



DIPARTIMENTO DI SCIENZE AGRARIE ALIMENTARI E AMBIENTALI

CORSO DI LAUREA IN: SCIENZA E TECNOLOGIE AGRARIE

CURRICULUM IN VITICOLTURA ED ENOLOGIA

USO DEL BIOCHAR IN VITICOLTURA
Analisi dell'influenza e dell'efficacia nei vigneti

USE OF BIOCHAR IN VITICULTURE
Analysis of influence and effectiveness in vineyards
TIPO TESI: compilativa

Studente:
RAFFAELE PIGNOTTI

Relatore:
PROF.SSA ORIANA SILVESTRONI

ANNO ACCADEMICO 2023-2024

SOMMARIO

ELENCO DELLE TABELLE.....	4
ELENCO DELLE FIGURE	5
ACRONIMI E ABBREVIAZIONI	6
INTRODUZIONE E SCOPO DELLA TESI	7
MATERIALI E METODI	10
RISULTATI.....	11
CAPITOLO 1 IL BIOCHAR	16
1.1 Metodo di produzione del biochar	16
1.2 Forme disponibili e possibili difficoltà nell'incorporazione nel terreno.....	18
CAPITOLO 2 INFLUENZA DEL BIOCHAR SUGLI ASPETTI QUANTITATIVI E QUALITATIVI DI VITE, UVA E VINO	20
2.1 Influenza del biochar sulla vite	20
2.2 Influenza del biochar sull'uva	21
2.3 Influenza del biochar sul vino.....	24
CAPITOLO 3 INFLUENZA DEL BIOCHAR SUGLI CAPACITÀ IDRICA E SULLA FERTILITÀ DEL SUOLO	26
3.1 Capacità di ritenzione idrica	26
3.2 Fertilità del suolo	29
CAPITOLO 4 INFLUENZA DEL BIOCHAR SUGLI INQUINANTI DEL TERRENO	33
4.1 Idrocarburi policiclici aromatici.....	33
4.2 CO ₂ e N ₂ O.....	36
4.3 Metalli pesanti.....	37
CONCLUSIONI	39
BIBLIOGRAFIA	41

ELENCO DELLE TABELLE

Tabella 1: Tabella riassuntiva dei 13 studi selezionati.....	12
Tabella 1-1: Contenuto percentuale dei prodotti di pirolisi a seconda del tipo di processo	16
Tabella 2-1: Comportamento produttivo di viti di Pinot nero in risposta ad applicazioni di biochar in vigneti irrigui in due diverse località dell’Oregon (USA).....	22
Tabella 2-2: : Composizione degli acini di Pinot nero in risposta ad applicazioni di biochar in vigneti irrigui in due diverse località dell’Oregon (USA).	22
Tabella 2-3: Risposte dei composti fenolici della buccia delle bacche e dei semi ai trattamenti di applicazione del biochar in due diverse località dell’Oregon (USA).	23
Tabella 2-4: Valori medi di glucosio [g/L], fruttosio [g/L], pH, acidità titolabile (TA) [g/L] e azoto assimilabile da lieviti (APA) [mg/L] per viti allevate su substrato biochar-compost (BCS), e in file di controllo (Co) per gli anni 2019 – 2022	23
Tabella 2-5: Risposte dei fenoli del vino ai trattamenti di applicazione del biochar in due diverse località dell’Oregon (USA).	24
Tabella 2-6: Effetti dei substrati sul contenuto di zuccheri (° Brix) e pH nei mosti	25
Tabella 4-1: pH, rapporto C/N e concentrazione dei metalli pesanti nel periodo di tempo 2010/2014.....	37
Tabella 4-2: Evoluzione dal 2010 al 2014 della concentrazione dei metalli disponibili nel suolo di un vigneto di Merlot in Toscana trattato con Biochar a due diverse dosi rispetto ad un controllo non trattato	38

ELENCO DELLE FIGURE

Figura 1: Modelli di variabilità della produzione in vigneto in California. A) 2017. B) 2018, C) 2019, D) media dei tre anni.....	8
Figura 2: Valori medi delle analisi chimiche condotte in un vigneto in California	8
Figura 1-1: Processo di pirolisi nella produzione di biochar	17
Figura 1-2: Distribuzione del biochar in un vigneto sperimentale nell'azienda Antinori a Montepulciano	18
Figura 3-1: Curve di ritenzione idrica del suolo: biochar puro e trattamenti sperimentali (C, B, BB).	27
Figura 3-2: Proprietà fisiche e chimiche dei terreni modificati e non modificati provenienti da due differenti località in Oregon (USA).....	30
Figura 3-3: Contenuto di nutrienti nel suolo nel trattamento di controllo (C) e nei trattamenti con biochar (B e BB) nel 2010-2013.	31
Figura 3-4: Nutrienti del terreno in due diverse località in Oregon (USA)	32
Figura 4-1: I più importanti parametri analitici del biochar per EBC.....	34
Figura 4-2: Concentrazioni dei 16 IPA dell'EPA statunitense	35

ACRONIMI E ABBREVIAZIONI

APA	Azoto prontamente assimilabile.
AWC	Available Water Capacity.
BC	Biochar.
CO ₂	Anidride carbonica.
CSC	Capacità di scambio cationico.
DOC	Denominazioni d'Origine Controllata.
EBC	European Biochar Certificate.
GWC	Gas-water contact.
IBI	International Biochar Initiative.
IPA	Idrocarburi policiclici aromatici.
N ₂ O	Protossido di azoto.
SO	Sostanza organica.
TA	Acidità titolabile.
TOC	Carbonio organico totale
TON	Azoto organico totale.
UE	Unione Europea.

INTRODUZIONE E SCOPO DELLA TESI

La variabilità sito-specifica presente nei vigneti concorre a diversificare numerose caratteristiche degli appezzamenti vitati in termini di attributi del suolo, vigore della vite, stato idrico e nutrizionale, produttività e composizione dei grappoli. La variabilità di vigore del vigneto condiziona la sua produzione e la qualità del frutto, rappresentando un problema importante e complesso per i viticoltori e giustificando una costante ricerca sulle nuove strategie di gestione differenziale.

La sfida per i viticoltori è quella di comprendere l'entità della variabilità e decidere se mitigarla attraverso una gestione sito-specifica del vigneto o trarne vantaggio diversificando l'offerta di prodotti. Per questo motivo molti studi hanno analizzato la variabilità sito-specifica dei vigneti, al fine di ottenere le mappe di vigore per correlarle con la capacità produttiva e la composizione dell'uva. In particolare, Sams et al. (2022) hanno analizzato la variazione spazio-temporale in un vigneto di Cabernet Sauvignon in California ottenendo nell'arco di un triennio interessanti mappe di produzione (Figura 1) che hanno permesso di delimitare annualmente aree a diversa capacità produttiva, inizialmente ripartita in 5 classi. La buona ripetibilità nel tempo della variabilità spaziale ha permesso di creare una mappa della produzione media triennale che viene riportata nella Figura 1 D. Per collegare le informazioni sulla variabilità della capacità produttiva alle conoscenze sulla variabilità della composizione chimica dell'uva, è stato necessario semplificare lo schema operativo fino a portare da 5 a 2 le classi di capacità produttiva da associare alle valutazioni della composizione delle uve (Figura 2). I risultati ottenuti da Sams et al. (2022) mostrano che la distribuzione spaziale della capacità produttiva del vigneto ha un pattern molto simile a quello della distribuzione spaziale di antociani, tannini polimerici, quercitina glicosidata, acido malico e azoto prontamente assimilabile dai lieviti (APA). In particolare, le zone dove il Cabernet Sauvignon allevato a contropalliera ha la capacità produttiva più alta (compresa tra 5,9 e 7,5 kg/m a seconda degli anni), rispetto a quelle in cui la produzione resta meno alta (compresa tra 4,9 e 5,8 kg/m a seconda degli anni), presentano le più basse concentrazioni di antociani, tannini polimerici, quercitina glicosidata e i livelli più alti di acido malico e di APA.

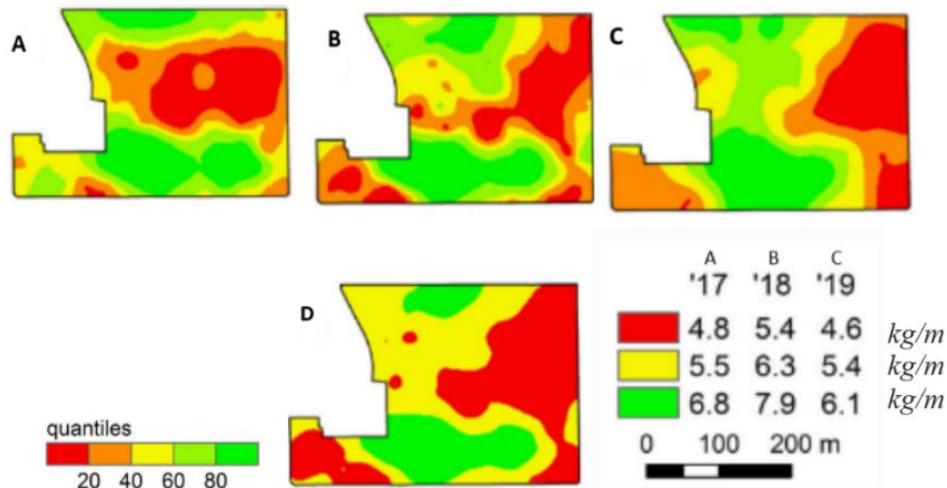


Figura 1, Modelli di variabilità della produzione in vigneto in California. A) 2017, B) 2018, C) 2019, D) media dei tre anni. I dati della mappa sono stati classificati come quantili (20° percentile) (Sams et al. 2022).

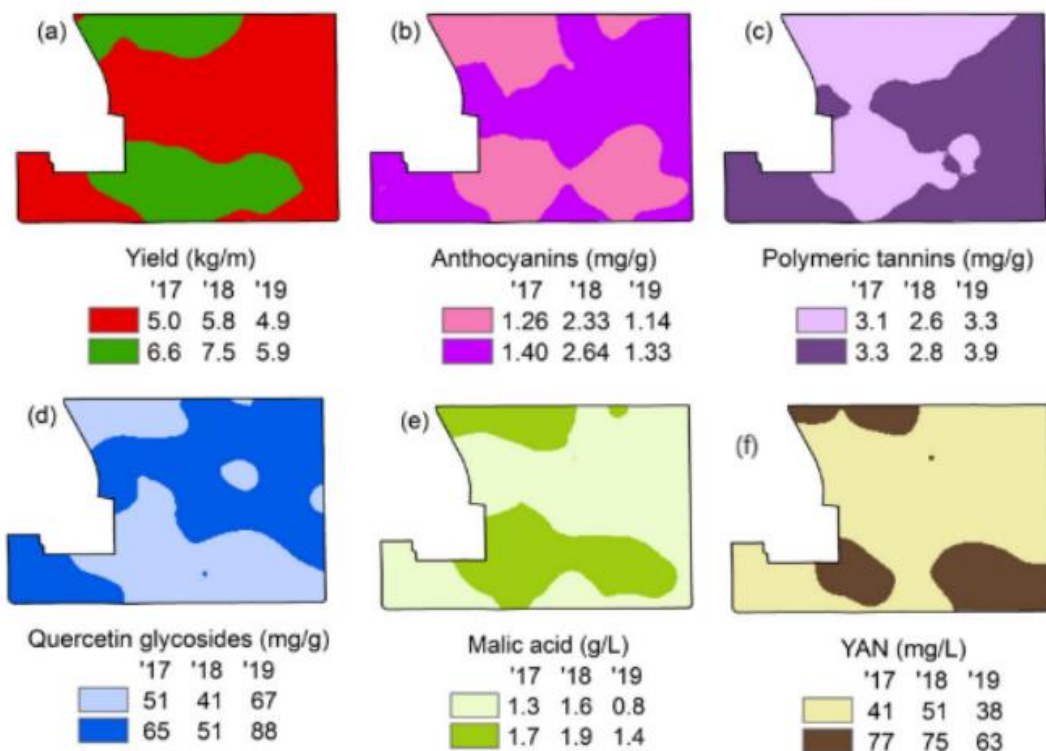


Figura 2, Valori medi delle analisi chimiche condotte in un vigneto in California: (a) produzione, (b) antociani, (c) tannini polimerici, (d) glucosidi della quercetina, (e) acido malico e (f) azoto assimilabile dal lievito (APA) (Sams et al. 2022).

