



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra



Ufficio federale dell'ambiente UFAM

Ufficio federale dell'agricoltura UFAG

Scheda

Il carbone vegetale nell'agricoltura svizzera

Rischi e opportunità per il suolo e il clima

Nota editoriale

Editore

Ufficio federale dell'ambiente (UFAM), Ufficio federale dell'agricoltura (UFAG), Arbeitsgruppe Interventionswerte und Risikobeurteilung (AGIR) del Cercle Sol

Contatti

Gudrun Schwilch, sezione Suolo, UFAM, gudrun.schwilch@bafu.admin.ch

Regine Röthlisberger, divisione Clima, UFAM, regine.roethlisberger@bafu.admin.ch

Michael Zimmermann, settore Sistemi agro-ambientali e sostanze nutritive, UFAG, michael.zimmermann@blw.admin.ch

Rebecca Keusch, consiglio d'amministrazione AGIR, rebecca.keusch@tg.ch

Link per scaricare il PDF

www.bafu.admin.ch > Tema Clima > Informazioni per gli specialisti > Rimozione e sequestro di CO₂

La presente scheda è disponibile anche in tedesco e francese.

La lingua originale è il tedesco.

© UFAM 2023

La scheda illustra lo stato delle conoscenze scientifiche relative all'utilizzo di carbone vegetale nell'agricoltura svizzera e indica le prescrizioni vigenti concernenti l'impiego di questa sostanza. È intesa in primo luogo a fornire informazioni ai professionisti e all'amministrazione e non è di natura esecutiva.

L'essenziale in breve

- Nella presente scheda, per carbone vegetale (in inglese *biochar*) si intende il prodotto solido ottenuto recentemente dalla biomassa vegetale «carbonizzata». In particolare vengono descritte le proprietà dei carboni vegetali ottenuti mediante pirolisi (cap. 1).
- Per evitare la propagazione di sostanze nocive nell'ambiente, occorre rispettare scrupolosamente le prescrizioni di legge concernenti la produzione, la messa in commercio e l'impiego di carbone vegetale (cap. 2).
- La produzione privata di carbone vegetale per il fabbisogno proprio comporta rischi particolari per i produttori, l'aria e il suolo a causa della presenza di sostanze nocive (cap. 2.2.3).
- Sussiste una situazione di concorrenza per le sostanze organiche residue limitate (biomassa). Il percorso di riciclaggio ideale dipende da diversi fattori, ad esempio la possibilità di ottimizzare i processi di pirolisi in termini di resa energetica e rendimento di carbone vegetale. La produzione di carbone vegetale dovrebbe tenere conto il più possibile della strategia svizzera sulla biomassa (cap. 3).
- L'effetto sui suoli e sul clima dipende dal materiale di partenza e dal processo di pirolisi impiegato. Per i suoli svizzeri non è da prevedere che il sequestro elevato di carbonio comporti al tempo stesso effetti positivi sulla produttività, come invece è emerso per i suoli tropicali (cap. 3). Occorre prevenire che l'apporto di carbone vegetale per motivi dovuti alla protezione del clima abbia ripercussioni negative sul suolo.
- Ad oggi in Svizzera non è stato dimostrato alcun aumento di resa nella produzione agricola dovuto all'aggiunta di carbone vegetale (cap. 3.1).
- Attorno all'impiego del carbone vegetale in agricoltura permangono diverse incertezze, soprattutto per quanto concerne gli effetti a lungo termine sui suoli e sugli organismi che li abitano (cap. 3.1 e 3.3). Tali effetti, che dipendono dai fattori del sito e dalle proprietà del carbone vegetale, possono essere irreversibili. Il carbone vegetale viene impiegato anche al di fuori dell'agricoltura, ad esempio in substrati tecnici per alberi di città o in materiali isolanti negli edifici (cap. 3.1).
- Il carbone vegetale può contribuire a mitigare i cambiamenti climatici. Il potenziale climalterante sui suoli agricoli svizzeri è invece limitato e può essere stimato solo in modo impreciso a causa della dipendenza da numerose assunzioni (cap. 3.4).
- Nella maggior parte dei casi, oggi l'impiego di carbone vegetale in agricoltura non è economicamente redditizio (cap. 3.4).
- Sono necessari studi per colmare le lacune di conoscenze in merito agli effetti a lungo termine del carbone vegetale sulle proprietà e sugli organismi del suolo. Sono inoltre necessari studi di valutazione del ciclo di vita che mettano a confronto diversi percorsi di riciclaggio della biomassa con e senza produzione di carbone vegetale (cap. 3.5).
- Nell'ottica della precauzione, fintanto che non sarà possibile escludere effetti nocivi, ad esempio sugli organismi del suolo, l'impiego del carbone vegetale su superfici estese è sconsigliato. Le conclusioni tratte dalle prescrizioni e dallo stato attuale delle conoscenze sull'impiego del carbone vegetale in agricoltura sono illustrate nel capitolo 4.

1 Basi

Nella presente scheda, per carbone vegetale (in inglese *biochar*) si intende il prodotto solido ottenuto recentemente dalla biomassa vegetale «carbonizzata». Il carbone vegetale incorporato nei suoli è in genere prodotto mediante pirolisi¹, attraverso processi della durata di minuti od ore, a temperature comprese tra 350 e 1000 °C e alla pressione atmosferica in condizioni di assenza quasi totale di ossigeno [60] [67]. Come materiale di partenza si potrebbe in teoria utilizzare qualsiasi tipo di biomassa; tuttavia, in Svizzera, devono essere di fatto soddisfatti determinati criteri (cfr. cap. 2).

Una caratteristica del carbone vegetale è l'elevato tenore di carbonio (per legno: 75–95 %), che dipende dal materiale di partenza e dal processo di produzione (in particolare dalla temperatura durante la pirolisi) [59] [60] [67]. I carboni vegetali possono presentare una superficie specifica elevata (> 100 m²/g), che rappresenta un'area di scambio sia per i nutrienti sia per le sostanze nocive e che può aumentare la capacità di ritenzione idrica del suolo [60] [67]. Tuttavia, l'efficacia e la stabilità del carbone vegetale nell'agricoltura e nell'ambiente dipendono non solo dalle proprietà del carbone, ma anche da fattori pedoclimatici [44] [60] [67].

La struttura chimica del carbone vegetale fa in modo che possa restare stabile nell'ambiente per tanti anni [49] [60] [67]. Pur non disponendo di risultati di esperimenti a lungo termine, soprattutto su suoli a latitudini temperate come quelle della Svizzera, dai dati attuali si evince che il carbone vegetale sparso nei suoli perde una quantità relativamente bassa di carbonio (C): durante la pirolisi circa metà del carbonio presente nel materiale di partenza viene trasformata in sostanze gassose, mentre il resto viene convertito in carbone vegetale. Una volta incorporato, nel suolo rimane gran parte del carbonio presente in questo carbone vegetale, mentre in confronto solo una piccola parte di biomassa non pirolizzata rimarrebbe. A lungo termine il carbone vegetale degrada più lentamente rispetto ai primi anni. In questo periodo di tempo, il carbonio sottratto all'atmosfera attraverso la biomassa viene sequestrato come carbone vegetale nel suolo, dove contrasta gli effetti del cambiamento climatico.

