



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, unità di direzione Clima, UFAM, regine.roethlisberger@bafu.admin.ch

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

Martin Schwarz, consiglio d'amministrazione AGIR, martin.schwarz@bd.zh.ch

Link per scaricare il PDF

www.bafu.admin.ch/rimozione-e-sequestro-di-co2

La presente scheda è disponibile anche in tedesco e francese.

La lingua originale è il tedesco.

© UFAM 2026

Seconda edizione

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 “carbonizzazione” di biomassa prevalentemente vegetale. 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, i dispositivi semplici per la pirolisi non sono in genere autorizzabili (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 (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 [66] [75]. 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) [65] [66] [75]. 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 [66] [75]. 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 [49] [66] [75].

La struttura chimica del carbone vegetale fa in modo che possa restare stabile nell'ambiente per tanti anni [55] [66] [75]. 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) [75]. I gas di scarico possono inquinare l'aria e l'ambiente, mentre il suolo può essere contaminato dall'incorporazione di carbone vegetale. Entrambi questi effetti devono essere prevenuti 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 i settori dell'energia, degli alimenti, dei mangimi e della gestione dell'humus [57] [59] [82].

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 [75].

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 [74] [75].

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 [23], 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

Le seguenti normative riguardano, tra l'altro, 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. Dal 1° gennaio 2024, il carbone vegetale è esplicitamente regolamentato nell'OCon come cosiddetta categoria di materiali costituenti (Component Material Category CMC 14: materiali di pirolisi e gassificazione) [9]. La messa in commercio di un concime costituito o in parte costituito da CMC 14 è soggetta ad autorizzazione ai sensi dell'OCon. 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'allegato 2.6 ORRPChim – Materiali di pirolisi e gassificazione (CMC 14)). L'ORRPChim stabilisce anche la quantità massima di carbone vegetale che può essere sparsa, pari a 1 tonnellata l'ettaro l'anno, con un limite massimo di 10 tonnellate l'ettaro nel corso di 20 anni [12] (ORRPChim allegato 2.6 punto 3.2.4).

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 sfruttati evitando ogni effetto pregiudizievole per le acque, in particolare quelli causati dal convogliamento e dal dilavamento dei fertilizzanti (anche: [19]). L'articolo 6 LPAc [5] vieta di introdurre direttamente o indirettamente o lasciare infiltrarsi nelle acque sostanze che possono inquinare. È parimenti vietato depositare o spandere tali sostanze fuori delle acque, se ne scaturisce un pericolo concreto di inquinare l'acqua. L'ORRPChim [12] disciplina esplicitamente i divieti e le eccezioni (ORRPChim allegato 2.6 punto 3.3).

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 (OIAt) [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 2026) [3] [11], i progetti relativi al carbone vegetale in Svizzera sono ammessi come progetti di compensazione a determinate condizioni e possono generare attestati negoziabili, utilizzabili ad esempio per compensare le emissioni di CO₂ del settore dei trasporti [17].

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 [72] [75].

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) [75]. 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*

Per la revisione della OCon [9] sono state recepite le disposizioni del regolamento (UE) 2019/1009 relative ai materiali di pirolisi e gassificazione (CMC 14); un elenco delle materie prime² è riportato nell'allegato II, parte II, CMC 14, punto 1 del regolamento UE [13]. I rifiuti biogenici puliti, come quelli provenienti dalla raccolta differenziata dei rifiuti organici o i rifiuti vegetali dell'industria alimentare, sono quindi ammessi come materiali di partenza per la produzione di carbone vegetale. È invece vietato l'impiego di materiali potenzialmente contaminati, come ad esempio il legname di scarto, i rifiuti urbani o i fanghi di depurazione. Altrimenti sussiste il pericolo particolare che, durante la pirolisi, possano formarsi diossine e furani altamente tossici o altri inquinanti (atmosferici) [75]. Secondo l'OCon [9], i concimi di fattoria non sono ammessi come materiale di partenza per il carbone vegetale.

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 [75] [76]. 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].