L'esempio sopra riportato mostra una variabilità stabile all'interno di un vigneto, una caratteristica che gli agricoltori possono sfruttare per intervenire nelle zone con una bassa produttività o con una bassa qualità dell'uva attraverso tecniche di viticoltura di precisione. Nel caso sopradescritto vi è una condizione di eccesso di vigore che può essere gestita intervenendo sulle zone più produttive con defogliazioni, diradamenti, riduzione dell'apporto idrico e/o di fertilizzanti. Esistono già in commercio macchine rateo-variabili per la defogliazione e la distribuzione di concimi. Attualmente la concimazione rateo-variabile permette, in base alle mappe di vigore del vigneto e software moderni, di regolare la dose di concime da distribuire. Tuttavia, l'aumento dell'apporto di concime nelle zone meno fertili del vigneto non è sempre in grado di incrementare la vigoria e la capacità produttiva delle viti. Spesso, infatti, i problemi di basso vigore e bassa capacità produttiva delle viti sono legati ad una scarsa disponibilità idrica. Prove condotte in California hanno mostrato un'elevata efficacia dell'irrigazione rateo-variabile, che richiede impianti irrigui decisamente più complessi dei tradizionali, nel ridurre la variabilità vegetativa, produttiva e qualitativa presente nel vigneto.

Nei vigneti delle Marche e di buona parte dell'Italia centrale è spesso presente un'importante variabilità sito-specifica che può essere difficilmente risolta con il semplice ricorso alla concimazione rateo-variabile, dato che è spesso associata a scarsa disponibilità idrica per una numerosa serie di cause (scarsa profondità del suolo e/o bassa fertilità microbiologica, scarsa capacità di ritenzione idrica, ecc.). In questi contesti risulta spesso difficile ricorrere all'irrigazione per mancanze infrastrutturali e diviene di grande interesse cercare strategie alternative per migliorare la capacità di ritenzione idrica del suolo.

Negli ultimi anni è incrementata l'attività di ricerca sugli ammendanti di nuova generazione, tra questi grande interesse è riservato al biochar. Il presente lavoro si propone di riassumere i dati della letteratura scientifica al fine di analizzare l'influenza e l'efficacia del biochar come ammendante del terreno in viticoltura.

MATERIALI E METODI

Con lo scopo di analizzare gli effetti e l'efficacia dell'utilizzo del biochar in viticoltura, in questo lavoro di tesi sono stati indagati i risultati ottenuti e pubblicati in diversi lavori scientifici che hanno messo in relazione l'applicazione di questo ammendante e le modificazioni di diversi parametri del vigneto. In dettaglio, è stata effettuata una ricerca sistematica della letteratura presente sul database Scopus (ricerca effettuata fino al 15 settembre 2024) utilizzando i seguenti termini: "biochar" e "vineyard". Gli articoli emersi dalla ricerca sono stati analizzati ponendo l'attenzione sui diversi effetti che il biochar apporta al vigneto e al terreno:

- Aspetti qualitativi e quantitativi di vite, uva e vino
- Ritenzione idrica
- Fertilità del suolo
- Inquinamento

Sulla base dei parametri testati è stata fatta una sintesi dei risultati descritti negli articoli.

RISULTATI

La ricerca effettuata con la combinazione delle due parole chiave “biochar” and “vineyard” ha portato ad ottenere un totale di 86 lavori (76 articoli, 2 review, 1 capitolo di libro, 6 contributi a congressi, uno dei quali come lavoro di sintesi), il primo dei quali risalente al 2011.

L’analisi delle pubblicazioni ha riguardato esclusivamente articoli e review, andando ad eliminare la gran parte degli articoli incentrati sulle tecniche di produzione di biochar anche a partire da residui di potatura del vigneto per focalizzare l’attenzione su quei casi in cui il biochar è stato impiegato come ammendante nel vigneto.

Al termine di queste verifiche abbiamo selezionato 13 articoli pubblicati tra il 2014 e il 2023 e che riguardavano prove sperimentali condotte in vigneti dislocati in diverse parti del mondo. In particolare, sei delle tredici prove sperimentali riportate nella presente tesi sono state condotte in Italia e, precisamente in un vigneto della Toscana, due negli Stati Uniti, due in Svizzera, uno in Canada, uno in Ungheria e uno in Germania.

In tabella 1 sono riportati gli autori il periodo di durata degli studi, la regione dove questi sono stati condotti, il clima e il tipo di terreno, le cultivar di vite e, ove disponibili, i portinnesti analizzati, la quantità e le diverse applicazioni di biochar confrontate con terreni di controllo ed infine i risultati ottenuti.

Tabella 1, Tabella riassuntiva dei 13 studi selezionati, con gli autori, il periodo di durata degli studi, la regione dove questi sono stati condotti, il clima e il tipo di terreno, le cultivar di vite e, ove disponibili, i portinnesti analizzati, la quantità e le diverse applicazioni di biochar confrontate con terreni di controllo ed infine i risultati ottenuti.

ARTICOLO	ANNO	LUOGO	CULTIVAR e PORTAINESTO	QUANTITA' DI BIOCHAR	TIPOLOGIA DI BIOCHAR	RISULTATI
Baronti et al., 2014.	2009-2011	Marchesi Antinori srl Montepulciano TERRENO acido poco profondo sabbioso-argilloso piovosità 400 mm temperatura media 16,3°C.	CV: Merlot 181 PI: 3309 Couderc	23 t/ha nel 2009 B 22t/ha nel 2009 e 22 t/ha nel 2010 BB NON trattato C	BC prodotto a 500 C° da tralci di potatura di un frutteto	densità diminuita contenuto d'acqua in BB e B più alto rispetto a C potenziale idrico fogliare meno negativo
Schmidt et al., 2014.	2011-2013	Ayent, Valais, Switzerland temperatura media 10,9C° precitazione medie 579 mm suolo franco	Pinot nero	10 t/ha B 63 t/ha BC 55 t/ha C	80% di trucioli di legno duro vario 20% di trucioli di legno di conifere La pirolisi a 750°C	diametro dei germogli = pH del mosto = zuccheri = acido tartarico, malico, acidità volatile e totale, glicerina, rapporto glucosio/fruttosio, APA =
Verhoeven et al., 2014.	2010-2012	Lodi, contea di Sacramento, CA terreno argilloso-sabbioso clima mediterraneo T° media 14,2 precipitazioni 400 mm (secondo anno siccitoso)	Pinot nero	10 t/ha incorporato a 15 cm	Il biochar WS prodotto da gusci di noci a 900°C. Il biochar PC è stato prodotto tra 500°C e 650°C utilizzando scarti della lavorazione del legname di pino	pH terreno aumentato emissioni N2O =

Genesio et al., 2015.	2009-2011	Marchesi Antinori srl Montepulciano TERRENO acido poco profondo sabbioso-argilloso la piovosità 400 mm temperatura media 16,3°C.	CV: Merlot 181 PI: 3309 Couderc	23 t/ha nel 2009 B 22t/ha nel 2009 e 22 t/ha nel 2010 BB NON trattato C	BC prodotto a 500 C° da tralci di potatura di un frutteto	contenuto di acqua aumentato acqua disponibile aumentato peso medio grappoli aumentato n° grappoli = dimensioni bacche aumentato composizione bacche =
Mackie et al., 2015.	2011-2012	Ithaka Institute, Canton Vallese, Svizzera. Terreno Sabbioso-argilloso Piovosità 550 mm Temperatura media 11.4 °C	CV: Pinot nero	1-controllo 2-biochar 8 t/ha 3-compost 55 t/ha 4- biochar e compost 63 t/ha (8 e 55)	biochar 80% di trucioli di legno duro e 20% di trucioli di legno di conifere	Biodisponibilità del Cu non influenzata Attività microbica non influenzata
Rombolà et al., 2015.	2009-2011	Marchesi Antinori srl Montepulciano TERRENO acido poco profondo sabbioso-argillosa piovosità 400 mm temperatura media 16,3°C.	CV: Merlot 181 PI: 3309 Couderc	23 t/ha nel 2009 B 22t/ha nel 2009 e 22 t/ha nel 2010 BB NON trattato C	BC prodotto a 500 C° da tralci di potatura di un frutteto	IPA dopo un anno aumentati IPA dopo 3 anni diminuiti
Maienza et al., 2017.	2009-2011	Marchesi Antinori srl Montepulciano TERRENO acido poco profondo sabbioso-argillosa piovosità 400 mm temperatura media 16,3°C.	CV: Merlot 181 PI: 3309 Couderc	23 t/ha nel 2009 B 22t/ha nel 2009 e 22 t/ha nel 2010 BB uno NON trattato C	BC prodotto a 500 C° da tralci di potatura di un frutteto	pH suolo aumentato C/N aumentato Na, Mg, K scambiabili = P, Ca aumentati Pb aumentato Cu aumentato leggermente disponibilità metalli pesanti diminuita leggermente
Horel et al., 2018.	Marzo /ottobre 2017	nell'altopiano del Balaton, in Ungheria terreno sabbioso-limoso e roccioso		3,5 t/ha il biochar il 17 marzo 2017. profondità di 5–20 cm,	il biochar è stato prodotto da scarti di grano utilizzando la tecnologia Pyreg-reactor a 600°C.	

Rombolà et al., 2019.	2009-2011	Marchesi Antinori srl Montepulciano TERRENO acido poco profondo sabbioso-argilloso piovosità 400 mm temperatura media 16,3°C.	CV: Merlot 181 PI: 3309 Couderc	23 t/ha nel 2009 B 22t/ha nel 2009 e 22 t/ha nel 2010 BB NON trattato C	BC prodotto a 500 C° da tralci di potatura di un frutteto	IPA aumentati
Garcia-Jaramillo et al., 2021.		due siti la Willamette Valley, Woodhall, Oregon precipitazioni medie annue comprese tra 1016 e 1270 mm, temperatura media annua dell'aria di 10-12 °C terreno sabbioso-argilloso la Rogue Valley, Cedars, Oregon precipitazione media annua è compresa tra 457 e 889 mm temperatura media annua dell'aria compresa tra 10 e 12 ° terreno sabbioso-argilloso	CV: pinot nero PI: 101-14 Mgt	Sono stati applicati quattro trattamenti su vitigni esistenti in ogni località: (NT) nessun biochar-nessuna lavorazione; (B0) nessun biochar + lavorazione; (B18) 18 t/habiochar + lavorazione del terreno; (B35) 35 t/ha biochar + lavorazione. Il biochar è stato sparso sul terreno e poi incorporato a 10 cm utilizzando una piccola fresa meccanica rotativa.	prodotto tramite gassificazione a 750–950 °C chimica, il biochar è stato essiccato in forno per 24 ore a 70 °C, macinato con un frullatore per uso alimentare	tannini nei vini diminuiti pH aumentato disponibilità C e N aumentata uva (resa, componenti bacca) invariata
Baronti et al., 2022.	2009-2011	Marchesi Antinori srl Montepulciano TERRENO acido poco profondo sabbioso-argilloso piovosità 400 mm temperatura media 16,3°C.	CV: Merlot 181 PI: 3309 Couderc	23 t/ha nel 2009 B 22t/ha nel 2009 e 22 t/ha nel 2010 BB uno NON trattato C	BC prodotto a 500 C° da tralci di potatura di un frutteto	pH aumentato contenuto di acqua aumenta
Sharifi et al., 2022.	2017-2020	Valle centro-meridionale dell'Okanagan presso il Summerland Research and	CV: Merlot 181 PI: SO4	B+Com 1:1 di biochar 22 t/ha (peso secco) ogni due anni prima della semina	biochar composto da trucioli di	C aumentato N invariato crescita della vite, la resa

		Development Centre of Agriculture and Agri-Food Canada, Summerland, BC, Canada. Inverni freddi TM -0,5°C estati calde TM 20°C precipitazioni 346 mm		della coltura di copertura. Il B+Com è stato miscelato con i primi 5–7 cm di terreno	conifere T di pirolisi 500°C	dell'uva, la qualità del frutto invariato peso tralci diminuito
Schneider et al., 2023.	2020/2022	JKI Geilweilerhof a Siebeldingen, Germania	CV: Calardis Musqué PI: SO4	due ammendanti organici (OA) distribuiti mediante miscelazione superficiale con uno scalpello, seguita dall'incorporazione profonda fino a 0,6 m con una vangatrice. tre trattamenti sperimentali: Compost di biochar (BCS) – 30 t/ha. Compost di rifiuti verdi (GC) 50 t/ha Controllo (Co) – nessuna incorporazione		glucosio e fruttosio = pH vino = acidità totale =

Capitolo 1

IL BIOCHAR

Il biochar (biological charcoal) è definito come materia organica decomposta termicamente, prodotta in condizioni di bassa concentrazione di ossigeno (pirolisi). Gli usi del biochar sono numerosissimi e vanno dalla produzione di calore ed energia, alle applicazioni metallurgiche, la produzione di materiali da costruzione, l'uso medico, fino ad arrivare all'applicazione in agricoltura come ammendante (Weber et al, 2018).