La carbonizzazione pirolitica della biomassa è una reazione esotermica, che quindi sprigiona energia. La pirolisi comporta dei rischi: sostanze nocive come metalli pesanti o idrocarburi aromatici policiclici (IPA) possono accumularsi nel carbone vegetale o formarsi in presenza di una gestione dei processi non ottimizzata (cfr. cap. 2.2) [67]. I gas di scarico possono inquinare l'aria e l'ambiente, mentre il suolo può essere contaminato dall'incorporazione di carbone vegetale. Quest'ultimo effetto deve essere prevenuto ricorrendo a una gestione professionale.

La possibilità di utilizzo della biomassa come carbone vegetale può generare flussi di sostanze adeguati, ma potrebbe anche accentuare la competizione per l'utilizzo tra settore energetico, filiera agroalimentare, settore dei mangimi e dell'humus [51] [53] [73].

Poiché mancano valori basati sull'esperienza a lungo termine ottenuti in condizioni di campo e metodi di lavorazione tipici del posto, la valutazione degli effetti derivanti dall'incorporazione del carbone vegetale nei suoli è soggetta a grandi incertezze [67].

¹ Un processo diverso è la carbonizzazione idrotermale (Hydro Thermal Carbonization, HTC), che avviene con l'aggiunta di acqua a temperature dai 180 ai 250 °C e in pressioni di 20–50 bar [66] [67].

2 Prescrizioni concernenti l'impiego del carbone vegetale

L'impiego del carbone vegetale deve essere integrato nelle politiche e nelle strategie esistenti. Si pensi in particolare alla politica climatica [15] [17], alla politica energetica [6] [20] e alla strategia suolo [22], alla strategia sulla biodiversità [14] e sulla biomassa [18] come pure alla politica della risorsa legno 2030 [16].

2.1 Panoramica delle prescrizioni sull'impiego del carbone vegetale

I testi legali seguenti riguardano anche la produzione e l'apporto di carbone vegetale. La legge sulla protezione dell'ambiente (LPAmb) [4] chiede di conservare in modo duraturo la diversità biologica e la fertilità del suolo e, a scopo di precauzione, di ridurre tempestivamente gli effetti che potrebbero divenire dannosi o molesti. L'ordinanza contro il deterioramento del suolo (O suolo) [8] precisa quando un suolo può essere considerato fertile. L'ordinanza sui concimi (OCon) [9] disciplina l'omologazione, la messa in commercio, l'importazione e l'utilizzazione di concimi, quindi anche di carbone vegetale. L'ordinanza sulla riduzione dei rischi inerenti ai prodotti chimici (ORRPChim) [12] stabilisce requisiti di qualità riguardanti la fornitura di concimi e disciplina varie limitazioni e divieti nell'impiego degli stessi (cfr. in dettaglio l'all. 2.6 ORRPChim). Scopo della legge sulla protezione delle acque (LPAC) [5] è di proteggere le acque superficiali e le acque sotterranee da effetti pregiudizievoli; in particolare i suoli vanno gestiti in modo da evitare ogni effetto pregiudizievole per le acque, segnatamente quelli causati dal convogliamento e dal dilavamento dei fertilizzanti (anche: [19]). La legge federale sulla protezione della natura e del paesaggio (LPN) [1] chiede che venga conservata la diversità biologica. Inoltre, secondo la legge sull'agricoltura (LAgr) [2], la produzione agricola deve contribuire a salvaguardare le basi naturali della vita. L'ordinanza sugli alimenti per animali (OsAIA) [10] disciplina i requisiti relativi agli alimenti per animali e agli additivi. Per la produzione di carbone vegetale occorre rispettare l'ordinanza contro l'inquinamento atmosferico (OIA) [7], che ha lo scopo di proteggere l'uomo e l'ambiente da inquinamenti dell'aria dannosi o molesti. Secondo la vigente legislazione sul CO₂ (stato al 1° gennaio 2023) [3] [11], i progetti relativi al carbone vegetale sono ammessi a determinate condizioni e possono generare attestati CO₂ negoziabili, utilizzabili a compensazione delle emissioni di CO₂ nel settore dei trasporti [17]. La vigente ordinanza sul CO₂ limita in particolare la quantità cumulativa di carbone vegetale per i progetti di compensazione a una dose per ettaro pari a 8 t/ha dal 2022 al 2030 [11].

2.2 Materiali di partenza e produzione di carbone vegetale

Per evitare che l'utilizzo del carbone vegetale causi un accumulo di sostanze nocive nel suolo, ad esempio metalli pesanti, occorre selezionare con attenzione il materiale di partenza [65] [67].

Le condizioni di pirolisi durante il processo di produzione sono decisive per limitare la quantità di sostanze nocive che si formano, in particolare gli idrocarburi aromatici policiclici (IPA) [67]. Gli IPA possono fuoriuscire dall'impianto di pirolisi sotto forma di inquinanti atmosferici oppure si possono condensare sul carbone vegetale.

2.2.1 Materiali di partenza

È ammesso unicamente l'utilizzo di materiale di partenza non trattato. Per la produzione di carbone vegetale il più possibile privo di sostanze nocive e con uno sviluppo di fumo ridotto è ammesso solo l'impiego di rifiuti naturali provenienti da boschi, campi, giardini e orti (possibilmente secchi) e di legno non trattato [7]. Di conseguenza, per la produzione di carbone vegetale è vietato l'impiego di qualsiasi legno che sia già stato utilizzato in altro modo o sia venuto a contatto con sostanze estranee (legno usato, rifiuti di legno problematici). In tal caso, sussiste il pericolo particolare che, durante la pirolisi, possano formarsi diossine e furani altamente tossici o altri inquinanti (atmosferici) [67].

Tali rischi possono essere ridotti al minimo facendo ricorso a impianti di pirolisi professionali e rispettando le direttive dello European Biochar Certificate (EBC) [65]. L'EBC definisce un elenco dei materiali da utilizzare, specificando i valori limite per le concentrazioni di sostanze in essi presenti.

2.2.2 *Produzione industriale*

Durante la produzione di carbone vegetale si formano inquinanti atmosferici che possono contaminare l'ambiente e che devono essere ridotti al minimo conformemente alle esigenze previste nell'OIAAt [7]. Esistono diversi metodi di produzione e diversi tipi di impianti [67] [68]. Un impianto di pirolisi industriale viene in ogni caso valutato e autorizzato dall'autorità competente (Cantone, Comune), applicando i corrispondenti requisiti previsti dall'OIAAt (valori limite di emissione, captazione ed evacuazione dei gas di scarico ecc.) [7].

2.2.3 *Produzione per il consumo proprio*

Anche in caso di produzione privata di carbone vegetale per il consumo proprio, ad esempio con il sistema Kon-Tiki², occorre rispettare le prescrizioni dell'OIAAt [7]. Secondo l'articolo 4 OIAAt, l'autorità competente può definire provvedimenti per la limitazione preventiva delle emissioni e limitare o vietare l'impiego di determinati impianti. La formazione di fumo, che tra l'altro dipende in gran parte dalle proprietà e dall'umidità del combustibile, deve essere ridotta al minimo durante tutto il processo. Gli inquinanti che si formano potrebbero avere un impatto sia sulla salute del produttore che sull'ambiente circostante. Inoltre, tali apparecchi generano talvolta elevate emissioni di metano e di composti organici volatili (NMVOC) [32], riducendo il beneficio complessivo per il clima derivante dall'apporto del carbone vegetale e non essendo auspicabile dal punto di vista della protezione dell'aria. In più, per quanto concerne la protezione del suolo, sussiste il pericolo di una contaminazione elevata da sostanze nocive dovute alla produzione di carbone vegetale in condizioni di pirolisi incontrollate [67].