Il CercI'Air (Associazione svizzera dei responsabili della protezione dell'aria) ha stabilito nella raccomandazione di esecuzione n. 31r «Impianti per la carbonizzazione e la gassificazione di legno e altre biomasse solide» [22] come devono essere valutate le diverse categorie di impianti per la produzione di carbone vegetale dal punto di vista dell'OIAAt. In base alle disposizioni dell'OIAAt, come materiali di partenza sono adatti fondamentalmente il legno allo stato naturale e i rifiuti e i prodotti biogenici provenienti dall'agricoltura. Possono essere utilizzati anche i rifiuti naturali provenienti da boschi, campi e giardini, purché la loro qualità corrisponda a quella del legno allo stato naturale. Le biomasse solide diverse dalle categorie sopra menzionate sono considerate dall'OIAAt come rifiuti biogenici, per il cui valorizzazione si applicano valori limite più severi per gli impianti di incenerimento dei rifiuti secondo l'allegato 2 punto 71 o 72 OIAAt. Questi includono, ad esempio, i rifiuti dell'industria alimentare o i residui della produzione di carta.

Per la messa in commercio di carbone vegetale come concime è necessario richiedere un'autorizzazione all'Ufficio federale dell'agricoltura (UFAG). Secondo l'OCon [9], per la produzione di carbone vegetale valgono i seguenti requisiti: (1) temperatura di processo superiore a 500°C per almeno 10 minuti, (2) rispetto dei valori limite concernenti gli inquinamenti ai sensi dell'allegato 2.6 punto 2.2.2.3 ORRPChim, (3) l'UFAG può prescrivere nell'autorizzazione regolari analisi (allegato 2 OCon, CMC 14), (4) i tenori di carbone vegetale devono essere dichiarati nel documento di accompagnamento (allegato 3 OCon, prescrizioni generali di etichettatura, cpv. 12). Una miscela di un fertilizzante con carbone vegetale già autorizzato non deve essere nuovamente autorizzata; la miscela è tuttavia soggetta a registrazione (OCon art. 20 cpv. 3).

2.2.3 *Produzione per il consumo proprio*

Anche in caso di produzione privata di carbone vegetale per il consumo proprio occorre rispettare le prescrizioni dell'OIAAt [7]. I sistemi aperti (ad esempio Kon-Tiki) senza regolazione di processo, senza valorizzazione termica dei gas di legno e senza raccolta dei gas di scarico non sono conformi allo stato della tecnica [22]. 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. I sistemi aperti non sono in genere autorizzabili. I requisiti relativi ai materiali di partenza sono gli stessi indicati al punto 2.2.2.

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, i dispositivi semplici generano talvolta elevate emissioni di metano e di composti organici volatili (NMVOC) [36], il che non è

² Esempi di possibili materiali di partenza ai sensi del regolamento (UE) 2019/1009 sono gli organismi viventi o morti o parti di essi; i rifiuti vegetali dell'industria di trasformazione alimentare e i rifiuti vegetali fibrosi della produzione di pasta di carta grezza e della produzione di carta dalla pasta; i residui della lavorazione di bioetanolo e biodiesel; i rifiuti organici derivanti dalla raccolta differenziata di rifiuti organici; sottoprodotti di origine animale, una volta raggiunto il punto finale; gli additivi necessari a migliorare l'efficienza del procedimento o le prestazioni ambientali del processo di pirolisi o gassificazione.

auspicabile dal punto di vista della protezione dell'aria e può ridurre il beneficio complessivo per il clima derivante dall'apporto del carbone vegetale.

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 [75].

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 [49] [66]. 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 [44]. 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 [45] [83]. Per la Svizzera non si può prevedere in generale un effetto di tipo «*terra preta*³» [49].

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* [75]. 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 [81] 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 [75]. 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 [66]. 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 [70].

3.1.4 Bilancio dei nutrienti

L'incorporazione di carbone vegetale influisce sul bilancio dei nutrienti [44] [45] [49] [66] [75] [83]. 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 [75]. Il carbone vegetale nei suoli può ridurre il dilavamento di nutrienti, con conseguenze positive per piante e acque [32] [75]. 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 [75]. 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 [75].

