce l'obbligatorietà della contabilizzazione delle emissioni e degli assorbimenti di carbonio delle terre coltivate e dei pascoli (Coderoni e Vitullo, 2014).

A livello nazionale, lo Stato Italiano ha deciso di inserire la gestione delle terre agricole, dei prati e dei pascoli tra le attività del settore LULUCF che concorrono alla riduzione delle emissioni nel cosiddetto 2° periodo di impegni previsto dal Protocollo di Kyoto (2013-2020). Con il Decreto 22 gennaio 2013 del MATTM (di concerto con il MiPAAF e in esecuzione della Decisione UE n. 529/2013) è stato affidato ad ISMEA il coordinamento tecnico del Registro dei serbatoi di carbonio agroforestali per la sezione agricola, finalizzato al calcolo delle variazioni del contenuto (stock) di carbonio su base ventennale dei terreni sottoposti a gestione delle terre agricole (cropland management, CM) e dei prati e pascoli (grassland management, GM).

A livello regionale, il contributo che lo sviluppo e la diffusione di alcune pratiche agricole possono garantire nelle strategie di adattamento al cambiamento climatico è stato sottolineato nel Documento di Azione Regionale per l'Adattamento al Cambiamento Climatico della Regione Lombardia, di recente pubblicazione (Regione Lombardia, 2016).

Il presente articolo intende fornire una rassegna dello stato di avanzamento delle ricerche e delle politiche riguardanti il legame fra la variazione del contenuto di carbonio nei suoli e il cambiamento climatico. Saranno discussi gli aspetti fondamentali del quadro di riferimento metodologico e scientifico del legame fra il carbonio nei suoli e le politiche sul clima, valutando le principali tipologie di misure proposte per incrementare il contenuto di carbonio organico nei suoli. In un successivo articolo sarà effettuata una sintesi della letteratura scientifica disponibile sui temi di accoun-

ting e reporting degli stock di carbonio nei suoli, e delle relative variazioni spaziali e temporali a differenti scale.

2. IL CARBONIO NEI SUOLI

2.1. Lo stock di carbonio nei suoli e le politiche sul clima

L'interesse nello sviluppo di politiche di sequestro del carbonio è supportato da numerose ricerche scientifiche che attribuiscono all'assorbimento di carbonio nei suoli un ruolo importante nell'ambito delle politiche climatiche necessarie a raggiungere gli obiettivi di contenimento del riscaldamento globale definiti dall'Accordo di Parigi, ossia "mantenere l'incremento della temperatura media mondiale ben al di sotto dei 2°C sui livelli preindustriali" e di "fare sforzi per limitare l'incremento della temperatura a 1,5°C" (Caserini e Piana, 2016).

Secondo numerosi studi (Rogelj et al., 2015; Fuss et al., 2014) per rispettare i livelli di gas serra in atmosfera compatibili con questi limitati incrementi massimi delle temperature, non solo le emissioni climalteranti devono ridursi in modo drastico nel giro di pochi decenni, ma è necessario altresì ricorrere a flussi di emissioni negative, tramite tecniche CDR ("carbon dioxide removal"). Il tema delle possibilità di emissioni negative, dei limiti e delle potenzialità delle diverse alternative proposte ha suscitato molto dibattito (Smith et al., 2015), in quanto si tratta in larga parte di tecnologie e pratiche oggi non ancora disponibili a livello commerciale, pur se considerate in molti scenari studiati nella letteratura scientifica per raggiungere gli

ambiziosi obiettivi di contenimento del riscaldamento globale.

Il sequestro di carbonio nei suoli e nelle foreste è una delle strategie che potrebbero essere applicate a larga scala per sottrarre CO₂ dall'atmosfera, ed è stato oggetto di numerosi studi (Mackey et al., 2013; Paustian et al., 2016) e di alcune iniziative politiche.

L'interesse per il potenziale di stoccaggio nei suoli è legato al fatto che il suolo costituisce il più grande serbatoio (pool in termini anglosassoni) di carbonio terrestre (Tabella 1), pari a circa tre volte il contenuto attuale di carbonio dell'atmosfera, 4 volte l'ammontare delle emissioni antropogeniche cumulate e 250 volte l'ammontare delle emissioni da combustibile fossile annuali. Incrementare il contenuto di carbonio nel suolo, anche di poco in termini percentuali, può rappresentare un sostanziale contributo alla sottrazione di CO₂ dall'atmosfera (Paustian et al., 2016); allo stesso modo una perdita di carbonio costituisce un ostacolo a obiettivi ambiziosi di mitigazione del cambiamento climatico. Il suolo può quindi essere considerato un'arma a doppio taglio nei confronti del bilancio del carbonio (FAO, 2017b).

Inoltre, con l'incremento della popolazione mondiale dai 6 miliardi di individui dell'anno 2000 agli 8 miliardi stimati per l'anno 2020, è previsto un consistente aumento della domanda di generi alimentari. Le strategie di sequestro di carbonio nei suoli che fanno affidamento sulle pratiche di gestione agricola che verranno di seguito descritte (minima lavorazione, colture di copertura, input da effluenti zootecnici, ecc.) possono contribuire a soddisfare tale domanda, in-

Tabella 1 – Dimensioni dei maggiori serbatoi di carbonio terrestri e confronto con l'emissione annua e cumulata di carbonio

Serbatoio	Contenuto di carbonio	Fonte
Suolo (< 40 cm di profondità)	800 Gt C	Le Quéré et al., 2016
Suolo (< 1 m di profondità)	1500 ± 230 Gt C	
Suolo (< 2 m di profondità)	2400 Gt C	Paustian et al., 2016
Atmosfera	829 ± 10 Gt C	Ciais et al., 2013
Emissione cumulata di C nel periodo 1750-2011	555 ± 85 Gt C	
Emissione cumulata di C da combustibili fossili e produzione di cemento nel periodo 1750-2011	375 ± 30 Gt C	
Emissione cumulata di C dalla variazione degli usi del suolo nel periodo 1750-2011	180 ± 80 Gt C	
Emissione di C da combustibili fossili e produzione di cemento nel 2011	9,5 ± 0,8 Gt C/anno	

troducendo benefici ausiliari di sequestro di carbonio: per questo motivo il sequestro di carbonio nei suoli è considerato una strategia win-win (Lal, 2004). Effetti benefici sull'intero agroecosistema sono stati oggetto anche del progetto Life HelpSoil (ERSAF, 2014), che ha messo a confronto sistemi di gestione di agricoltura tradizionale con sistemi di gestione di agricoltura conservativa in 20 aziende agricole situate nella Pianura Padana.

La sostanza organica nel suolo (SOM) è composta da una miscela di sostanze organiche parzialmente decomposte e gioca un ruolo fondamentale in molte funzionalità del suolo e in molti servizi ecosistemici come l'attenuazione (buffering) del cambiamento climatico, il supporto alla produzione di generi alimentari, la regolazione della disponibilità delle risorse idriche e altro. Cambiamenti nella quantità o nella qualità di SOM influiscono sulla capacità dei suoli di garantire tali servizi ecosistemici, rendendo necessaria una gestione oculata dei terreni agricoli. La gestione della sostanza organica, che è composta per circa il 58% da carbonio organico, con pratiche di gestione agricole e di uso del suolo sostenibili è universalmente riconosciuta come strategia di ripristino dello stato di salute dei suoli che permette di combattere il degrado ambientale (land degradation) e la desertificazione, incrementando la resilienza degli ecosistemi agricoli al cambiamento climatico (FAO, 2107a).

Nell'implementazione delle strategie di sequestro del carbonio nei suoli è infine necessario distinguere tra ciò che è tecnicamente fattibile e ciò che può essere ottenuto date le circostanze economiche, sociali e politiche (Paustian et al., 2016). Numerosi lavori, effettuando analisi complessive delle pratiche agricole, combinano in approcci modellistici le strategie di sequestro di carbonio nei suoli con modelli di previsione economici e degli usi del suolo, per ottenere stime di riduzione delle emissioni in funzione di prezzi variabili del carbonio (che riflettono l'incentivo sociale a pagare per la mitigazione). La stima del potenziale di mitigazione è stata individuata da Smith et al. (2008) nel range 0,41 – 1,45 Gt C/anno (a seconda di differenti vincoli economici e sociali).

Stime più recenti, basate su simulazioni modellistiche, hanno calcolato i potenziali di sequestro ottenibili con l'adozione di diverse pratiche di gestione (es. Lugato et al., 2015, per i suoli europei).