1.1 Metodo di produzione del biochar

Le proprietà della biomassa carbonizzata dipendono dalle materie prime e dalle condizioni di processo. La selezione di condizioni adatte per produrre un char con le proprietà desiderate richiede quindi la conoscenza dei fattori di influenza, sia quantitativa che qualitativa (Tabella 1-1). Anche se il carbone vegetale è il tipo di biochar più comune e più noto, tutti i materiali biogenici possono essere convertiti in biochar. La pirolisi è la decomposizione termochimica di un combustibile a temperature elevate e senza l'aggiunta di ossigeno esterno.

Tabella 1-1. Contenuto percentuale dei prodotti di pirolisi a seconda del tipo di processo (Verheijen 2009)

Metodi	Condizioni	Frazione liquida	Biochar	Syngas
<i>Pirolisi rapida</i>	Temperatura moderata ($\approx 500^{\circ}\text{C}$), breve tempo di permanenza del vapore caldo (1 s)	75%	12%	13%
<i>Pirolisi istantanee</i>	Temperatura moderata ($\approx 500^{\circ}\text{C}$), breve tempo di permanenza del vapore caldo (10-20 s)	50%	20%	30%
<i>Pirolisi lenta (carbonizzazione)</i>	Bassa temperatura ($\approx 400^{\circ}\text{C}$), tempo di permanenza molto lungo delle sostanze solide	30%	35%	35%
<i>Gassificazione</i>	Alta temperatura ($\approx 800^{\circ}\text{C}$), tempo di permanenza lungo del vapore	5%	10%	85%

Il processo di produzione inizia con l'essiccazione della biomassa, che viene successivamente ulteriormente riscaldata in modo che la materia volatile venga rilasciata dal solido. I composti volatili rilasciati possono formare gas permanenti (come CO₂, CO, CH₄ e H₂) o composti organici condensabili (ad es. metanolo e acido acetico). Le reazioni successive includono cracking e polimerizzazione e possono modificare l'intero spettro di prodotti finali, rappresentati da gas permanenti (syngas), una o più fasi liquide (acqua e catrame) e un residuo solido; nella produzione di biochar, tuttavia, l'interesse principale è il prodotto solido carbonioso.

Il biochar agricolo viene in genere prodotto tramite pirolisi lenta, con temperature tipiche intorno ai 500 °C; la biomassa è composta principalmente dai tre composti organici cellulosa, emicellulosa e lignina. Il processo principale durante la carbonizzazione è la decomposizione termica della struttura della biomassa, che determina il distacco di gruppi funzionali e il rilascio di ossigeno e idrogeno (Figura 1-1). I biochar con bassi rapporti H/C (corrispondenti a un grado più elevato di carbonizzazione) contengono meno gruppi funzionali e più strutture aromatiche rispetto ai carboni a bassa temperatura: sono proprio le strutture aromatiche che possedendo un'elevata stabilità termodinamica sono importanti per le applicazioni in cui è richiesta la stabilità a lungo termine del biochar, come la funzione di ammendante del suolo (Weber et al, 2018).

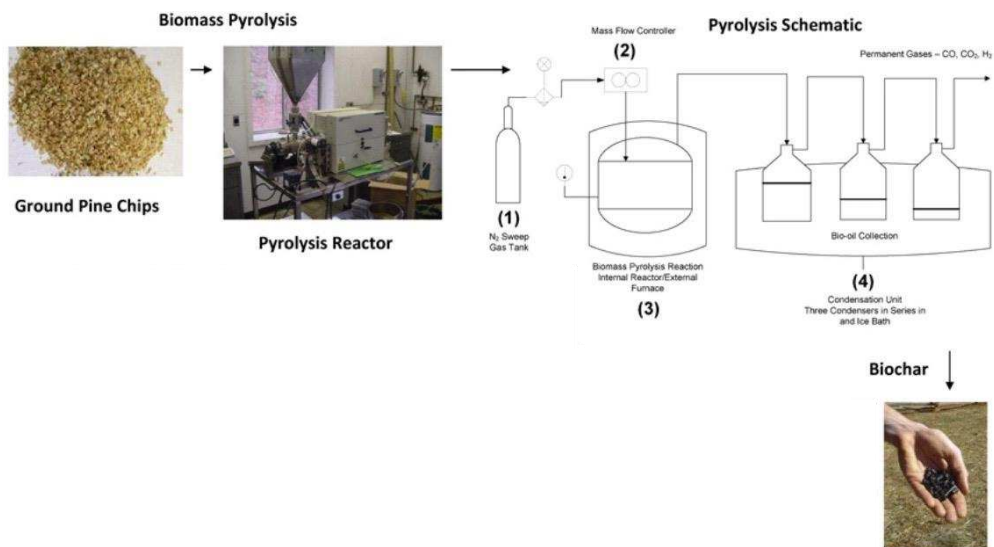


Figura 1-1. Processo di pirolisi nella produzione di biochar (Kastner et al., 2012)

1.2 Forme disponibili e possibili difficoltà nell'incorporazione nel terreno

Il biochar solido, per poter essere incorporato nel suolo, deve essere distribuito uniformemente sul terreno, che viene poi lavorato secondo le necessità e situazioni. In alcuni casi, come frutteti e altre colture perenni, può essere applicato alla superficie del suolo e, preferibilmente, ricoperto con altri materiali organici o applicati come miscela di compost o pacciamatura oppure applicato come impasto liquido se finemente macinato (su larga scala, questo potrebbe essere realizzato tramite una trinciatrice di tipo idraulica). Indipendentemente dal metodo di applicazione, è importante essere cauti quando lo si maneggia secco, in quanto molto polveroso e non deve mai essere distribuito in condizioni ventose, questo può essere facilmente risolto bagnandolo leggermente prima dell'applicazione (Dias et al. 2010).

In generale, ci sono tre approcci principali per l'applicazione del biochar nel suolo: i) incorporazione nello strato superficiale, ii) applicazione in profondità e iii) top-dressing. Nell'incorporazione nello strato superficiale, il biochar può essere applicato da solo o combinato con compost o letame e viene miscelato più o meno omogeneamente in tutto lo strato superficiale (nella maggior parte dei terreni arabili da 0-15/30 cm di profondità).

L'applicazione in profondità permette una maggiore omogeneizzazione del biochar dello strato superficiale del terreno durante l'aratura successiva. Si ritiene che il posizionamento del biochar nella rizosfera sia più vantaggioso per la crescita delle colture e meno soggetto a erosione. L'applicazione può essere effettuata tramite sistemi pneumatici oppure applicando il biochar in solchi o trincee e successivamente livellando la superficie del terreno (Figura 1-2).



Figura 1-2. Distribuzione del biochar in un vigneto sperimentale nell'azienda Antinori a Montepulciano (da Baronti et al., 2014)

Il top-dressing consiste nello spargimento del biochar (principalmente la frazione di polvere) sulla superficie del terreno e nell'affidarsi a processi naturali per l'incorporazione del biochar nello strato superficiale del terreno. Questa forma di applicazione viene presa in considerazione principalmente per quelle situazioni in cui l'incorporazione meccanica non è possibile, ad esempio nei sistemi di semina diretta, in foreste o pascoli. Uno svantaggio evidente è il rischio di erosione da parte dell'acqua e del vento, nonché per la salute umana (inalazione) e gli impatti su altri componenti.

Il termine "polvere" è riferito alla frazione fine e ultrafine del biochar, comprendente vari composti organici e inorganici di distinte dimensioni delle particelle nell'intervallo di dimensioni micro e nano. La materia prima e le condizioni di pirolisi sono fattori primari che influenzano le proprietà della polvere di biochar, tra cui il tipo e la dimensione delle sue particelle, nonché la proporzione tra particelle micro e nano dell'ecosistema (ad esempio, acque superficiali, superfici fogliari, ecc.). La frazione di polvere del biochar è un problema per tutte le strategie di applicazione durante le fasi di stoccaggio, movimentazione e applicazione del biochar.

Sia l'incorporazione dello strato superficiale che il top-dressing possono essere adatte per applicazioni "una tantum", ogni pochi anni o ogni anno. Ad esempio, per alcuni effetti specifici come la disponibilità di nutrienti o l'effetto di calcinazione, un'applicazione più frequente può essere più vantaggiosa per il suolo e/o meno dannosa per l'ambiente (Verheijen 2009).

Recentemente è stata messa a punto da un'azienda toscana una formulazione liquida di biochar che rende molto più agevole l'applicazione di questo ammendante, che viene ottenuto da una innovativa tecnologia di pirogassificazione: il prodotto della parziale combustione della biomassa all'interno del reattore viene meccanicamente raccolto dal fondo dello stesso per essere micronizzato e poi messo in soluzione (<https://biodea.bio/prodotto/biochar-black-fluid/>). Nel caso del vigneto se ne consiglia l'uso in fertirrigazione o la distribuzione sul suolo a mezzo di irroratrice, che effettui almeno 4-6 interventi (solitamente 2 interventi annui: in autunno, dopo la vendemmia e in primavera, a ridosso del germogliamento) con 100-200 l/ha di prodotto per ciascun intervento dosando il prodotto allo 0,2%.

Capitolo 2

INFLUENZA DEL BIOCHAR SUGLI ASPETTI QUANTITATIVI E QUALITATIVI DI VITE, UVA E VINO

Numerosi studi concordano sui potenziali cambiamenti che l'applicazione di biochar, come ammendante, potrebbe apportare ai terreni agricoli: miglioramento della struttura del suolo e dei nutrienti in esso contenuti, aumento della capacità di ritenzione idrica, modifica e miglioramento dell'habitat per i microrganismi del suolo, controllo dell'acidità del suolo, mitigazione del cambiamento climatico attraverso la riduzione quantitativa di ossido nitroso emesso, miglior contributo al sequestro di carbonio nei vigneti (Baronti et al, 2014).

Queste potenziali modifiche influenzerebbero la produzione e la qualità dell'uva, anche se i risultati ottenuti in campo sono talvolta discordanti: nonostante molti esperimenti abbiano dimostrato effetti positivi dell'applicazione del biochar sulle colture, la maggior parte di essi si riferisce a esperimenti a breve termine con risultati spesso di natura transitoria (Quilliam et al., 2012). Inoltre, molti studi in letteratura hanno concentrato la loro attenzione sull'effetto agronomico del biochar nelle colture erbacee, mentre esistono pochi studi dedicati alle colture arboree, a causa delle difficoltà nell'effettuare esperimenti rappresentativi in ambiente controllato e del tempo piuttosto lungo che diviene necessario per produrre effetti rilevabili (Lorenz et al, 2014).

La qualità delle uve ha una particolare rilevanza per la viticoltura ed è notoriamente molto influenzata dal decorso meteorologico annuale e dalle tecniche colturali applicate. Poiché la redditività dei vigneti dipende in buona parte dalla quantità e dalla qualità delle loro uve, l'influenza di un ammendante sul comportamento produttivo e sulla qualità delle uve è un fattore cruciale per il viticoltore. Diversi studi hanno analizzato gli effetti su bacche, viti e qualità del vino in rapporto all'applicazione di biochar nel suolo.

2.1 Influenza del biochar sulla vite

Uno studio condotto da Schmidt et al. (2014) per una durata di tre anni in Svizzera nel Canton Vallese non ha messo in luce differenze significative in termini di crescita delle piante,

assorbimento dei nutrienti e salute delle piante tra i terreni di controllo rispetto a quelli trattati con il solo biochar, con il solo compost o con la combinazione dei due. Questi risultati sono stati confermati anche da uno studio condotto in due località dell'Oregon (USA) da Garcia-Jaramillo et al (2021) in cui tuttavia, si ipotizza che la mancanza di risposta complessiva della vite al biochar (da una prospettiva di crescita e salute della pianta) possa essere ampiamente attribuita al fatto che le viti di controllo nelle località prese in considerazione non abbiano sperimentato grandi stress derivanti dal deficit idrico, in quanto sottoposte all'irrigazione supplementare. Tuttavia, uno studio condotto in Toscana su terreno poco profondo, con viti innestate su un portinnesto poco tollerante la carenza idrica (Genesio et al., 2015) ha dimostrato che, rispetto a terreni non irrigati che hanno sperimentato deficit idrici da moderati a gravi, l'aumento della disponibilità di acqua per le piante derivante dall'uso del biochar ha aumentato sostanzialmente la produzione del vigneto negli anni successivi alla sua applicazione (in particolare nel primo anno di applicazione del biochar alla dose di 22 t/ha) e che l'aumento della resa è inversamente correlato alle precipitazioni nel periodo vegetativo, mettendo così in luce l'efficacia dell'ammendante nelle annate siccitose.