2.3 **Messa in commercio di carbone vegetale come concime**

In un parere legale (H. Maurer) il carbone vegetale non viene classificato come sostanza estranea [54]. Attualmente il carbone vegetale può essere messo in commercio in Svizzera come concime con l'autorizzazione dell'Ufficio federale dell'agricoltura (UFAG) purché, come materiale di partenza, venga utilizzato solo legno non trattato e siano rispettate altre condizioni indicate nella scheda «Voraussetzungen und Vorschriften für die Bewilligung von Biokohle» [21]. Occorre pertanto garantire un controllo continuo della qualità relativamente a produzione, valori limite di emissione e tenore di sostanze nocive conformemente all'EBC classe di qualità 1 o 2 [65] e all'ORRPChim [12]. La scheda può essere richiesta all'organismo di omologazione per i concimi all'indirizzo duenger@blw.admin.ch. I controlli del carbone vegetale prodotto si limitano ai produttori industriali che mettono in commercio il carbone vegetale come concime. Nel 2024 entrerà in vigore una revisione dell'ordinanza sui concimi (OCon), basata sul regolamento europeo EU 2019/1009 [13]. Sono previsti un ampliamento dei materiali di partenza per la produzione di carbone vegetale, nel rispetto degli attuali requisiti qualitativi, e una quantità massima di applicazione.

² I Kon-Tiki sono apparecchi di metallo relativamente semplici utilizzati per la produzione di carbone vegetale che possono essere indicati anche per la produzione di carbone conforme ai criteri EBC [32].

3 Focus: il carbone vegetale in suoli utilizzati a scopi agricoli

3.1 Ripercussioni sui suoli

3.1.1 Resa agricola

Finora nei suoli agricoli svizzeri non è stato dimostrato alcun incremento di resa dopo l'apporto di carbone vegetale [44] [60]. Ciò è dovuto in primo luogo al fatto che si tratta di suoli relativamente giovani in un clima temperato e alle pratiche agricole svizzere che sono state adattate di conseguenza. Per contro, si sono osservati miglioramenti della produttività in suoli tropicali profondamente degradati da agenti meteorici, la cui fertilità è molto bassa [39]. Su suoli poco fertili, acidi e sabbiosi è stato riscontrato un aumento della resa dovuto all'incorporazione di carbone vegetale anche in presenza di un clima temperato [40] [74]. Per la Svizzera non si può prevedere in generale un effetto di tipo «*terra preta*³» [44].

3.1.2 Sostanza organica del suolo

L'apporto di carbone vegetale può influire sulla sostanza organica del suolo. Se, dopo l'aggiunta di un substrato organico, il tasso di degradazione della sostanza organica del suolo cambia, si parla di effetto *priming* [67]. Questo può determinare un aumento o un rallentamento della decomposizione della sostanza organica. Le conoscenze in questo ambito sono scarse; entrambi i casi sono stati osservati nell'arco di brevi periodi d'indagine. Da uno studio di modellizzazione effettuato per apporti di carbone vegetale ripetuti nel tempo [72] è emerso che, a una degradazione rapida della sostanza organica (*priming* positivo) nei primi anni, segue nei decenni successivi una degradazione più lenta (*priming* negativo). Dopo 50–100 anni, mantenendo costanti le condizioni del modello, prevale la formazione di sostanza organica. Se si considera il tenore di carbonio, già dopo breve tempo un aumento della degradazione della sostanza organica è più che compensato dall'aggiunta di carbonio pirolitico.

3.1.3 Fisica del suolo

Il carbone vegetale può influire sulle caratteristiche fisiche del suolo [67]. Per quanto siano state condotte solo poche indagini sistematiche in condizioni equivalenti a quelle presenti in Svizzera, le modifiche generate, ad esempio un aumento della porosità e un maggiore accumulo di acqua o una migliore stabilità degli aggregati, sono prevalentemente considerate dei vantaggi [60]. Il carbone vegetale migliorerebbe l'accumulo di acqua nelle fasi di siccità e ridurrebbe l'azione dell'erosione in caso di piogge intense. Si individua qui, nel contesto del cambiamento climatico, una possibilità di migliorare l'adattamento a un aumento sia dei periodi di siccità che delle precipitazioni intense. In particolare si osserva un effetto positivo del carbone vegetale sul bilancio idrico di suoli sabbiosi, che offre buone opportunità per i substrati tecnici (technosol) al di fuori dell'agricoltura, ad esempio nella manutenzione di alberi di città [62].

3.1.4 Bilancio dei nutrienti

L'incorporazione di carbone vegetale influisce sul bilancio dei nutrienti [39] [40] [44] [60] [67] [74]. Anche qui mancano indagini sistematiche riferite alle condizioni svizzere dalle quali ricavare raccomandazioni. Con la sua porosità e l'elevata superficie interna, il carbone vegetale offre una grande area di scambio per i nutrienti. A questo si aggiunge un possibile miglioramento nello sviluppo delle radici e nell'assorbimento di nutrienti da parte delle piante, dovuto alla maggiore capacità idrica e alla riduzione della compattezza. Infine, il carbone vegetale può far aumentare il valore del pH del suolo [67]. Il carbone vegetale nei suoli può ridurre il dilavamento di nutrienti, con conseguenze positive per piante e acque [29] [67]. Tuttavia, alcune osservazioni sul campo attestano solo un effetto di breve durata.

3.1.5 Rischi dovuti a sostanze nocive e prodotti fitosanitari

Ai possibili effetti positivi si contrappone il rischio che, insieme al carbone vegetale, diverse sostanze nocive vengano immesse nei suoli su superfici estese e che, con l'andare del tempo, si accumulino inquinanti organici e metalli pesanti [67]. Poiché che le sostanze nocive pericolose per la salute possono

³ La terra preta (dal termine portoghese che significa «terra nera») è un suolo fertile di origine antropogenica, contenente carbone vegetale e formatosi nel bacino amazzonico nel corso di secoli.

accumularsi nella catena alimentare, si crea una situazione di pericolo per le piante, le persone e gli animali, che deve essere ridotta il più possibile adottando buone prassi come descritto nel capitolo 2. Inoltre, il carbone vegetale può trattenere anche altre sostanze nocive come i prodotti fitosanitari [67].

La combinazione di carbone vegetale e prodotti fitosanitari è valutata in modo ambivalente [45] [66] [67]: da una parte, il carbone vegetale può ridurre la disponibilità di prodotti fitosanitari, quindi l'assorbimento indesiderato di detti prodotti dalla soluzione circolante del suolo da parte degli organismi viventi e delle piante; dall'altra, diminuisce però anche l'effetto desiderato di prodotti fitosanitari efficaci nel suolo, con la conseguenza che possono essere necessari apporti maggiori di queste sostanze. Dal momento che in presenza di carbone vegetale alcuni prodotti fitosanitari degradano più lentamente, è possibile che nel complesso si verifichi un accumulo di prodotti fitosanitari nei suoli, che deve essere valutato negativamente.

3.1.6 *Biologia del suolo*

In generale, le conoscenze sulla biologia del suolo sono ancora molto lacunose. Questo vale in particolare per l'impatto del carbone vegetale sui parametri biologici [50] [67], ad esempio la composizione della comunità microbica e le relative prestazioni [71]. È fondamentale considerare, per quanto possibile, tutte le ripercussioni ecologiche per evitare effetti potenzialmente negativi sugli organismi del suolo, di importanza decisiva per molte funzioni del suolo. Sono stati descritti effetti diversi su questi organismi [30] [34] [52] [70]: sotto l'azione del carbone vegetale, ad esempio, si è notata una maggiore quantità di biomassa negli organismi del suolo, in particolare negli organismi microbici. In presenza di un apporto (una tantum) molto elevato (≥ 10 t/ha), si sono verificate ripercussioni negative su specie più grandi, ad esempio i lombrichi [30]. Particolarmente preoccupante è l'effetto negativo sui lombrichi, considerato il loro ruolo centrale nella decomposizione del materiale organico, nel ciclo dei nutrienti e nella formazione del suolo.