2.2. *Le emissioni e il potenziale di sequestro di carbonio nei suoli*

La dimensione e l'evoluzione temporale del contenuto di carbonio organico nel suolo è governata da un bilancio del carbonio che prende in considerazione fattori positivi (dovuti alla somma di contributi endogeni quali residui colturali, radici ed essudati radicali e contributi esogeni quali l'aggiunta di materiali vegetali, di ammendanti organici, di fertilizzanti e di concimi) e fattori negativi (dovuti alle perdite per mineralizzazione e per respirazione microbica). Il contenuto di carbonio organico in un suolo può quindi essere incrementato aumentando i quantitativi in input o riducendo i tassi di decomposizione, determinando così una rimozione netta di CO₂ dall'atmosfera (Paustian et al., 2016).

Le principali emissioni di CO₂ del settore agricolo sono dovute alle perturbazioni antropogeniche sul suolo introdotte dalle pratiche agricole. L'aratura favorisce il processo di mineralizzazione soprattutto attraverso la disgregazione fisica degli aggregati che espone il carbonio alla decomposizione mediata dai microorganismi (Gregorich et al., 1998). Ad esempio, una modellizzazione del processo di aggregazione e disgregazione degli aggregati di sostanza organica nel suolo (Six et al., 2000), ha rilevato stabilità e maggiori quantitativi di carbonio negli aggregati di suolo dei terreni gestiti con pratiche no-till rispetto a quelli gestiti con agricoltura convenzionale in quattro siti oggetto di studio.

La dinamica, e in particolare la perdita, del contenuto di carbonio nei terreni agricoli è inoltre incrementata da svariati fenomeni di degrado. Questi fenomeni possono avere natura fisica, chimica o biologica e a loro volta dipendono da numerosi fattori che spaziano dalle pratiche di gestione del suolo alle condizioni climatiche ed alle caratteristiche strutturali dei suoli, parametri sito-specifici soggetti ad elevata variabilità. La maggior parte dei suoli agricoli presenta un contenuto minore del quantitativo potenziale, in funzione delle specifiche condizioni climatiche e delle caratteristiche dei suoli. Le perdite di carbonio in alcuni terreni sono dell'ordine dei 30-40 t C/ha, o da metà a due terzi del quantitativo storico (Lal, 2004). Tra tutti i fenomeni di degrado del suolo, l'erosione è quello che comporta un impatto maggiore nella diminuzione del contenuto di carbonio.

Per quanto riguarda il territorio italiano, secondo Costantini e Lorenzetti (2013) un terzo di un set

rappresentativo dei suoli italiani può essere considerato in stato di degrado, e la maggior parte di questi suoli ricade in aree dedicate a coltivazioni agricole.

Una gestione migliorata del suolo può ridurre sostanzialmente le emissioni di gas ad effetto serra ed immagazzinare nei suoli parte della CO₂ rimossa dall'atmosfera dalle piante, sotto forma di sostanza organica. In aggiunta alla diminuzione delle emissioni di gas ad effetto serra e al sequestro di carbonio, una gestione migliorata del suolo che incrementi la sostanza organica e regoli il ciclo dell'azoto può indurre delle importanti sinergie, quali un aumento della fertilità e della produttività, un aumento della biodiversità, una riduzione di fenomeni di erosione, inquinamento e ruscellamento e un aumento della resilienza delle colture e dei pascoli al cambiamento climatico (Paustian et al., 2016).

In definitiva quindi, con il termine "soil C sequestration" si fa riferimento in letteratura al processo di sequestro della CO₂ atmosferica da parte delle piante ed al suo processo di immagazzinamento sotto forma di sostanza organica (soil organic matter, SOM): il fine ultimo è ottenere un incremento del quantitativo di carbonio nel suolo. Il processo si compone di tre sottoprocessi successivi: 1) rimozione di CO₂ dall'atmosfera per fotosintesi; 2) trasformazione del carbonio sotto forma di biomassa; 3) trasferimento del carbonio da biomassa al suolo, dove è immagazzinato sotto forma di SOC nel pool più labile. A questo fine è importante approfondire la comprensione della distribuzione del carbonio con la profondità del suolo e le conoscenze della dinamica del processo di incapsulamento in micro-aggregati, che proteggono il carbonio da processi di consumo per via microbica e ne aumentano il tempo di residenza nel suolo. Vari sviluppi della ricerca scientifica sono indirizzati allo studio della risposta nella distribuzione verticale del carbonio nei suoli in funzione delle diverse tipologie di colture e delle rispettive lunghezze di penetrazione delle radici nel suolo.

Dall'introduzione delle pratiche di agricoltura intensiva ad oggi una grande porzione dei suoli sono stati soggetti ad una continua perdita di carbonio ed i relativi stock sono diminuiti di pari passo. La conversione di questi suoli a usi più conservativi e l'adozione di opportune pratiche di gestione possono determinare un consistente sequestro di carbonio. A parità di altri fattori il potenziale di sequestro di carbonio a livello mondiale è

maggiore per suoli degradati ed ecosistemi desertificati e minore per le foreste, con valori intermedi per le altre tipologie, secondo l'ordine indicato in Lal (2004):

Suoli degradati ed ecosistemi desertificati > Terreni agricoli > Pascoli > Foreste

La maggior parte dei terreni agricoli è stato soggetto a perdite che si pensa possano essere recuperate nel corso dei prossimi 25-50 anni. Circa il 33% dei suoli mondiali risulta soggetto a degrado ed i suoli di molti ecosistemi agricoli hanno subito perdite del 25-75% del contenuto di carbonio originario, per un quantitativo stimato in circa 42-78 Gt C, mentre la capacità di recupero è stata individuata in circa 21-51 Gt C (FAO, 2017a). La ricerca scientifica si sta focalizzando sulla determinazione dei tassi di sequestro e su una valutazione delle incertezze relative a queste misure. In ogni caso, le potenzialità future di sequestro di carbonio dipendono da numerosi fattori tra i quali la tipologia di suolo, il contenuto iniziale di carbonio, il clima e le pratiche di gestione. Bisogna evidenziare comunque che i risultati possono variare molto da sito a sito.

2.3. Le pratiche di gestione

Il contenuto di carbonio nei suoli agricoli può essere incrementato adottando le cosiddette pratiche di gestione raccomandate ("Recommended Management Practices", RMP), di cui un elenco è riportato in Tabella 2 (Lal, 2004).

Un ulteriore aspetto da tenere in considerazione riguarda la biodiversità nei suoli, che determina un impatto positivo nel mantenimento e nell'accrescimento del contenuto in carbonio. A parità di altri fattori, gli ecosistemi ad elevata biodiversità sono in grado di sequestrare un maggior quantitativo di carbonio degli ecosistemi a minore biodiversità (Lal, 2004). Nei sistemi agricoli la biodiversità può incrementare inoltre con il passaggio da agricoltura convenzionale a conservativa (ERSAF, 2014).

Le RMP fino a qui presentate rappresentano i campi di studio sui quali la ricerca si sta focalizzando nell'intento di valutare fattibilità ed applicabilità delle strategie di sequestro di carbonio a livello mondiale. Insieme al cambiamento di uso del suolo possono contribuire ad aumentare in valore assoluto gli input di carbonio nei suoli. Viene qui di seguito riportata una descrizione delle singole RMP.

Tabella 2 – \Confronto tra pratiche di gestione ordinarie e le pratiche di gestione raccomandate in relazione al sequestro di carbonio (Lal, 2004)

Metodi ordinari/convenzionali	Pratiche di gestione raccomandate (RMP)
Combustione delle biomasse e rimozione dei residui colturali	Recupero dei residui come pacciami di superficie
Aratura convenzionale	Minima lavorazione, no-till e pacciamatura
Maggese	Culture di copertura (cover crops)
Monocoltura continua	Rotazione ad elevata diversità
Agricoltura di sussistenza a bassi input	Gestione mirata degli input
Utilizzo intenso di fertilizzanti	Gestione integrata dei nutrienti con fertilizzanti organici ed agricoltura di precisione
Agricoltura intensiva	Integrazione del pascolo (e di culture prative poliennali e/o dell'agroforestazione) negli ordinamenti colturali
Irrigazione superficiale	Irrigazione a goccia o sub-irrigazione
Utilizzo indiscriminato di fitofarmaci	Gestione integrata delle infestanti
Coltivazione di terreni marginali	Programmi conservativi, recupero di suoli degradati mediante land-use change

2.3.1. Pratiche di minima lavorazione e no-till

La minima lavorazione è una tecnica che prevede la lavorazione del terreno a profondità generalmente non superiori a 15-20 cm, tale da permettere di ottenere con uno/due passaggi di macchina un letto di semina soddisfacente, senza inversione completa degli strati, mantenendo al contempo una copertura di residui colturali su almeno il 30% della superficie lavorata. Il No Tillage (no-till) è una tecnica che prevede invece come pratica continuativa la semina delle colture direttamente sulle stoppie della coltura precedente, i cui residui vengono lasciati totalmente o quasi (90-100%) sul terreno. Con questa tecnica non viene effettuata nessuna lavorazione del terreno (ERSAF, 2014).