2.2 Influenza del biochar sull'uva

È noto che i deficit idrici alterano la capacità produttiva delle viti e la composizione dell'uva, attraverso effetti che coinvolgono la dimensione delle bacche; infatti, il deficit idrico influisce sulla fotosintesi e ha la capacità di fermare o ridurre la crescita degli organi vegetativi e riproduttivi, aumenta la concentrazione di zuccheri e antociani nelle bacche e riduce l'acidità totale. Lo studio di Genesio et al. (2015) già citato ha osservato che nelle parcelle trattate con biochar il numero di grappoli per pianta non aveva subito variazioni, mentre il peso medio dei grappoli e degli acini aumentava in modo significativo rispetto ai controlli. Tuttavia, le bacche delle viti delle parcelle trattate, rispetto al controllo, non presentavano modificazioni significative né in termini di contenuto di zuccheri né di concentrazione di antociani e nemmeno nel rapporto buccia-polpa in cui non sono state osservate differenze significative tra le tesi a confronto. In sintesi, sebbene siano state osservate importanti differenze nella resa del vigneto, queste non hanno generato cambiamenti nei parametri di qualità dell'uva. L'assenza di differenze qualitative suggerisce che i meccanismi d'azione del biochar potrebbero essere più complessi della semplice conseguenza diretta dovuta miglioramento dello stato idrico. Uno studio condotto su Pinot nero in Oregon da Garcia-Jaramillo et al (2021) non ha permesso di mettere in evidenza risposte significative del vigneto irriguo alle applicazioni di biochar sia per quanto riguarda la capacità produttiva che i componenti della produzione (tabella 2-1).

Anche la qualità degli acini declinata in funzione della composizione del mosto (tabella 2-2) e dei fenoli contenuti nella buccia e nel seme (tabella 2-3) non è stata influenzata dagli apporti di ammendante.

Tabella 2-1: Comportamento produttivo di viti di Pinot nero in risposta ad applicazioni di biochar in vigneti irrigui in due diverse località dell’Oregon (USA).

Luogo	Tesi	Resa (kg/vite)	Grappoli (No/vite)	Bacche (No./grappolo)	Peso acino (g)
Woodhall	B0Lno	1.6± 0,3	22 ± 2	86.0 ± 6.8	0.93 ± 0.02
	B0Lsi	1.3± 0.1	20 ± 3	72.4 ± 7.9	0.90 ± 0.02
	B18Lsi	1.6± 0,5	22 ± 3	71.0 ± 7.5	0.94 ± 0.02
	B35Lsi	1.6± 0,3	22 ± 3	84.8 ± 1.7	0.96 ± 0.02
Cedars	B0Lno	4,2± 0,8	25 ± 1	143.2 ± 19.4	1.10 ± 0.06
	B0Lsi	4,2± 0,5	25 ± 3	144.3 ± 12.7	1.10 ± 0.08
	B18Lsi	4,2± 0,5	24 ± 3	165.7 ± 14.0	1.03 ± 0.09
	B35Lsi	4,2± 0,7	25 ± 3	148.6 ± 10.9	1.08 ± 0.07

B0Lno: no biochar-no lavorazioni; **B0Lsi**: no biochar+lavorazioni; **B18Lsi**: 18 t/ha di biochar + lavorazioni; **B35Lsi**: 35 t/ha biochar + lavorazioni (Garcia-Jaramillo et al 2021)

Tabella 2-2: Composizione degli acini di Pinot nero in risposta ad applicazioni di biochar in vigneti irrigui in due diverse località dell’Oregon (USA).

Luogo	Trattamenti	Gradi Brix °	pH	Acidità totale (g/l a.t.)
Woodhall	B0Lno	22.90 ± 1.0	3.75 ± 0.07	3.3 ± 0.3
	B0Lsi	23.80 ± 1.0	3.76 ± 0.11	3.0 ± 0.3
	B18Lsi	23.60 ± 0.5	3.75 ± 0.05	3.4 ± 0.3
	B35Lsi	23.90 ± 0.4	3.81 ± 0.03	3.3 ± 0.3
Cedars	B0Lno	24.10 ± 0.9	3.23 ± 0.05	5.6 ± 0.6
	B0Lsi	23.30 ± 1.3	3.25 ± 0.07	5.3 ± 0.3
	B18Lsi	24.20 ± 0.9	3.20 ± 0.03	5.9 ± 0.3
	B35Lsi	23.50 ± 1.3	3.23 ± 0.06	5.6 ± 0.6

B0Lno: no biochar-no lavorazioni; **B0Lsi**: no biochar+lavorazioni; **B18Lsi**: 18 t/ha di biochar + lavorazioni; **B35Lsi**: 35 t/ha biochar + lavorazioni (Garcia-Jaramillo et al 2021)

Tabella 2-3: Risposte dei composti fenolici della buccia delle bacche e dei semi ai trattamenti di applicazione del biochar in due diverse località dell’Oregon (USA).

Luogo	Trattamenti	Antociani della buccia (mg/kg)	Tannini della buccia (mg/kg)	Tannini del seme (mg/kg)
Woodhall	B0Lno	1.4 ± 0.2	0.3 ± 0.2	1.6 ± 0.1
	B0Lsi	1.6 ± 0.3	0.3 ± 0.1	1.6 ± 0.2
	B18Lsi	1.3 ± 0.4	0.3 ± 0.2	1.4 ± 0.1
	B35Lsi	1.2 ± 0.3	0.3 ± 0.1	1.5 ± 0.2
Cedars	B0Lno	0.9 ± 0.8	0.8 ± 0.1	1.4 ± 0.2
	B0Lsi	1.0 ± 0.5	0.9 ± 0.1	1.3 ± 0.2
	B18Lsi	1.0 ± 0.5	0.9 ± 0.2	1.4 ± 0.3
	B35Lsi	1.0 ± 0.7	0.9 ± 0.1	1.2 ± 0.3

B0Lno: no biochar-no lavorazioni; **B0Lsi**: no biochar+lavorazioni; **B18Lsi**: 18 t/ha di biochar + lavorazioni; **B35Lsi**: 35 t/ha biochar + lavorazioni (Garcia-Jaramillo et al 2021)

Risultati promettenti sono stati ottenuti in Germania da Schneider et al. (2023) impiegando un mix di Biochar e compost e lavorando su viti innestate su SO4, un portinnesto poco tollerante la carenza idrica. Rispetto al controllo, nel 2019 sono emersi aumenti degli zuccheri e del pH e cali dell’acidità titolabile (TA). In due anni su 4 sono aumentate le dotazioni di azoto prontamente assimilabile (APA) (Tabella 2-4). Tuttavia, le modifiche non si sono evidenziate tutti gli anni e la loro natura transitoria lascia diverse perplessità.

Tabella 2-4: Valori medi di glucosio [g/L], fruttosio [g/L], pH, acidità titolabile (TA) [g/L] e azoto assimilabile da lieviti (APA) [mg/L] per viti allevate su substrato biochar-compost (BCS) e in file di controllo (Co) per gli anni 2019 – 2022 (Schneider et al 2023).

	GLUCOSIO		FRUTTOSIO		pH		TA		APA	
	BCS	Co	BCS	Co	BCS	Co	BCS	Co	BCS	Co
2019	97.5	90.5	109.2	102.3	3.36	3.29	6.26	6.96	37.1	47.4
2020	91.5	89.7	106.3	104.3	3.50	3.40	7.09	7.71	101.9	79.0
2021	80.4	82.1	91.5	91.3	3.34	3.35	9.39	9.17	141.2	126.9
2022	79.8	79.7	90.5	90.9	3.29	3.25	7.92	8.07	71.2	71.5

2.3 Influenza del biochar sul vino

Alcuni studi hanno analizzato le modificazioni di alcune caratteristiche chimiche del vino prodotto dalle uve coltivate nei terreni trattati con biochar. Nella prova condotta in Oregon su vigneti irrigui, Garcia-Jaramillo et al. (2021) hanno riportato che i vini ottenuti nelle parcelle di Woodhall che avevano ricevuto applicazioni di Biochar mostravano una diminuzione significativa della concentrazione di tannini. L'effetto non è stato tuttavia rilevato anche nella seconda località presa in esame dall'esperimento (tabella 2-5).

Tabella 2-5: Risposte dei fenoli del vino ai trattamenti di applicazione del biochar in due diverse località dell'Oregon (USA).

Luogo	Trattamenti	Antociani (mg/L)	Tannini (mg/L)	Fenoli non tannici (mg/L)
Woodhall	B0Lno	597.2 ± 98.8	610.8± 108.1	2091.6 ± 145.9
	B0Lsi	552.4 ± 93.1	685.6± 261.2	2133.7 ± 74.5
	B18Lsi	548.0 ± 93.2	377.4±133.2	1915.0 ± 259.9
	B35Lsi	533.8 ± 70.7	344.9± 155.5	1922.8 ± 154.6
Cedars	B0Lno	350.7 ± 84.6	739.5± 145.8	1756.3 ± 104.3
	B0Lsi	343.3 ± 23.3	691.6± 167.8	1898.7 ± 98.6
	B18Lsi	384.7 ± 18.3	790.5± 115.5	1841.4 ± 54.5
	B35Lsi	390.7 ± 61.7	792.1± 112.2	1874.5 ± 83.0

B0Lno: no biochar-no lavorazioni; **B0Lsi**: no biochar+lavorazioni; **B18Lsi**: 18 t/ha di biochar + lavorazioni; **B35Lsi**: 35 t/ha biochar + lavorazioni (Garcia-Jaramillo et al 2021)

Oltre gli antociani, i tannini e i fenoli non tannici, alcuni studi hanno provato ad analizzare la concentrazione di zuccheri ed il pH nel mosto ottenuto. Ad esempio, dallo studio di Schmidt et al. (2014) emerge che nei primi anni il pH del mosto era significativamente più alto in entrambi i trattamenti con biochar (Tabella 2-6), il che potrebbe essere dovuto alla maturazione precoce delle uve. Negli anni successivi invece, il pH del mosto non è variato significativamente tra i trattamenti, ma l'acidità totale del mosto ha mostrato comunque una tendenza ad essere più elevata nel trattamento con biochar rispetto al trattamento di controllo.

Tabella 2-6: Effetti dei substrati sul contenuto di zuccheri (° Brix) e pH nei mosti

	Anno	Controllo	Biochar	Compost	Bc+Compost
Gradi Brix°	2011	22.60	23.10	23.10	23.45
	2012	21.10	20.65	21.30	20.75
	2013	22.85	22.60	22.90	22.85
pH	2011	3.17	3.24	3.26	3.28
	2013	3.41	3.38	3.41	3.42

Capitolo 3

INFLUENZA DEL BIOCHAR SULLA CAPACITA' IDRICA E SULLA FERTILITÀ DEL SUOLO

3.1 Capacità di ritenzione idrica

La scarsità d'acqua è riconosciuta come una delle maggiori limitazioni ambientali all'espansione della viticoltura in nuovi territori e alla stabilità quantitativa e qualitativa della produzione di uva nelle attuali aree viticole. I vigneti sono infatti spesso sottoposti a grave stress idrico durante le estati, inficiando l'approvvigionamento idrico per le viti, che rappresenta uno dei principali indicatori per la qualità del vino. L'uso del biochar come ammendante del terreno è una pratica ampiamente utilizzata per migliorare la capacità di ritenzione idrica del suolo e l'infiltrazione dell'acqua: l'aumento della capacità di ritenzione idrica del suolo in seguito all'aggiunta di biochar è correlato alla sua porosità ed alla sua elevata superficie specifica (Verheijen et al., 2011). Sono state avanzate due ipotesi per spiegare il meccanismo di aumento della funzione idrologica nel suolo a seguito dell'aggiunta di biochar: il primo è che l'acqua viene immagazzinata all'interno dello spazio poroso del biochar, mentre l'altra teoria ipotizza che l'aumento della ritenzione idrica del suolo sia dovuto alla aumentata stabilità aggregata del suolo dopo l'applicazione del biochar. Inoltre, alcuni studi hanno riscontrato una diminuzione della densità apparente del suolo con l'aggiunta di biochar. Tale diminuzione della densità apparente può comportare un aumento della porosità e dell'aerazione del suolo, aumentando potenzialmente la respirazione microbica e delle radici e l'infiltrazione delle precipitazioni (Basso et al., 2013).