3.2 Ripercussioni sul clima

L'incorporazione di carbone vegetale nei suoli si ripercuote anche sul bilancio dei gas serra, la causa principale del cambiamento climatico [27] [46] [51]. Inizialmente, il CO₂ atmosferico è stato assorbito dalle piante e il carbonio (C) è stato incorporato nella biomassa attraverso la fotosintesi. Dato il tenore di carbonio relativamente elevato e la lenta degradabilità del carbone vegetale prodotto dalla biomassa, esiste la possibilità di sequestro del carbonio nel lungo termine. Ad esempio, il carbone vegetale incorporato nel suolo⁴ può generare le cosiddette «emissioni negative» (cfr. anche il rapporto del Consiglio federale in adempimento del postulato 18.4211 [61]). I tassi di degradazione del carbone vegetale nei suoli dipendono dalle proprietà del carbone e sono difficili da stimare; probabilmente sono inferiori allo 0,3 per cento all'anno, ma non si dispone di indagini in campo aperto in condizioni tipiche dell'agricoltura svizzera [60] [67]. Una parte molto piccola del carbone vegetale si decompone rapidamente, mentre la maggior parte si mantiene stabile nel suolo per lungo tempo. Oggi si può ritenere che il tempo di permanenza della frazione stabile del carbone vegetale nei suoli svizzeri sia di decenni, se non di secoli, un periodo di notevole rilevanza per la mitigazione dei cambiamenti climatici nel XXI secolo.

Un altro effetto positivo per il clima potrebbero essere le minori emissioni di protossido di azoto (N₂O) dai suoli arricchiti di carbone vegetale. Un metastudio [29] quantifica la riduzione di N₂O inizialmente al 38 per cento, pur mostrando che, dopo un anno, l'effetto è trascurabilmente ridotto e statisticamente irrilevante. Per il metano (CH₄) si riscontrano riduzioni delle emissioni in particolare per i suoli (periodicamente) allagati. Per i suoli non allagati, che costituiscono un pozzo naturale per il CH₄ presente nell'atmosfera, sembra che attraverso l'azione del carbone vegetale questa funzione sia svolta in misura minore [42].

3.3 Ripercussioni sconosciute

Per tutte le opportunità e i rischi qui descritti mancano indagini a lungo termine, in particolare eseguite alle condizioni esistenti in Svizzera a scala di campo, le sole in grado di illustrare gli effetti che potrebbero derivare dall'invecchiamento del carbone vegetale e da un sistema suolo modificato di conseguenza. Benché il carbonio pirogeno sia anche presente naturalmente nei suoli [57], l'incorporazione di carbone vegetale comporta alcune ripercussioni poco chiare. In particolare, si

⁴ Oltre all'agricoltura, il carbone vegetale potrebbe essere utilizzato anche come isolante in edifici o substrati tecnici. Anche caverne, cavità o bunker potrebbero essere utilizzati come siti di deposito artificiali. Aspetti quali una minore interazione con l'ambiente animato e una possibilità di stoccaggio concentrata con una conoscenza esatta del sito e la disponibilità di documentazione potrebbero essere particolarmente vantaggiosi rispetto a una distribuzione diffusa e irreversibile in agricoltura.

sottolineano i già menzionati effetti contraddittori sulla biologia del suolo e la conseguente necessità di ricerca. Occorre impedire che l'apporto di carbone vegetale per motivi di protezione del clima comporti effetti negativi sul suolo.

Esiste una situazione di concorrenza per le sostanze organiche residue limitate (biomassa). La produzione di carbone vegetale dovrebbe tenere conto il più possibile della strategia svizzera sulla biomassa [18]. Gli studi hanno dimostrato che le proprietà del carbone vegetale dipendono dal materiale di partenza e dalle condizioni durante la pirolisi [67]. Sebbene non si disponga ancora di un quadro completo di queste correlazioni, possono emergere conflitti tra obiettivi dal punto di vista della protezione del clima e del beneficio agronomico. Questo perché il processo pirolitico può essere ottimizzato in termini di resa energetica o di rendimento del carbone vegetale, e i diversi carboni vegetali si differenziano per la durabilità del sequestro di carbonio (permanenza) o del potenziale di deposito dei nutrienti (e degli inquinanti) [23] [33] [43] [58] [66].

In uno studio è stata osservata una maggiore crescita delle piante dopo l'apporto di carbone vegetale, ma si è anche constatato che le piante potrebbero essere più sensibili alle infestazioni di insetti e patogeni come pure a fattori di stress come la siccità [69].

La possibilità che una variazione dell'albedo⁵ dei suoli dovuta all'apporto di carbone vegetale sia in grado di modificare in modo decisivo il bilancio termico è probabilmente meno da temere se le quantità di carbone vegetale sono ridotte e anche perché l'obiettivo dovrebbe in ogni caso essere quello di una copertura del suolo il più possibile continua [38] [55].

Inoltre, conformemente al principio di precauzione, la scarsità di dati e la mancanza di valori empirici impongono di prevedere ed escludere possibili sviluppi negativi.

3.4 Potenziale di sequestro del carbonio (C) e redditività finanziaria

Secondo le prescrizioni (cfr. cap. 2), l'impiego del carbone vegetale è opportuno solo su suoli agricoli e urbani utilizzati dall'uomo. Per la Svizzera, partendo da un materiale di base di tipo legnoso, Schmidt et al. (2021) stimano un potenziale di sequestro del carbonio – limitato nel tempo – attraverso il carbone vegetale pari a 0,90–1,16 Mt CO₂ all'anno per le superfici concimabili (terreni coltivati, pascoli e alpeggi come pure coltivazioni di frutta, ortaggi e vite) [31] [64] [60]. Secondo gli autori, questa quantità (350'000 t di carbone vegetale) sarebbe oggi disponibile come potenziale sostenibile e finora non utilizzata secondo Thees et al. (2017). Keel et al. [48] stimano, anche per la Svizzera ma esclusivamente per i terreni coltivati e per uno scenario in cui sia utilizzata solo biomassa ottenuta dalla cura del paesaggio, il potenziale a 0,14 Mt CO₂ all'anno; in uno scenario nel quale vengono utilizzati anche legna da energia di bassa qualità, rifiuti vegetali prodotti da economie domestiche e rifiuti legnosi non trattati, il potenziale viene stimato a 0,73 Mt CO₂ all'anno.⁶

Per sequestrare una tonnellata di CO₂ nei suoli tramite il carbone vegetale, servono circa 0,4 tonnellate di carbone vegetale certificato EBC. Dal momento che la disponibilità a pagare per le emissioni negative è limitata (ca. 100–200 CHF/t CO₂)⁷ e i costi di produzione sono elevati (ca. 300–750 CHF/t di carbone vegetale) [56], il sequestro di carbonio nel suolo attraverso il carbone vegetale oggi non è una pratica economicamente redditizia. Il prezzo di mercato per una tonnellata di carbone vegetale si aggira su 1000 CHF. Sebbene gli agricoltori prevedano nel lungo termine una diminuzione del prezzo a circa 500 CHF/t, i costi per l'applicazione sui campi non saranno convenienti fintanto che la vendita di certificati rappresenterà l'unica fonte di proventi finanziari e la disponibilità a pagare per il CO₂ sequestrato non crescerà sensibilmente.