La consistenza e l'affidabilità delle stime di sequestro del carbonio legate ad una conversione del suolo da aratura convenzionale a pratiche di minima lavorazione e pratiche no-till è ancora oggetto di discussione nella comunità scientifica; le posizioni più critiche supportano la tesi che l'incremento degli stock di carbonio osservato nello strato superficiale del suolo (0-30 cm) sia controbilanciato da una perdita negli strati di suolo profondi, che non sempre sono presi in considerazione nelle pubblicazioni scientifiche (Powlson et al., 2014). Il potenziale di sequestro ottenibile con la sola adozione di pratiche no-till è in ogni caso molto variabile e dipende da numerosi fattori sito-specifici (tipo di suolo, condizioni ambientali e climatiche, modalità e tipologia di tecniche di gestione dei terreni) nonché dagli apporti di carbonio organico esterni (i.e. colture di copertura, residui colturali, effluenti zootecnici, ammen-

danti organici, concimazione). Molti studi hanno riportato un potenziale di sequestro elevato per i suoli europei; tra questi Smith et al. (1998) hanno ad esempio stimato che l'adozione di pratiche di minima lavorazione possano presentare un potenziale di sequestro in Europa di circa 23 Mt C/anno pari a 83 Mt CO₂/anno. Uno studio più recente effettuato da Francaviglia et al. (2017) ricorrendo ad approcci di data mining e basato su un dataset composto da dati da 66 siti in climi mediterranei ha mostrato che l'adozione di pratiche no-till determina un consistente aumento di carbonio organico nel suolo. Allo stato degli studi si può tuttavia ritenere che le pratiche conservative (no-till) possano arrivare, nelle condizioni favorevoli, ad accumulare negli strati superficiali del suolo fino a 0,2-0,5 t C/ha/anno. In generale il potenziale di accumulo è maggiore nei suoli più degradati ed impoveriti e appare più significativo negli ambienti caldi rispetto a quelli umidi e freddi. Un altro aspetto che va considerato per valutare l'efficacia e l'impegno richiesto dalle pratiche no-till è che per garantire l'effettivo accumulo di carbonio è necessario che il passaggio a questa tipologia di coltivazione sia permanente. Come indicato da Powlson et al. (2014), in molti terreni in cui sono adottate pratiche no-till è invece comune l'utilizzo in alcuni periodi delle tecniche tradizionali, portando alla perdita dei benefici dell'accumulo di carbonio nei primi strati del suolo.

2.3.2. Culture di copertura

Un modo per incrementare il livello di carbonio nei suoli consiste nell'utilizzare colture di coper-

tura (cover crops) inserite nella rotazione tra una coltura principale e la successiva, allo scopo di dare una copertura adeguata al suolo, apportare residui (e quindi biomassa) al terreno e stimolarne l'attività biologica. Le funzioni delle "cover crops" sono molteplici: proteggono il suolo contro l'erosione e il compattamento, favoriscono il riciclo degli elementi nutritivi, agevolano il controllo di infestanti e parassiti, aumentano la sostanza organica nel terreno e ne preservano e migliorano la struttura (ERSAF, 2014).

L'impiego di colture di copertura incrementa, inoltre, la biodiversità, la qualità dei residui in input e di conseguenza il quantitativo di carbonio nel suolo. Effetti benefici nell'impiego di colture di copertura sono stati registrati da Poeplau e Don (2015), in uno studio che ha individuato un potenziale medio di sequestro di carbonio pari a 0,32 t/ha/anno.

2.3.3. Input esterni di carbonio organico

Una gestione accurata dei nutrienti è molto importante nelle pratiche di sequestro del carbonio. In generale, l'impiego di effluenti zootecnici, ammendanti organici e/o di compost incrementa il contenuto di carbonio più di quanto non si verifichi con l'impiego di uno stesso quantitativo di nutrienti da fertilizzanti inorganici (Gregorich et al., 2001). Un'applicazione a lungo termine di ammendanti inoltre incrementa il contenuto di carbonio e può favorire fenomeni di aggregazione delle particelle del suolo, migliorandone quindi la struttura. Il potenziale che le pratiche di minima lavorazione presentano nel sequestro di carbonio può essere significativamente incrementato dall'applicazione di ammendanti organici (Hao et al., 2002). Le applicazioni più recenti fanno riferimento ad input di carbonio da sostanza organica sostanzialmente da due fonti:

- *Aggiunta di compost*

L'aggiunta di carbonio da fonti esterne quali compost può incrementare gli stock di carbonio nel suolo; si tratta di un carbonio che è soggetto a un processo di decomposizione più lenta rispetto ai residui colturali in quanto il compost è caratterizzato da tempi di residenza medi nel suolo molte volte superiori alla materia organica non compostata (Paustian et al., 2016).

- *Aggiunta di biochar*

Il biochar è il prodotto di processi di pirolisi e gassificazione della biomassa, nei quali la biomassa stessa viene surriscaldata in assenza (o in presenza limitata) di ossigeno. Il processo di pi-

rolisi/piro-gassificazione così condotto produce da un lato gas combustibili (H_2 , CO, CH_4) ed oli e dall'altro un composto solido ad elevato contenuto di carbonio, il biochar appunto. L'aggiunta di biochar può indurre un incremento della fertilità dei suoli, soprattutto nei casi di suoli acidi. La produttività aumenta e di pari passo aumentano la resilienza delle colture nei confronti di malattie e la capacità di ritenzione del terreno, aspetti che rendono il ricorso al biochar una pratica di gestione particolarmente raccomandabile. I più recenti studi a scala globale (Woolf et al., 2010) stimano che l'applicazione a vasta scala del biochar in agricoltura possa contribuire ad un sequestro complessivo di CO_2 pari a 1,2 Gt C/anno, pari al 12% circa delle emissioni antropiche di GHG (Greenhouse gasse).

Secondo l'Italian biochar association (Ichar) la produzione e la conseguente applicazione di biochar sui suoli può rappresentare un'alternativa interessante per il settore agricolo e forestale in Italia, incrementando la sostenibilità e fornendo una misura di mitigazione del cambiamento climatico. Il carbonio contenuto nel biochar mineralizza a tassi bassissimi, ciò garantisce un sequestro di carbonio nel suolo molto efficiente.

Il biochar è riconosciuto come una tecnica "carbon negative", ossia in grado di produrre una riduzione dei livelli di CO_2 in atmosfera, come mostrato da diversi studi LCA (si veda, ad esempio, lo studio sull'applicazione come ammendante in risaie del Nord Italia in Lugato et al., 2013). Alcune norme nazionali (ad esempio in Italia la Legge nr. 75) ne consentono l'uso in agricoltura. Bisogna però considerare alcuni aspetti poco studiati, tra cui quello che riguarda le modifiche dell'albedo dei suoli trattati (Bozzi et al., 2015) e le emissioni di particolato fine (black carbon), e questo soprattutto in relazione alle modalità e tecniche di distribuzione (Genesio et al., 2016; Ravi et al., 2016). Un ulteriore aspetto critico legato ad un impiego massiccio di biochar in agricoltura riguarda la possibile biodisponibilità di IPA (Idrocarburi Policiclici Aromatici), seppur studi recenti (Hilber et al., 2017) sembrano contenere questo tipo di pericolo. Rimangono comunque alcuni gap nella conoscenza scientifica riguardante gli effetti che un'applicazione di lungo termine del biochar può produrre sui suoli, come riportato in Tammeorg et al. (2016).

2.3.4. Irrigazione

Le pratiche di agricoltura conservativa contribuiscono ad aumentare l'efficienza d'uso dell'acqua

irrigua, riducendo le perdite per evaporazione e percolazione ed incrementando la capacità di ritenzione idrica nei suoli e la conservazione nel tempo delle acque di precipitazione (ERSAF, 2014). In linea di massima l'irrigazione aumenta le perdite di carbonio perché si creano le condizioni ideali per l'attività dei microrganismi, quali temperature medio-alte e disponibilità idrica. Tecniche innovative come l'irrigazione in deficit, che consiste nel ridurre al minimo le dosi di adacquamento nelle fasi vegetative meno sensibili, riducono la probabilità di accelerare i tassi di mineralizzazione della sostanza organica nel periodo estivo. Risulta opportuno, inoltre, adottare sistemi irrigui che consentano di apportare volumi ridotti e aumentare al contempo l'efficienza d'uso dell'acqua da parte delle colture (surface and subsurface drip irrigation).