Alcuni studi hanno analizzato le capacità di ritenzione idrica del biochar e i cambiamenti del contenuto di acqua apportati dall'utilizzo di tale ammendante nei vigneti; ad esempio, uno studio di Baronti et al. (2014) su Merlot 181 a Montepulciano, ha dimostrato come il contenuto volumetrico di acqua del biochar puro è sempre maggiore rispetto a quello dei terreni di controllo e dei terreni trattati con singola o doppia dose di ammendante (C, B e BB). Inoltre, il contenuto di acqua del suolo BB e B è superiore a C per tutti i valori del potenziale matriciale e il contenuto di acqua alla capacità di campo in BB e B è stato rispettivamente del 26% e del 7% superiore a C (le curve di ritenzione idrica misurate su campioni di suolo C, B, BB e su

biochar puro sono riportate in Figura 3-1). Se ne deduce quindi che l'aggiunta di biochar ha aumentato il contenuto di acqua nel suolo e si è dimostrato che questo effetto possa ridurre lo stress idrico delle piante e aumentare l'attività fotosintetica senza influenzare l'idrofobicità del suolo; infatti, l'aumento dell'Available Water Capacity (AWC) ha migliorato lo stato idrico delle piante aumentando sostanzialmente il potenziale idrico delle foglie durante il periodo più secco dell'estate, quando l'acqua nel suolo scarseggia. Se considerati in una prospettiva più operativa, i risultati suggeriscono che l'applicazione del biochar potrebbe aumentare la resistenza dei vigneti alla siccità, promuovendo così il biochar come strategia adottabile dagli agricoltori per migliorare l'adattamento al cambiamento climatico. Tuttavia, dato che il deficit idrico influisce sulla fotosintesi, ha la capacità di fermare o ridurre la crescita, aumenta lo zucchero delle bacche e le antocianine e riduce l'acidità totale, il potenziale dell'applicazione del biochar deve essere attentamente valutato e ulteriormente studiato per identificare un compromesso tra una migliore capacità di adattamento e la possibile perdita di qualità e caratteristiche distintive del vino.

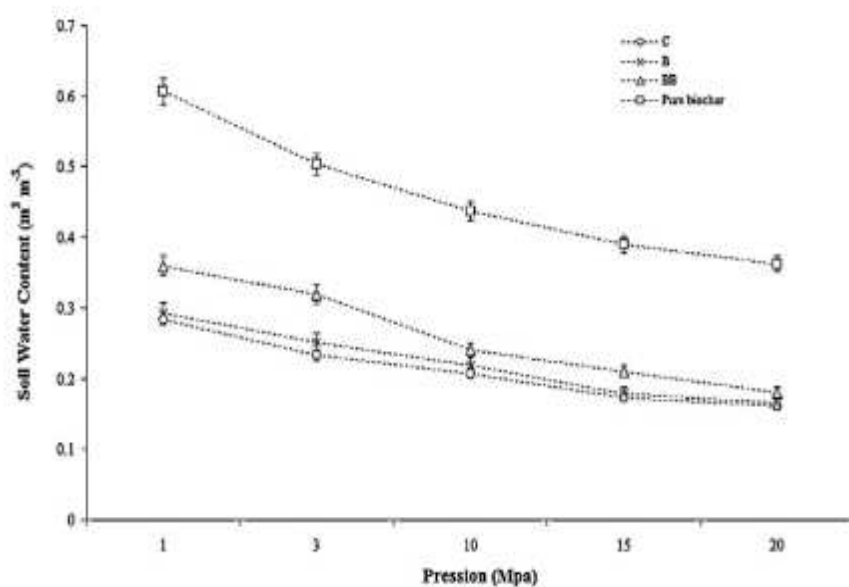


Figura 3-1. Curve di ritenzione idrica del suolo: biochar puro e trattamenti sperimentali (C, B, BB). Ogni valore rappresenta la media di 3 repliche. Le barre verticali indicano \pm l'errore standard (Baronti et al, 2014)

I timori di una perdita di qualità dei vini associata all'uso di tecniche innovative sono forti nelle aree dove si producono vini DOC (Denominazioni d'Origine Controllata), che sono strettamente correlati al concetto dell'interazione vitigno-ambiente-tecnica colturale che viene oramai frequentemente riassunto usando il francesismo "terroir". A questo proposito, vale la

pena ricordare la posizione assunta in Italia da numerosi consorzi di tutela dei vini DOC, che ritenevano fino a pochi anni fa che l'irrigazione fosse una pratica di forzatura e dovesse pertanto essere vietata. Già dopo la vendemmia 2012, a causa di una successione di annate siccitose, il Mipaaf, precorrendo i tempi rispetto all'entrata in vigore della legge 12 dicembre 2016, n. 238, precisò che, anche nei casi in cui i disciplinari non fornissero alcuna indicazione rispetto alla possibilità di impiegare l'irrigazione di soccorso, essa era comunque da ritenersi ammessa, fermo restando il rispetto del limite massimo di resa unitaria per ettaro previsto per la specifica Dop o Igp. Il Testo Unico della Vite e del Vino, ovvero la legge 12 dicembre 2016, n. 238, pur confermando il divieto delle pratiche di forzatura, non inserisce tra queste l'irrigazione di soccorso. In altri termini, alla luce dei cambiamenti climatici e degli scadimenti qualitativi dovuti a forti condizioni di carenza idrica, l'irrigazione di soccorso è oggi di fatto considerata una necessità, e come tale non è più un elemento variabile né discrezionale dei disciplinari di produzione. L'uso del biochar non è pertanto una strategia adottabile dagli agricoltori per aggirare il non più esistente divieto di interventi irrigui, ma si configura come uno strumento che potrebbe aumentare la resilienza del vigneto in quelle condizioni in cui non è possibile o consigliabile ricorrere all'irrigazione a causa di carenze infrastrutturali, lievitazione dei costi di produzione, difficoltà di gestione e necessità di ridurre il consumo di acqua.

A questo riguardo gli studi volti a valutare l'efficacia del biochar nel tempo in termini di capacità di ritenzione idrica del suolo vitato assumono un grande interesse. Baronti et al. (2022), nella indagine condotta in Toscana su Merlot, hanno mostrato che 10 anni dopo l'interramento di una singola dose (B) di biochar (22 t/ha) nel vigneto le parcelle trattate non differiscono da quelle di controllo. E' pertanto evidente che la dose (B) applicata non è stata sufficiente a causare cambiamenti a lungo termine nelle proprietà di ritenzione idrica del suolo. Invece, con una doppia dose (BB) di biochar emergono differenze rilevanti rispetto al controllo, specie nei mesi estivi. Una meta-analisi condotta su 274 studi da Omondi e altri (2016) evidenzia che valori più elevati di acqua disponibile correlano con applicazioni di biochar superiori a 80 t/ha, mentre la disponibilità di acqua è inferiore con applicazioni di biochar minori a 20 t/ha. Questo effetto è stato molto probabilmente amplificato dal tipo di terreno: Razzaghi et al. (2020) hanno riassunto, infatti, che il biochar aumenta il contenuto di acqua disponibile nei suoli sabbiosi del 45%, mentre solo del 14% in quelli argillosi, confermando ed ampliando i risultati di altri autori che avevano riscontrato una maggiore ritenzione idrica a lungo termine nei suoli sabbiosi.

I risultati di questo studio offrono nuove ed interessanti informazioni riguardo all'impatto del biochar sullo stato idrico del suolo e delle piante in una coltura perenne, dimostrando che una doppia dose di biochar potrebbe essere utilizzata efficacemente per migliorare il contenuto idrico del suolo, ridurre la necessità della pianta di produrre radici fini, ridurre la plasticità del suolo, ridurre lo stress idrico delle piante e aumentare l'attività fotosintetica a lungo termine. Dunque, nel contesto del cambiamento climatico, una strategia basata sull'utilizzo del biochar si conferma, anche a lungo termine, vincente nell'adattamento della pianta, prevenendo e limitando specificamente l'effetto negativo che la siccità ha su di essa e sul frutto.

3.2 Fertilità del suolo

Alcuni studi ipotizzano che il biochar possa svolgere un ruolo importante sulla salute e la fertilità del suolo in cui viene applicato andandone a modificare i parametri chimici e il contenuto di ioni e sostanze nutritive.

Ad esempio, uno studio a lungo termine condotto da Baronti et al. (2022) su Merlot 181 in Toscana ha dimostrato che a dieci anni dalla sua applicazione il biochar ha aumentato significativamente il pH del terreno. Tali risultati sono stati più evidenti dopo un doppio trattamento con biochar (aumento dell'11%, ossia pH 7,07 vs pH 6,33 del controllo) che nella singola applicazione (aumento del 7%, ossia pH 6,83 vs pH 6,33 del controllo). Anche un ulteriore studio condotto da Garcia-Jaramillo et al. (2021) ha dimostrato che l'applicazione del biochar ha modificato la composizione chimica del suolo in entrambi le località prese in considerazione (Figura 3-2): in particolare il pH è stato aumentato significativamente solo con l'applicazione del biochar alla dose più elevata (B35) in uno dei due terreni, mentre nell'altra regione, il pH è aumentato significativamente con entrambe le dosi applicate (B18 e B35).

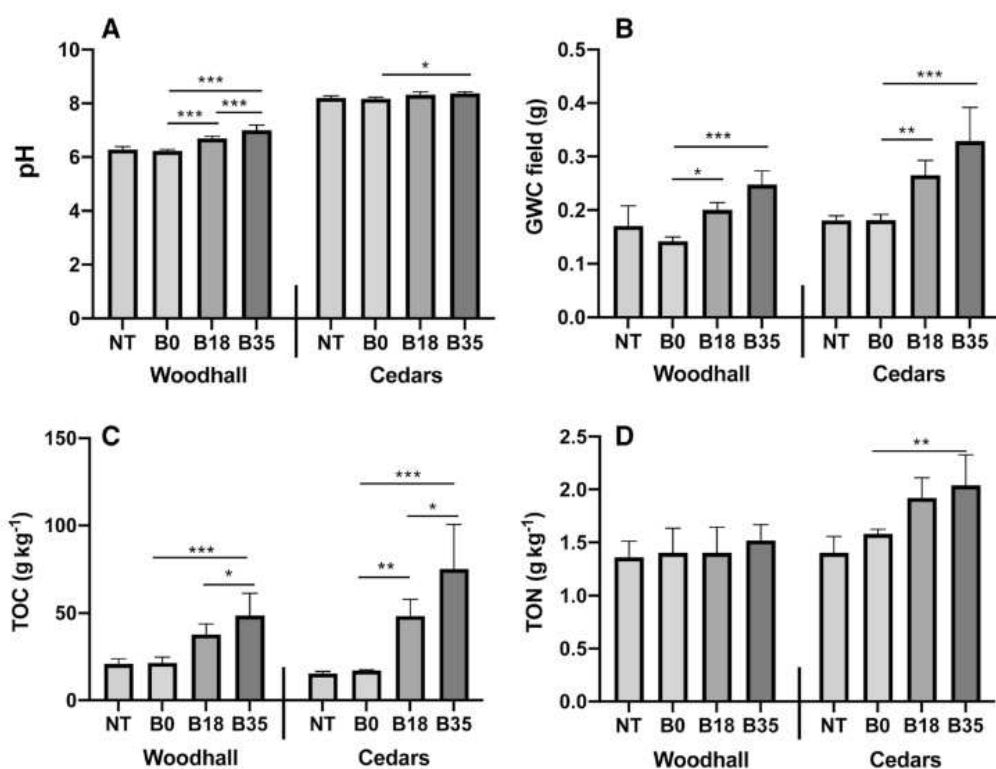


Figura 3-2. Proprietà fisiche e chimiche dei terreni modificati e non modificati provenienti da due differenti località in Oregon (USA). A: pH, B: contenuto gravimetrico di acqua nel suolo (campo GWC), C: carbonio organico totale, D: N organico totale. Suoli: (NT) no biochar + no lavorazione; (B0) no biochar + lavorazione; (B18) 18 t/ha biochar + lavorazione del terreno; (B35) 35 t/ha biochar + lavorazione del terreno. Media e deviazione standard di cinque repliche. Le linee sopra le colonne indicano i valori statisticamente significativi nelle due diverse località. * $P < 0,05$, ** $P < 0,01$, * $P < 0,001$ (Garcia-Jaramillo et al, 2021)**

Anche lo studio di Maienza et al. (2017) condotto su Merlot in Toscana riporta che le applicazioni di biochar a singola e doppia dose (B e BB) hanno aumentato significativamente il pH del suolo ($p < 0,001$) ed il rapporto C/N rispetto al controllo ($p < 0,001$). Questo studio prende inoltre in considerazione anche la concentrazione di alcuni nutrienti nel terreno: non sono stati osservati cambiamenti significativi per le concentrazioni di Na, Mg e K scambiabili, mentre il fosforo disponibile (P_{av}) e il calcio scambiabile sono aumentati nei trattamenti B e BB (Figura 3-3); si è ipotizzato che gli aumenti di Ca scambiabile e P disponibile riflettano gli alti cationi basici e la concentrazione di P del biochar.