Gli impianti di pirolisi possono essere redditizi attraverso la combinazione dei proventi derivanti da carbone vegetale, calore, ev. produzione di energia elettrica e i certificati per l'impatto climatico. L'energia termica ottenuta viene utilizzata, ad esempio, per il teleriscaldamento, come già avviene per diversi impianti come quelli di Basilea, Flaach o Frauenfeld [26] [28] [41].

Una riflessione importante è chiedersi se la produzione e l'utilizzo del carbone vegetale siano ecologicamente opportuni, se si considerano i cicli dell'energia e delle materie nella loro integralità [51] [53] [73]. L'ulteriore opzione di utilizzo come carbone vegetale potrebbe generare o acuire i conflitti di

⁵ L'albedo è una misura del potere riflettente di una superficie che riflette la luce in tutte le direzioni, quindi che non brilla di luce propria.

⁶ In alternativa, una parte della biomassa potrebbe essere impiegata in altro modo, al di fuori dell'agricoltura: Keel et al. (2021) [47] stimano a 0,21 Mt CO₂ all'anno il potenziale per i suoli tecnici nelle aree insediative (alberi di città), per le strade di nuova costruzione a 0,24 Mt CO₂ all'anno.

⁷ Si presume che la disponibilità massima a pagare per un progetto di compensazione (sanzione art. 28 legge sul CO₂ e attestati esteri) sia pari a 200 CHF/t CO₂ [3] [11].

utilizzo relativamente alle sostanze organiche residue. Un sovvenzionamento del carbone vegetale potrebbe comportare cambiamenti dell'uso del territorio, se la biomassa venisse coltivata per la produzione di carbone vegetale anziché per la produzione alimentare. Tale prassi sarebbe in contrasto con la strategia svizzera sulla biomassa e deve pertanto essere impedita.

È preoccupante anche un possibile trasferimento dei flussi di sostanze organiche, ad esempio rimuovendo per lungo tempo da una superficie la paglia utilizzata per la produzione di carbone vegetale senza compensare tale rimozione con l'apporto di altro materiale organico. L'arricchimento di carbonio mediante carbone vegetale su una superficie sarebbe quindi accompagnato da un impoverimento di carbonio su un'altra superficie.

Per calcolare le emissioni negative che contrastano gli effetti del cambiamento climatico è fondamentale tenere conto del bilancio complessivo (rimozioni di CO₂ dall'atmosfera vs. emissioni di gas serra nell'atmosfera). Ciò include, tra l'altro, la coltivazione della biomassa, i trasporti e la pirolisi fino alla fissazione del carbone vegetale in una forma non combustibile, compresa la perdita nell'atmosfera della frazione labile di carbone vegetale presente nei suoli [63] [65]. Tutte le emissioni generate devono essere detratte dal potenziale di sequestro. Per la corretta indicazione dell'impatto climatico è fondamentale scegliere e utilizzare un limite di sistema rispettoso dell'ambiente.

Può essere utile anche fare un confronto: il potenziale annuale menzionato di sequestro del carbonio tramite carbone vegetale è simile alle emissioni derivanti da suoli organici drenati che, nel 2019, in Svizzera erano pari a circa 0,69 Mt CO₂ [37] e che rappresentano solo il 3 per cento circa della superficie agricola. La riumidificazione di suoli organici utilizzati a fini agricoli può dare un contributo importante alla protezione del clima, anche se con mancati proventi, in quanto blocca o riduce al minimo le emissioni prodotte dalla mineralizzazione della torba conservando il carbonio residuo.

3.5 Necessità di ricerca

Dalle considerazioni sopra esposte emerge la necessità di fare ricerca. Da una parte, occorrono esperimenti in pieno campo con il carbone vegetale effettuati a lungo termine in presenza di condizioni ordinarie, orientate alla pratica e tipiche del posto che rispecchino nel modo più completo possibile i sistemi suolo e clima come pure il bilancio energetico, il bilancio del carbonio e quello dei nutrienti. Per questo motivo, UFAM e UFAG sostengono i primi studi a lungo termine con il carbone vegetale (ad es. «Black goes Green») [35] [36]. Dall'altra, è necessario integrarvi studi di valutazione dei cicli di vita coerenti [43] [53] [73]. Soltanto combinando questi sforzi e confrontandoli con altri flussi di sostanze e utilizzi a cascata sarà possibile dire quali sono i sistemi di impiego più auspicabili. Al tempo stesso, questi sistemi dovranno essere attuati solo se si può escludere l'immissione e l'accumulo di inquinanti.

4 Conseguenze e raccomandazioni per l'impiego di carbone vegetale in agricoltura

Per motivi prevalentemente legati alla protezione del suolo, il carbone vegetale deve essere utilizzato in agricoltura solo se si conoscono i parametri rilevanti del suolo sulla superficie target e se è stato segnalato un fabbisogno in riferimento alla disponibilità di nutrienti o al regime idrico. Il carbone vegetale utilizzato deve essere conforme a quanto indicato nel capitolo 2 e deve essere applicato solo in piccole quantità. Si dovrebbero sottoporre a pirolisi solo sostanze residue non trattate (ad es. patate) e il carbone vegetale dovrebbe essere utilizzato a cascata: il carbone vegetale di qualità idonea può inizialmente essere aggiunto al mangime per animali⁸ o utilizzato in stalla come lettiera [24] [25] [60]. Per ottenere un effetto diretto favorevole sull'approvvigionamento di sostanze nutritive, prima dell'apporto il carbone vegetale deve essere «caricato» di nutrienti, ad esempio miscelandolo con compost, concime o liquame [67]. I valori empirici mostrano che una quantità di applicazione pari a 0,5–2 tonnellate di carbone vegetale per ettaro (sostanza secca, SS) è piuttosto ridotta e può essere ripetuta (annualmente) [60]. In genere il carbone vegetale viene applicato in superficie, ma è possibile anche ricorrere all'incorporazione concentrata alla zona radicale, che prevede l'immissione di carbone vegetale in punti o strisce sotto un seme o una piantina [60]. Con una tonnellata di carbone vegetale per ettaro all'anno, Schmidt et al. (2021) calcolano che fino al 2050 permangono nel suolo al massimo 30 tonnellate di carbone vegetale per ettaro⁹ e presumono che non avvengano effetti negativi sulla qualità del suolo [60]. Tuttavia, oggi mancano le conoscenze a lungo termine per valutare questo aspetto.

In relazione al contenimento del cambiamento climatico sussiste un grande interesse a prelevare il CO₂ dall'atmosfera e sequestrarlo a lungo termine nei suoli attraverso il carbone vegetale. Per rispettare il principio di precauzione, l'impiego di carbone vegetale dovrebbe essere accompagnato scientificamente, almeno in caso di applicazione su superfici estese. I dati sul rendimento e le analisi del suolo, in particolare in riferimento alla permanenza del carbonio e alle ripercussioni sulla biologia del suolo, devono essere documentati in modo trasparente.

Fintanto che non sarà possibile escludere effetti nocivi, ad esempio sugli organismi del suolo, nell'ottica della precauzione l'impiego di carbone vegetale su superfici agricole estese è sconsigliato.

⁸ Prescrizione: la qualità è soddisfatta conformemente alla classe 1 EBC. Vari rapporti sul campo indicano un miglior benessere animale con un apporto *non* permanente.