2.3.5. Recupero di aree degradate e land-use change

Una buona porzione di suoli ha registrato una perdita consistente dell'originario contenuto di carbonio, tale contenuto può essere recuperato grazie all'impiego di opportune pratiche di gestione. Gli ecosistemi naturali sono caratterizzati da stock di carbonio più elevati rispetto ai suoli agricoli e la perdita di carbonio che si manifesta con la conversione a suolo agricolo è stata documentata in una simulazione modellistica effettuata da Lugato et al. (2015) attraverso uno scenario che prevede la conversione del 100% delle praterie dei terreni europei a terreni agricoli determinerebbe una perdita di carbonio totale cumulata al 2100 pari a 2 Gt. Le perdite di carbonio totali che si registrano a seguito di conversione di uso, a nuovo equilibrio raggiunto, sono solitamente pari al 30-50% dello stock di carbonio dello strato superficiale (Ogle et al., 2005). Il ripristino degli acquitrini che sono stati drenati per uso agricolo riduce il procedere delle perdite per de-

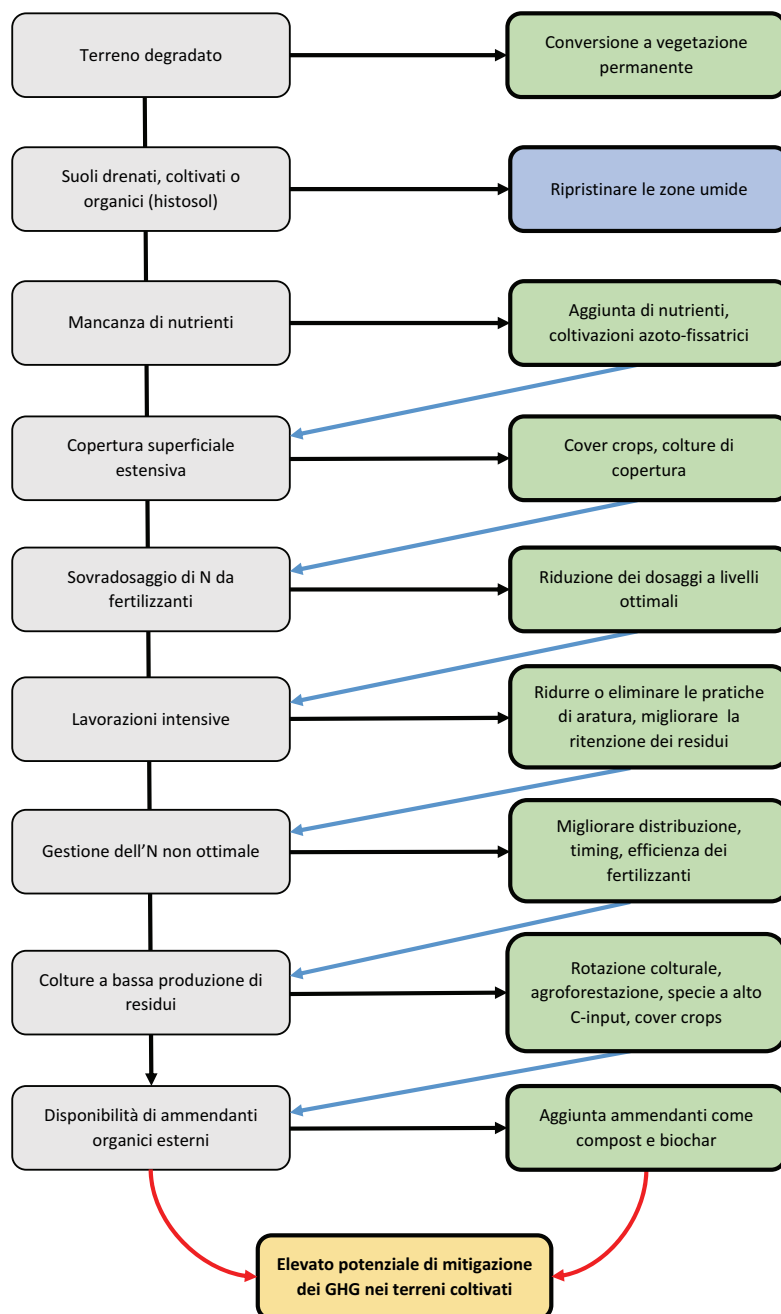


Figura 1– Albero di decisione per le pratiche di gestione dei suoli agricoli (Paustian et al., 2016)

composizione, che possono contare per 5-20 t C/ha/anno (IPCC, 2006). In generale, i tassi di sequestro del carbonio relativi alle aree ad uso agricolo sono inferiori rispetto alle aree convertite a foreste o a pascolo.

2.3.6. Linee guida per la gestione dei suoli

Le RMP finora riportate permettono di individuare le linee guida per una gestione migliorata del suolo, che prenda in considerazione le alternative e le pratiche di gestione che la letteratura suggerisce nella ricerca riguardo il sequestro di carbonio. L'albero di decisione riportato in Figura 1 (Pau-

Tabella 3 – Limitazioni e proposte per lo sviluppo di politiche di sequestro di carbonio (FAO, 2017b)

Limitazione	Soluzione proposta
Finanziaria	Incentivi e regolamenti che prendano in considerazione situazioni locali
Socio-culturale	Adozione di strategie di adattamento che riconoscono e tengono conto del contesto e delle conoscenze locali
Legata alla conoscenza	Supporto agli stakeholders che forniscono e rendono accessibili informazioni e dati sul clima da ricerche, sistemi di monitoraggio, sistemi di divulgazione
Tecnico-logistica	Favorire la diffusione delle tecnologie esistenti ed investire in nuove tecnologie per la gestione sostenibile dei suoli. Continuo monitoraggio in schemi “learning by doing” dei costi, dei benefici e degli effetti delle politiche di mitigazione
Istituzionale e legata a disponibilità di risorse	Sviluppo di nuove infrastrutture e creazione di mercati accessibili ed efficienti, istituzione di servizi finanziari quali, ad esempio, polizze assicurative

stian et al., 2016) riassume in maniera schematica le alternative di gestione a disposizione.

3. POLITICHE E MISURE PER FAVORIRE LO STOCCAGGIO DI CARBONIO NEI SUOLI

Lo sviluppo di politiche che favoriscano lo stoccaggio di carbonio dei suoli è un elemento di grande interesse e attualità nell’ambito delle politiche nazionali ed internazionali di mitigazione del cambiamento climatico; interesse cresciuto negli ultimi anni, sia per l’urgenza sempre più pressante di contrasto del cambiamento climatico che per gli oggettivi vantaggi che un incremento di sostanza organica nei suoli determina sulla fertilità dei terreni e sulla produzione agricola in generale.

Numerose sono le azioni realizzate, in corso e previste per il futuro, a diversi livelli territoriali e con diversi approcci.

Le tipologie di azioni e misure possibili possono essere raggruppate nelle seguenti categorie, in seguito discusse (Paustian et al., 2016):

- accordi internazionali, fra soggetti nazionali o sub-nazionali;
- regolamenti e tassazioni;
- sussidi;
- iniziative di sensibilizzazione;
- progetti nel mercato volontario del carbonio.

In termini generali un rapporto redatto dalla FAO (2017b) ha individuato e riassunto le maggiori limitazioni (“barriers”) che ad oggi pongono un freno consistente alla diffusione di pratiche di gestione sostenibile dei suoli che permettano di realizzare il potenziale di sequestro di carbonio. Tali limitazioni sono attribuibili sostanzialmente ad aspetti finanziari, tecnico-logistici, istituzionali, di conoscenza, di disponibilità di risorse e socio-culturali.

Sempre in FAO (2017b) sono proposte alcune soluzioni che possano aiutare a superare tali limitazioni e che prevedono nello specifico le azioni riportate in Tabella 3.

Un’ulteriore aspetto da tenere in considerazione nella definizione di politiche in grado di favorire lo stoccaggio di carbonio nei suoli è che l’adozione di tali pratiche deve essere duratura nel tempo, minimizzando così i rischi di perdita dei quantitativi di carbonio accumulati nei periodi successivi all’implementazione delle politiche stesse. Infatti, essendo il processo di sequestro del carbonio reversibile, un ritorno a pratiche di gestione tradizionale in terreni gestiti con le pratiche di gestione raccomandate illustrate in precedenza (Tabella 2), determina la restituzione all’atmosfera del carbonio in precedenza sequestrato nel suolo.

3.1. Accordi internazionali, fra soggetti nazionali o sub-nazionali

L’iniziativa di riferimento su scala globale per lo stoccaggio di carbonio nei suoli è attualmente la citata iniziativa, “4 per mille Initiative: Soils for Food Security and Climate”, un accordo volontario nell’ambito del “Global Climate Action Agenda” (GCAA) che ha l’obiettivo di aumentare il contenuto globale di carbonio dei suoli del 4 per 1000 ogni anno. Partecipano a questa iniziativa numerosi soggetti, circa 200 tra Stati, organizzazioni internazionali, università, associazioni di produttori, ONG, fondazioni, banche e fondi di investimento.