La combinazione di carbone vegetale e prodotti fitosanitari è valutata in modo ambivalente [50] [74] [75]: 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 [56] [75], ad esempio la composizione della comunità microbica e le relative prestazioni [79]. 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 [33] [39] [58] [78]: 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 [33]. 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. Uno studio recente mostra una diminuzione della biomassa e della densità (numero di individui per m²) dei lombrichi a causa di un effetto tossico dopo l'applicazione di dosi elevate di carbone vegetale prodotto ad alte temperature (principalmente dalla frazione di carbonio pirogenico disciolta). Tuttavia, vi sono indicazioni che questo effetto diminuisca nel tempo.⁴ Alla fine rimane dell'incertezza riguardo agli effetti del carbone vegetale sui lombrichi. Per valutare l'utilizzo del carbone vegetale è quindi indispensabile, da un lato, valutarne la potenziale ecotossicità per i lombrichi e altri organismi del suolo e, dall'altro, l'influenza della bioturbazione dei lombrichi sull'efficacia del carbone vegetale [80].

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 [29] [51] [57]. 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 suolo⁵ può generare le cosiddette «emissioni negative» (cfr. anche il rapporto del Consiglio federale in adempimento del postulato 18.4211 [68]). 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 [66] [75]. 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,

⁴ Per determinare se l'applicazione di carbone vegetale potesse avere un impatto sui lombrichi, è stato avviato uno studio sul campo della durata di cinque anni (2021–2025: Black goes Green – Bodenbiologie. Entwicklung bodenbiologischer Qualitätsindikatoren nach Pflanzenkohleausbringung in einem Praxisversuch, in preparazione). Sebbene nel 2021 non siano stati riscontrati effetti sulla biomassa e sulla diversità dei lombrichi, nella primavera del 2023 sono stati osservati i primi segni di un calo della biomassa e della densità. La frequenza dei campionamenti è stata aumentata nel 2024 e si è riscontrata una biomassa e una densità dei lombrichi significativamente inferiori. I risultati hanno mostrato una diminuzione della biomassa dei lombrichi anecici del 30% e del 28% rispettivamente due e tre anni dopo l'applicazione di 8 t/ha di carbone vegetale sui terreni agricoli. Lo stato attuale della scienza suggerisce che la frazione disciolta del carbone vegetale provoca stress ossidativo in diverse specie di lombrichi. Sebbene la popolazione di lombrichi sembri essersi ripresa dopo quattro anni nello studio Black goes Green, la pressione su queste popolazioni potrebbe essere ridotta utilizzando dosi più basse o concetti integrati per la produzione di carbone vegetale che prevedono la rimozione della frazione disciolta.

⁵ 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.

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 (N_2O) dai suoli arricchiti di carbone vegetale. Un metastudio [32] quantifica la riduzione di N_2O inizialmente al 38 per cento, pur mostrando che, dopo un anno, l'effetto è trascurabilmente ridotto e statisticamente irrilevante. Per il metano (CH_4) si riscontrano riduzioni delle emissioni in particolare per i suoli (periodicamente) allagati. Per i suoli non allagati, che costituiscono un pozzo naturale per il CH_4 presente nell'atmosfera, sembra che attraverso l'azione del carbone vegetale questa funzione sia svolta in misura minore [47]. Uno studio modello di ciclo di vita su diverse opzioni di applicazione del carbone vegetale nell'agricoltura svizzera ha dimostrato che il sequestro del carbonio domina il bilancio dei gas serra. Al contrario, gli ulteriori contributi (produzione e trasporto del carbone vegetale, nonché gli effetti del carbone vegetale sulle emissioni lungo l'utilizzo a cascata) sono modesti, pari a pochi percento [64].

L'effetto del carbone vegetale in termini di riduzione delle emissioni di ammoniaca non è considerato certo [24][54].

3.3 Effetti sconosciuti

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 [62], l'incorporazione di carbone vegetale comporta alcune ripercussioni poco chiare. In particolare, si 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 [75]. 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) [24] [38] [48] [63] [74].

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 [77].

La possibilità che una variazione dell'albedo⁶ 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 [43] [60].

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 CO_2 all'anno per le superfici concimabili (terreni coltivati, pascoli e alpeggi come pure coltivazioni di frutta, ortaggi e vite) [35] [73] [66]. 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. [53] 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 CO_2 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

⁶ 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.

viene stimato a 0,73 Mt CO₂ all'anno.⁷ Una proiezione di Agroscope sugli effetti cumulativi dell'applicazione del carbone vegetale in aziende agricole tipiche e idonee della Svizzera, nell'attuale quadro giuridico, indica un potenziale netto di sequestro fino a 0,3 Mt di CO₂ all'anno [64].