5 Fonti

5.1 Atti normativi (leggi e ordinanze)

- [1] **Legge federale del 1° luglio 1966 sulla protezione della natura e del paesaggio (LNP)**; RS 451 (stato 1° gennaio 2022), https://www.fedlex.admin.ch/eli/cc/1966/1637_1694_1679/it (consultato il 14.11.2022).
- [2] **Legge federale del 29 aprile 1998 sull'agricoltura (legge sull'agricoltura; LAgr)**; RS 910.1 (stato 1° gennaio 2022), https://www.fedlex.admin.ch/eli/cc/1998/3033_3033_3033/it (consultato il 14.11.2022).
- [3] **Legge federale del 23 dicembre 2011 sulla riduzione delle emissioni di CO₂ (legge sul CO₂)**; RS 641.71 (stato 1° gennaio 2022), <https://www.fedlex.admin.ch/eli/cc/2012/855/it> (consultato il 14.11.2022).
- [4] **Legge federale del 7 ottobre 1983 sulla protezione dell'ambiente (legge sulla protezione dell'ambiente; LPAmb)**; RS 814.01 (stato 1° gennaio 2022), https://www.fedlex.admin.ch/eli/cc/1984/1122_1122_1122/it (consultato il 14.11.2022).
- [5] **Legge federale del 24 gennaio 1991 sulla protezione delle acque (LPAc)**; RS 814.20 (stato 1° gennaio 2022), https://www.fedlex.admin.ch/eli/cc/1992/1860_1860_1860/it (consultato il 14.11.2022).
- [6] **Legge del 30 settembre 2016 sull'energia (LEne)**; RS 730.0 (stato 1° ottobre 2022), <https://www.fedlex.admin.ch/eli/cc/2017/762/it> (consultato il 14.11.2022).
- [7] **Ordinanza del 16 dicembre 1985 contro l'inquinamento atmosferico (OIAt)**; RS 814.318.142.1 (stato 1° ottobre 2022), https://www.fedlex.admin.ch/eli/cc/1986/208_208_208/it (consultato il 14.11.2022).
- [8] **Ordinanza del 1° luglio 1998 contro il deterioramento del suolo (O suolo)**; RS 814.12 (stato 12 aprile 2016), https://www.fedlex.admin.ch/eli/cc/1998/1854_1854_1854/it (consultato il 14.11.2022).
- [9] **Ordinanza del 10 gennaio 2001 sulla messa in commercio di concimi (ordinanza sui concimi; OCon)**; RS 916.171 (stato 16 luglio 2022), <https://www.fedlex.admin.ch/eli/cc/2001/105/it> (consultato il 14.11.2022).
- [10] **Ordinanza del 26 ottobre 2011 concernente la produzione e l'immissione sul mercato degli alimenti per animali (ordinanza sugli alimenti per animali; OsAlA)**; RS 916.307 (stato 1° gennaio 2022), <https://www.fedlex.admin.ch/eli/cc/2011/772/it> (consultato il 14.11.2022).
- [11] **Ordinanza del 30 novembre 2012 sulla riduzione delle emissioni di CO₂ (ordinanza sul CO₂)**; RS 641.71 (stato 1 gennaio 2023) <https://www.fedlex.admin.ch/eli/cc/2012/856/it> (consultato il 18.01.2023).
- [12] **Ordinanza del 18 maggio 2005 concernente la riduzione dei rischi nell'utilizzazione di determinate sostanze, preparati e oggetti particolarmente pericolosi (ordinanza sulla riduzione dei rischi inerenti ai prodotti chimici; ORRPCchim)**; RS 814.81 (stato 6 ottobre 2022), <https://www.fedlex.admin.ch/eli/cc/2005/478/it> (consultato il 14.11.2022).
- [13] **Regolamento (UE) 2019/1009** del Parlamento europeo e del Consiglio, del 5 giugno 2019, che stabilisce norme relative alla messa a disposizione sul mercato di prodotti fertilizzanti dell'UE, che modifica i regolamenti (CE) n. 1069/2009 e (CE) n. 1107/2009 e che abroga il regolamento (CE) n. 2003/2003 (Testo rilevante ai fini del SEE), <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/?uri=CELEX%3A32019R1009> (consultato il 14.11.2022).

5.2 Piani settoriali e aiuti all'esecuzione

- [14] **UFAM 2017**: Piano d'azione Strategia Biodiversità Svizzera. Ufficio federale dell'ambiente (UFAM), Berna, <https://www.bafu.admin.ch/bafu/it/home/temi/biodiversita/pubblicazioni/pubblicazioni-biodiversita/strategia-biodiversita-svizzera.html> (consultato il 14.11.2022).
- [15] **UFAM 2018**: La politica climatica della Svizzera. Attuazione dell'accordo di Parigi sul clima. Ufficio federale dell'ambiente (UFAM), Berna. Informazione ambientale n. 1803: 28 pagg., <https://www.bafu.admin.ch/ui-1803-i> (consultato il 14.11.2022).
- [16] **UFAM 2021**: Ressourcenpolitik Holz 2030. Strategie, Ziele und Aktionsplan Holz 2021–2026. Ufficio federale dell'ambiente (UFAM), Berna, Informazione ambientale n. 2103: 76 pagg., <https://www.bafu.admin.ch/ui-2103-i> (consultato il 14.11.2022).
- [17] **UFAM 2022**: pagina web «Compensazione delle emissioni di CO₂», <https://www.bafu.admin.ch/bafu/it/home/temi/clima/info-specialisti/misure-riduzione/compensazione.html> (consultata il 14.11.2022).
- [18] **UFAM e UFAG 2009**: Strategia sulla biomassa in Svizzera - Strategia per la produzione, la trasformazione e l'impiego di biomassa in Svizzera, Ufficio federale dell'energia (UFE), Ufficio federale dell'agricoltura (UFAG), Ufficio federale dello sviluppo territoriale (ARE), Ufficio federale dell'ambiente (UFAM), Berna, <https://www.news.d.admin.ch/newsd/message/attachments/15398.pdf> (consultato il 14.11.2022).
- [19] **UFAM e UFAG 2012**: Elementi nutritivi e utilizzo dei concimi nell'agricoltura. Un modulo dell'aiuto all'esecuzione per la protezione dell'ambiente nell'agricoltura. Ufficio federale dell'ambiente (UFAM), Berna. Pratica ambientale UV 1225: 61 pagg., <https://www.bafu.admin.ch/bafu/it/home/temi/acque/pubblicazioni/pubblicazioni-acque/elementi-nutritivi-utilizzo-concimi-agricoltura.html> (consultato il 14.11.2022).
- [20] **UFE 2021**: pagina web «Politica energetica», 22.9.2021, <https://www.bfe.admin.ch/bfe/it/home/politica/politica-energetica.html> (consultata il 14.11.2022).
- [21] **UFAG 2020**: Voraussetzungen und Vorschriften für die Bewilligung von Biokohle, 15.6.2020, Ufficio federale dell'agricoltura (UFAG), Berna.
- [22] **Consiglio federale svizzero 2020**: Strategia Suolo Svizzera per una gestione sostenibile del suolo, Informazione ambientale, 70 pagg., <https://www.bafu.admin.ch/ui-2018-i> (consultato il 14.11.2022).