L’effettiva possibilità di raggiungimento dell’obiettivo prefissato con il programma “4 per mille Soils for Food Security and Climate” è stato oggetto di una recente pubblicazione (Minasny et al., 2016), in cui sono analizzati stock di car-

bonio e potenziali di sequestro individuati da letteratura scientifica relativamente a 20 regioni mondiali (Nuova Zelanda, Cile, Sudafrica, Australia, USA, Tanzania, Indonesia, Kenya, Nigeria, India, Cina Taiwan, Corea del Sud, Cina, Francia, Canda, Belgio, Inghilterra e Galles, Irlanda, Scozia, Russia). I risultati mostrano che in molti casi un aumento annuo dello stock del 4 per 1000 è fattibile e, considerando 1 m di profondità utile nel suolo, si determinerebbe un assorbimento di circa 2-3 Gt C/anno, pari a circa il 20-35% delle emissioni di gas ad effetto serra antropogeniche globali. Nella pubblicazione sono comunque indicati anche casi specifici di aree per le quali è stato individuato un basso potenziale di sequestro, sottolineando ancora una volta la dipendenza dell'efficacia dell'implementazione delle strategie di sequestro dalle condizioni locali climatiche.

Il sequestro di C nei suoli agricoli è uno dei temi affrontati dalla Global Research Alliance sui gas serra agricoli, avviata nel dicembre 2009 e a cui aderiscono 47 di tutte le regioni del mondo (fra cui l'Italia). L'obiettivo dell'Alleanza è promuovere la ricerca, lo sviluppo e la diffusione delle tecnologie e delle pratiche che possono contribuire a aumentare la produzione di cibo senza aumentare le emissioni di gas serra, nonché rendere più resiliente alle variazioni climatiche il sistema agricolo.

3.2. Regolamenti e tassazioni

Le politiche relative a regolamenti e alle tassazioni sono applicate secondo modalità di intervento diretto che mirano a ridurre le emissioni di gas ad effetto serra dai suoli intervenendo a scala di singola azienda agricola. Questo tipo di approccio è il più difficile dal punto di vista politico, per la difficoltà di fare accettare limiti e extra costi agli agricoltori. Per questo motivo, le politiche a carattere volontario o quelle basate sui sussidi hanno avuto una diffusione largamente maggiore.

Una tassazione sui consumi di fertilizzanti azotati è già esistente in Europa e negli Stati Uniti; pur se pensata per la limitazione dell'inquinamento da nitrati, è una misura che ha l'effetto di ridurre anche le emissioni del protossido di azoto (N_2O), gas climalterante.

Non sono state reperite informazioni su sistemi di limitazioni e tassazioni sulle emissioni di carbonio dai suoli. Anche in Paesi in cui le aree dedicate al-

l'agricoltura sono molto vaste tale settore è sostanzialmente esente da tassazioni dirette sulle emissioni di CO_2 . Secondo Kevin Parton non è sorprendente l'esclusione delle emissioni agricole dallo schema di tassazione delle emissioni di carbonio australiano, come avviene nel resto del mondo, e ciò è dovuto principalmente alle dimensioni ridotte delle aziende agricole e alle incertezze legate alla determinazione delle emissioni stesse (Collerton, 2012).

3.3. Sussidi

I sussidi rappresentano una politica già molto utilizzata a livello nazionale e internazionale per favorire l'accumulo di carbonio nei suoli.

In ambito europeo, la Politica Agricola Comune (PAC) rappresenta il quadro legislativo delle azioni dell'Unione sul comparto agricolo. Tra le grandi novità della nuova PAC (2014-2020) c'è sicuramente il forte accento alle questioni "verdi" e di sostenibilità ambientale che si arricchiscono anche della lotta al cambiamento climatico e mai come prima l'UE è disposta a sostenere quegli agricoltori che decidono di adottare delle pratiche di gestione più sostenibili in azienda (Marandola, 2014).

In Italia, nello specifico, sussistono casi di erogazione di sussidi regionali legati ai PSR (Programmi di Sviluppo Rurale) di alcune Regioni. Ad esempio, Regione Lombardia prevede un supporto all'agricoltore di 360 €/ha per l'adozione di tecniche di semina su sodo e colture di copertura o di 240 €/ha per l'adozione di tecniche di minima lavorazione. Il PSR della Regione Toscana prevede che l'agricoltore riceva un contributo di circa 200 €/ha per l'adozione di una misura di "riduzione delle emissioni di gas climalteranti". Seppur tali sussidi incentivano la diffusione di pratiche di gestione che in letteratura sono spesso indicate come responsabili di un accumulo di carbonio nei suoli, non sono previsti ad oggi interventi di verifica sperimentali o modellistici di un effettivo incremento del carbonio sul campo.

I pagamenti agroambientali sono quindi uno strumento ormai consolidato nei PSR, pagamenti che nella versione 2014-2020 fanno riferimento alla misura 10: si tratta di pagamenti a superficie (in €/ha) disegnati per compensare gli agricoltori dei maggiori costi e dei mancati guadagni che possono derivare dall'adozione di metodi produttivi più sostenibili (Marandola, 2014).

Negli Stati Uniti i programmi del Dipartimento dell'Agricoltura degli Stati Uniti (UD Department of Agriculture programmes) includono la mitigazione dei gas ad effetto serra quale obiettivo di conservazione mentre alcune misure del EU Common Agricultural Policy collegano i sussidi a misure di "cross-compliance" che includono il mantenimento degli stock di sostanza organica nel suolo. Le misure di cross-compliance infatti rappresentano un meccanismo sviluppato dall'UE che fa corrispondere dei pagamenti diretti agli agricoltori che osservano standard di gestione base relativi all'ambiente, alla sicurezza alimentare, alla salute di piante ed animali ed al mantenimento dei terreni in buone condizioni che permettano di combattere i fenomeni di degrado.

3.3.1. *La mitigazione dei cambiamenti climatici nei PSR 2014-2020*

La lotta ai cambiamenti climatici costituisce uno degli obiettivi trasversali della programmazione 2014-2020, alla cui realizzazione contribuiscono tutte le sei Priorità dello Sviluppo Rurale regionali (Rete Rurale Nazionale, 2016).

Mitigazione ed adattamento al cambiamento climatico sono due temi principali soprattutto nell'ambito della Priorità 5 ("Promuovere l'uso efficiente delle risorse e il passaggio a un'economia a basse emissioni di carbonio e resiliente al clima nel settore agroalimentare e forestale") così come individuato nelle focus area 5D ("Riduzione delle emissioni di gas ad effetto serra e di ammoniaca prodotte dall'agricoltura") e 5E ("Promozione della conservazione e il sequestro del carbonio nel settore agricolo e forestale"). Anche i già citati contributi che alcune Regioni hanno deciso di stanziare per gli agricoltori che decidono di mettere in pratica particolari pratiche di gestione (i pagamenti agro-climatico ambientali, misura 10) fanno parte della programmazione prevista nei PSR regionali.

La promozione delle pratiche di gestione che favoriscono il sequestro del carbonio, che a sua volta determina un incremento degli stock di carbonio, può fornire un ulteriore contributo anche in ottica della Priorità 4, in particolare per ciò che riguarda le Focus Area 4A ("salvaguardia, ripristino e miglioramento della biodiversità"), 4B ("migliore gestione delle risorse idriche") e 4C ("prevenzione dell'erosione dei suoli e una migliore gestione degli stessi").

In ambito europeo inoltre, secondo l'art. 8 del Reg. (UE) 1303/2013, gli Stati membri devono

fornire informazioni sul sostegno agli obiettivi relativi al cambiamento climatico, conformemente al proposito di destinare almeno il 20% del bilancio dell'Unione a tali obiettivi, usando una metodologia basata sulle categorie di intervento, i settori prioritari o le misure appropriate per ciascuno dei fondi SIE (fondi Strutturali e d'investimento Europei). Gli importi destinati alla Priorità 4 e alla Priorità 5 concorrono per intero agli obiettivi in materia di cambiamenti climatici (Rete Rurale Nazionale, 2016). Nell'Accordo di Partenariato, che stabilisce le modalità per garantire l'allineamento con la Strategia dell'Unione, sono inoltre stabiliti gli obiettivi tematici da perseguire: l'OT4 ("sostenere la transizione verso un'economia a basse emissioni di carbonio in tutti i settori") e l'OT5 ("promuovere l'adattamento al cambiamento climatico, la prevenzione e la gestione dei rischi").

L'obiettivo di lungo termine cui le politiche devono mirare consiste nell'ottenere un riconoscimento del ruolo dell'agricoltura nella contabilizzazione delle emissioni e degli assorbimenti di GHG. Il raggiungimento di questo obiettivo, importante sia per il potenziale contributo alla mitigazione del cambiamento climatico che per le opportunità che possono generarsi per le aziende agricole, non può prescindere da un approfondimento della conoscenza scientifica del processo di immagazzinamento del carbonio nei suoli. Una conoscenza approfondita dei processi chimici, fisici e biologici che, in corrispondenza delle diverse pratiche di gestione, regolano lo scambio di carbonio tra atmosfera e sistema colturale, è utile sia nella definizione di appropriati meccanismi incentivanti, che possono servire da stimolo per massimizzare le potenzialità di assorbimento, sia nelle possibilità di accesso a nuovi mercati particolarmente sensibili all'adozione da parte delle imprese di certificazioni climatico-ambientali, siano esse di prodotto o di processo.