Per sequestrare una tonnellata di CO₂ nei suoli tramite il carbone vegetale, servono circa 0,4 tonnellate di carbone vegetale idoneo. Dal momento che la disponibilità a pagare per le emissioni negative è limitata e i costi di produzione sono elevati (ca. 300–750 CHF/t di carbone vegetale) [61], il sequestro di carbonio nel suolo attraverso il carbone vegetale oggi non è generalmente una pratica edditizia dal punto di vista economico. 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 [28] [31] [46].

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 [57] [59] [82]. Per ogni tonnellata di biomassa, la quantità di emissioni negative ottenibile è da 2 a 5 volte inferiore quando si utilizza il carbone vegetale nei terreni rispetto alla bioenergia con cattura e stoccaggio del carbonio (BE-CCS⁸) [30][34]. Anche la resa energetica ottenibile sotto forma di calore ed elettricità dalla pirolisi della biomassa in carbone vegetale è inferiore rispetto alla combustione diretta [30]. Per il carbone vegetale, i percorsi di trasporto brevi sono particolarmente importanti per ottenere elevati tassi di sequestro netto del carbonio [30].

L'ulteriore opzione di utilizzo come carbone vegetale potrebbe generare o acuire i conflitti di 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 con una decisione del Consiglio federale [69] (misura 5) 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 [71][72]. 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 [42] e che rappresentano solo il 3 per cento circa della superficie agricola. La riuniformazione 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. Il bilancio delle emissioni di gas serra dei prodotti alternativi utilizzati in sostituzione delle perdite di rendimento dovrebbe essere preso in considerazione nel bilancio complessivo [71].

⁷ In alternativa, una parte della biomassa potrebbe essere impiegata in altro modo, al di fuori dell'agricoltura: Keel et al. (2021) [52] stimano a 0,21 Mt CO₂ all'anno il potenziale di sequestro del carbonio per i suoli tecnici nelle aree insediative (alberi di città) e per le strade di nuova costruzione a 0,24 Mt CO₂ all'anno, quando viene aggiunto carbone vegetale.

⁸ BE-CCS è l'acronimo di bioenergia con cattura e sequestro del carbonio (Bioenergy with Carbon Capture and Storage). In questo processo, la CO₂ prodotta durante la generazione di energia dalla combustione di biomassa viene catturata e sequestrata in modo permanente. Ciò consente di generare emissioni negative.

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») [40] [41]. Dall'altra, è necessario integrarvi studi di valutazione dei cicli di vita coerenti [48] [59] [82]. In particolare, mancano analisi comparative dei diversi percorsi di valorizzazione della biomassa disponibile in quantità limitata. Il consorzio nell'ambito del programma di ricerca SWEET⁹ esaminerà in che modo il potenziale sostenibile della biomassa svizzera possa contribuire al meglio all'obiettivo delle emissioni nette pari a zero della Svizzera. 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.

⁹ <https://www.bfe.admin.ch/bfe/it/home/ricerca-e-cleantech/programma-di-promozione-sweet/panoramica-dei-bandi-di-gara/sweet-call-1-2024.html>

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. Il carbone vegetale dovrebbe sempre essere utilizzato a cascata: il carbone vegetale di qualità idonea può inizialmente essere aggiunto al mangime per animali¹⁰ o utilizzato in stalla come lettiera [26] [27] [66][64]. 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 o liquame [75]. I valori empirici mostrano che la quantità di applicazione deve essere piuttosto ridotta e che l'applicazione può essere ripetuta (annualmente) [66]. Secondo l'ORRPChim [12] (allegato 2.6 punto 3.2.4), è consentito l'applicazione solo di piccole quantità (capitolo 2.1). 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 [66]. 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 ettaro¹¹ e presumono che non avvengano effetti negativi sulla qualità del suolo [66]. Tuttavia, oggi mancano le conoscenze a lungo termine per valutare questo aspetto.

La pirolisi della biomassa per ottenere carbone vegetale offre la possibilità di ottenere emissioni negative di elevata permanenza. Oltre all'impiego nei terreni agricoli, associato alle opportunità e ai rischi sopra citati, esistono altri campi di applicazione alternativi del carbone vegetale (ad esempio nel calcestruzzo, nell'asfalto o nei terreni urbani) [67], tenendo sempre conto della Strategia svizzera per la biomassa [18].