5.3 Bibliografia

- [23] **Al-Wabel M.I. et al. 2017**: Impact of biochar properties on soil conditions and agricultural sustainability: A review. Land Degradation & Development, Volume 29, Issue 7, Special Issue: Ash and fire, char and biochar in the environment. DOI, <https://doi.org/10.1002/ldr.2829>
- [24] **Abächerli F. 2021**: Pflanzenkohle: Lösung für den landwirtschaftlichen Klimaschutz? Vortrag an der AgroCleanTech-Tagung 2021 zu Treibhausgas-Senken in der Landwirtschaft, https://www.agrocleantech.ch/images/Fachleute/Tagungen/2021/2021_PP_Verora_Fredy_Abaecherli_D.pdf (consultato il 14.11.2022).
- [25] **Agro Clean Tech Verein 2017**: Pflanzenkohleeinsatz in der Landwirtschaft. Einsatzbereiche und Wirtschaftlichkeit von Pflanzenkohle als Klimamassnahme. Luglio 2016. Florence Looser AgroCleanTech Verein, https://agrocleantech.ch/images/Fachleute/Wissen/Pflanzenkohleeinsatz_in_der_Landwirtschaft_als_Klimamassnahme.pdf (consultato il 14.11.2022).

- [26] **AgroCO2ncept Flaachtal:** Landwirte und Unternehmer aus der Region Flaachtal haben die Initiative ergriffen, um die Machbarkeit des praktischen Klimaschutzes im landwirtschaftlichen Alltag und in der Region aufzuzeigen, <http://www.agroco2ncept.ch/das-projekt/index.html> (consultato il 14.11.2022).
- [27] **Amelung W. et al. 2020:** Towards a global-scale soil climate mitigation strategy, *Nature Communications* 11, 5427, <https://doi.org/10.1038/s41467-020-18887-7>
- [28] **Bioenergie Frauenfeld:** Im Holzheizkraftwerk wird Biomasse, in Form von Restholz, aus der Region mittels Pyrolyse in Pflanzenkohle umgewandelt, <https://www.bioenergie-frauenfeld.ch/> (consultato il 14.11.2022).
- [29] **Borchard N. et al. 2019:** Biochar, soil and land-use interactions that reduce nitrate leaching and N₂O emissions: A meta-analysis, *Science of The Total Environment*, 651, 2, 2354-2364, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.060>
- [30] **Briones M.J.I., Panzacchi P., Davies C.A., Ineson P. 2020:** Contrasting responses of macro- and meso-fauna to biochar additions in a bioenergy cropping system, *Soil Biology and Biochemistry*, 145, <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2020.107803>
- [31] **Burg V., Bowman G., Erni M., Lemm R., Thees O. 2018:** Analyzing the potential of domestic biomass resources for the energy transition in Switzerland. *Biomass and Bioenergy* 111, 60–69, <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2018.02.007>
- [32] **Cornelissen G., Pandit N.R., Taylor P., Bandit B.H., Sparrevik M., Schmidt H.P., 2016:** Emissions and Char Quality of Flame-Curtain "Kon-Tiki" Kilns for Farmer-Scale Charcoal/Biochar Production. *PLoS ONE* 11(5): e01544617. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0154617>
- [33] **Crombie K., Mašek O., Cross A., Sohi S. 2015:** Biochar – synergies and trade-offs between soil enhancing properties and C sequestration potential. *GCB Bioenergy*, 7, 1161-1175, <https://doi.org/10.1111/gcbb.12213>
- [34] **Elliston T. and Oliver I. 2020:** Ecotoxicological assessments of biochar additions to soil employing earthworm species *Eisenia fetida* and *Lumbricus terrestris*, *Environmental Science and Pollution Research* 27, 33410–33418, <https://doi.org/10.1007/s11356-019-04542-2>
- [35] **FiBL 2021a:** Kohle fürs Klima, comunicato stampa del 20.05.2021 del Forschungsinstitut für biologischen Landbau (FiBL), <https://www.fibl.org/de/infothek/meldung/kohle-fuers-klima> (consultato il 14.11.2022).
- [36] **FiBL 2021b:** Klimawirkung von Recyclingdüngern und Pflanzenkohle: Emissionen von Lachgas, Methan und Ammoniak in einem Feldversuch, <https://www.fibl.org/it/temi/banca-dati-dei-progetti/progetto/project/1473> (consultato il 14.11.2022).
- [37] **UFAM 2021:** Switzerland's Greenhouse Gas Inventory 1990–2019: National Inventory Report and reporting tables (CRF). Submission of April 2021 under the United Nations Framework Convention on Climate Change and under the Kyoto Protocol. Ufficio federale dell'ambiente (UFAM), Berna, <http://www.climatereporting.ch>
- [38] **Genesio et al. 2012:** Surface albedo following biochar application in durum wheat. *Environmental Research Letters* 7 (2012) 014025: 8, <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/7/1/014025> (consultato il 14.11.2022).
- [39] **Glaser B., Haumaier L., Guggenberger G., Zech W. 2001:** The 'Terra Preta' phenomenon: a model for sustainable agriculture in the humid tropics. *Naturwissenschaften*, 88 (1), 37-41, <https://doi.org/10.1007/s001140000193>
- [40] **Glaser B., Wiedner K., Seelig S., Schmidt H. P., Gerber H. 2015:** Biochar organic fertilizers from natural resources as substitute for mineral fertilizers, *Agronomy for Sustainable Development*, 35:667-678, <https://doi.org/10.1007/s13593-014-0251-4>
- [41] **IWB 2021:** Pflanzenkohleanlage - Produktion CO₂-negativer Fernwärme und Pflanzenkohle, Industrielle Werke Basel, <https://www.iwb.ch/Ueber-uns/Projekte/Innovationsprojekte/Pflanzenkohleanlage.html> (consultato il 14.11.2022).
- [42] **Jeffery S., Verheijen F., Kammann C., Abalos D. 2016:** Biochar effects on methane emissions from soils: A meta-analysis, *Soil Biology and Biochemistry*, 101, <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2016.07.021>
- [43] **Jeffery S. et al. 2015:** The way forward in biochar research: targeting trade-offs between the potential wins, *GCB Bioenergy* 7, 1–13, <https://doi.org/10.1111/gcbb.12132>
- [44] **Jeffery S. et al. 2017:** Biochar boosts tropical but not temperate crop yields, *Environmental Research Letters*, 12, 5, <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa67bd>
- [45] **Khorram et al. 2016:** Biochar: A review of its impact on pesticide behavior in soil environments and its potential applications, *Journal of Environmental Sciences*, 44, 269-279, <https://doi.org/10.1016/j.jes.2015.12.027>
- [46] **Keel S. 2021:** Landwirtschaftliche Böden als Treibhausgas-Senke. Presentazione al convegno AgroCleanTech 2021, https://www.agrocleantech.ch/images/Fachleute/Tagungen/2021/2021_PP_Agrscope_Sonja_Keel_D.pdf (consultato il: 17.01.2022).
- [47] **Keel S. G., Johannes A., Boivin P., Burgos S., Charles R., Hagedorn F., Kulli B., Leifeld J., Saluz A., Zimmermann S. 2021:** Soil carbon sequestration in Switzerland: analysis of potentials and measures (Postulate Bourgeois 19.3639). Rapporto di Agroscope su mandato dell'Ufficio federale dell'ambiente (UFAM). Berna.
- [48] **Keel S. G., Bretscher D., Leifeld J., Ow A., Wüst-Galley C.:** Soil carbon sequestration potential bounded by population growth, land availability, food production, and climate change. Sottomesso a PNAS.
- [49] **Lehmann J., Czimczik Cl., Laird D., Sohi S. 2009:** Stability of Biochar in the Soil. in J Lehmann & J Stephen (eds.), *Biochar for Environmental Management: Science and Technology*. Earthscan, Londra, pp. 169-182.
- [50] **Lehmann J. et al. 2011:** Biochar effects on soil biota – A review, *Soil Biology and Biochemistry*, 43, 9, 1812-1836, <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2011.04.022>
- [51] **Lehmann J. et al. 2021:** Biochar in climate change mitigation, *Nature Geoscience* 14, 883–892, <https://doi.org/10.1038/S41561-021-00852-8>
- [52] **Liesch et al. 2010:** Impact of Two Different Biochars on Earthworm Growth and Survival, *Annals of Environmental Science*, 4, 1-9, <http://hdl.handle.net/2047/d20000234>
- [53] **Matušík J., Hnátková T., Kočí V. 2020:** Life cycle assessment of biochar-to-soil systems: A review, *Journal of Cleaner Production* 259, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120998>
- [54] **Maurer und Stäger AG 2021:** Rechtlicher Umgang mit Pflanzenkohle, parere legale commissionato dall'UFAM, 15.02.2021, Dr. iur. et dipl. chem. Hans Maurer, Rechtsanwalt.
- [55] **Meyer S., Bright R. M., Fischer D., Schulz H., Glaser B. 2012:** Albedo Impact on the Suitability of Biochar Systems To Mitigate Global Warming, *Environmental Science & Technology*, 46, 22, 12726–12734, <https://doi.org/10.1021/es302302g>
- [56] **Prognos und Infras 2021:** Energieperspektiven 2050+, Exkurs Negativemissionstechnologien und CCS. Potenziale, Kosten und Einsatz. 7 settembre 2021, aggiornato il 19 novembre 2021. Studio su mandato dell'Ufficio federale dell'energia (UFE), <https://t1p.de/EP2050NET> (consultato il 14.11.2022).
- [57] **Reisser M., Purves R.S., Schmidt M.W.I., Abiven S. 2016:** Pyrogenic Carbon in Soils: A Literature-Based Inventory and a Global Estimation of Its Content in Soil Organic Carbon and Stocks. *Front. Earth Sci., Sec. Biogeoscience*, <https://doi.org/10.3389/feart.2016.00080>
- [58] **Rodrigues L., Budai A., Elsgaard L., Hardy B., Keel S.G., Mondini C., Plaza C., Leifeld J.:** The importance of biochar quality and pyrolysis yield for soil carbon sequestration in practice. Sottomesso a *Environmental Science & Technology*.

- [59] **Schimmelpfennig S. and Glaser B. 2012:** One Step Forward toward Characterization: Some Important Material Properties to Distinguish Biochars, *J. Environ. Qual.*, 41, 4, 1001-1013, <https://doi.org/10.2134/jeq2011.0146>
- [60] **Schmidt H.P., Hagemann N., Abächerli F., Leifeld J., Bucheli T. 2021:** Pflanzenkohle in der Landwirtschaft - Hintergründe zur Düngertilgung und Potentialabklärung für die Schaffung von Kohlenstoff-Senken. *Agroscope Science*, 112, 2021, 1-71. DOI, <https://doi.org/10.34776/as112g>
- [61] **Consiglio federale svizzero 2020:** Che rilevanza potrebbero avere le emissioni negative di CO₂ per le future politiche climatiche della Svizzera?, rapporto del Consiglio federale in adempimento del postulato 18.4211 Thorens Goumaz. Berna, 02.09.2020, <https://www.parlament.ch/centers/eparl/curia/2018/20184211/Bericht%20BR%20D.pdf> (consultato il 14.11.2022).
- [62] **Stockholm Biochar Project 2019:** Il progetto di Stoccolma sul carbone vegetale utilizza i rifiuti di parchi e giardini per produrre energia rinnovabile e carbone vegetale, che viene utilizzato in giardini, parchi urbani e aiuole, <https://www.hamk.fi/wp-content/uploads/2019/04/Mattias-Gustafsson-pieni.pdf> (consultato il 14.11.2022).
- [63] **Tanzer S., Ramirez A. 2019:** When are negative emissions negative emissions?, *Energy and Environmental Science*, 4, <https://doi.org/10.1039/C8EE03338B>
- [64] **Thees O., Burg V., Erni M., Bowman G., Lemm R. 2017:** Biomassenpotenziale der Schweiz für die energetische Nutzung, Ergebnisse des Schweizerischen Energiekompetenzzentrums SCCER BIOSWEET. WSL Berichte: Vol. 57. Birmensdorf: Istituto federale di ricerca per la foresta, la neve e il paesaggio WSL, <https://www.dora.lib4ri.ch/wsl/islandora/object/wsl:13277> (consultato il 06.01.2022).
- [65] **The European Biochar Certificate (EBC) and Positive list of biomass feedstock.** Versione 10.1 del 10.1.2022. <https://www.european-biochar.org/en/ct/2-EBC-guidelines-documents-for-the-certification> (consultato il 14.11.2022).
- [66] **Thünen Institut 2022:** Ergebnisse des Projekts Pflanzenkohle in der Landwirtschaft 2010-2015, Einsatz von Kohlen aus der Pyrolyse und der hydrothermalen Carbonisierung in der Landwirtschaft. Sintesi alla pagina <https://www.thuenen.de/de/fachinstitute/agrarklimaschutz/projekte/pflanzenkohle-in-der-landwirtschaft> (consultato il 14.11.2022).
- [67] **UBA 2016:** Chancen und Risiken des Einsatzes von Biokohle und anderer «veränderter» Biomasse als Bodenhilfsstoffe oder für die C-Sequestrierung in Böden, Texte 04/2016, Umweltbundesamt Deutschland, <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/chancen-risiken-des-einsatzes-von-biokohle-anderer> (consultato il 14.11.2022).
- [68] **Verenum 2020:** Nussbaumer, T., Lauber, A., Zotter, P., 2020: Anlagen zur Vergasung und Verkohlung von Holz und anderer fester Biomasse, Grundlagen und Empfehlungen zum Vollzug der Luftreinhalte-Verordnung, im Auftrag der Kantone Aargau, Graubünden und Bern, Verenum AG, Zurigo, 14.9.2020.
- [69] **Viger M., Hancock R.D., Miglietta F., Taylor G. 2015:** More plant growth but less plant defence? First global gene expression data for plants grown in soil amended with biochar. *Bioenergy*, 7, 4, 658-672, <https://doi.org/10.1111/gcbb.12182>
- [70] **Wahlen J.K., Benslim H., Elmi A.a., Husk B.R. 2021:** Earthworm populations are stable in temperate agricultural soils receiving wood-based biochar. *Pedosphere* 31(3): 398–404, [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(20\)60080-7](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(20)60080-7)
- [71] **Wagg C., Bender F., Widmer F., van der Heijden M. 2014:** Soil biodiversity and soil community composition determine ecosystem multifunctionality. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111, 14, 5266-5270, <https://doi.org/10.1073/pnas.1320054111>
- [72] **Woelf D., Lehmann J. 2012:** Modelling the long-term response to positive and negative priming of soil organic carbon by black carbon. *Biogeochemistry* (2012) 111:83–95, <https://doi.org/10.1007/s10533-012-9764-6>
- [73] **Woelf D., Lehmann J., Lee D. 2016:** Optimal bioenergy power generation for climate change mitigation with or without carbon sequestration. *Nature Communications* 7, 13160, <https://doi.org/10.1038/ncomms13160>
- [74] **Ye L. et al. 2020:** Biochar effects on crop yields with and without fertilizer: A meta-analysis of field studies using separate controls. *Soil Use Manage* 36:2–18, <https://doi.org/10.1111/sum.12546>