3.4. *Iniziative di sensibilizzazione*

Il fine ultimo delle iniziative di sensibilizzazione è la promozione di un modello di business sostenibile di cui possano beneficiare tutti gli attori della catena di produzione, vendita e consumo di alcuni prodotti. Un esempio concreto è dato da programmi, cui si fa riferimento con il termine inglese "Supply chain initiative". Si tratta di programmi congiunti ideati da associazioni europee coinvolte nell'intero ciclo di vita dei prodotti del

settore dell'alimentazione. Le aziende coinvolte intendono stabilire un metodo di misura per la sostenibilità basato sulla minimizzazione della carbon footprint e che allo stesso tempo possa essere spendibile come strategia di marketing. Due esempi sono citati da Paustian et al. (2016) e sono stati sviluppati in anni recenti: il Field to Market Alliance (2017) e lo Unilever Sustainable Agriculture Code (Unilever, 2015). Nel primo programma un tool di calcolo, che comprende otto indicatori (biodiversità, consumo energetico, emissioni GHG, utilizzo di acqua, uso del suolo, carbonio nel suolo, conservazione del suolo, qualità dell'acqua), restituisce le prestazioni in termini di sostenibilità per uno specifico sito su un grafico ad area, comparandole con medie nazionali. Nel secondo programma invece Unilever incoraggia i propri fornitori, e gli agricoltori con cui essi mantengono relazioni lavorative, ad adottare pratiche di gestione sostenibile riguardo le pratiche agricole (*"We expect all our suppliers of agricultural raw materials to commit to joining the sustainability journey and to demonstrate that they agree to minimum standards of performance and to continuously improve performance over time"*). Tra le pratiche di gestione sostenibile il monitoraggio degli stock di carbonio è obbligatorio, fatto salvo circostanze eccezionali (ogni mancata ottemperanza all'obbligo deve essere temporanea e indicata nei piani di sviluppo o garantita quale eccezione da Unilever).

3.5. Il mercato del carbonio

3.5.1. Tipologie di crediti nel mercato del carbonio

Per promuovere lo sviluppo di progetti di riduzione delle emissioni in atmosfera si è sviluppato negli ultimi anni un mercato del carbonio, in cui sono scambiati dei "crediti di CO₂". I crediti sono generati nell'ambito di sistemi "cap and trade", come i sistemi di emission trading, o da progetti "baseline and credit", come i progetti del Clean Development Mechanism o del mercato volontario.

Per le grandi sorgenti puntuali di CO₂ è vigente in Europa il sistema di "emission trading" (ETS), un sistema "cap and trade" che prevede che i responsabili delle emissioni siano soggetti ad un livello massimo ("cap") di emissioni di gas ad effetto serra; tale livello massimo di emissioni può essere rispettato riducendo direttamente le proprie emissioni o comprando permessi in surplus da altri soggetti che hanno ecceduto le ri-

duzioni richieste (o vendendo i crediti in eccesso in caso di riduzioni maggiori a quanto previsto dal cap).

Una seconda tipologia di crediti è quella che deriva da progetti "baseline and credit", in cui i crediti sono generati da singoli progetti, in relazione alla differenza tra un livello di emissioni di riferimento (chiamato "baseline") e il livello effettivo delle emissioni conseguente alla realizzazione del progetto stesso. Il Clean Development Mechanism (CDM), uno dei meccanismi flessibili previsti dal Protocollo di Kyoto (art. 12), prevede il rilascio da parte dell'UNFCCC dei crediti CER (Certified Emission Reductions), dopo che il progetto è stato redatto, implementato e monitorato secondo specifiche metodologie definite dall'UNFCCC stessa.

I crediti CDM sono stati utilizzati ad esempio da alcuni Stati (come l'Italia) per rispettare i limiti imposti dal Protocollo di Kyoto, limiti non raggiunti tramite le sole misure domestiche. La normativa dell'ETS europeo prevede che alcune tipologie dei crediti di progetti CDM (esclusi quelli da progetti forestali) possano, entro certi limiti quantitativi, essere utilizzati per rispettare i limiti previsti dall'ETS.

Altre tipologie di crediti basati sulla metodologia "baseline and credit" sono i crediti scambiati nel mercato "volontario" del carbonio, utilizzati spesso per compensare (*offset* è il termine anglosassone) emissioni generate da altre attività. Questi crediti, chiamati "VER" (verified emission reductions), sono rilasciati da soggetti privati senza il coinvolgimento dell'UNFCCC, ma in base alla corrispondenza a predefiniti standard che realizzano una sorta di "certificazione" di questi crediti.

3.5.2. Requisiti dei crediti del mercato del carbonio

Uno dei requisiti fondamentali che devono rispettare i progetti baseline and credit, del CDM o del mercato volontario, è l'addizionalità, che consiste nel verificare che la riduzione delle emissioni avvenuta a causa del progetto sia "addizionale" rispetto alla situazione che si avrebbe in assenza del progetto stesso (scenario di riferimento – baseline): le emissioni reali dovute al progetto devono essere minori di quelle che si sarebbero avute in assenza del progetto.

Una valutazione accurata dell'addizionalità è uno degli elementi basilari per l'integrità e la credibilità dei sistemi di compensazione delle emissioni. Siccome, come detto, i crediti CDM possono es-

sere usati per compensare gli obblighi di riduzione in sistemi “cap and trade” (es. nell’ambito dell’ETS europeo), se la riduzione non fosse addizionale non si avrebbe una riduzione complessiva delle emissioni.

La definizione del concetto dell’addizionalità e delle modalità di verifica è stata demandata alle decisioni della Conferenza delle Parti del Protocollo di Kyoto: “*A CDM project activity is additional if anthropogenic emissions of greenhouse gases by sources are reduced below those that would have occurred in the absence of the registered CDM Executive Board project activity*”. Il CDM Executive Board ha definito le modalità di verifica dell’addizionalità, con l’approvazione di specifiche metodologie e strumenti.

La valutazione dell’addizionalità si basa quindi sulla capacità di valutare con adeguata confidenza sia le riduzioni indotte dal progetto, sia la baseline, ossia cosa succederebbe se il progetto non fosse realizzato. La quantificazione delle emissioni nella baseline introduce inevitabilmente incertezze, legate alla necessità di definire uno scenario futuro contro-fattuale.

Le tipologie di addizionalità considerate nei progetti di compensazione, comuni sia alle procedure di approvazione dei progetti CDM che a molti schemi di certificazione delle compensazioni del mercato non regolato, sono:

- *addizionalità normativa*: il progetto riduce le emissioni più di quanto previsto dalle normative o dagli standard industriali vigenti;
- *addizionalità tecnologica*: il progetto usa tecnologie (per la riduzione delle emissioni) che non sarebbero comunque state utilizzate in assenza del progetto stesso, che non sono già la pratica corrente nel settore;
- *addizionalità finanziaria*: il progetto ha un quadro economico conveniente dal punto di vista finanziario solo con gli introiti previsti dalla vendita dei crediti. In altre parole, i crediti sono riconosciuti se si dimostra che con il progetto si riesce a superare il problema della mancanza di capitali, e che il quadro finanziario è sufficientemente positivo solo se alla voce “entrate” del bilancio si prevedono gli introiti della vendita dei crediti. Se il progetto CDM determina benefici economici (es. produzione di energia elettrica che viene venduta), bisogna verificare che il progetto non sarebbe già conveniente senza il beneficio della vendita dei CERs. Oltre alle incertezze nella valutazione della baseline, legate alla capacità di definire cosa succederebbe

in assenza del progetto, altre incertezze sono legate alla quantificazione delle emissioni effettive del progetto e alla capacità di verificare che il progetto sia realizzato come prestabilito. L’attuazione e la diffusione dei crediti del mercato del carbonio relativi a progetti di accumulo di carbonio nei suoli è oggi ostacolata proprio da alcune limitazioni tecniche relative all’affidabilità delle metodologie di rilevamento e quantificazione degli stock di carbonio e all’individuazione di protocolli per la contabilizzazione (accounting) e per il reporting delle variazioni degli stock di carbonio a differenti scale.

Altri aspetti fondamentali per l’integrità dei progetti di compensazione riguardano l’intenzionalità, la permanenza degli effetti, l’assenza (o almeno la valutazione) dei leakage.