Per rispettare il principio di precauzione, l'impiego di carbone vegetale in terreni agricoli 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.

¹⁰ 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° agosto 2025), https://www.fedlex.admin.ch/eli/cc/1966/1637_1694_1679/it (consultato il 29.10.2025).
- [2] **Legge federale del 29 aprile 1998 sull'agricoltura (legge sull'agricoltura; LAgr)**; RS 910.1 (stato 1° gennaio 2025), https://www.fedlex.admin.ch/eli/cc/1998/3033_3033_3033/it (consultato il 29.10.2025).
- [3] **Legge federale del 23 dicembre 2011 sulla riduzione delle emissioni di CO₂ (legge sul CO₂)**; RS 641.71 (stato 1° gennaio 2025), <https://www.fedlex.admin.ch/eli/cc/2012/855/it> (consultato il 29.10.2025).
- [4] **Legge federale del 7 ottobre 1983 sulla protezione dell'ambiente (legge sulla protezione dell'ambiente; LPAmb)**; RS 814.01 (stato 1° aprile 2025), https://www.fedlex.admin.ch/eli/cc/1984/1122_1122_1122/it (consultato il 29.10.2025).
- [5] **Legge federale del 24 gennaio 1991 sulla protezione delle acque (LPAc)**; RS 814.20 (stato 1° agosto 2025), https://www.fedlex.admin.ch/eli/cc/1992/1860_1860_1860/it (consultato il 29.10.2025).
- [6] **Legge del 30 settembre 2016 sull'energia (LEne)**; RS 730.0 (stato 1° ottobre 2025), <https://www.fedlex.admin.ch/eli/cc/2017/762/it> (consultato il 29.10.2025).
- [7] **Ordinanza del 16 dicembre 1985 contro l'inquinamento atmosferico (OIAt)**; RS 814.318.142.1 (stato 1° settembre 2025), https://www.fedlex.admin.ch/eli/cc/1986/208_208_208/it (consultato il 29.10.2025).
- [8] **Ordinanza del 1° luglio 1998 contro il deterioramento del suolo (O suolo)**; RS 814.12 (stato 1° agosto 2025), https://www.fedlex.admin.ch/eli/cc/1998/1854_1854_1854/it (consultato il 29.10.2025).
- [9] **Ordinanza del 1° novembre 2023 sulla messa in commercio di concimi (ordinanza sui concimi; OCon)**; RS 916.171 (stato 1° giugno 2025), <https://www.fedlex.admin.ch/eli/cc/2023/711/it> (consultato il 29.10.2025).
- [10] **Ordinanza del 26 ottobre 2011 concernente la produzione e l'immissione sul mercato degli alimenti per animali (ordinanza sugli alimenti per animali; OsAIA)**; RS 916.307 (stato 1° gennaio 2025), <https://www.fedlex.admin.ch/eli/cc/2011/772/it> (consultato il 29.10.2025).
- [11] **Ordinanza del 30 novembre 2012 sulla riduzione delle emissioni di CO₂ (ordinanza sul CO₂)**; RS 641.71 (stato 1° gennaio 2025) <https://www.fedlex.admin.ch/eli/cc/2012/856/it> (consultato il 02.03.2026).
- [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; ORRPChim)**; RS 814.81 (stato 1° ottobre 2025), <https://www.fedlex.admin.ch/eli/cc/2005/478/it> (consultato il 29.10.2025).
- [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/DE/TXT/?uri=CELEX%3A02019R1009-20241120> (consultato il 29.10.2025).

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/it/strategia-e-piano-dazione-biodiversita> (consultato il 24.02.2026)
- [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/it/politica-climatica> (consultato il 24.02.2026).
- [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/it/publication?id=LDSZ8epwFuG> (consultato il 24.02.2026).
- [17] **UFAM 2022**: pagina web «Compensazione delle emissioni di CO₂», <https://www.bafu.admin.ch/compensazione-delle-emissioni-di-co2> (consultata il 29.10.2025).
- [18] **UFAM, UFAG, UFE, ARE 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.admin.ch/news/message/attachments/15398.pdf> (consultato il 24.02.2026).
- [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/dam/it/sd-web/WdKYtyPVTauw/naehrstoffe_und_verwendungvonduegeninderlandwirtschaft.pdf (consultato il 24.02.2026).
- [20] **UFE 2021**: pagina web «Politica energetica», 22.09.2021, <https://www.bfe.admin.ch/bfe/it/home/politica/politica-energetica.html> (consultata il 29.10.2025).
- [21] **UFAG 2020**: Voraussetzungen und Vorschriften für die Bewilligung von Biokohle, 15.06.2020, Ufficio federale dell'agricoltura (UFAG), Berna. www.blw.admin.ch, contatto: duenger@blw.admin.ch
- [22] **Cercl'Air, 2024**: Vollzugsempfehlung Nr. 31r des Cercl'Air, Schweizerische Gesellschaft der Lufthygiene-Fachleute, Anlagen zur Verkohlung und Vergasung von Holz und anderer fester Biomasse, Version April 2024, <https://cerclair.ch/assets/pdf/31r-2024-04-D-Anlagen-zur-Verkohlung-und-Vergasung-von-Holz.pdf> (consultato il 29.10.2025)
- [23] **Consiglio federale svizzero 2020**: Strategia Suolo Svizzera per una gestione sostenibile del suolo, Informazione ambientale, 70 pagg., <https://www.bafu.admin.ch/it/publication?id=4NTJ1hD1nJV> (consultato il 24.02.2026).

5.3 Bibliografia

- [24] **Agroscope 2023**: Carbone vegetale, Scheda tecnica N. 191. <https://ira.agroscope.ch/it-CH/publication/54625>
- [25] **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>

- [26] **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 29.10.2025).
- [27] **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 29.10.2025).
- [28] **AgroCO2ncept Flaachthal:** Landwirte und Unternehmer aus der Region Flaachthal 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 29.10.2025).
- [29] **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>
- [30] **Bauer, C., Hondeborg, D., Jakobs, A., Myrindinas, M., Olmos van Velden, M., Sacchi, R., Terlouw, T., 2024:** Carbon Dioxide Removal (CDR) – Environmental Life Cycle Assessment. Final report. Paul Scherrer Institut (PSI) and ETH Zürich. <https://www.aramis.admin.ch/Dokument.aspx?DocumentID=72809> (consultato il 29.10.2025)
- [31] **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 29.10.2025).
- [32] **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>
- [33] **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>
- [34] **Brunner C., Knutti, R., 2022:** Potenziale und Kosten der CO₂-Entfernung aus der Atmosphäre in der Schweiz, Schlussbericht, ETH Zürich, <https://www.aramis.admin.ch/Dokument.aspx?DocumentID=69758> (consultato il 29.10.2025)
- [35] **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>
- [36] **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>
- [37] **Cornelissen, G., Sørmo, E., de la Rosa, R.K.A., Ladd, B., 2023:** Flame curtain kilns produce biochar from dry biomass with minimal methane emissions, *Science of The Total Environment*, 903, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.166547>
- [38] **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>
- [39] **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>
- [40] **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 29.10.2025).
- [41] **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 29.10.2025).
- [42] **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>
- [43] **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 29.10.2025).
- [44] **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>
- [45] **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>
- [46] **IWB 2022:** Pflanzenkohle- und Holzschnitzelanlage von IWB für Maispracher Wärmeverbund, Industrielle Werke Basel, https://www.iwb.ch/ueber-uns/newsroom/medienmitteilungen/artikel~_archiv_Pflanzenkohle_und-Holzschnitzelanlage-von-IWB-f-r-Maispracher-W-meverbund- (consultato il 29.10.2025)
- [47] **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>
- [48] **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>
- [49] **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>
- [50] **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>
- [51] **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: 29.10.2025).
- [52] **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 ([Postulat Bourgeois 19.3639](https://www.postulatbourgeois.ch/Postulat_Bourgeois_19.3639)). Rapporto di Agroscope su mandato dell'Ufficio federale dell'ambiente (UFAM). Berna. [soil-carbon-sequestration-in-switzerland-analysis-of-potentials-and-measures.pdf](https://www.ufam.admin.ch/dam/ufam/data/medien/2021/soil-carbon-sequestration-in-switzerland-analysis-of-potentials-and-measures.pdf) (consultato il: 02.03.2026).
- [53] **Keel S. G., Bretscher D., Leifeld J., von Ow A., Wüst-Galley C. 2023:** Soil carbon sequestration potential bounded by population growth, land availability, food production, and climate change. *Carbon Management*, 14, 1, 2023. <https://doi.org/10.1080/17583004.2023.2244456>
- [54] **Kupper, T. 2025:** Einsatz von Pflanzenkohle in der Hofdüngerkaskade zur Reduktion von Ammoniakemissionen, Hochschule für Agrar-, Forst- und Lebensmittelwissenschaften HAFL, Zollikofen, 04.02.2025. https://www.ammoniak.ch/files/Downloads/Dokumente_Beurteilung_Faktenblaetter/33_Pflanzenkohle_Emissionsreduktion_Ammoniak_20250502_20251102.pdf
- [55] **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.

- [56] **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>
- [57] **Lehmann J. et al. 2021:** Biochar in climate change mitigation, *Nature Geoscience* 14, 883–892, <https://doi.org/10.1038/S41561-021-00852-8>
- [58] **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>
- [59] **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>
- [60] **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>
- [61] **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 29.10.2025).
- [62] **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>
- [63] **Rodrigues L., Budai A., Elsgaard L., Hardy B., Keel S.G., Mondini C., Plaza C., Leifeld J. 2023:** The importance of biochar quality and pyrolysis yield for soil carbon sequestration in practice. *Eur J Soil Sci.* 2023;74:e13396, <https://doi.org/10.1111/ejss.13396>
- [64] **Roesch, A., Vaucher, N., Mantonanaki, A., Stüssi, M., Lansche, J., Hagemann, N., 2025:** Life cycle assessment of different biochar application scenarios in Swiss agriculture, *Agroscope, Zürich*, Commissioned by the Federal Office for the Environment (FOEN), *Agroscope Science*, 210, 2025, 1-108. <https://doi.org/10.34776/as210e>
- [65] **Schimmelpennig 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>
- [66] **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>
- [67] **Schönborn, A., Krähenbühl, N., 2023:** Biochar Beyond Soils, Investigating potential NET applications for promising biochar feedstocks in material Applications, Final Report, ZHAW, <https://www.aramis.admin.ch/Default?DocumentID=71227&Load=true> (consultato il 29.10.2025)
- [68] **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 29.10.2025)
- [69] **Schweizerischer Bundesrat 2023:** Kohlenstoffsequestrierung in Böden. Bericht des Bundesrats in Erfüllung des Postulats 19.3639 Bourgeois vom 18. Juni 2019. Bern, 29.03.2023. <https://www.parlament.ch/de/ratsbetrieb/suche-curia-vista/geschaefft?AffairId=20193639> und <https://www.parlament.ch/centers/eparl/curia/2019/20193639/Bericht%20BR%20D.pdf> (consultato il 29.10.2025)
- [70] **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://biochar-international.org/wp-content/uploads/2019/09/Stockholm-Biochar-Project.pdf> (consultato il 29.10.2025)
- [71] **Tanzer S., Ramirez A. 2019:** When are negative emissions negative emissions? *Energy and Environmental Science*, 4, <https://doi.org/10.1039/C8EE03338B>
- [72] **The European Biochar Certificate (EBC) and Positive list of biomass feedstock, 2025.** <https://www.carbon-standards.com/de/standards/service-386-herstellung-von-pflanzenkohle.html> (consultato il 29.10.2025)
- [73] **Thees O., Burg V., Erni M., Bowman G., Lemm R. 2017:** Biomasspotenziale 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 29.10.2025).
- [74] **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 29.10.2025).
- [75] **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 29.10.2025).
- [76] **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, 14.09.2020. <https://t1p.de/verenum2020> (consultato il 29.10.2025)
- [77] **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/qcbb.12182>
- [78] **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)
- [79] **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>
- [80] **Wang, J., Yang, Y., Wu, J., Zhao, K., & Zhang, X. (2024):** The interaction between biochar and earthworms: Revealing the potential ecological risks of biochar application and the feasibility of their co-application. *Science of The Total Environment*, 950, 175240. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.175240>
- [81] **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>
- [82] **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>
- [83] **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>