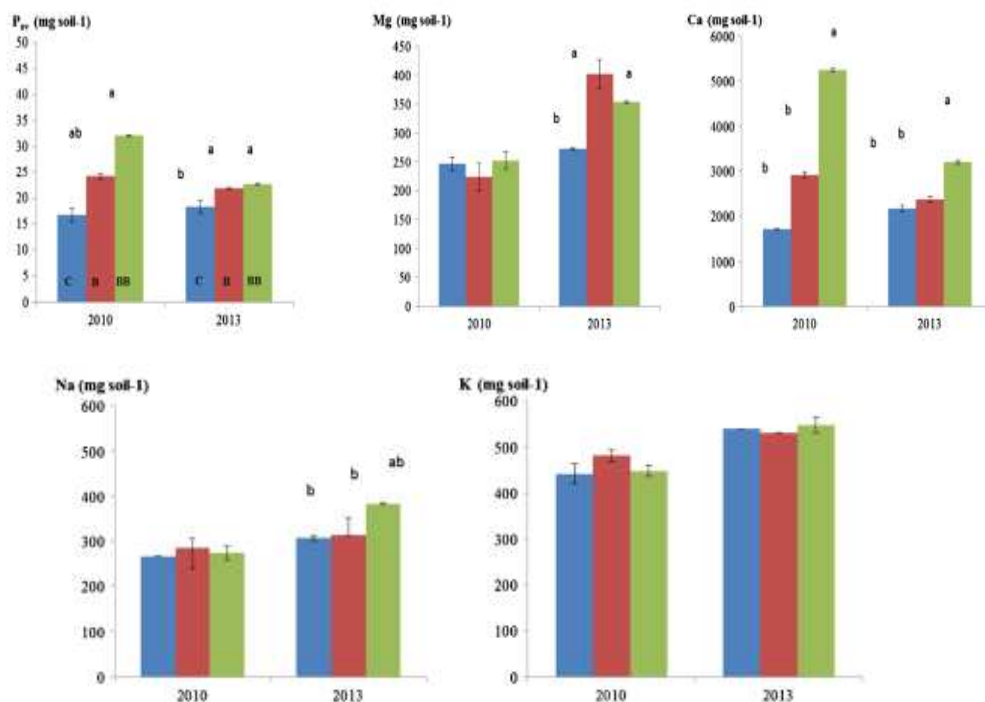


Figura 3-3. *Contenuto di nutrienti nel suolo nel trattamento di controllo (C) e nei trattamenti con biochar (B e BB) nel 2010-2013. I colori indicano trattamenti diversi: C (blu), B (rosso) e BB (verde). Le barre indicano l'errore standard. Le diverse lettere sopra le colonne indicano differenze statisticamente significative ($p < 0,005$) (Maienza et al, 2017)*

Variazioni della concentrazione degli ioni nel suolo sono state dimostrate anche da Garcia-Jaramillo et al. (2021) su Pinot Nero in Oregon, che hanno osservato come l'applicazione del biochar abbia influito in modo diverso sulla concentrazione di micro e macronutrienti disponibili per le piante in entrambe le località prese in considerazione. In particolare, nella prima località (Figura 3-4 A e B) le concentrazioni di K e Mg sono aumentate significativamente per entrambe le dosi di applicazione del biochar, mentre le concentrazioni di Ca e P disponibile sono aumentate significativamente solo alla dose di applicazione di biochar più elevata. Invece, le concentrazioni di Al sono diminuite dopo l'aggiunta di biochar. Nella seconda località (Figura 3-4 C e D), le concentrazioni di Al, Fe, K, Mn e P sono aumentate significativamente con le applicazioni di biochar alle due dosi valutate, mentre è stata osservata una significativa riduzione di Na.

Da questi studi se ne deduce che l'applicazione di biochar al suolo può comportare variazioni della concentrazione di elementi nutritivi, ma che queste variazioni dipendono dalla dose applicata (e dalle modalità di applicazione) e dalle caratteristiche del suolo.

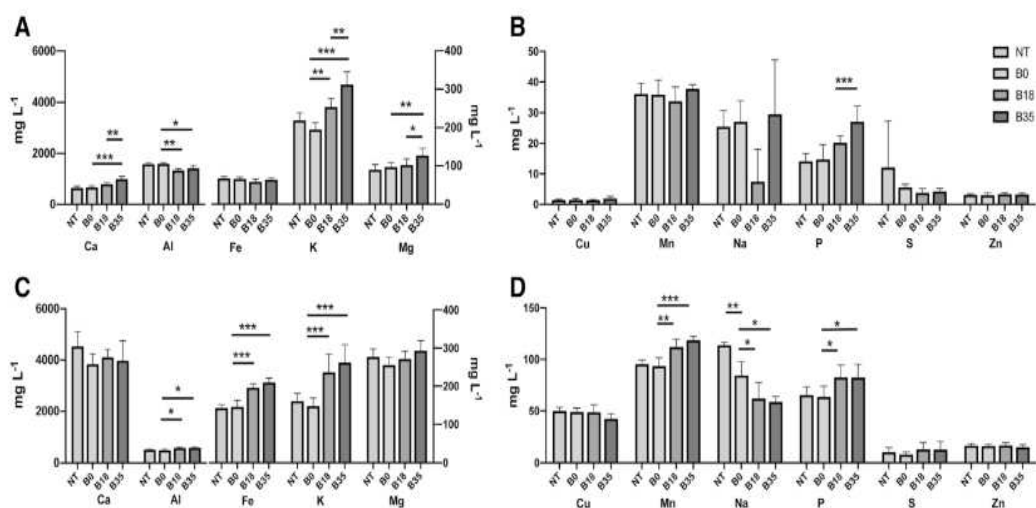


Figura 3-4. Nutrienti del terreno in due diverse località in Oregon (USA). Le lettere A e B rappresentano il vigneto di Woodhall, le lettere C e D rappresentano il vigneto di Cedras. Trattamenti a confronto: (NT) no biochar + no lavorazione; (B0) no biochar + lavorazione; (B18) 18 t/ha biochar + lavorazione del terreno; (B35) 35 t/ha biochar + lavorazione del terreno.

In (A) e (C) Fe, K e Mg sono tracciati sull'asse Y destro. Media e deviazione standard di cinque repliche. Le linee sopra le colonne indicano i valori statisticamente significativi. *P<0,05, **P<0,01, *P<0,001 (Garcia-Jaramillo et al, 2021)**

Da questo stesso studio è emerso inoltre che il biochar ha il potenziale per migliorare la salute del suolo aumentando la dinamica della SO. Le proprietà fisico-chimiche del suolo sono state significativamente influenzate oltre che dall'aumento del pH del biochar, anche dall'aumento dell'umidità che è stato descritto come incremento significativo del GWC (gas-water contact). Si è dimostrato inoltre un aumento del carbonio organico totale (TOC) e dell'azoto organico totale (TON) (Figura 3-2).

Capitolo 4

INFLUENZA DEL BIOCHAR SUGLI INQUINANTI DEL TERRENO

Il biochar potrebbe giocare un ruolo importante anche nel controllo dell'emissione di sostanze inquinanti, come gli idrocarburi policiclici aromatici, i gas serra e i metalli pesanti.

4.1 Idrocarburi policiclici aromatici (IPA)

L'applicazione di biochar al suolo agricolo potrebbe rappresentare un rischio significativo per la salute umana a causa della presenza di sostanze nocive. Composti come furani, diossine e idrocarburi policiclici aromatici (IPA) possono formarsi durante la pirolisi della biomassa e rimanere nel biochar. In particolare, gli IPA sono tra i potenziali inquinanti del biochar più ampiamente discussi, dato il loro effetto negativo sull'ambiente ed i rischi che comportano per la salute umana (Wang et al., 2018).

Alcuni studi hanno tentato di trovare una correlazione tra l'uso del biochar e il cambiamento delle concentrazioni di IPA nel suolo. Ad esempio, uno studio di Maienza et al. (2017) su Merlot in Toscana, ha dimostrato che l'applicazione di biochar ha portato ad un aumento dei livelli di IPA nei suoli rispetto al controllo e che, tuttavia, tutte le sostanze tossiche analizzate non superavano mai i limiti consentiti dalla legislazione ambientale italiana (D.Lgs 152/06). In particolare si è notato che l'applicazione di biochar ha aumentato i livelli totali di IPA nel terreno in relazione diretta con la quantità applicata; ciò potrebbe essere dovuto al processo di pirolisi che produce il biochar che porta alla formazione di vari composti organici come diossine, furani e IPA (Oleszczuk et al.2014). Tuttavia, anche per il trattamento con doppia dose di biochar, le concentrazioni di IPA erano molto più basse (circa 102 volte) rispetto ai limiti soglia imposti dalla legge. Così come i livelli totali di IPA, anche la variazione del pH e della composizione microbica nel suolo sono dipendenti dalla dose di biochar applicata al terreno. Tuttavia, anche in questo caso l'effetto di una dose più elevata di biochar non aumenta i composti tossici nei suoli oltre i limiti consentiti dalla legislazione ambientale italiana.

Dunque, sulla base di questi risultati e dei test eco-tossicologici, se ne deduce che l'applicazione a lungo termine di biochar, a entrambe le dosi, non ha impatti negativi sulla

comunità microbica del suolo, né potenziali conseguenze tossiche. Questi risultati sono stati riportati anche in uno studio di Rombolà et al. (2015), svolto sempre nel vigneto di Merlot in Toscana, in cui i risultati ottenuti suggeriscono che il livello di contaminazione del suolo è determinato dal grado di contaminazione del biochar, che dipende dalle materie prime e dalle condizioni del processo di produzione. Ciò conferma la tesi secondo cui quando le concentrazioni di IPA nel biochar soddisfano i livelli soglia proposti dall' IBI (International Biochar Initiative) e dall' EBC (European Biochar Certificate) (Figura 4-1), si prevede che l'impatto dell'ammendante sui composti chimici tossici nel suolo sia minimo.

EBC -Certification Class	EBC-FeedPlus	EBC-Feed	EBC-AgroOrganic	EBC-Agro	EBC-Urban	EBC-ConsumerMaterials	EBC-BasicMaterials
Elemental analysis	Declaration of Ctot, Corg, H, N, O, S, ash						
	H / Corg	< 0.4		< 0.7			
Physical parameters	Water content, dry matter (as received and @ < 3mm particle size), bulk density (DM), WHC, pH, salt content, electrical conductivity of the solid biochar						
TGA	Needs to be presented for the first production batch of a pyrolysis unit						
Nutrients	Declaration of N, P, K, Mg, Ca, Fe						
Heavy metals	Pb	10 g t ⁻¹ (88%DM)	10 g t ⁻¹ (88%DM)	45 g t ⁻¹ DM	120 g t ⁻¹ DM	120 g t ⁻¹ DM	120 g t ⁻¹ DM
	Cd	0.8 g t ⁻¹ (88% DM)	0.8 g t ⁻¹ (88% DM)	0.7 g t ⁻¹ DM	1.5 g t ⁻¹ DM	1.5 g t ⁻¹ DM	1.5 g t ⁻¹ DM
	Cu	70 g t ⁻¹ DM	70 g t ⁻¹ DM	70 g t ⁻¹ DM	100 g t ⁻¹ DM	100 g t ⁻¹ DM	100 g t ⁻¹ DM
	Ni	25 g t ⁻¹ DM	25 g t ⁻¹ DM	25 g t ⁻¹ DM	50 g t ⁻¹ DM	50 g t ⁻¹ DM	50 g t ⁻¹ DM
	Hg	0.1 g t ⁻¹ (88% DM)	0.1 g t ⁻¹ (88% DM)	0.4 g t ⁻¹ DM	1 g t ⁻¹ DM	1 g t ⁻¹ DM	1 g t ⁻¹ DM
	Zn	200 g t ⁻¹ DM	200 g t ⁻¹ DM	200 g t ⁻¹ DM	400 g t ⁻¹ DM	400 g t ⁻¹ DM	400 g t ⁻¹ DM
	Cr	70 g t ⁻¹ DM	70 g t ⁻¹ DM	70 g t ⁻¹ DM	90 g t ⁻¹ DM	90 g t ⁻¹ DM	90 g t ⁻¹ DM
	As	2 g t ⁻¹ (88% DM)	2 g t ⁻¹ (88% DM)	13 g t ⁻¹ DM	13 g t ⁻¹ DM	13 g t ⁻¹ DM	13 g t ⁻¹ DM
Organic contaminants	16 EPA PAH	6±2.4 g t ⁻¹ DM	CSI-declaration	6±2.4 g t ⁻¹ DM	6.0+2.4 g t ⁻¹ DM	CSI-declaration	CSI-declaration
	8 EFSA PAH	1.0 g t ⁻¹ DM					4 g t ⁻¹ DM
	benzo[e]pyrene benzo[k]fluoranthene	< 1.0 g t ⁻¹ DM for each of both substances					
	PCB, PCDD/F	See chapter 10	Once per pyrolysis unit for the first production batch. For PCB: 0.2 mg kg ⁻¹ DM, for PCDD/F: 20 ng kg ⁻¹ (I-TEQ OMS), respectively				

Figura 4-1 I più importanti parametri analitici del biochar per EBC (European Biochar Certificate)

Questi risultati sono stati ulteriormente confermati da un secondo studio condotto da Rombolà et al. (2019), sempre nello stesso vigneto di Merlot in Toscana, che ha chiaramente dimostrato l'impatto del biochar sull'aumento delle concentrazioni di IPA nei terreni trattati rispetto al terreno di controllo. Le concentrazioni di IPA nel terreno che ha ricevuto la doppia applicazione di biochar sono diminuite significativamente nel corso di quattro anni, ma i livelli totali di IPA sono sempre risultati superiori rispetto al terreno di controllo (Figura 4-2). Anche in questo caso comunque le concentrazioni totali si sono sempre mantenute al di sotto della concentrazione massima accettabile stabilita in diversi paesi europei. I livelli originali di IPA

nel terreno sono stati raggiunti solamente nei suoli trattati con una singola applicazione di biochar e dopo cinque anni dalla stessa. Concentrazioni superiori a quelle del suolo non trattato persistono dopo cinque anni nel caso di due applicazioni consecutive; se ne deduce quindi che l'interramento di dosi elevate di biochar dovrebbe essere separato di oltre cinque anni per ridurre l'impatto degli IPA nel suolo.

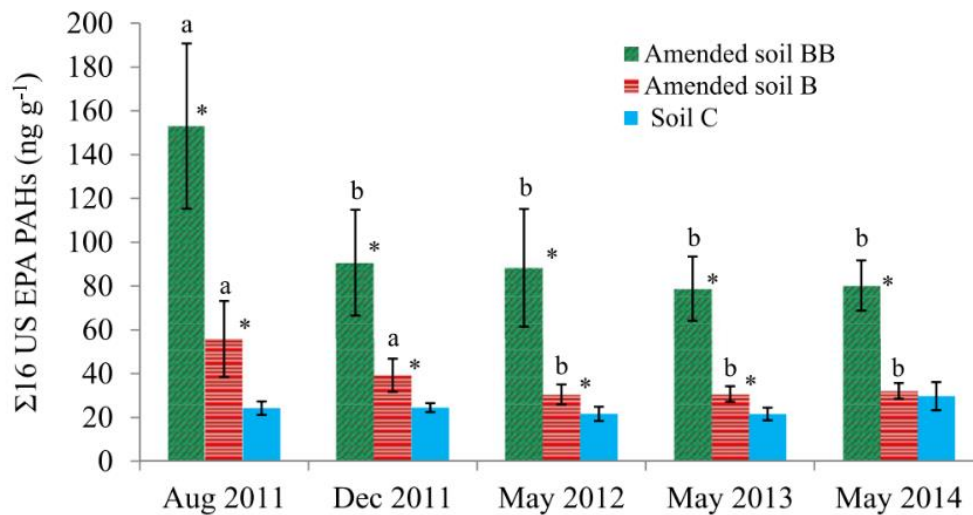


Figura 4-2 Concentrazioni dei 16 IPA dell'EPA statunitense e deviazione standard ($n = 5$ plot) nel terreno, il biochar ha modificato il terreno B e BB in diverse date di campionamento dalla prima (agosto 2011) e dall'ultima data di campionamento (maggio 2014).

* Significativamente diverso dal terreno di controllo dal test di Dunnnett ($p < 0,05$). Lettere diverse indicano differenze statisticamente significative tra gli stessi trattamenti da agosto 2011 a maggio 2014 (Kruskale ANOVA unidirezionale di Wallis; test di Dunn, $p < 0,05$) (Rombolà et al, 2019)

Da questo stesso studio emerge che nei campioni di terreno è stato osservato un forte aumento della SO dopo due trattamenti con biochar, associato al carbonio recalcitrante (rappresenta la frazione della sostanza organica resistente alla decomposizione) che favorirebbe la permanenza degli IPA nel suolo e la possibile incorporazione da altre fonti (ad esempio l'atmosfera). Due applicazioni consecutive di un biochar di alta qualità nel suolo hanno modificato ulteriori proprietà dei terreni come pH (aumentato), Capacità di scambio Cationico (aumentata, CSC) e densità apparente (diminuita). Questi parametri possono aver influenzato la concentrazione degli IPA: per assorbimento (SO), biodegradazione (pH, CSC) e perdita fisica (densità apparente). Nello specifico, la diminuzione della densità apparente insieme alla

pendenza del vigneto potrebbe aver favorito una perdita fisica di biochar con conseguente notevole riduzione degli IPA.

4.2 CO₂ e N₂O

Secondo alcuni studi il biochar avrebbe il potenziale di ridurre le emissioni di CO₂ e di gas serra sfruttando quattro differenti meccanismi: (i) abbassare le emissioni di CO₂ attraverso la formazione di strutture C-stabili durante la pirolisi, (ii) compensare il consumo di combustibili fossili dall'energia generata durante il processo di pirolisi, (iii) migliorare la fertilità del suolo in modo da aumentare la produttività primaria e ridurre gli apporti di fertilizzanti, (iv) mitigare le emissioni N₂O, CH₄ e di gas serra (Woolf et al., 2010). Quest'ultimo meccanismo rimane una questione ancora aperta in quanto non sono chiari i processi attraverso i quali il biochar possa ridurre le emissioni di tali inquinanti, ma secondo uno studio il biochar potrebbe influenzare direttamente e indirettamente la concentrazione di azoto (N) nel suolo attraverso cambiamenti nel ciclo microbico dell'N, nell'adsorbimento di N inorganico, nell'assorbimento di N da parte delle piante e nel flusso d'acqua (Clough et al., 2013).

Uno studio di Schneider et al. (2023), su Calardis Musqué in Germania, ha evidenziato che tra i gas serra misurati, solo la CO₂ ha mostrato un'emissione regolare e un andamento dinamico in relazione al cambiamento delle condizioni meteorologiche. Anche se non statisticamente significativa ($p > 0,05$), l'emissione complessiva di CO₂ è stata più elevata nei terreni trattati con biochar rispetto al controllo nella maggior parte del periodo di campionamento. L'aumento delle emissioni di CO₂ nel suolo trattato durante l'intero periodo di misurazione può essere attribuito alla graduale decomposizione del biochar applicato negli strati più profondi del suolo per un periodo prolungato.

Infine, uno studio condotto da Horel et al. (2018), in Ungheria, ha evidenziato che il biochar utilizzato come ammendante ha determinato una diminuzione di N₂O e solo piccoli cambiamenti (aumenti o diminuzioni) nei valori di emissione di CO₂ dai terreni. I dati suggeriscono inoltre, che l'aggiunta combinata di letame e biochar al terreno può ridurre le emissioni complessive di N₂O; tuttavia, questi fattori separatamente non hanno ridotto in modo significativo le emissioni di N₂O. In relazione ai cambiamenti nelle emissioni di gas serra, l'aggiunta di letame e biochar ai suoli insieme potrebbe ridurre notevolmente anche la CO₂.

4.3 Metalli pesanti

Il contenuto di metalli pesanti nei suoli è dovuto a fattori naturali e all'attività dell'uomo; nell'orizzonte più superficiale il tenore rilevato è la somma del contenuto naturale e dell'apporto antropico legato a fonti diffuse di contaminazione. La conoscenza della distribuzione areale della concentrazione naturale e naturale-antropica dei metalli pesanti nei suoli permette di valutarne in modo realistico lo stato di contaminazione.

Uno studio di Maienza et al. (2017), su Merlot in Toscana, ha valutato la disponibilità e la concentrazione di alcuni metalli pesanti nel suolo dopo trattamento con doppia o singola applicazione di biochar mostrando un aumento significativo del Pb totale ($p < 0,001$) in entrambi i trattamenti B e BB rispetto a quelli nel terreno di controllo, mentre la concentrazione totale di Cu è aumentata solo leggermente nel trattamento BB rispetto a quella nel trattamento B e nel controllo (Figura 4-1). Le concentrazioni totali degli altri metalli analizzati non erano significativamente diverse tra i trattamenti (Figura 4-1). La disponibilità di metalli pesanti non è aumentata significativamente nel tempo nei terreni trattati con biochar, fatta eccezione per un aumento significativo ($p < 0,05$) in Al e Ni disponibili per BB nel 2014 (figura 4-2). Anche le concentrazioni di Pb e Cu sono aumentate nei terreni trattati, ma nessuno dei metalli ha superato gli attuali limiti UE per i terreni agricoli (CEC 1986 n. 86/278/CEE). Inoltre, l'aumento della concentrazione totale dei metalli non è correlato a un aumento della loro disponibilità, confermando la capacità delle ceneri di biochar di stabilizzare i metalli pesanti nel terreno (Mackie et al. 2015).

Tabella 4-1: pH, rapporto C/N e concentrazione dei metalli pesanti nel periodo di tempo 2010/2014 (Maienza et al. 2017).

	C2010	C2013	C2014	B2010	B2013	B2014	BB2010	BB2013	BB2014
pH	5.5	5.24	5.94	5.94	6.35	6.54	7.18	6.55	7.31
C/N	5.43	7.08	6.52	5.18	5.22	5.44	17.71	11.56	13.47
Pb	20.90	17.75	16.68	74.19	87.30	88.70	70.37	72.88	69.35
Cu	22.48	23.26	22.33	29.67	23.10	24.41	30.87	34.48	28.08
Al	29.54	31.86	34.28	31.62	40.00	33.94	24.02	32.1	32.88
Ni	22.40	26.02	25.05	26.35	26.65	26.99	21.65	24.83	24.56

Tabella 4-2: Evoluzione dal 2010 al 2014 della concentrazione dei metalli disponibili nel suolo di un vigneto di Merlot in Toscana trattato con Biochar a due diverse dosi rispetto ad un controllo non trattato (Maienza et al. 2017).

	C2010	C2013	C2014	B2010	B2013	B2014	BB2010	BB2013	BB2014
Pb	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Cu	0.06	0.03	0.04	0.02	0.04	0.02	0.06	0.04	0.03
Al	0.10	0.04	0.10	0.10	0.05	0.04	0.15	1.20	0.16
Ni	0.05	0.18	0.08	0.05	0.16	0.09	0.02	0.64	0.05

Uno studio di Mackie et al. (2015), su Pinot Nero in Svizzera, ha dimostrato che biochar, compost e biochar-compost non hanno influenzato la biodisponibilità del Cu nei suoli analizzati. L'uso agricolo di fungicidi a base di rame (Cu) ha portato a un elevato livello basale di Cu in molti terreni europei, che persiste e si accumula soprattutto nello strato superficiale del terreno. L'aumento della concentrazione di Cu nei suoli ha effetti negativi per la vite e i batteri; tuttavia, si è ipotizzato che il biochar potesse assorbire, tra i vari inquinanti, anche il Cu, riducendo l'accessibilità e minimizzando lo stress indotto dalle tossine su microrganismi e piante. La mancanza di immobilizzazione del rame nell'indagine di Mackie et al. (2015) potrebbe essere potenzialmente dovuta al fatto che la materia prima utilizzata (biochar di legno duro ad alta temperatura) sia stata studiata solo in laboratorio; inoltre, rispetto ai valori di Cu nel terreno in laboratorio, i livelli di inquinamento da Cu nei vigneti potrebbero essere generalmente troppo bassi per indurre l'adsorbimento del metallo da parte del biochar.

CONCLUSIONI

Le sfide che si trovano ad affrontare i viticoltori sono i repentini cambiamenti climatici, il bisogno di aumentare la produzione e la qualità dell'uva e la necessità di ridurre l'inquinamento del suolo. Sono state proposte numerose strategie per affrontare queste problematiche, tra cui è emerso anche l'utilizzo del biochar. Nonostante alcune criticità nel suo utilizzo e la mancanza di dati certi di efficacia, il biochar ha sicuramente dimostrato un grande potenziale per la lotta contro i cambiamenti climatici. Infatti, con il passare del tempo, ci accorgiamo che intervenire per proteggere la viticoltura, soprattutto in un territorio come quello marchigiano caratterizzato da zone collinari spesso senza accesso all'acqua per l'irrigazione, è un nostro dovere. Il biochar è uno degli strumenti che al giorno d'oggi può essere utilizzato per contrastare questi continui cambiamenti data la sua grande capacità di trattenere l'acqua: una strategia basata sul biochar può essere efficacemente adottata nei vigneti situati in aree soggette a siccità, come alternativa all'irrigazione, e in zone di depressione vegetativa dove potrebbe portare ad una uniformazione produttiva, aiutando i viticoltori ad avere delle produzioni continuative e costanti nel tempo.

Tuttavia, le zone di applicazione del biochar dovrebbero essere aree di dimensioni limitate per diverse motivazioni. In primo luogo, al momento il biochar presenta costi di acquisto elevati che si aggirano all'incirca sui 2500 €/tonnellata, ciò porterebbe il viticoltore ad un esborso economico davvero importante nel caso di copertura di vaste aree. Inoltre, solo l'effetto di ritenzione idrica è stato confermato su larga scala mentre, per le ulteriori potenzialità descritte in laboratorio non sono stati prodotti risultati significativi negli esperimenti in pieno campo effettuati in vigneto.

In particolare, nonostante siano stati ottenuti risultati secondo cui l'applicazione di biochar comporta delle variazioni della concentrazione degli elementi nutritivi nel suolo, queste sono ovviamente influenzate dalla quantità usata, dal metodo di applicazione e dal tipo di terreno. Inoltre, non sono stati ottenuti miglioramenti evidenti della fertilità del suolo, né generalizzati incrementi della produzione e della qualità delle uve. Su questo fronte possiamo affermare che si registrano miglioramenti della quantità o della qualità delle uve quando si opera su terreni prevalentemente sabbiosi e/o acidi e in ambienti siccitosi. I potenziali vantaggi si riducono in

modo importante quando si opera su terreni argillosi e/o in condizioni di pH basico. Gli studi condotti su queste ultime tipologie di suolo, specie se in ambienti con buone disponibilità idriche (naturali o dovute all'irrigazione) hanno portato all'assenza o alla penuria di risultati positivi nel corso di numerose indagini condotte in diverse regioni del mondo.

Anche per quanto riguarda l'efficacia nell'immobilizzazione di sostanze inquinanti, risultati significativi sono stati ottenuti solo in condizioni di laboratorio con concentrazioni di inquinanti ben superiori rispetto a quelle rilevabili nei terreni coltivati.

Le modificazioni del pH sono state dimostrate con certezza nei suoli acidi che con l'aggiunta del biochar si sono trasformati in sub-basici portando ad un innalzamento di pH anche di qualche punto; in terreni già basici l'aggiunta di questo ammendante non ha, invece, portato a cambiamenti favorevoli nel pH. Nonostante ciò, la ricerca sta già sviluppando dei biochar con soluzioni tampone che ne diminuiscono la basicità. Questo è un esempio di come, sfruttando la versatilità e la flessibilità di questo ammendante, si potrebbero migliorare le proprietà fisiche e chimiche in base alle specifiche necessità del suolo e delle singole zone di depressione, garantendo una migliore gestione differenziata della variabilità dei vigneti.

In conclusione, le potenzialità del biochar sono realmente numerose, ma ancora in piena fase di ricerca, pertanto sono auspicabili ulteriori studi volti ad indagarne l'efficacia.

BIBLIOGRAFIA

- Baronti S., Vaccari F.P., Miglietta F., Calzolari C., Lugato E., Orlandini S., Pini R., Zulian C., Genesio L., 2014. Impact of biochar application on plant water relations in *Vitis vinifera* (L.), *European Journal of Agronomy*, Volume 53, 2014, Pages 38-44, ISSN 1161-0301, <https://doi.org/10.1016/j.eja.2013.11.003>.
- Baronti S., Magno R., Maienza A., Montagnoli A., Ungaro F., Vaccari F.P., 2022. Long term effect of biochar on soil plant water relation and fine roots: Results after 10 years of vineyard experiment, *Science of The Total Environment*, Volume 851, Part 1, 2022, 158225, ISSN 0048-9697, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158225>.
- Basso, A.S., Miguez, F.E., Laird, D.A., Horton, R., Westgate, M., 2013. Assessing potential of biochar for increasing water-holding capacity of sandy soils. *Global Change Biol. Bioenergy* 5, 132–143.
- Brockhoff, S.R., Christians, N.E., Killorn, R.J., Horton, R., Davis, D.D., 2010. Physical and mineral-nutrition properties of sand-based turfgrass root zones amended with biochar. *Agron. J.* 102 (6), 1627–1631. <https://doi.org/10.2134/agronj2010.0188>.
- Clough, T.J., Condon, L.M., Kammann, C., Müller, C., 2013. A review of biochar and soil nitrogen dynamics. *Agronomy* 3, 275–293.
- Dias B.O., Silva C.A., Higashikawa F.S., Roig A., Sánchez-Monedero M.A., 2010. Use of biochar as bulking agent for the composting of poultry manure: Effect on organic matter degradation and humification *Bioresource Technology*, Volume 101, Issue 4, 2010, Pages 1239-1246, ISSN 0960-8524, <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.09.024>.
- Fischer, B., Manzoni, S., Morillas, L., Garcia, M., Johnson, M., Lyon, S., 2019. Improving agricultural water use efficiency with biochar – a synthesis of biochar effects on water storage and fluxes across scales. *Sci. Total Environ.* 657, 853–862. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.312>.

- Garcia-Jaramillo, M.N., Meyer, K.M., Phillips, C.L., Acosta Martinez, V., Osborne, J., Levin, A.D., Trippe, K.M. 2021. Biochar addition to vineyard soils: Effects on soil functions, grape yield and wine quality. *Biochar*. 3:565-577. <https://doi.org/10.1007/s42773-021-00118-x>.
- Genesio L., Miglietta F., Baronti S., Vaccari F. P., 2015. Biochar increases vineyard productivity without affecting grape quality: Results from a four years field experiment in Tuscany, *Agriculture, Ecosystems & Environment*, Volume 201, 2015, Pages 20-25, ISSN 0167-8809, <https://doi.org/10.1016/j.agee.2014.11.021>.
- Horel, Á.; Tóth, E.; Gelybó, G.; Dencső, M.; Potyó, I. Soil CO₂ and N₂O Emission Drivers in a Vineyard (*Vitis vinifera*) under Different Soil Management Systems and Amendments. *Sustainability* 2018, 10, 1811. <https://doi.org/10.3390/su10061811>
- Karhu, K., Mattila, T., Bergström, I., Regina, K., 2011. Biochar addition to agricultural soil increased CH₄ uptake and water holding capacity—results from a short-term pilot field study. *Agric. Ecosyst. Environ.* 140 (1–2), 309–313. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2010.12.005>.
- Kastner J.R., Miller J., Geller D.P., Locklin J., Keith L.H., Johnson T., 2012. Catalytic esterification of fatty acids using solid acid catalysts generated from biochar and activated carbon, *Catalysis Today*, Volume 190, Issue 1, 2012, Pages 122-132, ISSN 0920-5861, <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2012.02.006>.
- Lorenz, K., Lal, R. 2014. Biochar application to soil for climate change mitigation by soil organic carbon sequestration. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 177, 651-670.
- Mackie K.A., Marhan S., Ditterich F., Schmidt H.P., Kandeler E. The effects of biochar and compost amendments on copper immobilization and soil microorganisms in a temperate vineyard, *Agriculture, Ecosystems & Environment*, Volume 201, 2015, Pages 58-69, ISSN 0167-8809, <https://doi.org/10.1016/j.agee.2014.12.001>.
- Maienza, A., Baronti, S., Cincinelli, A. Martellini, T. Grisolia, A. Miglietta, F. Renella, G. Stazi, Silvia Rita Vaccari Fp. Biochar improves the fertility of a Mediterranean vineyard without toxic impact on the microbial community. *Agron. Sustain. Dev.* 37, 47 (2017). <https://doi.org.ezproxy.cad.univpm.it/10.1007/s13593-017-0458-2>

- Oleszczuk P, Joško I, Kuśmierz M, Futa B, Wielgosz E, Ligeża S, Pranagal J (2014) Microbiological, biochemical and ecotoxicological evaluation of soils in the area of biochar production in relation to polycyclic aromatic hydrocarbon content. *Geoderma* 213:502–511. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.08.027>
- Omondi, M.O., Xia, X., Nahayo, A., Liu, X., Korai, P.K., Pan, G., 2016. Quantification of biochar effects on soil hydrological properties using meta-analysis of literature data. *Geoderma* 274, 28–34. <https://doi.org/10.1016/J.GEODERMA.2016.03.029>.
- Quilliam, R.S., Marsden, K.A., Gertler, C., Rousk, J., DeLuca, T.H., Jones, D.L. 2012. Nutrient dynamics: microbial growth and weed emergence in biochar amended soil are influenced by time since application and reapplication rate. *Agriculture Ecosystems and Environment* 158, 192-199.
- Razzaghi, F., Obour, P.B., Arthur, E., 2020. Does biochar improve soil water retention? A systematic review and meta-analysis. *Geoderma* 361, 114055. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.114055>.
- Rombolà, A.G., Meredith, W., Snape, C.E., Baronti, S., Genesio, L., Vaccari, F.P., Miglietta F., and Fabbri D.. (2015). Fate of Soil Organic Carbon and Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in a Vineyard Soil Treated with Biochar. *Environmental Science & Technology*, 49(18), 11037-11044 [10.1021/acs.est.5b02562].
- Rombolà AG; Fabbri D; Baronti S; Vaccari FP; Genesio L; Miglietta F. 2019 Changes in the pattern of polycyclic aromatic hydrocarbons in soil treated with biochar from a multiyear field experiment Istituto di Biometeorologia - IBIMET - Sede Firenze <https://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.11.178>"
- Sams B., Bramley R.G.V., Sanchez L., Dokoozlian N.K., Ford C.M., Pagay V. Characterising spatio-temporal variation in fruit composition for improved winegrowing management in California Cabernet Sauvignon. *Australian Journal of Grape & Wine Research*, 2022, Vol 28, Issue 3, p407, ISSN 1322-7130, DOI 10.1111/ajgw.12542.
- Schmidt H. P., Kammann C., Niggli C., Evangelou M.W.H, Mackie K. A., Abiven S., 2014 Biochar and biochar-compost as soil amendments to a vineyard soil: Influences on plant growth, nutrient uptake, plant health and grape quality, *Agriculture, Ecosystems & Environment*, Volume 191, 2014, Pages 117-123, ISSN 0167-8809, <https://doi.org/10.1016/j.agee.2014.04.001>.

- Schneider N., Islam M., Wehrle R., Pätzold S., Brüggemann N., Töpfer R., Herzog K. Deep incorporation of organic amendments into soils of a ‘Calardis Musqué’ vineyard: effects on greenhouse gas emissions, vine vigor, and grape quality *Frontiers in Plant Science* vol 14, 2023, DOI 10.3389/fpls.2023.1253458, 1664-462X
- Verheijen, F.G.A. 2009, Biochar application to soils-a critical scientific review of effects on soil properties, processes and functions. In: EUR 24099 EN. Office for the Official Publications of the European Communities, Luxembourg.
- Verheijen F.G.A., Jeffery S., Van der Velde M., Bastos A.C. 2011. A quantitative review of the effects of biochar application to soils on crop productivity using meta-analysis, *Agriculture, Ecosystems & Environment*, Volume 144, Issue 1, 2011, Pages 175-187, ISSN 0167-8809, <https://doi.org/10.1016/j.agee.2011.08.015>.
- Wang, J., Xia, K., Waigi, M.G., Gao, Y., Odinga, E.S., Ling, W., Liu, J., 2018. Application of biochar to soils may result in plant contamination and human cancer risk due to exposure of polycyclic aromatic hydrocarbons. *Environ. Int.* 12, 169e177.
- Weber K., Quicker P., Properties of biochar, *Fuel*, Volume 217, 2018, Pages 240-261, ISSN 0016-2361, <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.12.054>.
- Wolf, D., Amonette, J.E., Street-Perrott, F.A., Lehmann, J., Joseph, S., 2010. Sustainable biochar to mitigate global climate change. *Nat. Commun.* 1, 56.