La valutazione dell’intenzionalità consiste nel verificare che le riduzioni ottenute siano effettivamente “human induced” e non derivanti, ad esempio nel caso della compensazione tramite assorbimento di carbonio dai suoli, dal naturale accumulo di carbonio nel suolo. Per permanenza degli effetti (in particolare per crediti da assorbimenti legati a cambiamenti dell’uso del suolo) si intende verificare l’assenza di fenomeni che determinano nel tempo l’annullamento delle riduzioni avvenute; ad esempio, in un progetto di forestazione, il ritorno in atmosfera del carbonio fissato a causa di incendi, schianti, danni causati da attacchi di insetti o della riconversione della superficie all’agricoltura.

Un altro aspetto rilevante è quello dei carbon leakage (letteralmente “sversamenti”), ossia effetti collaterali di segno opposto a quelli dell’investimento compensativo realizzato e da questo dipendenti. Ad esempio, la chiusura di un impianto produttivo o la protezione di una foresta potrebbe determinare nel territorio vicino la parallela apertura di una medesima sorgente emissiva o il trasferimento dell’attività di deforestazione. Oppure, un impianto di produzione di elettricità a biomasse potrebbe indurre nelle aree vicine una deforestazione non prevista per l’approvvigionamento della biomassa stessa.

3.5.3. I crediti CDM sull’accumulo di carbonio nel suolo

Al giugno 2017 non risultano crediti CDM rilasciati riguardanti l’accumulo di C nei suoli; esiste invece un tool di calcolo impiegato nei progetti A/R (Afforestazione/Riforestazione) che permette di stimare i cambiamenti degli stock di carbonio nel pool relativo al carbonio nei suoli.

3.5.4. I crediti del mercato volontario sull'accumulo di carbonio nel suolo

I mercati volontari dei crediti del carbonio stanno guadagnando sempre più visibilità internazionale e non sono pochi gli Stati in cui tali sistemi sono in rapido sviluppo.

Il mercato volontario ha mostrato nel passato maggiore interesse del mercato regolato per i progetti nel settore LULUCF, soprattutto per progetti AFF (Afforestation, Reforestation and Revegetation) e progetti REDD (Reduced Emissions from Deforestation and forest Degradation); spesso però i progetti sono risultati di scarsa qualità, con problemi metodologici sull'addizionalità dei progetti e sulla permanenza degli effetti, e con verifiche spesso carenti.

Fra le esperienze di maggior interesse per quanto riguarda lo stoccaggio di carbonio nei suoli è possibile citare:

1. *Verified Carbon Standard (VCS)*: è lo schema di certificazione dei crediti del mercato volontario più diffuso al mondo, che conta al febbraio 2017 più di 1300 progetti certificati per un ammontare complessivo di 200 Mt di gas serra ridotti o rimossi dall'atmosfera; nonostante lo sviluppo della metodologia che prevede il calcolo delle variazioni di carbonio nei suoli, non si contano progetti sui suoli nel database VCS.
2. *Kenya Agricultural Carbon Project (KACP)*: è il primo progetto a cui sono stati attribuiti crediti di carbonio in corrispondenza del sequestro di carbonio nei suoli, per un totale di 24,8 kt CO₂. Il programma mira alla promozione di pratiche di gestione agricola sostenibile ("climate-safe"), con un ulteriore vantaggio, in alcuni casi, dovuto ad un aumento delle rese. Il KACP coinvolge 60000 agricoltori per un corrispettivo di 45000 ha di terreno (KACP, 2014).
3. *Alberta Carbon Offset System*: sistema di carbon offset creato nel 2007 (Goddard, 2008), in cui è prevista la generazione di crediti da pratiche di gestione di agricoltura conservativa; con il protocollo "conservation cropping" sono stati certificati nel marzo 2017 circa 37 progetti, che hanno generato circa 2,4 milioni di VER. Il sistema è poi confluito nel database continuamente aggiornato dell'Alberta Carbon Registries (<https://www.csaregistries.ca/albertacarbonregistries/home.cfm>).
4. *Carbon Farming Initiative (CFI)*: è un programma promosso dal governo australiano (CFI), nell'ambito del mercato del carbonio dell'Australia, permette agli agricoltori di ottenere

crediti immagazzinando carbonio nel suolo (Australian Government, 2011). Il CFI è operativo dal 2011, prevede una partecipazione volontaria da parte degli agricoltori, ed è stato integrato dal dicembre 2014 nell'Emission Reduction Fund. Nelle prime cinque aste sono stati scambiati crediti del settore agricolo per circa 17,7 milioni di tonnellate di CO₂eq., ma si riscontrano difficoltà nel reperire dati su quanti di questi crediti siano relativi a progetti di stoccaggio di carbonio nei suoli.

5. *Progetto Carbomark*: è un progetto LIFE realizzato nel periodo 2008-2011 dalla collaborazione tra Regione Veneto, Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia, Università degli Studi di Padova e Università degli Studi di Udine, con l'obiettivo di sviluppare progetti di mitigazione in grado di offrire crediti di carbonio duraturi e affidabili, attraverso la creazione di un mercato di crediti locali (Regione del Veneto, 2011). Al mercato Carbomark hanno aderito ventuno aziende private in qualità di acquirenti e ventisette proprietari forestali (pubblici), in qualità di venditori. Nel mercato Carbomark sono stati scambiati crediti generati da gestione forestale, messi all'asta da 4 comuni, per un totale di 560 crediti acquistati da compratori.

Va ricordato che al momento non è propriamente corretto parlare di un vero e proprio mercato per le attività REDD; ciò che esiste è un quadro normativo (in ambito UNFCCC) che permette ai paesi di calcolare un "Reference Level", per una serie di attività (es. riduzione della deforestazione, afforestazione, gestione forestale, riduzione del degrado forestale, ecc.). Tale Reference Level, una volta revisionato da esperti UNFCCC, permette a un Paese di implementare le attività REDD previste. Una volta ottenuti dei risultati misurabili (in termini di riduzione di emissioni o aumento del sequestro di C), il Paese può richiedere a fondi internazionali come il Green Climate Fund o a fondi privati il "Result Based Payment", una monetizzazione dei risultati ottenuti e verificati. Al momento il Brasile è l'unico Paese che ha superato tutte le fasi previste dal REDD ed è eleggibile per richiedere i "Result Based Payments".

Come discusso in Coderoni e Vitullo (2014) va rilevato che gli scambi del mercato volontario dei crediti di carbonio possono incorrere nel problema del doppio conteggio se i crediti di carbonio sono relativi ad attività (fra cui quelle forestali o relative allo stoccaggio di carbonio nei suoli) oggetto di contabilità nazionale in ambito UNFCCC. La com-

pravendita di crediti di carbonio generati dal mercato volontario andrebbe quindi opportunamente normata per permettere a soggetti pubblici e privati di investire in interventi ambientali mirati alla generazione di crediti, con la certezza degli effetti ambientali del loro investimento, evitando conflitti con il sistema nazionale di accounting.

4. CONCLUSIONI

Mentre è riconosciuto come le attività agricole, gli allevamenti e le filiere alimentari possono fornire un contributo importante alla riduzione delle emissioni climalteranti e al controllo della deforestazione (Caserini, 2015), la rassegna riportata ai paragrafi precedenti mostra come numerosi lavori nella letteratura scientifica indicano che l'utilizzo di tecniche agronomiche di agricoltura conservativa può servire per incrementare la resilienza dei sistemi colturali e dei suoli ai cambiamenti climatici, nonché per favorire il sequestro del carbonio nei suoli.

Le pratiche di gestione e le iniziative politiche avviate in numerose regioni e nazioni in tema di sequestro del carbonio sono spesso ancora in una fase iniziale, e dovranno essere fortemente sviluppate nei prossimi anni per permettere di dare un contributo a realizzare quegli ingenti livelli di emissioni negative necessari per raggiungere gli ambiziosi obiettivi di stabilizzazione delle temperature globali definiti dall'Accordo di Parigi.

Va infine considerato che alcune pratiche agricole a cui si è accennato (no-tillage, cover crops, letamazione, compost e biochar) possono portare a significative variazioni nei flussi netti di protossido di azoto (N_2O) che di metano (CH_4), sia in positivo (maggiori emissioni) che in negativo. Il potenziale di mitigazione di ognuna di queste pratiche, quindi, andrebbe analizzato in termini di CO_2 -equivalenti, dove con questa terminologia si intende esprimere con un unico indicatore normalizzato rispetto al potenziale effetto serra (Global Warming Potential, GWP), l'insieme dei contributi dei tre principali gas climalteranti di rilevanza per il settore agricolo. Ciò è di estrema importanza ai fini della stima e della contabilizzazione del sequestro netto di carbonio nei suoli ottenibile da queste pratiche a diverse scale, nel quadro delle politiche di mitigazione del cambiamento climatico; queste metodologie saranno oggetto di un successivo contributo.

5. RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- Australian Government (2011) About the Carbon Farming Initiative. Australian Government – Department of Environment and Energy.
www.environment.gov.au/climate-change/emissions-reduction-fund/cfi/about.
- Bozzi E., Genesio L., Toscano P., Pieri M., Miglietta F. (2015) Mimicking biochar-albedo feedback in complex Mediterranean agricultural landscapes. *Environmental research letters*, vol. 10, number 8.
- Caserini S. (2015) Cambiamenti climatici e sicurezza alimentare. *Ingegneria dell'Ambiente*, vol. 2, n. 1, 83-101.
- Caserini S., Piana V. (2016) L'Accordo di Parigi e la Conferenza di Marrakech. *Ingegneria dell'Ambiente*, vol. 3, n. 4, 307-313.
- Ciais P.C. et al. (2013) Carbon and Other Biogeochemical Cycles. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.
- Coderoni S., Vitullo M. (2014) Crediti di carbonio dai suoli agricoli: contabilizzazione e governance. *Agriregionieuropa*, vol. 10, n. 38.
- Collerton S., (2012) Farming and the carbon tax: what's in store?
<http://www.abc.net.au/news/2011-07-15/carbon-tax-farmers/2795816>.
- Costantini E.A.C., Lorenzetti R. (2013) Soil degradation processes in the Italian agricultural and forest ecosystems. *Italian Journal of Agronomy* 2013; vol. 8 e:28.
- CSA Group. Alberta Carbon Registries.
<https://www.csaregistries.ca/albertacarbonregistries/home.cfm>.
- ERSAF (2014) Progetto Life HelpSoil, Linee guida per l'applicazione e la diffusione dell'Agricoltura Conservativa, prima edizione.
- FAO (2017a) Global Symposium on Soil Organic Carbon – unlocking the potential of mitigating and adapting to a changing climate, concept note and agenda.
- FAO (2017b) Soil Organic Carbon: the hidden potential. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy.
- Field to Market Alliance (2017).
<https://fieldtomarket.org/>
- Francaviglia R., Di Bene C., Farina R., Salvati L. (2017) Soil organic carbon sequestration and tillage systems in the Mediterranean Basin: a data mining approach. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 107: 125.
- Fuss S., Canadell J.G., Peters G.P., Tavoni M., Andrew R.M., Ciais P., et al. (2014) Betting on negative emissions. *Nature Climate Change*, 4, 850-853.
- Genesio L., Vaccari F.P., Miglietta F. (2016) Black carbon aerosol from biochar threatens its negative emission potential. *Global Change Biology*, 22, 2313-2314.
- Goddard T. (2008) The Alberta Carbon Offset System. *Proc. Agronomy Update*, 90-93.

- Gregorich E.G., Greer K.J., Anderson D.W., Liang, B.C. (1998) Carbon distribution and losses: erosion and deposition effects. *Soil and Tillage Research*, 47, 291-302. In: Lal R. (2004) Soil carbon sequestration to mitigate climate change. *Geoderma*, 123, 1-22.
- Gregorich E.G., Drury C.f., Baldock J.A. (2001) Changes in soil carbon under long-term maize in monoculture and legume-based rotation. *Canadian Journal of Soil Science*, 81, 21-31. In: Lal R. (2004) Soil carbon sequestration to mitigate climate change. *Geoderma*, 123, 1-22.
- Hao Y., Lal R., Owens L.B., Izaurralde R.C., Post M., Hotem D. (2002) Effect of cropland management and slope position on soil organic carbon pools in the North Appalachian Experimental Watersheds. *Soil & Till*, 68, 133-142. In: Lal R. (2004) Soil carbon sequestration to mitigate climate change. *Geoderma*, 123, 1-22.
- Hilber I., Mayer P., Gouliarmou V., Hale S.E., Cornelissen G., Schmidt H., Bucheli T.D. (2017) Bioavailability and bioaccessibility of polycyclic aromatic hydrocarbons from (post-pyrolytically treated) biochars. *Chemosphere*, 174, 700-707.
- IPCC (2006) Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, vol. 4 IPCC Technical Support Unit, Kanagawa, Japan.
- IPCC (2014) Summary for Policymakers. In: Edenhofer O., Pichs-Madruga R., Sokona Y. et al. (eds.) *Climate Change 2014, Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.
<http://mitigation2014.org>.
- KACP (2014) Kenya First to Earn Carbon Credits from Sustainable Farming.
www.v-c-s.org/kenya-first-earn-carbon-credits-sustainable-farming/.
- Lal R. (2004) Soil carbon sequestration to mitigate climate change. *Geoderma*, 123, 1-22.
- Le Quéré C., Andrew R.M., Canadell R.M., Sitch S., Korbakken J.I., Peters G.P. et al (2016) Global Carbon Budget 2016. *Earth System Science Data*, 8, 605-649.
- Lugato E., Vaccari F.P., Genesio L., Baronti S., Pozzi A., Rack M., et al. (2013) An energy-biochar chain involving biomass gasification and rice cultivation in Northern Italy. *GCB Biogeoenery*, 5, 192-201.
- Lugato E., Bampa F., Panagos P., Montanarella L., Jones A. (2015) Potential carbon sequestration of European arable soils estimated by modelling a comprehensive set of management practices. *Global Change Biology*, 20, 3557-3567.
- Mackey B., Prentice I.C., Steffen W., House J.I., Lindenmayer D., Keith H., Berry S. (2013) Untangling the confusion around land carbon science and climate change mitigation policy. *Nature Climate Change*, 3, 552-557.
- Marandola, D. (2014) La semina su sodo nei PSR 2014-2020. *L'informatore Agrario*, 40, 59-65.
- Minasny B., Malone B.P., McBratney A.B., Angers D.A., Arrouays D., Chambers A. et al. (2016) Soil carbon 4 per mille. *Geoderma*, 292, 59-86.
- Ogle S.M., Breidt F.J., Paustian K. (2005) Agricultural management impacts on soil organic carbon storage under moist and dry climatic conditions of temperate and tropical regions. *Biogeochemistry*, 72, 87-121. In: Paustian K., Lehmann J., Stephen O., Reay D., Robertson P., Smith P. (2016) Climate-smart soils. *Nature*, 532, 49-57.
- Paustian K., Lehmann J., Stephen O., Reay D., Robertson P., Smith P. (2016) Climate-smart soils. *Nature*, 532, 49-57.
- Poeplau C. e Don A. (2015) Carbon sequestration in agricultural soils via cultivation of cover crops – A meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 200, 33-41.
- Powelson D.S., Stirling C.S., 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, 678-683.
- Ravi S., Sharratt B.S., Li S., Olshevski S., Meng Z., Zhang J. (2016) Particulate matter emissions from biochar-amended soils as a potential tradeoff to the negative emission potential. *Nature Scientific Reports*, 6, 35984.
- Regione Lombardia (2016) Deliberazione N° X/6028, seduta del 19/12/2016: Documento di Azione Regionale per l'Adattamento al Cambiamento Climatico.
- Regione del Veneto, Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia, Università degli Studi di Padova, Università degli Studi di Udine (2011) Guida alla partecipazione a Carbo-mark.
- Rete Rurale Nazionale (2016) Mitigazione dei cambiamenti climatici nei Programmi di Sviluppo Rurale 2014 2020: analisi degli interventi previsti per le Focus Area 5D e 5E.
- Rogelj J., Luderer G., Pietzcker R.C., Kriegler E., Schaeffer M., Krey V., Riahi, K. (2015) Energy system transformations for limiting end-of-century warming to below 1.5 °C. *Nature Climate Change*, 5, 519-528.
- Six J., Elliott E.T., Paustian K. (2000) Soil macroaggregate turnover and microaggregate formation: a mechanism for C sequestration under no-tillage agriculture. *Soil biology & Biogeochemistry*, 32, 2099-2103.
- Smith P., Powelson D.S., Glendining M.J., Smith J.U. (1998) Preliminary estimates of the potential for carbon mitigation in European soils through no-till farming. *Global Change Biology*, 4, 679-685.
- Smith P., Martino D., Cai Z., Gwary D., Janzen H., Kumar P. et al. (2008) Greenhouse gas mitigation in agriculture. *Philosophical Transaction of the Royal Society B.*, 789-813.
- Smith P., Davis S.J., Creutzig F., Fuss S., Minx J., Gabrielle B. (2015) Biophysical and economic limits to negative CO2 emissions. *Nature Climate Change*, 6, 42-50.
- Tammeorg P., Bastos A.C., Jeffery S., Rees F., Kern J., Graber E.R. et al. (2016) Biochar in soils: towards the required level of scientific understanding. *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management*.
- Unilever (2015) Unilever Sustainable Agriculture Code.
- Woolf D., Amonette J.E., Street-Perrott F.A., Lehmann J., Joseph S. (2010) Sustainable biochar to mitigate global climate change. *Nature Communication* 1, 1-9.



INGEGNERIA DELL'AMBIENTE

per il 2017 è sostenuta da:

