



DIPARTIMENTO DI SCIENZE AGRARIE ALIMENTARI E AMBIENTALI

CORSO DI LAUREA IN: SCIENZE FORESTALI E AMBIENTALI

**TECNICHE DI COMPOSTAGGIO E METODI PER
IL RIPRISTINO DELLA FERTILITÀ DEI SUOLI**

**COMPOSTING TECHNIQUES AND METHODS FOR
RESTORING SOIL FERTILITY**

TIPO TESI: Compilativa

Studente:
RECANATINI LUCA

Relatore:
PROF. CRISTIANO CASUCCI

ANNO ACCADEMICO 2021-2022

SOMMARIO

ELENCO DELLE FIGURE.....	
3INTRODUZIONE E SCOPO DELLA TESI.....	4
CAPITOLO 1: IL COMPOSTAGGIO	5
1.1 Compostaggio aerobico	5
1.2 Fasi del processo di compostaggio	8
1.3 qualità del compost prodotto.....	18
1.4 Contenuto metalli pesanti antibiotici.....	19
1.5 Ripristino dei suoli attraverso l'utilizzo del compost.....	19
CAPITOLO 2: MATERIALI E METODI	22
CAPITOLO 3 ARTICOLI.....	22
3.1 Articolo I	23
3.2 Articolo II	26
3.3 Articolo III.....	31
CONCLUSIONI	55
BIBLIOGRAFIA	56

ELENCO DELLE FIGURE

Figura 1: Esempio di compost utilizzabile come ammendante.

Figura 2: Impianto di digestione anaerobica.

Figura 3: fasi per la produzione del compost in ambito domestico (dallo scarto alimentare fino al prodotto finale).

Figura 4: Schemi dei principali cambiamenti dei processi agronomici e biogeochimici durante il ripristino della fertilità del suolo attraverso la perennizzazione dei terreni agricoli degradati.

Figura 5: Combinazioni alternative di servizi ecosistemici che potrebbero essere forniti da diversi sistemi perenni rispetto ai terreni agricoli degradati.

INTRODUZIONE E SCOPO DELLA TESI

Il compostaggio è un processo biologico che trasforma la materia organica in un prodotto finale chiamato compost, che può essere utilizzato come fertilizzante naturale per le piante. Questo processo può essere applicato in diversi contesti, tra cui l'ambiente forestale, dove il compostaggio può essere utilizzato come strumento di gestione dei rifiuti e di prevenzione degli incendi boschivi.

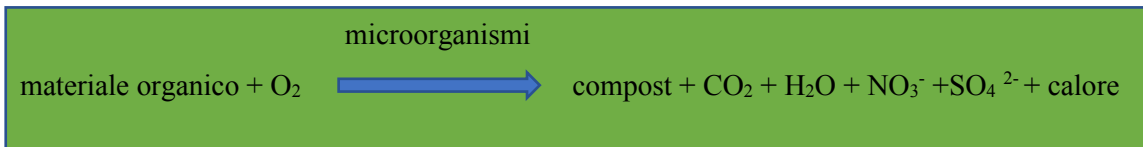
Il compostaggio è una tecnica sostenibile ed ecologica per la gestione dei rifiuti, che può contribuire alla riduzione dell'impatto ambientale e al miglioramento della salute del suolo e delle piante.

Lo scopo di questa tesi è porre l'attenzione sull'importanza rivestita dall'utilizzo del compost per vari ambiti di applicazione (dall'uso domestico fino all'uso industriale) in relazione ad un miglioramento della raccolta differenziata per mitigare gli impatti ambientali provocati dai rifiuti e sull'importanza della fertilità del suolo come proprietà da preservare e ripristinare .

Capitolo 1

IL COMPOSTAGGIO

1.1 COMPOSTAGGIO AEROBICO. Con il termine compostaggio viene definito il processo di maturazione biologica controllata, in ambiente aerobico, della sostanza organica di residui animali e vegetali attraverso il quale si ha produzione di materiali a catena molecolare più semplice, più stabili, igienizzati, ricchi di composti umici, utili, in definitiva, per la concimazione delle colture agrarie e per il ripristino della sostanza organica nei suoli. Il processo avviene ad opera di diversi ceppi di microrganismi operanti in ambiente aerobico: batteri, funghi, attinomiceti, alghe, protozoi, presenti naturalmente nelle biomasse organiche o artificialmente apportati con l'eventuale materiale di inoculo. Sinteticamente il processo può essere descritto con la seguente relazione:



Il processo di compostaggio è oggi di grande interesse sotto diversi punti di vista:

- dal punto di vista ecologico-ambientale, perché trasforma biomasse provenienti dal ciclo urbano, da selezione di reflui agroalimentari, agricoli e zootecnici, nonché fanghi derivanti dalla depurazione di acque reflue civili, in materiali utili alla fertilizzazione dei terreni agricoli, perché non più fitotossici, apportatori di nutrienti e miglioratori delle caratteristiche strutturali del terreno;
- dal punto di vista igienico-sanitario, perché il materiale organico viene sanitizzato nel processo, grazie alle elevate temperature che si ingenerano;
- dal punto di vista energetico, dato che il processo si autosostiene energeticamente, con l'energia derivante dalla demolizione dei legami biochimici caratterizzanti le complesse molecole della sostanza organica.

Da un punto di vista prettamente tecnico, le matrici organiche compostabili devono avere caratteristiche biochimiche tali da garantire una regolare attuazione del processo; in particolare devono contenere in entità sufficiente composti di facile degradabilità, per garantire il nutrimento

dei microrganismi agenti del processo. Un buon prodotto ai fini del compostaggio deve avere un'elevata attività biologica, definibile ad esempio attraverso gli indici di respirazione. I materiali organici utilizzabili per la produzione del compost di qualità sono regolamentati dal Decreto Ministeriale 5 febbraio 1998 e riconducibili alle tipologie indicate in tab. 1. Il prodotto ottenuto per potere essere commercializzato ed utilizzato in agricoltura senza controindicazioni come materiale ammendante/fertilizzante, deve possedere le specifiche caratteristiche e requisiti stabiliti dalla normativa relativa ai fertilizzanti, cioè dalla legge n. 748/1984 (e sue successive modifiche e integrazioni). Il processo di compostaggio, comunque, può essere adottato anche per la stabilizzazione della sostanza organica contenuta nei RSU e nei fanghi di depurazione prima dello smaltimento in discarica: il prodotto ottenuto non rientrerà nella categoria del "compost di qualità", ma dovrà essere considerato – da un punto di vista normativo – un rifiuto.

MATERIALE ORGANICO	PROVENIENZA
◆ frazione fermentescibile RSU (FORSU)	- raccolta differenziata
◆ residui vegetali	- coltivazione e raccolta di colture vegetali - lavorazione di prodotti agricoli - manutenzione del verde ornamentale (residui di potatura, erba)
◆ segatura, trucioli di legno, sughero	- attività forestali e legno non trattato
◆ scarti di legno non impregnato	- imballaggi
◆ cascami e scarti di cotone, lino, juta e canapa	- attività tessili
◆ cascami e scarti di lana e seta	- attività tessili
◆ deiezioni animali, letami e lettiere integrate	- attività zootecniche
◆ sottoprodotti macellazione	- macellazione
◆ fanghi di depurazione	-attività di trasformazione alimentare (carne, pesce, orto-frutta, bevande) - depuratori civili - industria della carta - attività zootecniche e agro-industria

Tab. 1- Materiali organici compostabili

Tra le diverse popolazioni di microrganismi che si alternano all'interno della matrice organica nelle diverse fasi del processo di compostaggio si ha una interazione sinergica: i prodotti metabolici di una tipologia di microrganismo possono essere usati come nutrimento di altri. Un utile esempio è quello dei microrganismi secernenti amminoacidi e vitamine, essenziali per la vita di altri ceppi microbici. Anche gli insetti e altri invertebrati sono utili alla disgregazione fisica di molte strutture organiche rendendole, così, disponibili per i batteri. In merito alla distribuzione dei microrganismi nel cumulo, i batteri si ritrovano un po' ovunque, mentre i funghi e gli attinomiceti si trovano prevalentemente nello strato superficiale (0,05-0,15 m dalla superficie). Anche le alghe si posizionano sullo strato superficiale dei cumuli. In termini numerici i batteri rappresentano la parte dominante degli agenti del processo, risultando di circa cento volte superiori alle altre categorie di microrganismi.

I diversi microrganismi operano a regimi termici definiti e la loro attività è strettamente influenzata dalle temperature di processo, tanto da poter essere classificati in psicrofili, mesofili e termofili (tab. 1.2). Durante il compostaggio, al variare della temperatura di processo, variano le popolazioni microbiche attive: nelle prime fasi, che comportano una rapida metabolizzazione dei composti carboniosi più semplici (monosaccaridi, lipidi e peptidi), operano inizialmente i microrganismi psicrofili e mesofili.

	TEMPERATURA °C
MICRORGANISMI PSICROFILI	$0 < t < 30$
MICRORGANISMI MESOFILI	$< t < 45$
MICRORGANISMI TERMOFILI	$45 < t < 90$

Tab. 1.2 - Classificazione dei microrganismi in funzione del regime termico

Successivamente, a causa dell'innalzamento della temperatura, conseguente ad una intensa attività metabolica, si ha una forte selezione tra le popolazioni batteriche a vantaggio delle specie termofile, il cui campo di lavoro ottimale è indicabile nel campo 50-60°C. Se si sale oltre gli 80-90°C si verifica la morte della maggior parte dei microrganismi ad eccezione di alcune specie batteriche ultra-termofile, che si trovano nella matrice organica sotto forma di spore (strutture di resistenza al calore). A tali condizioni corrisponde, comunque, una progressiva diminuzione dell'attività microbica, fino all'arresto della stessa. Il conseguente raffreddamento porta alla riattivazione dei microrganismi sporigeni, a partire da quelli termofili, per passare poi a quelli mesofili e psicrofili.

Tra i diversi microrganismi operanti nei processi di compostaggio appare indispensabile attuare una distinzione tra **microrganismi aerobi** che necessitano di ossigeno per il loro metabolismo e i **microrganismi anaerobi** che sono attivi in ambienti privi di ossigeno. Il compostaggio è, per definizione, un processo aerobico; dovrebbe, quindi, essere caratterizzato dalla presenza di soli microrganismi aerobi. Anche in condizioni ottimizzate, tuttavia, nei cumuli operano anche popolazioni anaerobiche, che producono composti gassosi come metano, acido butirrico ed altri acidi grassi dal caratteristico odore sgradevole. L'importante è che queste attività siano di entità controllata, dato che con il prevalere di processi anaerobi si avrà una produzione di compost di non elevata qualità.

1.2 LE FASI DEL PROCESSO DI COMPOSTAGGIO

Le trasformazioni che subisce la sostanza organica nel processo di compostaggio possono essere ricondotte a due fasi successive:

1. decomposizione o destrutturazione,
2. maturazione.

La prima fase del processo termina con il declino delle fermentazioni termofile ed ha una durata limitata nel tempo; la seconda fase del processo, indicata come fase di maturazione, è caratterizzata da un processo mesofilo prolungato. L'obiettivo principale del processo di compostaggio è quello di ottenere un prodotto stabilizzato, intendendo con questo termine sia il raggiungimento della maturità biologica (rallentamento delle attività biologiche sulla sostanza organica), sia la maturità agronomica (assenza di fitotossicità per le piante). In realtà anche dopo la fine del processo, cioè dopo la seconda fase, il compost non è completamente stabile, dato che i fenomeni biologici continuano, anche se con scarsi effetti sulla qualità del prodotto.

LA PRIMA FASE: DECOMPOSIZIONE DELLA SOSTANZA ORGANICA

Il processo di compostaggio inizia non appena il substrato organico viene correttamente messo in cumulo con la fase di destrutturazione della frazione organica più facilmente degradabile (zuccheri, acidi organici, amminoacidi) ad opera dei microrganismi aerobi, con consumo di ossigeno, liberazione di CO₂ e produzione di energia, necessaria a portare la temperatura del cumulo progressivamente fino al previsto regime termofilo: ciò è ottenuto tramite la rottura dei legami chimici dei diversi composti organici. Questa fase, prettamente termofila, è nota anche come **high rate phase** e può durare per alcune settimane e anche più di un mese: la durata è

influenzata dalle caratteristiche del substrato e dalla tecnica di compostaggio adottata. L'incremento in temperatura è assai marcato nelle 12-48 ore successive all'allestimento del cumulo e l'andamento è di rapida crescita fino a 55-60°C. Se il calore non viene adeguatamente dissipato le temperature possono aumentare portando all'inattivazione della maggior parte dei microrganismi. La fase termofila comporta la devitalizzazione dei semi delle piante infestanti eventualmente presenti nelle matrici di partenza.

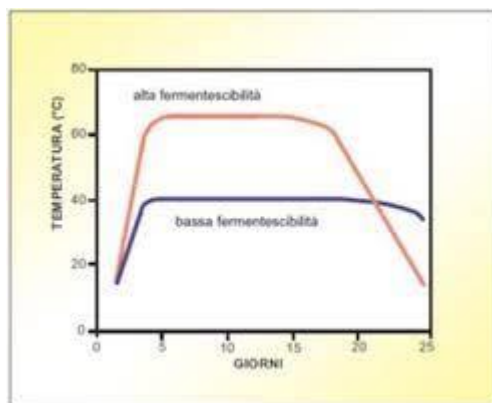


Fig 1.1 Andamento delle temperature nel cumulo durante il processo per una biomassa di elevata e bassa fermentescibilità.

L'aerazione forzata o il rivoltamento del cumulo sono, dunque, indispensabili per consentire il raffreddamento del substrato oltre che per mantenere l'ossigenazione della biomassa al di sopra dei valori critici per l'attività della popolazione microbica aerobia. Durante questa fase del processo si ha la formazione temporanea di fitotossine, metaboliti naturali provenienti dalla degradazione dei materiali organici. Le più importanti sostanze fitotossiche sono probabilmente l'azoto ammoniacale e gli acidi grassi volatili a catena corta, come gli acidi acetico, propionico e butirrico, ma si suppone che l'insieme delle fitotossine racchiuda una più ampia gamma di composti tra cui ammine alifatiche ed aromatiche, nonché acidi organici a struttura più complessa e fenoli. Le fitotossine vengono velocemente metabolizzate dalle popolazioni microbiche che man mano si susseguono nella massa in trasformazione. Con il progredire del processo diminuiscono le sostanze solubili e contemporaneamente iniziano a formarsi sostanze pseudomiche. Le temperature elevate, le condizioni di pH e di umidità che si ingenerano nella massa in decomposizione, fanno sì che i batteri siano i microrganismi più attivi in questa fase. Alla fine della prima fase si dispone di compost fresco.

LA SECONDA FASE: MATURAZIONE

Con la scomparsa dei composti più facilmente biodegradabili, metabolizzati nella prima fase del compostaggio, i processi metabolici di decomposizione interessano le molecole organiche più complesse e si attuano con processi più lenti, anche a seguito della morte di una buona parte della popolazione microbica per carenza di nutrimento. Con il conseguente progressivo abbassamento della temperatura cambiano anche le popolazioni di microrganismi attivi, con passaggio da quelle termofile a quelle mesofile prima e psicrofile successivamente. In questa fase, infatti, le temperature scendono a valori di 40-45°C per poi scendere progressivamente, stabilizzandosi poco al di sopra della temperatura ambiente.

Già nella fase mesofila appaiono gli attinomiceti: essi degradano attivamente amido, cellulosa e lignina, composti indispensabili per la sintesi delle sostanze umiche. L'intervento degli attinomiceti è fondamentale per l'umificazione: la loro presenza è facilmente rilevabile per la produzione di composti aromatici, come la geosmina, che conferiscono al prodotto finale il tipico odore di terriccio di bosco. Si ha anche una intensa colonizzazione del materiale da parte di animali di piccole dimensioni (ad esempio collemboli, acari e millepiedi) che contribuiscono in modo considerevole allo sminuzzamento e al rimescolamento dei composti organici e minerali. Le sostanze umiche hanno origine dalla trasformazione chimica e biologica di residui animali e vegetali e dalle attività di sintesi dei microrganismi: i composti formati tendono ad associarsi in complesse strutture chimiche stabili. L'umificazione è dovuta soprattutto alla polimerizzazione ossidativa degli acidi fenolici e dei fenoli ottenuti dal catabolismo della lignina, dei tannini e dei polifenoli, oppure per neosintesi microbica. Per quanto concerne la morfologia del prodotto è simile a quella di un buon terreno: la pezzatura del prodotto è ridotta rispetto a quella di partenza, ma può presentare aggregazione glomerulare. Alla fine della seconda fase, denominata anche curing phase, si dispone di compost maturo, cioè stabilizzato.

1.2. PARAMETRI E INDICI DI EVOLUZIONE DEL PROCESSO

I microrganismi hanno un ruolo fondamentale nella decomposizione della sostanza organica e vi è una relazione diretta tra la loro attività e l'evoluzione del processo di compostaggio. L'andamento e la velocità del processo sono, cioè, strettamente dipendenti dai fattori che influenzano le condizioni ottimali per la vita dei microrganismi operanti nelle diverse fasi del processo. Parametri quali ossigeno, umidità e temperatura sono normalmente controllati per

verificare il corretto andamento del processo, ma esistono altri parametri che influenzano le condizioni di vita dei microrganismi ed in particolare:

1. la porosità del substrato;
2. l'umidità del materiale;
3. la presenza di ossigeno;
4. la temperatura;
5. il rapporto C/N e la disponibilità dei nutrienti;
6. il pH;
7. la presenza di sostanze inibenti i processi di trasformazione

Appare evidente, quindi, che l'evoluzione di un processo di compostaggio dipende non solo da una corretta composizione della biomassa organica, ma anche dal mantenimento delle condizioni di processo ottimali. Un corretto monitoraggio dei cumuli, soprattutto nelle fasi di avvio, è indispensabile per la rilevazione di eventuali anomalie di processo.

-POROSITA' DEL SUBSTRATO. Si definisce porosità totale del cumulo, o spazio lacunare, il rapporto (espresso in percentuale) tra il volume occupato dagli spazi vuoti all'interno della biomassa e quello occupato dalla biomassa stessa. I vuoti sono occupati in parte da aria ed in parte da acqua: la porosità libera, che in bibliografia viene anche indicata con il termine F.A.S. = free air space, indica la percentuale di volume occupata dall'aria. Questo parametro è di grande importanza, in quanto influenza la possibilità, o meno, di mantenere nella massa in compostaggio la quantità di ossigeno necessaria al processo. Nel compostaggio si è, dunque, in presenza di un sistema a tre variabili: acqua, aria e materiale organico. In condizioni ottimali lo spazio lacunare si attesta su valori compresi tra il 35 e il 50%.

-UMIDITA' DEL MATERIALE. L'acqua è un elemento fondamentale per la vita della maggior parte dei microrganismi attivi nel processo di compostaggio, perché: - è indispensabile per il verificarsi degli scambi nutritivi attraverso le membrane cellulari; - è il veicolo per gli enzimi extracellulari; - è il veicolo per i substrati solubili; - è il mezzo in cui avvengono le reazioni chimiche. I valori di umidità ottimali del materiale sono compresi tra il 65 e il 40%: con valori inferiori al 40% si ha un notevole rallentamento dell'attività biologica, che si ferma raggiunto il limite del 25-30%.

Con una umidità superiore al 65%, per contro, la diffusione dell'ossigeno nella massa risulta difficoltosa, potendo portare anche all'instaurarsi di condizioni anossiche.

È possibile, comunque, sottoporre a compostaggio anche materiali dotati di umidità prossima all'80% (fanghi di impianti di depurazione, erba, letami zootecnici): in tal caso si devono operare

opportune miscelazioni del prodotto con materiali ad alto contenuto di sostanza secca, come segatura e cortecce, o materiali fibrosi, quali paglia, foglie secche, in modo che l'umidità media della massa non superi il 65%. Il processo del compostaggio determina una naturale diminuzione di umidità nel tempo per effetto dell'evaporazione, facilitata dal ricambio dell'aria nella massa. Una eccessiva diminuzione comporta, però, il blocco del processo: il materiale è apparentemente stabile ma i fenomeni biologici riprendono nel caso di una sua reidratazione. Appare quindi fondamentale garantire che i valori di questo parametro rientrino nel range ottimale, obiettivo che nella fase iniziale viene raggiunto miscelando correttamente le matrici da compostare, e durante il processo ricorrendo all'umidificazione del prodotto utilizzando diversi sistemi di lavaggio.

-OSSIGENO. In condizioni aerobiche la degradazione di un substrato ricco di carbonio determina un forte consumo di ossigeno, con produzione di anidride carbonica, acqua e calore.

Ciò considerato, nel processo di compostaggio si ha una continua diminuzione dell'ossigeno a disposizione dei microrganismi: è necessario, dunque, reintegrarlo nella massa nella quantità necessaria per un regolare andamento del processo. I microrganismi aerobi usano approssimativamente 1,6 kg di ossigeno per elaborare 1,0 kg di materia organica. Tale richiesta di ossigeno deve essere soddisfatta dall'O₂ introdotto nei cumuli. La maggiore necessità di apporto di O₂ si ha all'inizio del processo, quando è massima l'attività di demolizione della sostanza organica da parte dei microrganismi: in questa fase la disponibilità di ossigeno negli spazi lacunari deve mantenersi nel campo 5 - 15% in volume. In tali condizioni non si raggiungono le condizioni di anaerobiosi ma neppure quelle della completa demolizione della sostanza organica tipica dei fenomeni di combustione.

-TEMPERATURA. La temperatura della massa in compostaggio è il parametro che meglio indica l'andamento del processo ed è anche quello di più facile monitoraggio. Oltre che per una corretta trasformazione della sostanza organica da parte dei microrganismi ai fini di renderla disponibile per gli usi agronomici, va ricordato che la fase termofila è molto importante nel processo, perché porta a: - l'igienizzazione del prodotto, con la distruzione dei microrganismi patogeni, che si ha a temperature non inferiori ai 55°C, come evidenziato anche nella tabella 1.12; - l'inattivazione dei semi di erbe infestanti e dei parassiti delle piante, che si ha a non meno di 60°C.. Nella fase termofila, va evitato un innalzamento della temperatura oltre i 70°C, perché ciò comporta un'alta mortalità microbica, visto che sono pochi i ceppi batterici in grado di sopravvivere a tali condizioni: ciò comprometterebbe l'efficienza del processo. Per tal ragione, per non superare gli ottimali livelli di temperatura di 55-60°C, è necessario intervenire con il rivoltamento della massa o con una appropriata ventilazione forzata del cumulo. Attraverso il

monitoraggio della temperatura del cumulo è possibile anche valutare il livello di ossigenazione della massa: l'abbassamento di temperatura va messo in prima istanza in relazione alla carenza di ossigeno.

-RAPPORTO C/N. Carbonio, azoto, fosforo e potassio sono naturalmente contenuti nella maggior parte delle matrici compostabili. La loro presenza è fondamentale per il processo, in quanto non sono solo unità strutturali, ma anche fonti di energia per i microrganismi. In particolare è assai importante avere un equilibrato rapporto tra carbonio e azoto: la carenza di uno dei due elementi (ma anche di altri nutrienti) è un fattore limitante per l'attività microbica, nonché per il suo sviluppo. Infatti, i microrganismi eterotrofi utilizzano il carbonio come fonte di energia e hanno bisogno dell'azoto per sintetizzare le proteine. L'azoto viene ottenuto per scissione delle proteine in peptidi ed aminoacidi liberi; questi possono essere soggetti ad una assimilazione diretta o ad un'ulteriore scissione con produzione di ammoniaca. Questa può tornare a far parte di composti organici se utilizzata dai microrganismi; può essere persa tramite volatilizzazione oppure trasformata in nitrato. Durante le diverse fasi del processo le popolazioni microbiche utilizzano un terzo del carbonio combinandolo con l'azoto per formare il protoplasma cellulare; la parte restante è ossidata ad anidride carbonica.

Considerando che in genere vengono utilizzati trenta atomi di carbonio per ogni atomo di azoto, si deduce che il rapporto ottimale C/N all'inizio del compostaggio dovrebbe attestarsi su un valore di 30. In condizioni di eccesso di carbonio ($C/N > 30$) si ha un rallentamento della decomposizione, con allungamento della durata del processo. Per contro con un valore di $C/N < 20$, si verifica la liberazione dell'eccesso di azoto sotto forma di NH_3 . La liberazione di ammoniaca in atmosfera è particolarmente elevata in presenza di un elevato tenore di azoto e alti valori di temperatura e pH. Qualora si sia in presenza di biomasse con C/N 5-15 è opportuna, quindi, una loro miscelazione con residui lignocellulosici (C/N 100-300): in tal modo si giunge ad un bilanciamento del rapporto garantendo le condizioni ottimali per il processo. E', tuttavia, necessario ricordare che l'aggiunta di materiali ricchi di carbonio non è per sé condizione sufficiente per riequilibrare le caratteristiche di C/N del substrato da compostare: il carbonio di materiali lignei – di lenta degradabilità – è di scarsa utilità.

Il rapporto C/N diminuisce nel tempo in quanto si verifica una perdita di carbonio per emissione di CO_2 mentre l'azoto, componente delle strutture aromatiche delle sostanze umiche, tende a rimanere nella massa. Alla fine del processo di compostaggio il C/N risulta inferiore a quello di partenza: in condizioni ottimali si arriva a valori $C/N = 15 - 20$. Con un valore troppo basso del rapporto C/N il compost può essere tossico per le piante, per il potenziale rilascio di ammoniaca;

con un valore troppo alto, invece, può determinare una competizione tra radici e microrganismi del suolo per l'azoto disponibile.

-pH. Il processo di compostaggio avviene con pH estremamente variabili, ma i valori ottimali per la miscela di partenza sono compresi tra 5,5 e 8,0, considerato che i batteri preferiscono un pH vicino alla neutralità e che i funghi preferiscono pH acidi. All'inizio del processo si ha un naturale spostamento di pH verso valori acidi a seguito della formazione di CO₂ e di acidi organici; successivamente il pH sale fino ad 8-9 a causa dell'eliminazione di CO₂ con l'aerazione ed a seguito della decomposizione delle proteine con produzione di ammoniaca. Alla fine del processo si registra un pH neutro o leggermente alcalino; in molti casi risulta difficile rispettare il valore limite imposto dalla legge nazionale (pH max 8,5). In ogni caso, la correzione del pH non viene di norma attuata, né intervenendo sul prodotto iniziale, né su quello finale.

-SOSTANZE INIBENTI. I processi biologici di degradazione della sostanza organica sono influenzati negativamente dalla presenza nel substrato di metalli pesanti in concentrazioni superiori a quelle compatibili con l'attività batterica. Valori troppo elevati determinano effetti tossici che nel migliore dei casi inducono soltanto l'inibizione dell'attività biologica, ma possono anche portare alla morte di tutti i ceppi batterici non resistenti. Particolare effetto negativo viene spiegato dagli ioni cromo, in particolare dal cromo esavalente che penetra nella membrana cellulare più facilmente del trivalente ed interferisce con le funzioni cellulari. Il compost ottenuto da rifiuti solidi urbani indifferenziati potrebbe presentare concentrazioni piuttosto elevate di tutti gli elementi esaminati, quindi l'utilizzo dei rifiuti tal quali non consentire di ottenere un prodotto accettabile dal punto di vista legislativo, normativo, agronomico e ambientale.

Il problema dei metalli pesanti, d'altra parte, può venire superato solo destinando al compostaggio matrici organiche selezionate, provenienti da utenze ben definite e da programmi di raccolta differenziata. Alcuni studi hanno evidenziato come solo il compost da rifiuti verdi risulti completamente allineato ai limiti previsti dal marchio ecologico europeo Ecolabel.

Dalle prove in pieno campo per quanto riguarda l'impiego di compost ottenuti da matrici organiche selezionate non emergono accumuli di metalli pesanti nei terreni.

Appare di notevole rilevanza la necessità di ricorrere ad indici che permettano di valutare la stabilità biologica del materiale compostato. I parametri principalmente utilizzati a questo scopo sono:

- l'indice di germinazione
- l'indice di mineralizzazione dell'azoto
- l'indice di respirazione

- l'indice di umificazione.

Con il termine di stabilità biologica si intende quello stadio di evoluzione della sostanza organica in cui i processi risultano decisamente rallentati, perché non esistono più le condizioni per una normale attività dei microrganismi responsabili dei processi di trasformazione biologica delle biomasse.

METODI DI COMPOSTAGGIO Oggigiorno sono numerosi i metodi di compostaggio utilizzabili, la cui scelta dipende da una serie concomitante di fattori; tra tutti, un ruolo di primo piano nella scelta del sistema da usare è rappresentato dal tipo di matrici organiche da trattare. Ad influenzare la scelta del metodo da utilizzare fattori importanti sono anche la quantità di rifiuto da trattare e stabilizzare, la disponibilità di spazio per la realizzazione dell'impianto di trattamento, l'entità dell'investimento necessario per le strutture ed i macchinari, l'incidenza della manodopera ed una molteplicità di considerazioni aggiuntive di natura ambientale, infrastrutturale e sociale. Sulla base di quanto detto, non è possibile definire a priori quale metodo di compostaggio sia più idoneo alle esigenze di un contesto specifico; tuttavia, anche se l'obiettivo di un corretto trattamento aerobico dei rifiuti organici può essere ottenuto mediante differenti strategie impiantistiche, è opportuno elencare e tenere ben presenti quelli che sono i limiti specifici di ciascuna soluzione impiantistica, evitando quindi l'adozione di metodi non appropriati. Come descritto precedentemente il requisito fondamentale per garantire un processo di degradazione rapido ed efficiente consiste nel mantenere costante la quantità di ossigeno presente nelle matrici che vengono trattate; di conseguenza, nelle diverse soluzioni operative, il metodo adottato determina il modo con cui la suddetta esigenza viene soddisfatta e, di conseguenza, finisce con l'influenzare altri aspetti importanti come il controllo della temperatura, il tempo necessario alla stabilizzazione delle matrici coinvolte, la movimentazione del materiale in trasformazione ed il controllo delle emissioni maleodoranti. Nel panorama tecnologico, esistono essenzialmente tre metodi generali di compostaggio (www.isprambiente.gov.it):

- a) il compostaggio in cumuli periodicamente rivoltati;
- b) il compostaggio in cumuli statici aerati;
- c) il compostaggio in bioreattori.

Esiste anche il compostaggio passivo, il quale però non è rilevante da un punto di vista tecnologico, poiché propone semplicemente di porre la matrice organica putrescibile al suolo, così da essere lasciata indisturbata per lunghi periodi (molti mesi), senza condizionare in alcun modo le reazioni di degradazione e le trasformazioni che si instaurano.



Figura 1: Esempio di compost utilizzabile come ammendante.

1.1 Compostaggio anaerobico

La digestione anaerobica è un processo di degradazione della sostanza organica che avviene in assenza di ossigeno. Tale processo produce una miscela di gas costituita principalmente da metano (CH_4) e anidride carbonica (CO_2). Il rifiuto a matrice organica, in particolare la FORSU, è caratterizzato da un elevato contenuto di carboidrati, lipidi e proteine facilmente degradabili, e rappresenta un ottimo substrato per la digestione anaerobica. La miscela di gas ottenuta dalla digestione anaerobica delle biomasse prende il nome di BIOGAS. La filiera di recupero e riciclaggio del rifiuto organico è un settore industriale strategico, rappresentato in Italia da 345 impianti di trattamento biologico operativi nel 2019. Gli impianti integrati di digestione anaerobica e compostaggio, che producono non solo compost ma anche biogas, sono oltre 65 e alcuni di questi si sono già affacciati al mondo della produzione di biometano per autotrazione. Dalla raffinazione (upgrading) del biogas si ottiene il BIOMETANO, un biocarburante avanzato con qualità del tutto simili a quelle del gas naturale che può essere immesso in rete ed utilizzato per il riscaldamento, la cottura dei cibi e l'autotrazione. La digestione anaerobica della frazione umida, associata all'upgrading del biogas a biometano, acquisisce, nel quadro complessivo della gestione dei rifiuti urbani, un ruolo strategico perché perfettamente in accordo con l'approccio "green e circolare" su cui l'Europa sta improntando le proprie politiche di sviluppo sostenibile.



Figura 2: Impianto di digestione anaerobica

1.2 Compost domestico

Il compostaggio domestico è un ottimo modo di gestire i propri rifiuti casalinghi. Si tratta essenzialmente di una tecnica di smaltimento, con successivo riciclaggio, della frazione organica dei rifiuti solidi urbani (residui alimentari, residui di potatura, residui delle pratiche di giardinaggio, foglie, letame ecc.). Tramite questa tecnica i rifiuti vengono trasformati in concime grazie a una serie di reazioni, il concime ottenuto con la tecnica di compostaggio viene definito appunto compost (più raramente composta).

Grazie al compostaggio domestico è possibile limitare la produzione generale di rifiuti e, in vari casi, ricavarne anche vantaggi economici; il compost ottenuto, infatti, può essere per esempio utilizzato per la concimazione delle nostre piante da giardino e da orto; peraltro sono diversi i Comuni italiani che incentivano economicamente questa pratica di smaltimento dei rifiuti organici praticando ai cittadini interessati uno sconto sulla tassa sui rifiuti (la cosiddetta TARI).



Figura 3: Fasi per la produzione del compost in ambito domestico (dallo scarto alimentare fino al prodotto finale).

1.3 Qualità del compost prodotto

In Italia, il settore del compostaggio è rappresentato dal Consorzio Italiano Compostatori (CIC), organizzazione senza scopi di lucro che raggruppa in sé tutte le principali aziende del settore; il CIC fornisce innanzitutto assistenza tecnica alle aziende ed è il promotore di numerose iniziative per un continuo sviluppo del compostaggio, necessario per tenere il passo con la continua evoluzione del contesto normativo, tecnologico ed economico europeo. Tra le proprie attività, il CIC attesta la qualità del compost ottenuto da alcune aziende che, del tutto volontariamente, si sottopongono ad un programma di controllo; inoltre, esso è supportato da un Comitato Tecnico Scientifico, i cui membri sono tra i maggiori esperti del settore, e che, inoltre, aggiorna continuamente i suoi parametri per essere al passo con lo sviluppo tecnologico e legislativo mondiale e comunitario. Il Consorzio promuove anche attività di ricerca con lo scopo di sperimentare nuove tecniche di trattamento e nuove metodologie di laboratorio per l'analisi della qualità del prodotto finale: infatti, ogni prodotto su cui si vuole apporre il marchio "Compost di qualità CIC" viene esaminato valutando la qualità delle frazioni organiche in ingresso, le diverse operazioni meccaniche di trasformazione eseguite e le conseguenti caratteristiche biochimiche ed

agronomiche del compost ottenuto. Inoltre, il CIC intende anche migliorare un aspetto che ad oggi non è sviluppato a pieno, ovvero l'incontro tra domanda e offerta, soprattutto diffondendo la conoscenza sulla qualità del prodotto e sui benefici legati al suo utilizzo verso quelli che possono essere i potenziali utilizzatori, consolidando quindi il concetto di “qualificazione agronomica delle iniziative di compostaggio”

Il Consorzio Italiano Compostatori lavora da sempre per garantire la qualità lungo tutta la filiera di produzione del compost.

Attraverso verifiche continue sul prodotto, il Marchio accerta la qualità dei fertilizzanti organici prodotti negli impianti delle aziende associate al CIC e si configura come uno strumento dalla duplice utilità:

- è utile ai produttori di ammendante compostato, che possono monitorare e migliorare la qualità del sistema di gestione e del prodotto,
- è utile ai potenziali utilizzatori, per poter riconoscere sul mercato quei prodotti che soddisfano standard qualitativi costantemente verificati.

1.4 Ripristino della fertilità suoli

“Il modello industriale di coltivazione del cibo ha creato sistemi privi di diversità che richiedono enormi quantità di pesticidi e fertilizzanti chimici per mantenere alte le rese”, spiega Koen van Seijen, autore del podcast Investing in Regenerative Agriculture ed esperto sul tema. Le pratiche di coltivazione e allevamento, intensive nell'utilizzo di input, hanno portato all'esaurimento e all'erosione del suolo e dei sistemi naturali. La salute del suolo e l'incremento del topsoil (vale a dire lo strato più superficiale del terreno) sono le priorità principali dell'agricoltura rigenerativa”. Le pratiche rigenerative per il suolo sono molteplici. Innanzitutto si favorisce l'uso di compost (sia di origine biologica che derivante da trattamento di rifiuti) per il ripristino della fertilità organica, per favorire le radici e la capacità di assorbimento dell'acqua si limita il lavoro dei mezzi meccanici, favorendo un numero ridotto di passaggi o l'agricoltura manuale. Rotazione, sostituzione con legumi, maggese, ma anche il biochar, un carbone vegetale usato per ridare nutrienti al suolo, sono meccanismi per riportare in salute il suolo. Monocolture intensive, e eliminazione totale di animali e piante dal suolo coltivato danneggiano la biodiversità che può aiutare a proteggere da parassiti, debitamente controllato.

Investire in agricoltura rigenerativa non ha solo l'effetto di aumentare la produttività alimentare, ridurre l'impatto sulla biodiversità, e diminuire l'impronta idrica, grazie a suoli più sani infatti secondo la Fao i suoli, dopo gli oceani sono i più grandi serbatoi di anidride carbonica e svolgono un ruolo cruciale nella mitigazione e nell'adattamento agli impatti della crisi climatica. Il degrado

del suolo mondiale ha già rilasciato nell'atmosfera fino a 78 gigatonnellate di carbonio (una gigatonnellata equivale alla massa di 10.000 portaerei statunitensi a pieno carico). Secondo la mappa Global Soil Organic Carbon Sequestration, i suoli potrebbero sequestrare fino a 2,05 petagrammi di CO₂ equivalente all'anno, compensando così fino al 34% delle emissioni di gas serra dai terreni agricoli. I suoli sono vita: al loro interno si trova il 25% della biodiversità globale. La pianificazione per interventi di concimazione e/o ammendamento e correzione può essere ritenuta necessaria alla luce delle caratteristiche del materiale terroso e dei materiali disponibili per la concimazione organica di fondo.

In questa fase è necessario monitorare le caratteristiche degli strati di materiale terroso per verificarne le caratteristiche e potere predisporre correzioni, correttivi ed ammendamenti necessari.

Il contenuto di sostanza organica nel suolo è un indicatore della qualità ambientale. La sostanza organica esercita infatti la propria azione sulle proprietà nutrizionali del terreno, sia perché costituisce una riserva di elementi nutritivi ed energetici per i microrganismi del suolo e di elementi nutritivi per le piante, sia perché attraverso i meccanismi di scambio, adsorbimento, complessazione e chelazione, modula la disponibilità degli elementi medesimi (Benedetti, 2008). In termini generali, si indica come normali prassi di tipo agronomico l'effettuazione di una concimazione organica. In questo caso, può essere considerato utile l'utilizzo di compost di qualità.

Il compost è un ammendante, ossia ha la capacità di migliorare le caratteristiche fisico meccaniche del suolo, con un discreto effetto concimante ed è quindi in grado di sostituire la letamazione ed in parte la fertilizzazione minerale.

Sono ormai abbondanti le prove sperimentali e dimostrative condotte in Italia. Varie sono anche le utilizzazioni aziendali del compost come ammendante sia nei suoli destinati a coltivazioni arboree quanto per quelli ove vi siano seminativi.

Attualmente il miglioramento della qualità dei prodotti disponibili ha accentuato la surrogazione di letami o fertilizzanti di sintesi, anche per la riduzione della disponibilità dei primi e dei costi dei secondi.

Per l'uso del compost occorrono alcuni accorgimenti:

- monitoraggio della qualità del prodotto utilizzato,
- attenzione nell'utilizzo, in considerazione dei risultati d'analisi,
- dar peso alla certificazione del prodotto.

Ricordiamo inoltre il beneficio che ha l'incremento del contenuto di carbonio organico nel suolo nelle strategie ambientali relative ai cambiamenti climatici.

Il calcolo della quantità necessaria di compost si basa sul bilancio umico, tenendo conto di diversi fattori quali:

- quantità di suolo (T) calcolata tramite: spessore considerato, densità apparente del suolo (val generali min-max da 0,8 a 1,7 kg/dm³)
- quantità di sostanza organica da apportare, che dipende da: Contenuto di partenza del materiale terroso, contenuto in sostanza organica del compost (mediamente 35-55% ss), contenuto di umidità del compost (35-55% s.t.q.)

L'utilizzo di Compost in agricoltura è regolato dal D.Lgs. 75 del 29 aprile 2010 (Riordino e revisione della disciplina in materia di fertilizzanti), che abroga e sostituisce il precedente D.Lgs. 217 del 29 04 2006.

Ai materiali definiti da tale norma si fa riferimento con il termine “compost di qualità”.

Capitolo 2

MATERIALE E METODI

Al fine di raggiungere lo scopo della presente tesi sono stati presi in considerazione e analizzati i seguenti articoli scientifici:

- ARTICOLO I: Giovanni Fecondo, Grazia Guastadisegni, Mario D’Ercole, Maria Del Bianco , Pietro Antonio Buda, 2008. “*Use of quality compost on arboreus cultivation to improve soil fertility (Utilizzo di compost di qualità su colture arboree per il miglioramento della fertilità del terreno)*. *Italian Journal of Agronomy Open Access*, Volume 3, Issue SUPPL. 2, Pages 31 - 3
- ARTICOLO II: Massimo Zaccardelli, Domenico Ronga, Riccardo Scotti, Giovanni Ragosta, Catello Pane, 2013. *Valutazione dei sottoprodotti della filiera del biodiesel come ammendanti organici in orticoltura*. La valorizzazione dei sottoprodotti nell’ambito zootecnico, pg. 37-43.
- ARTICOLO III: Samantha Mosier , S. Carolina Córdova and G. Philip Robertson, 2021. Restoring Soil Fertility on Degraded Lands to Meet Food, Fuel, and Climate Security Needs via Perennialization, *Front. Sustain. Food Syst., Sec. Agroecology and Ecosystem Services* Volume 5 - 2021 | <https://doi.org/10.3389/fsufs.2021.706142>

2.1 Articolo I

Introduzione e obiettivi: Negli ultimi decenni il processo di industrializzazione e di urbanizzazione, soprattutto dei Paesi occidentali, è stato molto intenso. Detti processi, se da un lato hanno fatto registrare un maggiore benessere delle popolazioni, dall'altro hanno creato seri problemi di smaltimento dei sottoprodotti di lavorazione e comunque dei reflui civili, agricoli e industriali (DPR 915/82). Parallelamente, in agricoltura è stato adottato, per poter spingere la produttività ai massimi livelli, un sistema di coltivazione di tipo intensivo basato il più delle volte su una gestione errata della tecnica agronomica (impiego esclusivo di fertilizzanti chimici al posto dei concimi organici, bruciatura o asportazione dei residui colturali, lavorazioni profonde) che ha causato una riduzione del tasso di sostanza organica nel terreno fino a raggiungere, nei casi più gravi, la soglia di desertificazione. Si ricorda che la dotazione normale di sostanza organica è pari allo 0,8-1,3% nei terreni sabbiosi e all'1,5-2,0% nei terreni argillosi. Da indagini condotte sull'intero territorio nazionale sembra che più del 50% dei terreni agricoli siano poveri in sostanza organica; la percentuale si alza al 64% per indagini condotte sulla regione Abruzzo. La sostanza organica è una componente fondamentale per la fertilità del terreno in quanto svolge numerose funzioni: aumenta l'efficienza d'uso degli elementi nutritivi attraverso la formazione di chelati, svolge azione biostimolante legata alla presenza di enzimi quali le fosfatasi, migliora la struttura del terreno, la capacità di ritenzione idrica, l'attività microbica; ciò assume molta importanza in terreni particolarmente difficili come quelli calcarei. Per recuperare la fertilità dei terreni agrari in termini di tenore in sostanza organica ci sono diverse possibilità: recupero di residui colturali, impiego di appropriate tecniche di gestione del suolo, utilizzo di ammendanti. Relativamente all'utilizzo di ammendanti, sicuramente l'impiego di compost di qualità rappresenta una soluzione interessante in quanto presenta il doppio vantaggio di apportare sostanza organica al terreno e di recuperare scarti organici di varia natura (D.Lgs. 22/97). Il compost è un ammendante che si ottiene attraverso un processo biologico, naturale di tipo aerobico a partire da matrici organiche. Attraverso questo processo, della durata di 3-5 mesi, si ottiene un prodotto ricco di sostanza organica stabilizzato e depurato delle caratteristiche di putrescibilità e fecalità del prodotto di partenza. Le matrici compostabili sono rappresentate da scarti vegetali (verde pubblico e privato), rifiuti organici di industrie agroalimentari e allevamenti zootecnici, frazione organica di rifiuti urbani (FORSU) e fanghi di depurazione. In riferimento alle matrici organiche si possono ottenere diversi tipi di compost: ammendante compostato verde (compost di verde ornamentale e residui colturali), ammendante compostato misto (compost dalla frazione organica di RSU e scarti da raccolta differenziata) e ammendante torboso composto (legge 748/84). Stati come la Germania, l'Olanda e l'Austria producono circa il 70% del compost prodotto da tutta l'Unione Europea.

Nella sperimentazione è stato impiegato un ammendante compostato misto prodotto in un impianto ubicato in contrada Valle Cena del Comune di Cupello al fine di verificare l'influenza sulla fertilità del suolo e di riflesso sulle produzioni quali-quantitative delle colture sopraccitate. Allo stato attuale il compost utilizzato, pur essendo in fase di certificazione, è conforme ai limiti normativi previsti dalla legge 748/84 che è la stessa che regola la produzione di fertilizzanti.

Materiali e metodi: La sperimentazione è stata effettuata nel biennio 2003-2004 rispettivamente su un oliveto e un vigneto ubicati lungo la fascia litoranea della zona meridionale della Regione Abruzzo. Su entrambe le colture sono state poste a confronto due dosi di compost (C20: 20 tonnellate per ettaro, C40: 40 tonnellate per ettaro) e il controllo non trattato (C0). Le operazioni colturali (lavorazione del terreno, concimazione, controllo malattie) sono state quelle adottate normalmente nella zona in cui è stata condotta la prova. Il disegno sperimentale adottato è il blocco randomizzato con tre repliche. La distribuzione del compost nelle due annate è stata eseguita in concomitanza della concimazione minerale; l'ammendante è stato interrato con una successiva lavorazione del terreno. Prima della distribuzione del compost e della concimazione, è stata eseguita una caratterizzazione pedologica del terreno dei rispettivi campi sperimentali per strati elementari di 20 cm fino alla profondità di 100 cm. Annualmente, dopo la raccolta dell'uva e delle olive, il campionamento di terreno è stato effettuato su tutte le parcelle e nello strato interessato dalla lavorazione (0-20 cm). Successivamente, in laboratorio sono stati determinati i principali parametri della fertilità: pH, conducibilità, sostanza organica, azoto totale, fosforo e potassio assimilabile. Sulla pianta sono state determinate la resa e le principali caratteristiche qualitative del prodotto (peso medio delle drupe per l'olivo; numero e peso medio dei grappoli, °Babo, pH e acidità totale per la vite)

Risultati e discussione Terreno In tabella 2 sono riportate le principali caratteristiche fisico-chimiche dei terreni dell'oliveto e del vigneto. Il terreno del vigneto presenta una fertilità superiore a quella dell'oliveto, e questo relativamente al maggiore contenuto di sostanza organica e di fosforo assimilabile. Dalle tabelle 3 e 4 risulta che l'impiego di compost ha influito, ad esclusione del pH, su tutti i parametri presi in considerazione; il pH, infatti, è l'unico parametro che non ha subito variazioni significative rimanendo alcalino o leggermente alcalino (7,9-8,3), grazie alla elevata capacità tampone del terreno, dovuta all'elevato contenuto di calcare, che riesce a mantenere i valori invariati anche in seguito all'aggiunta di dosi piuttosto elevate di compost. Per quanto riguarda la prova dell'oliveto (tab. 3), la conducibilità e il contenuto di potassio assimilabile sono aumentati in modo significativo in ambedue gli anni in seguito alla somministrazione di compost; il contenuto di fosforo assimilabile è aumentato in modo significativo solo nel 2004, mentre per gli altri parametri (sostanza organica e azoto totale) i valori

sono comunque aumentati, ma non in modo significativo. In tabella 4 (prova effettuata su vigneto), emerge che il tenore di sostanza organica e il contenuto di potassio assimilabile sono aumentati in modo significativo in entrambe le annate, l'azoto totale è aumentato solo nel 2003, mentre per la conducibilità e il fosforo assimilabile l'aumento dei valori c'è stato, ma non in termini statisticamente significativi. L'aumento del contenuto di potassio ha comportato un aumento dei valori di conducibilità nelle rispettive tesi trattate; i suddetti valori sono rimasti sempre inferiori al limite di tolleranza che nel caso della vite e dell'olivo è compreso tra 1,4 e 2,1 mS cm⁻¹. Il leggero aumento di conducibilità combinato con il maggiore contenuto di sostanza organica e di elementi nutritivi è positivo in quanto sono il segno di una maggiore fertilità agronomica del suolo.

Caratteristiche	Profondità (cm)					Media
	0-20	20-40	40-60	60-80	80-100	
<i>Oliveto</i>						
pH	7,8	7,9	8,0	8,0	8,0	7,9
Calcare attivo (%)	11,9	12,1	12,8	12,8	12,8	12,5
Sostanza organica (%) (Walkley-Black)	1,8	1,3	0,7	0,6	0,7	1,0
Azoto totale (g kg ⁻¹) (Kjeldhal)	1,6	1,3	0,9	0,8	1,0	1,1
P ₂ O ₅ assimilabile (mg kg ⁻¹) (Olsen)	12,6	6,8	3,3	2,5	3,0	5,6
K ₂ O assimilabile (mg kg ⁻¹) (ammonio acetato)	409	294	204	191	217	263
<i>Vigneto</i>						
pH	8,1	8,1	8,2	8,2	8,1	8,1
Calcare attivo (%)	9,0	8,9	8,9	8,2	8,8	8,8
Sostanza organica (%) (Walkley-Black)	2,1	1,4	1,3	1,0	1,0	1,4
Azoto totale (g kg ⁻¹) (Kjeldhal)	1,5	1,1	1,1	0,9	0,8	1,1
P ₂ O ₅ assimilabile (mg kg ⁻¹) (Olsen)	34,8	19,7	11,6	8,0	7,2	16,3
K ₂ O assimilabile (mg kg ⁻¹) (ammonio acetato)	410	230	178	190	188	239

Tabella 2. Caratteristiche chimiche e fisiche del terreno.

Tesi	pH	ECw (mS cm ⁻¹)	Sostanza organica (%)	Azoto totale (g kg ⁻¹)	Fosforo assimilabile (mg kg ⁻¹)	Potassio assimilabile (mg kg ⁻¹)
<i>Anno 2003</i>						
C ₀	7,9	0,17 b	2,5	1,4	24,5	471,9 b
C ₂₀	7,9	0,19 ab	2,8	1,8	22,5	502,5 b
C ₄₀	8,0	0,23 a	3,1	2,0	31,6	615,4 a
Valori di F	n.s.	*	n.s.	n.s.	n.s.	*
<i>Anno 2004</i>						
C ₀	8,3	0,35 b	2,4	1,5	14,2 b	750,3 b
C ₂₀	8,5	0,39 ab	3,1	1,6	37,7 a	984,7 a
C ₄₀	8,2	0,42 a	3,1	2,1	36,3 a	1071,7 a
Valori di F	n.s.	*	n.s.	n.s.	*	*

* = differenze significative per P ≤ 0,05.
n.s. = differenze non significative.
Test di Duncan.

Tabella 3. Effetto delle dosi di compost sulle caratteristiche chimiche del terreno dell'oliveto

Tesi	pH	ECw (mS cm ⁻¹)	Sostanza organica (%)	Azoto totale (g kg ⁻¹)	Fosforo assimilabile (mg kg ⁻¹)	Potassio assimilabile (mg kg ⁻¹)
<i>Anno 2003</i>						
C ₀	8,0	0,19	1,8 b	1,4 b	23,8	619,3
C ₂₀	7,9	0,22	2,3 a	1,8 ab	36,6	816,2
C ₄₀	8,0	0,29	2,9 a	2,1 a	48,0	813,0
Valori di F	n.s.	n.s.	*	*	n.s.	*
<i>Anno 2004</i>						
C ₀	8,3	0,27	2,0 b	1,2	31,7	668,5 c
C ₂₀	8,3	0,31	2,8 a	1,5	46,9	829,9 b
C ₄₀	8,3	0,39	2,9 a	1,7	49,5	972,0 a
Valori di F	n.s.	n.s.	*	n.s.	n.s.	**
* = differenze significative per P ≤ 0,05. ** = differenze significative per P ≤ 0,01. n.s. = differenze non significative. Test di Duncan.						

Tabella 4. Effetto delle dosi di compost sulle caratteristiche chimiche del terreno del vigneto.

Conclusioni: Il problema della risorsa suolo per usi agricoli rientra nelle quindici emergenze a livello planetario. Quando parliamo di degrado del suolo ci riferiamo alla diminuzione del tenore di sostanza organica, all'aumento della salinizzazione, al compattamento e all'inquinamento a causa di metalli pesanti e di microinquinanti organici. Obiettivo della sperimentazione è di far fronte al problema della sostanza organica che in questi ultimi decenni, a causa di una gestione errata del suolo, è diminuita in modo costante determinando la riduzione della fertilità del suolo stesso. Sulla base dei risultati, è emerso che l'impiego di compost di qualità ha esercitato un effetto positivo sulla fertilità del suolo; infatti, i valori dei principali parametri chimici (sostanza organica ed elementi nutritivi) sono aumentati sempre, anche se in alcuni casi in modo non significativo. Tutto questo ci consente di ridurre la quantità di concimi chimici sia perché una quota di elementi nutritivi viene apportata con il compost e sia perché la sostanza organica aumenta l'efficienza d'uso degli stessi elementi nutritivi. Nel calcolo dei piani di concimazione bisogna tener presente che per elementi come l'azoto, sola una piccola parte (10-15%) è presente in forma minerale (ammoniacale e nitrica), il resto è presente in forma organica. L'azoto organico viene mineralizzato per il 15% nell'anno in corso; la quota residuale viene ceduta negli anni successivi. In questa sperimentazione, inoltre, abbiamo voluto verificare l'effetto del compost sulle produzioni quantitative e qualitative delle due colture prese in esame. In effetti, almeno nel breve periodo l'utilizzo di compost non ha avuto ripercussioni sulla produzione e sulla qualità dei prodotti della vite e dell'olivo.

2.2 Articolo II

Introduzione e obiettivi: Lo sviluppo della filiera del biodiesel potrebbe contribuire al contenimento delle emissioni di anidride carbonica generate dalla combustione di fonti

energetiche fossili (petrolio, carbone, gas da giacimenti sotterranei), con conseguente riduzione dell'effetto serra. Il processo di produzione del biodiesel genera una notevole quantità di coprodotti (panelli, farine e tegumenti), residui dell'estrazione dell'olio dai semi di oleaginose. I pannelli oleosi rappresentano un'importante fonte di sostanza organica e di micro e macro elementi, quali azoto, fosforo e potassio, da potersi impiegare in agricoltura come ammendanti, così come avviene con i ben più studiati compost, soprattutto quelli ottenuti dalla frazione organica dei residui solidi urbani (compost da FORSU). Inoltre, tra i pannelli derivanti dalle varie oleaginose, quelli ottenuti da crucifere, come Brassica carinata e colza, sono particolarmente interessanti per le loro proprietà biocide nei confronti di nematodi e funghi fitopatogeni. Questa proprietà è dovuta alla presenza di glucosinolati nei tessuti che, per idrolisi operata dall'enzima mirosinasi, liberano isotiocianati tossici. Rimanendo ancora nell'ambito delle filiere bioenergetiche, anche coprodotti della filiera del biogas come i digestati sono stati proposti come ammendanti-fertilizzanti in agricoltura. L'obiettivo del presente lavoro è stato quello di valutare l'attitudine di differenti pannelli oleosi in forma di pellet (Brassica carinata, colza, girasole decorticato e girasole non decorticato) e di tegumenti di semi di girasole, nell'ammendamento di suoli coltivati attraverso una valutazione degli effetti sulla produzione delle colture e sull'attività biologica del suolo. A tal proposito sono stati presi in considerazione due sistemi produttivi: pomodoro da industria in pieno campo e bieta da taglio in coltura protetta.

Materiali e metodi: Per il pomodoro da industria, le prove sono state condotte nel 2012 presso l'azienda sperimentale di Battipaglia del CRA-ORT. Il disegno sperimentale ha previsto la realizzazione della prova su parcelle, ognuna di superficie di 16,72 m², distribuite su blocchi randomizzati, con tre repliche. Le piante di pomodoro (cultivar Auspicio) sono state disposte in file binate, con una densità di investimento pari a 29.410 piante/ha. Il trapianto è avvenuto il 9 maggio 2012; la raccolta è avvenuta il 16 agosto. Per la bieta, le prove sono state condotte nel 2012 presso l'azienda agricola "Cucino", sita a Battipaglia (SA) in località S. Lucia. Il disegno sperimentale ha previsto la realizzazione della prova su parcelle, ognuna di superficie di 3,00 m², distribuite su blocchi randomizzati, con tre repliche. La semina meccanica (cultivar Bieta Verde da Taglio OroSem) è avvenuta il 10 aprile 2012; la raccolta è avvenuta il successivo 16 maggio. Sono stati confrontati nelle tesi sperimentali quattro tipi di pannelli oleosi (in forma di pellet): Brassica carinata, colza, girasole decorticato, girasole non decorticato; tegumenti di semi di girasole. Nella prova del pomodoro sono stati inseriti, inoltre, altri due tipi di ammendante organico: digestato solido, proveniente da un impianto di biogas della zona e ottenuto dopo separazione e allontanamento della fase liquida, e compost da FORSU (frazione organica dei rifiuti solidi urbani), acquistato dalla ditta Gesenu (Perugia). Nella prova di bieta, invece, le due

tesi aggiuntive hanno visto l'ammendamento con due differenti compost vegetali prodotti da carciofo+finocchio (1) e da residui verdi di pomodoro e IV gamma (2). Sono state utilizzate come controlli parcelle trattate con concimi minerali e parcelle non concimate e non ammendate. I pannelli sono stati interrati a circa 15-20 cm di profondità, una settimana prima del trapianto. Le quantità di pannelli oleosi, compost e digestato interrati sono state tali da apportare una quantità di azoto pari a quella somministrata con la concimazione delle parcelle del controllo minerale (150, per il pomodoro e 130 kg/ha di azoto per la bieta). Queste parcelle hanno ricevuto anche 100 kg/ha di fosforo (P₂O₅) e 100 kg/ha di potassio (K₂O). L'azoto minerale è stato somministrato come nitrato ammonico, distribuito per 1/3 al trapianto e per 2/3 in fertirrigazione; il fosforo e il potassio, invece, sono stati distribuiti in pre-trapianto come perfosfato semplice e solfato potassico. A metà ciclo colturale, per ciascuna delle due sperimentazioni sono stati prelevati campioni rappresentativi di suolo (0-20) formati da 5 sub-campioni. Mentre al termine della coltura sono stati eseguiti rilievi bio-produttivi. I campioni di suolo, invece, sono stati analizzati per il rilievo dei principali indicatori dell'attività biologica quali respirazione potenziale, attività idrolasica e l'attività metabolica attraverso il sistema BIOLOG in accordo a quanto riportato da Pane et al. Mentre l'analisi dell'attività enzimatica costituzionale è stata eseguita con il sistema API-ZYM secondo quanto descritto da Bending et al. I dati sono stati analizzati statisticamente mediante ANOVA ad una via e le medie sono state separate mediante il test di Duncan utilizzando il programma MSTAT-C.

Risultati e Conclusioni: I pannelli di oleaginose, in particolare quelli prodotti a partire dai semi di colza, girasole (nelle versioni: pellet, seme decorticato e tegumento), e Brassica carinata, si sono rivelati idonei all'impiego in agricoltura come ammendanti organici. Come tali, a parità di unità di azoto somministrate al suolo, la sostanza organica ha il limite della lenta cessione dei nutrienti a causa del processo di mineralizzazione, e della loro minore biodisponibilità a causa di possibili fenomeni di sequestro dell'azoto da parte della microflora sviluppatasi a carico del carbonio organico. In questo tipo di contesto, nel caso del pomodoro, i livelli produttivi più elevati sono stati assicurati dai concimi minerali che, a differenza di quelli organici, garantiscono pronta biodisponibilità di elementi nutrizionali (Tab. 1). Gli ammendanti, benché riescano a sostenere livelli delle produzioni più elevati rispetto a quelle registrate nelle tesi di controllo non trattato, non sono state in grado di surrogare pienamente la concimazione minerale. Comunque, i pellet di Brassica carinata e quelli di colza e girasole decorticato e non, hanno determinato minori differenze di produzione rispetto alla tesi minerale. Infine, le piante, sotto il profilo fitosanitario, non hanno mostrato problemi significativi con tessuti di girasole e brassica, mentre hanno subito una flessione dello stato vegetativo nelle tesi ammendate con colza e tegumento del seme di

girasole. Nel caso della bieta, invece, la risposta produttiva ai panelli è stata decisamente migliore e abbastanza comparabile con il minerale. Tutti gli ammendanti saggiati, infatti, sostengono la produzione commerciale di bieta verde da taglio, a livelli statisticamente comparabili con quelli ottenuti in suoli trattati con la concimazione minerale. Inoltre l'ammendamento riesce a produrre effetti benefici sulle piante che si manifestano sul migliore stato vegetativo rispetto al controllo non trattato. L'impatto sulla fertilità biologica del suolo dei panelli apportati nei due sistemi è stato studiato attraverso l'analisi dei principali indicatori di attività microbiologica generale, quali respirazione potenziale ed attività enzimatiche coinvolte nei cicli biogeochimici della sostanza organica del suolo. In particolare, queste determinazioni hanno messo in luce il diverso grado di degradabilità degli ammendanti, probabilmente in funzione delle frazioni di carbonio organico e del formato (pellet, tegumenti, ecc.) di cui erano costituite, inducendo in maniera differenziale l'attività microbica (Tabelle 3 e 4).

Attraverso i sistemi biochimici BIOLOG e API-ZYM è stata valutata, inoltre, l'influenza dei trattamenti sulla biodiversità funzionale delle comunità microbiche del suolo. In tal caso si è evidenziato un aumento della biodiversità funzionale e un miglioramento delle condizioni microbiologiche del suolo trattato con le farine rispetto a quelli non ammendati. Fortemente influenzata da quei fattori che modificano la biomassa microbica, come la presenza di composti carboniosi e nutrienti. In questo caso, l'attività idrolasica totale è stata influenzata dai differenti ammendanti utilizzati, con delle differenze marcate tra i due sistemi. Mentre in pieno campo, durante la coltura di pomodoro, l'utilizzo di farine ha determinato incrementi di minore entità, rispetto alle parcelle non trattate o trattate con concimazione minerale, sotto serra sono state osservati maggiori incrementi dell'attività idrolasica totale, soprattutto nelle parcelle trattate con residui di girasole. Sicuramente le maggiori temperatura e umidità presenti sotto serra, unitamente al maggiore contenuto in carbonio di questo tipo di residui può aver avuto un ruolo fondamentale in questo tipo di risultato.

Trattamento	CO ₂ -C ppm sec ⁻¹ (ppm sec ⁻¹)	FDA (µgFDA g ⁻¹ h ⁻¹)	BIOLOG (n=31) (AWCD)	API-ZYM (n=19) (AWCD)
Controllo	0.225 c	0,49 e	1.64 bc	1.62
Minerale	0,345 b	1,06 c	1.84 b	1.54
Pellet di Colza	0.376 b	1,60 a	2.45 ab	1.25
Pellet di Girasole	0.214 c	1,60 ab	1.28 ab	1.24
Pellet di Girasole Decorticato	0.205 c	0,93 d	1.25 c	1.15
Tegumenti di Girasole	0.278 bc	1,29 b	1.05 c	1.73
Pellet di <i>Brassica carinata</i>	0.385 b	2,14 a	2.27 ab	1.82
Digestato	0.475ab	1,31 b	2.89 a	1.19
Compost da Forsu	0.648 a	1,21 b	2.77 a	1.64

Tabella 3 Effetto dell'applicazione di differenti tipi di ammendanti organici sulla respirazione potenziale (CO₂-C), sull'attività idrolasica totale (FDA), sull'attività metabolica (BIOLOG) ed enzimatica costitutiva (API-ZYM) delle comunità microbiche del suolo coltivato a pomodoro da industria

Trattamento	CO ₂ -C ppm sec ⁻¹ (ppm sec ⁻¹)	FDA (µgFDA g ⁻¹ h ⁻¹)	BIOLOG (n=31) (AWCD)	API-ZYM (n=19) (AWCD)
Controllo	0.125 de	1.64 d	1.25 b	1.27
Minerale	0,065 e	1.39 e	1.28 b	1.10
Pellet di Colza	0.240 cd	1.77 d	1.57 ab	1.87
Pellet di Girasole	0.277 c	2.46 c	1.48 ab	0.85
Pellet di Girasole Decorticato	0.132 de	5.43 a	1.65 a	1.65
Tegumenti di Girasole	0.327 bc	4.94 ab	1.63 a	1.68
Pellet di <i>Brassica carinata</i>	0.116 de	1.90 cd	1.54 ab	1.58
Compost Vegetale 1	0.524 a	2.03 d	1.51 ab	1.30
Compost Vegetale 2	0.417 ab	4.20 b	1.33 ab	1.82

Tabella 4 Effetto dell'applicazione di differenti tipi di ammendanti organici sulla respirazione potenziale (CO₂-C), sull'attività idrolasica totale (FDA), sull'attività metabolica (BIOLOG) ed enzimatica costitutiva (API-ZYM) delle comunità microbiche del suolo coltivato a bieta verde da taglio.

L'incremento di un indicatore, come l'attività idrolasica totale, indica un aumento generale di tutte le attività cataboliche presenti nel suolo, con effetti positivi su tutti i microorganismi presenti, e conseguentemente anche sui cicli biogeochimici di quei nutrienti importanti per le piante in orticoltura. In conclusione, gli ammendanti testati offrono prospettive di sviluppo per un loro

impiego efficiente in orticoltura, soprattutto sul piano della fertilità generale dei suoli. È da sottolineare che, oltre la matrice di partenza (girasole, colza, B. carinata) abbia avuto un ruolo fondamentale, nei risultati presentati in questo lavoro, anche la forma (pellet, scaglie, ecc.) con cui questo tipo di ammendanti vengono somministrati al suolo. In merito al sostegno delle produzioni, probabilmente bisogna intervenire con incrementi della dose di ammendante o con integrazioni con concime minerale.

2.3 Articolo III

Introduzione e obiettivi: La pressione in continua crescita sui terreni agricoli per aumentare la produzione alimentare ha messo a dura prova la loro capacità di produrre prodotti agricoli a un costo ambientale accettabile. Le stime suggeriscono che se le traiettorie attuali continuano, 840 milioni di persone saranno colpite dalla fame entro il 2030 e alcuni ricercatori sostengono che entro il 2050 la produzione alimentare dovrà raddoppiare o più per soddisfare le esigenze di una popolazione globale in crescita sempre più ricca. Tuttavia, molti terreni già utilizzati o precedentemente utilizzati per la produzione alimentare sono degradati dal punto di vista agronomico. La diminuzione della fertilità del suolo e l'aumento della sensibilità ambientale all'agricoltura a causa di suoli poveri o cattiva gestione o entrambi hanno costantemente ridotto i raccolti su queste terre. Molte terre un tempo coltivabili ora non sono adatte all'agricoltura e molte sono state abbandonate dall'agricoltura.

I terreni degradati spesso derivano dalla ridotta fertilità del suolo derivante da una gestione intensiva, misure di conservazione del suolo inadeguate e cambiamenti climatici. Innumerevoli studi hanno documentato gli impatti negativi della produzione agricola annuale intensiva sull'ambiente suolo: in effetti, l'attuale rinascita dell'interesse per l'agricoltura rigenerativa ha come obiettivo il ripristino della salute del suolo un principio centrale. Alcuni aspetti specifici della produzione agricola annuale intensiva che portano al degrado del suolo includono frequenti eventi di disturbo come la lavorazione del terreno, l'assenza di copertura vegetale continua per tutto l'anno, la mancanza di sistemi di radicazione profondi continui e diversità funzionale delle colture e budget di nutrienti sbilanciati. Inoltre, il cambiamento climatico, l'aumento del riscaldamento e il cambiamento delle dinamiche delle precipitazioni in tutto il mondo, ha accelerato o esacerbato il degrado del suolo nelle regioni in cui i suoli sono sempre più soggetti a inondazioni e siccità. Le perdite per erosione sono state particolarmente gravi: fino all'1% del suolo superficiale viene perso ogni anno in molti luoghi, il risultato della lavorazione del terreno, del pascolo eccessivo e della crescente incidenza di eventi climatici estremi che accelerano l'erosione sia eolica che idrica.

Il continuo utilizzo di terreni degradati per la produzione agricola richiede interventi di gestione sempre maggiori per consentire una produzione alimentare ad alto rendimento. In questo contesto, l'ulteriore degrado del suolo rappresenta un'ulteriore minaccia per l'integrità ambientale dell'agricoltura, aggravando le perdite di carbonio (C), azoto (N) e fosforo (P) nel suolo. La perdita di C e di nutrienti essenziali dal sistema agricolo si traduce in terreni che faticano a produrre cibo per il consumo umano e le perdite aumenteranno solo man mano che la gestione si intensificherà per sostituire la fertilità persa, creando un circolo vizioso di retroazione a spirale verso il basso. .

Le stime dell'estensione delle terre degradate in tutto il mondo differiscono notevolmente a seconda della definizione. Definite più comunemente come terre a produttività ridotta a causa dell'attività umana lasciano ampio spazio alle stime della sua estensione, che vanno globalmente da 0,5 a più di 6 miliardi di ettari. Restringendo la definizione forse alla sua estensione agricola più severa - ex terreni agricoli ora abbandonati - si ottiene una stima più ristretta di 864-951 milioni di ettari, sebbene ancora molto incerta . Solo negli Stati Uniti, stime basate sui registri di uso del suolo della contea e osservazioni satellitari suggeriscono un intervallo di 74-99 milioni di ettari. Ci concentriamo qui su questa definizione più ristretta di terre degradate: terre coltivate o pascoli che potrebbero, con una corretta gestione, essere ripristinati e resi nuovamente produttivi senza conseguenze a lungo termine per la salute ambientale. Tale gestione potrebbe includere pratiche a base biologica che promuovono la salute del suolo e riaccoppiano i cicli C, N e P attraverso un approccio basato sui sistemi, incentrato sul miglioramento della ritenzione dei nutrienti e sul bilanciamento dei bilanci dei nutrienti, piuttosto che, ad esempio, aggiunte di fertilizzanti intese a mantenere alti livelli inorganici di nutrienti nei suoli. Gestione ecologica dei nutrienti è intrinseca all'agricoltura organica, sostenibile e rigenerativa e si ottiene principalmente migliorando la diversità delle piante, compresa l'incorporazione di piante perenni in lunghe rotazioni.

Prendiamo anche in considerazione il ripristino della fertilità per una classe recentemente riconosciuta di terreni agricoli contemporanei: aree di sottocampi con rese costantemente basse e non redditizie. Le analisi di stabilità della resa basate su satellite suggeriscono che >20% dei campi di mais (*Zea mays* L.) e soia (*Glycine max* L. Merr) nel Midwest degli Stati Uniti potrebbe rientrare in questa classificazione. Inoltre, le tecnologie di agricoltura di precisione (come l'identificazione di sottocampi con prestazioni insufficienti e la loro conversione in piante perenni) creano un ulteriore potenziale per ripristinare la capacità produttiva di queste terre con strategie di coltivazione perenne. La variabilità del sottocampo di questo tipo si verifica probabilmente in tutto il mondo.

Il ripristino della fertilità del suolo degradato attraverso la perennizzazione naturale è una pratica agricola di lunga data in atto da millenni. La coltura itinerante, conosciuta con nomi diversi nelle diverse regioni del mondo, e diffusa in tutto il mondo fino al Settecento e nei pantropici fino al Novecento, ha come cardine centrale il ripristino della fertilità del suolo durante una fase di maggese naturale dopo la coltivazione intensiva. Il maggese naturale fornisce un periodo non gestito durante il quale la successione ecologica ripristina la fertilità del suolo fino al punto in cui il suolo può essere nuovamente "estratto" per l'agricoltura.

Che la successione ecologica ripristini la fertilità del suolo - o, nel caso della successione primaria, crei la fertilità del suolo - è un principio ecologico di lunga data. Nella successione primaria il materiale genitore appena esposto viene successivamente colonizzato da licheni, erbe, forbici, arbusti e infine alberi, insieme a una comunità ecologica del suolo sempre più complessa che si sviluppa man mano che la materia organica del suolo si accumula e N, P e altri nutrienti circolano rapidamente abbastanza per supportare l'accelerazione della produttività primaria. La successione secondaria segue un disturbo che reimposta l'orologio della successione su un tempo precedente ma non rimuove il suolo e, a seconda del disturbo - che si tratti di incendio, condizioni meteorologiche estreme, agricoltura o qualche altra perturbazione - ha luogo una sequenza di recupero simile ma più rapida, alla fine, in assenza di disturbo continuo, ripristinando il sistema a uno stato precedente al disturbo. In un certo senso, i sistemi colturali annuali rientrano in un primo ciclo di successione, per cui l'orologio ecologico viene reimpostato ogni anno con il raccolto. I nutrienti essenziali vengono prontamente persi dai primi sistemi di successione e strettamente conservati in seguito, quando la biomassa perenne si accumula rapidamente, che aiuta a spiegare il contributo della vegetazione perenne alla ritenzione dei nutrienti e all'efficienza dell'uso dei nutrienti a livello di sistema. L'incorporazione di piante perenni nei sistemi di coltivazione per ripristinare la fertilità e trattenere i nutrienti si basa quindi sulla teoria ecologica e su una lunga storia di pratica mondiale.

Prove crescenti suggeriscono che anche i terreni degradati hanno il potenziale per il ripristino pur rimanendo produttivi ([Asbjornsen et al., 2013](#) ; [Bell et al., 2020](#)). In quasi tutti i casi, la perennizzazione, ovvero l'incorporazione di colture perenni e foraggi in lunghe rotazioni, è fondamentale. La perennizzazione può essere applicata in molti sistemi diversi per migliorare la fornitura di servizi ecosistemici dall'agricoltura, compreso il ripristino della fertilità (, accrescimento di suolo C, disponibilità di N, e ritenzione P, tutti componenti importanti della gestione ecologica dei nutrienti.

Qui sintetizziamo i vantaggi e le potenzialità dell'utilizzo di colture perenni per ripristinare la fertilità del suolo su terreni degradati e le loro funzioni ecosistemiche. In particolare,

identifichiamo i meccanismi mediante i quali le colture perenni migliorano e ripristinano il ciclo di C, N e P utilizzando un approccio sistemico. Inoltre, illustriamo strategie di gestione alternative, barriere all'adozione e potenziali soluzioni per ripristinare le terre degradate attraverso la gestione del sistema di coltivazione che potrebbero aiutare a soddisfare le future esigenze di sicurezza alimentare.

Impatti della perennizzazione sul ripristino della fertilità

Gli attributi centrali della gestione ecologica dei nutrienti sono un ciclo dei nutrienti più efficiente e una maggiore ritenzione di C, N e P, che sono particolarmente importanti per sostenere i raccolti in agricoltura. I depositi di C, N e P nel suolo sono indicatori chiave della salute del suolo e sono quasi sempre associati ad altri aspetti della qualità del suolo: caratteristiche fisiche (tra cui una migliore infiltrazione, struttura del suolo, porosità e stabilità degli aggregati), caratteristiche chimiche (compresa la disponibilità di nutrienti e ritenzione) e attributi biologici (compresa la complessità della rete trofica del suolo e la soppressione di parassiti e agenti patogeni).

Accumulo di carbonio nel suolo

Forse non esiste un parametro migliore per caratterizzare la fertilità del suolo rispetto ai livelli di sostanza organica del suolo o di C organico del suolo (SOC). Qualsiasi attività che porta all'accumulo di SOC avvantaggia il sistema con aumenti della capacità di ritenzione idrica del suolo, stoccaggio e ritenzione dei nutrienti (N e P, tra gli altri), capacità di scambio cationico, porosità del suolo, resistenza all'erosione, habitat del biota del suolo e qualsiasi processo mediato biologicamente dipendente da C. Il ripristino della fertilità del suolo si basa quindi in gran parte sull'accumulo di SOC, con strategie per promuovere l'accrescimento di C a seconda del tipo di coltura, della gestione agricola e degli emendamenti organici. Le pratiche agricole convenzionali tendono a promuovere la perdita di SOC. In particolare, la lavorazione del terreno stimola l'ossidazione della materia organica del suolo, semplifica le popolazioni microbiche (soprattutto fungine) e accelera l'erosione, il che porta a pool di SOC inferiori, scarsa fertilità del suolo e degrado del suolo. Inoltre, le colture annuali contribuiscono relativamente poco C sotto terra. In un tipico sistema di coltivazione annuale, solo una piccola parte della biomassa vegetale totale è costituita da radici, pronte a contribuire a un SOC stabile attraverso il turnover e l'essudazione. I rapporti radice-germoglio delle colture annuali sono tipicamente <0,30 o <25% della biomassa vegetale totale. Ciò è significativo per l'accrescimento del SOC perché il C derivato dalla radice sembra contribuire maggiormente alla stabilizzazione del SOC rispetto ai residui fuori terra, indipendentemente dal fatto che il SOC sia C associato a minerali o particolato organico C.

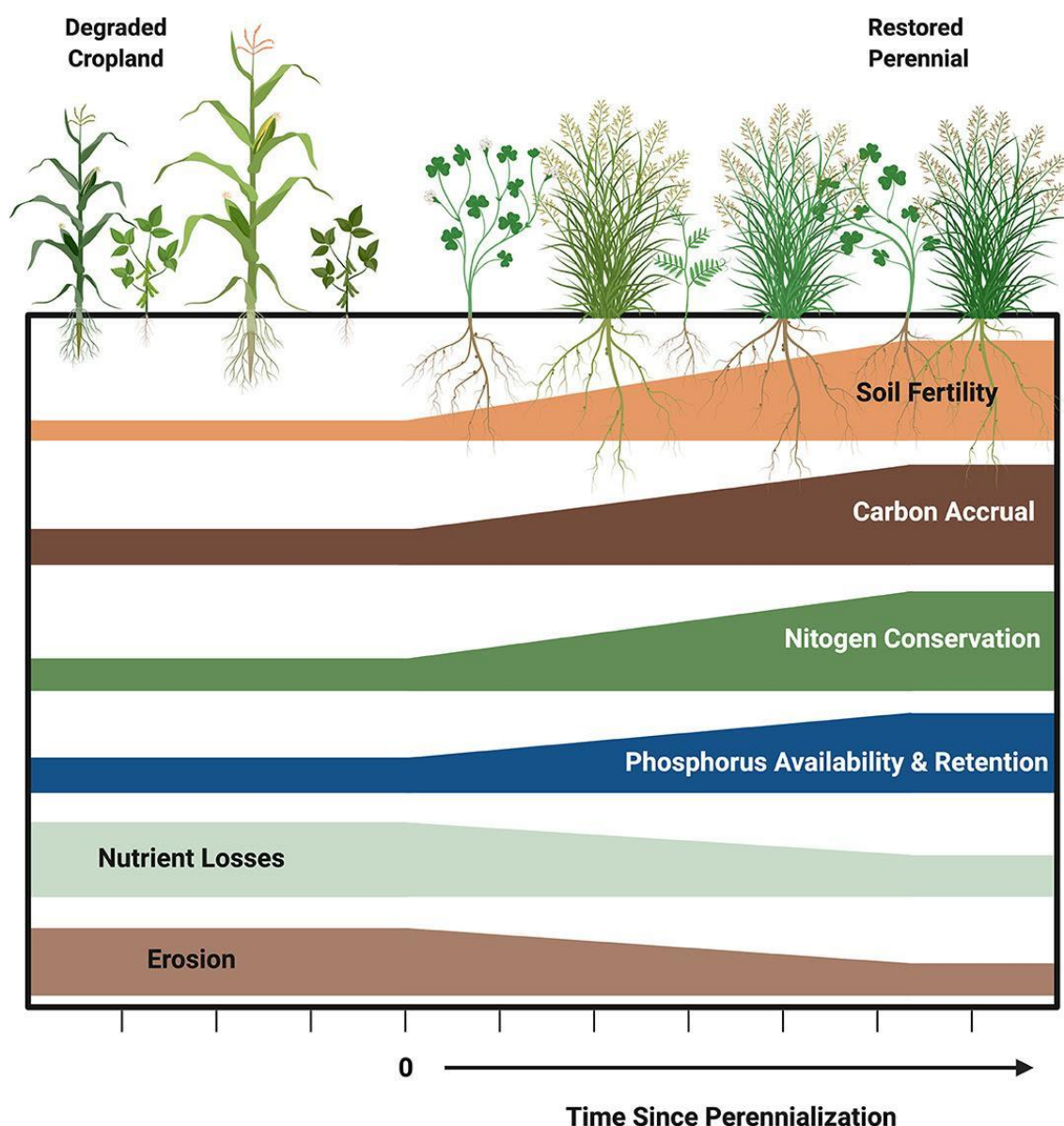


Figura 4: Schemi dei principali cambiamenti dei processi agronomici e biogeochimici durante il ripristino della fertilità del suolo attraverso la perennizzazione dei terreni agricoli degradati.

Al contrario, i sistemi di coltivazione perenni tendono a promuovere l'accrescimento del SOC, che risulta da diversi attributi. In primo luogo, i rapporti radice-germoglio delle colture perenni sono elevati, tipicamente molto >1 e 3-20 volte quelli del mais. Le piante perenni tendono anche ad avere stagioni di crescita più lunghe, il che contribuisce a una maggiore produzione di biomassa radicale. Sistemi relativamente grandi e con radici profonde corrispondono a maggiori input C associati alla radice. Si è rilevato che il passaggio dai sistemi convenzionali annuali (ad

esempio, rotazioni mais-soia) alle colture perenni ha aumentato l'allocazione di C sottoterra di oltre il 400%, associata ad aumenti della biomassa radicale fino al 2.500%.

Una maggiore biomassa radicale implica anche maggiori tassi di essudazione radicale, noti per aumentare e migliorare l'aggregazione del suolo, che protegge il suolo C dall'attacco microbico. Pertanto, ci si può aspettare che più radici in tutto il profilo del suolo aumentino l'aggregazione a molte diverse profondità del suolo. L'aggregazione non solo protegge il suolo C, garantendo tempi di residenza C più lunghi, ma ha anche implicazioni positive per la capacità di ritenzione idrica del suolo e per l'infiltrazione idrica. I suoli con alti livelli di aggregazione sono maggiormente in grado di resistere a grandi eventi di precipitazione perché l'acqua può infiltrarsi più rapidamente in profondità più profonde rispetto ai suoli con scarsa struttura. Una migliore infiltrazione d'acqua riduce quindi il deflusso dell'acqua disponibile per le piante e dei nutrienti essenziali, migliorando la disponibilità di acqua nel tempo e aiutando questi sistemi a essere più resistenti agli eventi meteorologici estremi.

L'assenza di disturbo del suolo contribuisce ulteriormente ai guadagni di SOC: nei sistemi perenni continui, la lavorazione del terreno viene utilizzata solo negli anni di impianto, in modo tale che successivamente una copertura vegetale permanente e una migliore struttura del suolo portino a una ridotta erosione, tassi di decomposizione ridotti e una maggiore stabilità degli aggregati. L'uso di colture perenni ha anche il potenziale per aumentare la quantità e la diversità degli input organici restituiti al suolo quando inclusi in un dato sistema. Periodi di crescita più lunghi e meno rimozioni di biomassa durante il raccolto da colture perenni si traducono in una maggiore copertura del suolo e più biomassa da restituire al suolo, con conseguente maggiore SOC.

La diversità di per sé può anche aumentare l'accumulo di SOC, nei sistemi perenni come in quelli annuali, portando a comunità microbiche del suolo più diversificate e più biomassa microbica C. Una maggiore diversità microbica e biomassa C possono anche migliorare la formazione dei pori del suolo e la stabilità aggregata facilitata da ife fungine e composti microbici extracellulari. Inoltre, la biomassa microbica e i sottoprodotti della decomposizione possono stimolare guadagni nelle frazioni di materia organica associate ai minerali e quindi pool di C stabili. La diversità può anche promuovere l'accumulo di C nel suolo attraverso il trasferimento interspecifico di C radicale, per cui i sistemi con specie che partecipano a tali trasferimenti ottengono C stabile a velocità più elevate. Oltre agli impatti sull'accumulo di SOC, la diversità delle piante può anche migliorare la soppressione dei parassiti (erbivori, erbe infestanti e malattie), l'impollinazione e altri servizi ecosistemici.

Conservazione dell'azoto

L'azoto è uno degli elementi più importanti e dinamici che limitano la crescita delle piante terrestri. Sebbene il fertilizzante N sia comunemente aggiunto agli ecosistemi agricoli, è ad alta intensità energetica e costoso da produrre e in genere si traduce in grandi perdite di N che danneggiano l'ambiente e la salute umana: meno della metà del fertilizzante N applicato ai terreni agricoli a livello globale vengono recuperati al momento del raccolto, il resto viene perso nell'ambiente, dove promuove l'eutrofizzazione delle acque superficiali, provoca zone morte marine, inquina le riserve di acqua potabile sotterranea, sopprime la biodiversità e contribuisce al riscaldamento globale, minacciando infine la sicurezza alimentare a lungo termine.

Gli stock di azoto nel suolo tendono a esaurirsi gravemente nei terreni degradati, rendendo la produzione su questi terreni ancora più dipendente da fonti di azoto esterne. Allo stesso tempo, la produzione diventa meno reattiva agli input di N a causa di altri vincoli sulla fertilità del suolo, come la scarsa sostanza organica del suolo (sezione Introduzione). Il risultato netto è un'efficienza d'uso dell'azoto ancora più bassa, rendendo questi sistemi sempre più permeabili e dannosi per l'ambiente e aggravando il degrado del suolo in una sfortunata spirale discendente.

La conservazione dell'azoto è quindi una pietra angolare dell'agricoltura rigenerativa e dell'intensificazione sostenibile, è fondamentale per la gestione ecologica dei nutrienti e può essere facilmente valutata considerando l'equilibrio tra input e output di azoto. I sistemi colturali con un'elevata efficienza d'uso dell'azoto, in cui gli output di N diversi dal raccolto sono bassi rispetto agli input, conserveranno l'azoto. materia organica, pronta a fornire N a una coltura successiva. Questo può essere visto nei confronti fianco a fianco di sistemi di coltivazione perenni fertilizzati rispetto a quelli annuali, dove l'efficienza d'uso dell'azoto (la quantità di azoto rimossa rispetto all'apporto di fertilizzanti) è sostanzialmente più alta per i sistemi perenni. Le colture perenni, raccolte, pascolate o utilizzate per piantagioni di conservazione, hanno un potenziale naturalmente elevato di conservazione dell'azoto per una serie di motivi e inoltre possono avere nuove strategie di acquisizione dell'azoto che possono ridurre al minimo le loro esigenze di fertilizzante.

Le colture perenni sono altamente efficienti nell'uso di N grazie a una combinazione di stechiometria del raccolto, capacità di traslocazione, lunghe stagioni di crescita e ampi sistemi di radici. In primo luogo, ad eccezione delle leguminose da foraggio e delle colture da seme, nei raccolti perenni viene rimosso relativamente poco azoto. Questo perché il contenuto di N della biomassa non riproduttiva è comunemente molte volte inferiore a quello di semi e cereali, con il loro alto contenuto proteico e bassi rapporti C:N. Ciò è particolarmente vero quando il raccolto avviene dopo la senescenza, quando il contenuto di N della biomassa può essere ben al di sotto

dell'1% a causa della traslocazione di N alle radici. Nei sistemi a pascolo, i "raccolti" avvengono durante la stagione in quanto il foraggio viene consumato, ma la maggior parte dell'azoto in questa biomassa viene immediatamente restituita al pascolo sotto forma di urina e letame. Tuttavia, *Medicago sativa*) che hanno un contenuto di N di biomassa particolarmente elevato.

Bassi contenuti di N post-senescenza riflettono la capacità delle piante perenni di traslocare N da foglie e steli fuori terra a radici, rizomi e corone radicali sotterranee prima della senescenza. L'azoto immagazzinato verrà quindi ritraslocato fuori terra per essere utilizzato durante la prossima stagione di crescita, riducendo la necessità di nuovo azoto. L'efficienza di riassorbimento dell'azoto per le erbe perenni può essere >75% ma può anche variare sostanzialmente anche all'interno di cultivar della stessa specie, così come con l'età del popolamento. Sebbene la fertilizzazione con N possa aumentare l'efficienza del riassorbimento - più N viene traslocato sottoterra anche quando non vi è alcuna risposta di produttività - può anche portare a un contenuto di N fogliare post-senescenza più elevato, portando a una minore conservazione complessiva di N.

Anche stagioni di crescita più lunghe per le piante perenni contribuiscono alla conservazione dell'azoto. La sincronia tra l'azoto mineralizzato dalla materia organica del suolo e l'assorbimento di azoto da parte delle piante è un importante meccanismo di conservazione dell'azoto nella maggior parte degli ecosistemi terrestri. Nei sistemi perenni, la crescita delle piante inizia tipicamente prima in primavera e persiste più a lungo in autunno, portando a una percentuale maggiore della stagione di crescita con assorbimento attivo di azoto rispetto alla maggior parte delle colture annuali. Poiché i microbi sono attivi per tutto questo periodo e di più, nei sistemi perenni, più N che mineralizzano sarà immobilizzato dalle piante, lasciandone meno da disperdere nell'ambiente.

Infine, come osservato in precedenza, le piante perenni tendono ad avere sistemi di radicazione più profondi ed estesi, da 3 a 8 volte più estesi rispetto alle colture annuali ([Anderson-Teixeira et al., 2013](#) ; [Dietzel et al., 2017](#)), con radice: germoglio rapporti da 2 a 3 volte superiori a quelli delle colture annuali ([Tabella 1](#)). Ciò fornisce un potenziale potenziato per catturare l'azoto inorganico, mineralizzato naturalmente dalla materia organica del suolo o aggiunto al fertilizzante, prima che si dissolva dal profilo del suolo. Tassi di lisciviazione inferiori sia per i nitrati ([Syswerda et al., 2012](#) ; [Smith et al., 2013](#) ; [Hussain et al., 2019](#)) che per l'azoto organico disciolto ([Hussain et al., 2020](#)) sono stati documentati in una varietà di colture erbacee e alberi a rotazione breve rispetto a colture annuali adiacenti, nonché in fasce di conservazione ([Schulte et al., 2017](#)).

Tutti i sistemi di coltivazione devono acquisire N per sostituire quello rimosso durante il raccolto o perso nell'ambiente tramite lisciviazione, volatilizzazione o denitrificazione. I sistemi di coltivazione perenni non sono diversi da quelli annuali sotto questo aspetto, sebbene le loro perdite per l'ambiente siano generalmente inferiori, come notato sopra. Tuttavia, per mantenere la produttività, l'azoto perso deve essere sostituito attraverso la fissazione biologica dell'azoto (BNF), la deposizione atmosferica o la fertilizzazione. Nei sistemi non raccolti come le piantagioni di conservazione, le perdite possono essere estremamente basse in assenza di incendio e gli input di deposizione atmosferica dell'ordine di pochi kg per ettaro all'anno possono essere sufficienti per soddisfare la maggior parte delle esigenze di N a lungo termine. Ma per i sistemi raccolti o i sistemi non gestiti periodicamente bruciati, il BNF o la fertilizzazione devono compensare la perdita di azoto di biomassa e devono inoltre essere sufficienti a fornire l'accumulo di materia organica nel suolo, che potrebbe essere del 5% di azoto con rapporti C:N tipici del suolo arabile di 10:1. Terreno così degradato che rigenera la fertilità del suolo a un tasso di accrescimento tipico di C di $0,2 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ anno}^{-1}$ sequestrerebbe $\sim 20 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ anno}^{-1}$. Le praterie perenni non fertilizzate a lungo termine raccolte per il fieno per più di 50 anni ([Jenkinson et al., 2004](#)) non mostrano diminuzioni nelle scorte di C e N del suolo o nelle rese, suggerendo che la stasi di N è mantenuta in gran parte attraverso BNF. Allo stesso modo, il fatto che le colture erbacee perenni raccolte per la bioenergia spesso non rispondano ai fertilizzanti N suggerisce input significativi di BNF. In un sito nel Midwest superiore degli Stati Uniti, ad esempio, [Roley et al. \(2018\)](#) non hanno riscontrato alcuna risposta del panico verga al fertilizzante N nella maggior parte degli anni e per un periodo di tre anni successivo a due anni di impianto hanno calcolato un deficit medio annuo minimo di N di 58 kg N ha^{-1} basato sul bilancio di massa N. La fissazione biologica dell'N - presumibilmente la fissazione associativa dell'N - deve essere stata almeno così alta per bilanciare le perdite note dovute alla resa più le perdite dovute alla lisciviazione e denitrificazione e immobilizzazione dell'N nella materia organica del suolo, sulla base del bilancio di massa dell'N.

Il BNF simbiotico è ben noto nei legumi; Le piante perenni importanti dal punto di vista agricolo note per ospitare la rizobia in grado di fissare l'azoto includono le colture erbacee erba medica e medica (*Medicago* spp.), trifoglio (*Trifolium* spp.), veccia (*Vicia* spp.) e trifoglio (*Lotus corniculatus*), così come piante legnose specie come *Leucaena*, *Gliricidia* e robinia (*Robinia* spp.). Nei suoli degradati, le leguminose possono soddisfare fino al 90% del loro fabbisogno di N con l'azoto atmosferico (cioè tramite BNF), e l'inclusione delle leguminose nei pascoli è una strategia ben nota per intensificare la produzione di foraggio.

Meno si sa sulla fissazione N associativa ([Smercina et al., 2019](#) ; [Roley, 2021](#)), che appare come un'associazione casuale ed episodica tra piante e batteri diazotrofi a vita libera. La fissazione associativa dell'azoto sembra verificarsi più comunemente sopra o in prossimità delle superfici radicali o, almeno nella canna da zucchero (*Saccharum officinarum* spp.), anche all'interno dei fusti delle piante, dove i batteri hanno facile accesso alla labile C. Nitrogenasi, il complesso enzimatico responsabile della trasformazione atmosferico N₂ in una forma che le piante possono utilizzare, è squisitamente sensibile all'ossigeno ([Robertson e Groffman, 2021](#)), rendendo il BNF difficile al di fuori dei noduli specializzati creati dai legumi e dalle piante actinorizzali per escludere l'ossigeno. Di conseguenza, la fissazione associativa di N è lenta, spazialmente discreta, forse episodica ([Roley et al., 2019](#)), e comunque difficile da misurare direttamente. Le misurazioni sul campo hanno rilevato colture importanti come la canna da zucchero e le graminacee che beneficiano di questo tipo di associazione con i fissatori di azoto ([Boddey e Dobereiner, 1995](#) ; [Peoples et al., 2001](#) ; [Roley et al., 2018](#) , [2019](#)). Tuttavia, la fissazione associativa di N è sempre più documentata in un'ampia varietà di ecosistemi ([Reed et al., 2011](#) ; [Ladha et al., 2016](#)) e attirando una rinnovata attenzione come fonte a basso costo di N per colture bioenergetiche perenni. Sebbene in alcuni casi il fertilizzante N possa ancora essere necessario per ottimizzare la produzione, l'inclusione dei legumi nelle miscele di specie bioenergetiche sarebbe un ulteriore modo per mantenere alta l'efficienza di utilizzo dell'N a livello di sistema. È noto che le colture annuali che si basano esclusivamente su BNF hanno una maggiore efficienza di utilizzo dell'N a livello di sistema ([Córdova et al., 2019](#)) e il potenziale per il BNF di migliorare l'efficienza di utilizzo dell'N delle terre degradate attraverso la perennizzazione è altrettanto promettente.

Disponibilità e ritenzione del fosforo

Dopo N, P è il secondo nutriente più limitante per la crescita delle piante. Come nutriente essenziale, P è cruciale per la struttura del DNA e dell'RNA, la produzione di enzimi e per l'ATP. Pertanto, P può co-limitare la produttività delle piante insieme a N o addirittura limitare direttamente la produttività in terreni altamente alterati dove l'offerta di P è bassa ([Elser et al., 2007](#)). A differenza di N, le riserve globali di fertilizzante P sono limitate e devono essere estratte piuttosto che sintetizzate da una fonte atmosferica illimitata. Oltre ad essere in offerta limitata, circa il 50% delle perdite di P è attribuito all'erosione, rendendo P un forte inquinante ambientale che contribuisce alla scarsa qualità dell'acqua a valle ([Alewel et al., 2020](#)). Nonostante la sua importanza, il ciclo P da un punto di vista biologico è poco studiato, in parte perché P è più difficile da rintracciare rispetto a C e N ([Guignard et al., 2017](#)). Tuttavia, in terreni degradati, la

disponibilità di P può essere gravemente compromessa quanto i depositi di C e la disponibilità di N ([Schneider et al., 2019](#)).

Il suolo P è presente in forme organiche e inorganiche, ma solo il P inorganico è disponibile per l'assorbimento da parte delle piante. E come N, non tutto il P inorganico del suolo è direttamente disponibile per le piante. Il P inorganico è presente nella maggior parte dei suoli come minerali come l'apatite (una forma di fosfato di calcio), che deve essere alterato in una forma inorganica disponibile per le piante. Inoltre, P può essere adsorbito su superfici minerali come argille contenenti ferro e alluminio. Questo P adsorbito deve subire reazioni di desorbimento per diventare una forma solubile disponibile per l'assorbimento da parte delle piante. In alternativa, la P organica nei residui vegetali, nella biomassa microbica e nei residui animali come feci e urina può essere mineralizzata a HPO_4^{2-} per l'assorbimento. Il pool di P organico è dinamico e una delle più importanti fonti di disponibilità di P nei terreni arabili ([Alewell et al., 2020](#)), in particolare nei sistemi organici, a basso input, rigenerativi e di altro tipo che si basano principalmente su fonti di nutrienti biologici.

Molti terreni agricoli degradati hanno abbondante suolo P ma non in una forma disponibile per le piante ([Al-Abbas e Barber, 1964](#)). Pertanto, i processi che rilasciano P disponibile per la pianta sono importanti per il ciclo P sostenibile. I fattori che contribuiscono a una bassa P disponibile per le piante includono meno essudati radicali e prodotti microbici che possono aiutare la dissoluzione di P in forme disponibili per le piante ([Graustein et al., 1977](#) ; [Fox et al., 1990](#) ; [Ingle e Padole, 2017](#)), pH basso, che può contribuire all'adsorbimento di P da parte di ferro e alluminio, e pH elevato, che può contribuire all'adsorbimento di P da parte del calcio. Inoltre, bassi livelli di materia organica del suolo possono ridurre la quantità di P disponibile per la dissoluzione, in quanto la materia organica del suolo fornisce anche siti di legame per il P inorganico del suolo ([Deb e Datta, 1967](#) ; [Hue, 1991](#)). Poiché i processi coinvolti nella disponibilità e ritenzione di P sono stati ampiamente ignorati, i terreni degradati fanno molto affidamento sull'aggiunta di fertilizzanti P inorganici per soddisfare la domanda delle piante e mantenere la produttività delle piante. Tuttavia, gran parte del P aggiunto non verrà restituito al suolo poiché verrà raccolto nella biomassa vegetale o perso nel sistema attraverso l'erosione, il deflusso e la lisciviazione ([Bennett et al., 2001](#) ; [Childers et al., 2011](#)), aggravando ulteriormente la mancanza di P disponibile nei sistemi degradati.

La perennializzazione può migliorare la disponibilità e il riciclaggio di P riducendo le perdite di P e aumentando la presenza di P disponibile nelle piante ([Patty et al., 1997](#) ; [Lehmann et al., 2001](#) ; [Crews and Brookes, 2014](#)). Esistono molti meccanismi diversi attraverso i quali ciò si verifica. Come notato in precedenza, le colture perenni aumentano la materia organica del suolo, che può

migliorare il ciclo del P fornendo una fonte di P attraverso la decomposizione o la dissoluzione del P inorganico adsorbito ([Kang et al., 2009](#) ; [Gaxiola et al., 2011](#)). Gli enzimi fosfatasi prodotti dai microbi del suolo possono scindere selettivamente gli esteri P dalla materia organica, consentendo l'immobilizzazione del P nella biomassa microbica ([van der Heijden et al., 2008](#) ; [Richardson et al., 2009](#)), che può portare a un maggiore riciclaggio di P quando i microbi muoiono. I processi coinvolti nel rilascio di P disponibile per le piante sono facilitati nei sistemi di coltivazione perenni attraverso una maggiore biomassa delle radici e profondità di radicazione e attraverso una maggiore biomassa e attività microbica.

Sistemi di radicazione più profondi e diversificati, così come comunità microbiche migliorate, possono anche contribuire a una disponibilità e un riciclaggio più efficienti del P ([Crews e Brookes, 2014](#)). Il rilascio di P da minerali e materia organica può avvenire attraverso l'essudazione radicale di acidi organici e attraverso l'attività microbica. Gli acidi organici prodotti dalle radici e dai microbi abbattano i minerali del suolo e competono per i siti di adsorbimento della materia organica per rilasciare P disponibile per la pianta ([Deb e Datta, 1967](#) ; [Fox et al., 1990](#) ; [Hue, 1991](#)). Esiste una correlazione positiva tra la quantità di acidi organici nel suolo e la produttività delle piante dovuta alla disponibilità di P ([Bolan et al., 1994](#)). Più radici a profondità del suolo più profonde aumentano la quantità di essudati radicali e, in ultima analisi, la quantità di P disponibile per la crescita delle piante. I microbi sono anche cruciali per trasformare P in forme utilizzabili dalle piante essudando metaboliti e acidi organici che rilasciano P adsorbito e non disponibile da minerali e materia organica ([Graustein et al., 1977](#) ; [Ingle e Padole, 2017](#)). Le micorrize associate alle radici delle piante sono particolarmente importanti per facilitare questo processo ([Malajczuk e Cromack, 1982](#) ; [Lapeyrie, 1988](#)), rendendo P più disponibile e migliorando l'assorbimento da parte delle piante di P. Pertanto, avere una comunità microbica attiva e diversificata faciliterà la dissoluzione del P e la mobilizzazione e infine la disponibilità nei suoli.

I sistemi perenni non solo forniscono più P disponibile per la pianta attraverso un aumento dei processi radicali e microbici, ma portano anche alla ritenzione di P nel sistema. Quando P non è associato a minerali, materia organica o biomassa, può essere facilmente perso dal sistema attraverso il deflusso e l'erosione ([Bennett et al., 2001](#) ; [Childers et al., 2011](#)). Ad esempio, in tutto il mondo, i campi coltivati perdono circa 15 milioni di tonnellate di P a causa dell'erosione ([Smil, 2000](#)). E [Cordel et al. \(2009\)](#) hanno stimato che a livello globale 8 milioni di Mg di P vengono persi dai campi agricoli ogni anno, in gran parte a causa di uno squilibrio tra i tassi di applicazione dei fertilizzanti P e i tassi di assorbimento delle piante, con conseguente applicazione eccessiva di P nei sistemi di coltivazione. [Patty et al. \(1997\)](#) hanno scoperto che anche piccole

stirpe tampone di erba perenne erano sufficienti per ridurre il deflusso di P nei corpi idrici dell'89-100%, sebbene sarebbe stato meglio se il P rimanesse nei campi disponibili per l'assorbimento futuro. L'assorbimento di P da parte delle radici e delle micorrize aiuta anche a garantire che P non venga perso dal sistema. La maggiore abbondanza di radici e micorrize nei sistemi perenni aumenta la probabilità che si verifichi l'assorbimento di P, poiché la lunghezza delle radici, l'area della superficie delle radici e le micorrize sono fortemente correlate con l'assorbimento di P (Bolan, 1991; Pang et al., 2010). Mentre le esportazioni di P dalla biomassa perenne raccolta come l'erba medica possono essere elevate, meno P viene rimosso dal sistema rispetto alle piante annuali come mais e soia (Lehmann et al., 2001; Cadot et al., 2018; Coney, 2019). La perennizzazione dei terreni degradati manterrà più residui vegetali e copertura della chioma per periodi di tempo più lunghi. Pertanto, queste terre avranno meno probabilità di perdere P a causa dell'erosione, della lisciviazione o del deflusso.

Potenziali strategie di gestione per il restauro

Per illustrare i meccanismi alla base dell'impatto della perennializzazione sul ripristino della fertilità del suolo, descriviamo di seguito tre potenziali sistemi di gestione che differiscono per intensità, impatto e tempo per il ripristino completo, illustrando ampiamente tre usi generali: mitigazione dei cambiamenti climatici (sistemi di coltivazione bioenergetica), produzione di proteine animali (pascolo intensivo a rotazione) e ripristino della biodiversità (piantagioni di conservazione). Tutti e tre forniscono miscele complementari di servizi ecosistemici, come illustrato nella, e nessuno è esclusivo: questi e altri sistemi rigenerativi potrebbero essere stabiliti nello stesso paesaggio, anzi, nella stessa fattoria o ranch, per fornire la multifunzionalità spesso ricercata nell'agricoltura sostenibile (Robertson e Harwood, 2001; Boody et al., 2005). Molte altre opportunità per il ripristino della fertilità del suolo attraverso la perennizzazione sono ugualmente realizzabili. Alcuni esempi degni di nota includono sistemi di cereali perenni (ad esempio, Glover et al., 2010; DeHaan et al., 2020), sistemi di frutteto e agroforestazione (ad esempio, Subler e Uhl, 1990; Palm, 1995), e lunghe rotazioni di colture da reddito che includono diversi anni di foraggio perenne o colture di copertura. Tutti hanno un grande potenziale per ripristinare la fertilità del suolo su terreni degradati.

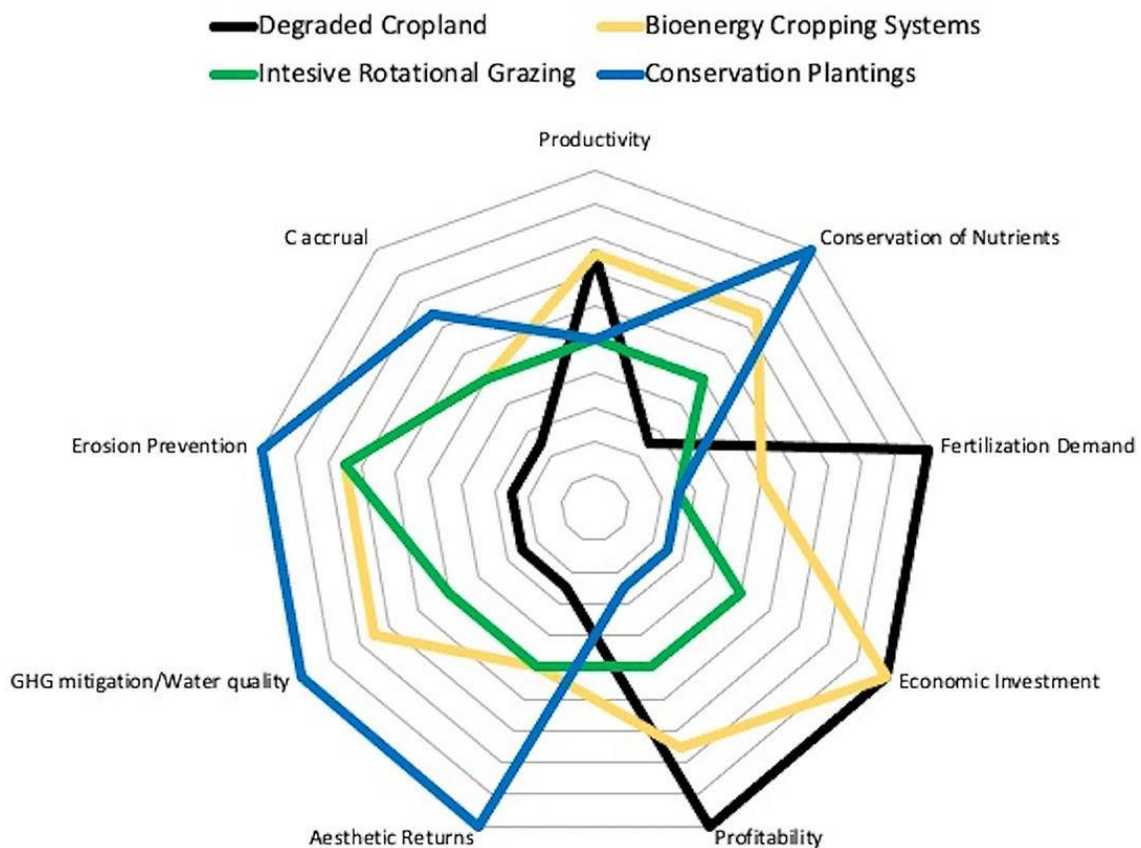


Figura 5: Combinazioni alternative di servizi ecosistemici che potrebbero essere forniti da diversi sistemi perenni rispetto ai terreni agricoli degradati.

1. Sistemi di coltivazione bioenergetica

La bioenergia cellulosica è fondamentale per tutti i percorsi di mitigazione dell'IPCC in grado di mantenere il cambiamento della temperatura globale di fine secolo al di sotto di 1,5°C ([Gruppo intergovernativo sui cambiamenti climatici, 2018](#)), sia che la bioenergia sia utilizzata per la produzione di combustibile liquido o di elettricità, o entrambi. Mentre alcune materie prime cellulosiche proverranno da sottoprodotti agricoli e industriali, una parte sostanziale deve provenire da colture di biomassa appositamente coltivate, principalmente erbe perenni e alberi a rotazione breve (Robertson et al., 2017). La quantità di biomassa appositamente coltivata necessaria per soddisfare la domanda di energia C-negativa è sostanziale: solo negli Stati Uniti, almeno un miliardo di tonnellate all'anno ([US Department of Energy, 2011](#)) e globalmente molto di più ([Nakada et al., 2014](#) ; [Calvino et al., 2019](#)).

I terreni coltivati produttivi non possono essere utilizzati per soddisfare in modo sostenibile gran parte di questa domanda: la conversione di terreni ora utilizzati per produrre cibo per produrre bioenergia creerà pressioni per convertire altri terreni ora non gestiti alla produzione alimentare al fine di compensare la perdita di produttività delle colture alimentari, annullando gran parte del clima vantaggio delle colture da biomassa sui terreni coltivati contemporanei. I cosiddetti effetti del cambiamento indiretto dell'uso del suolo (ILUC) possono essere evitati solo con aumenti irrealistici della produttività dei terreni coltivati (per compensare la produzione alimentare quando i seminativi sono destinati a nuove colture bioenergetiche), o evitando del tutto l'uso degli attuali terreni coltivati per la bioenergia ([Robertson et al., 2017](#)). D'altra parte, l'uso di terreni agricoli improduttivi o degradati per colture bioenergetiche perenni avrà uno scarso impatto ILUC a causa dell'ulteriore vantaggio climatico derivante dalla rimozione di queste terre dalla produzione agricola annuale, e quindi sono anche terreni candidati eccellenti per la produzione di materie prime perenni.

L'utilizzo di terreni degradati in tutto il mondo per la produzione di bioenergia cellulosa è quindi interessante su due fronti. In primo luogo, evita gli effetti ILUC per consentire di applicare tutti i benefici climatici della bioenergia cellulosa alla mitigazione del clima senza che i benefici debbano essere scontati per i gas serra aggiuntivi prodotti quando le aree naturali altrove vengono convertite alla produzione alimentare. Ciò riguarda anche gli obiettivi dell'obiettivo di sviluppo sostenibile 13, relativo all'azione per il clima. In secondo luogo, fornisce un mezzo per riportare le terre degradate a uno stato più fertile, consentendo una maggiore capacità produttiva per ridurre progressivamente la quantità di terra necessaria per la produzione di bioenergia, che a sua volta consentirà a queste terre di tornare alla fine a uno stato naturale più robusto. stato per sostenere gli obiettivi globali di biodiversità ([IPBES, 2019](#)) o tornati alla produzione di colture alimentari per raggiungere l'obiettivo di sviluppo sostenibile 2 relativo alla fame. Una percentuale crescente di terre bioenergetiche con fertilità del suolo ripristinata sarebbe disponibile per la produzione alimentare una volta che le temperature globali si fossero stabilizzate dopo il 2.100.

Il ripristino della fertilità del suolo sotto colture bioenergetiche perenni attinge alla maggior parte dei meccanismi relativi alla gestione ecologica dei nutrienti identificati nella sezione Impatti della perennializzazione sul ripristino della fertilità: accrescimento di C nel suolo, conservazione di N e ciclo P più efficiente. Sappiamo di più sull'accrescimento di C nel suolo a causa della sua importanza per i benefici climatici delle colture bioenergetiche. L'azoto è importante sia per il suo impatto positivo sulla produzione di biomassa, ma anche per il suo potenziale negativo di gravare ulteriormente sul carico di azoto reattivo della biosfera e di scartare i benefici climatici della

produzione di bioenergia attraverso la produzione di fertilizzanti e protossido di azoto. Il fosforo può anche limitare la produzione di biomassa, specialmente nei terreni tropicali altamente alterati. Come notato in precedenza, il suolo C guadagna sotto colture perenni, siano esse erbe come il panico verga (*Panicum virgatum*) o alberi a rotazione breve come il pioppo ibrido (*Populus* spp.), o anche comunità semi-naturali complesse come la prateria restaurata ([Tilman et al. , 2006](#) ; [Gelfand et al., 2020](#)), derivato da biomassa radicale e suolo C stabilizzato. C—in particolare, C associato con aggregati e superfici minerali . Alcuni autori hanno anche sostenuto l'aggiunta di biochar alle colture bioenergetiche, anche se il beneficio climatico sarà probabilmente inferiore rispetto a quando la biomassa C fosse invece completamente convertita alla produzione di energia per compensare l'uso di combustibili fossili .

Il fatto che il suolo C possa accumularsi sotto le colture bioenergetiche anche quando viene raccolta tutta la biomassa fuori terra illustra l'importanza delle radici come fonti di suolo C stabilizzato. È noto da tempo che le leguminose perenni coltivate come colture foraggere sequestrano il suolo C. Nel sud-ovest del Michigan, ad esempio, [Syswerda et al. \(2011\)](#) hanno dimostrato che un popolamento continuo di erba medica raccolto 3-4 volte per stagione di crescita ha guadagnato 1,0 Mg C ha⁻¹ anno⁻¹ nell'orizzonte Ap nei suoi primi 12 anni, come altri hanno documentato (ad esempio, [Kumar et al., 2018](#)) , e a quasi tre volte questo tasso (2,9 Mg C ha⁻¹ anno⁻¹) quando si considera l'intero profilo a 1 m. Anche il suolo C si accumula, ma spesso più lentamente sotto l'erba; [Schmer et al. \(2011\)](#) , ad esempio, hanno documentato tassi di aumento di SOC tra 1,4 e 3,3 Mg C ha yr da -1 a 1,2 m di profondità in uno studio di 5 anni sui campi raccolti di panico verga nelle fattorie del Nebraska, USA. Altri, ma non tutti hanno riscontrato guadagni di entità simile subito dopo l'insediamento del panico verga. Il suolo C si accumula anche sotto le colture arboree a rotazione breve , sebbene le perdite di SOC post-raccolta possano sostanzialmente ridurre i guadagni di C del suolo quando il suolo è esposto all'erosione e a condizioni di umidità e temperatura che accelerano la decomposizione quando il suolo è esposto prima della chiusura della chioma della coltura successiva .

I due maggiori rischi della produzione di bioenergia su larga scala, a parte l'uso di terreni coltivati contemporanei ora utilizzati per il cibo, sono un'ulteriore perdita di biodiversità in seguito alla conversione di coperture del suolo inadeguate e un ulteriore carico di N della biosfera. L'uso di colture adeguate su terreni degradati minimizza entrambi i rischi. In primo luogo, l'uso degli 864-951 milioni di ettari di terreni agricoli abbandonati in tutto il mondo evita le terre di interesse conservazionistico: zone umide, foreste secolari e altre aree naturali importanti per la conservazione della biodiversità . Evitare terreni con una copertura forestale significativa è particolarmente importante per evitare il debito C a lungo termine che va contro i benefici

climatici; le terre in fase di riforestazione stanno già contribuendo alla mitigazione dei cambiamenti climatici. Infine, piantare erbe autoctone e alberi a rotazione breve originari di una regione migliorerà il valore di conservazione delle terre più degradate, tipicamente dominate da specie invasive non autoctone con minore valore di biodiversità. Le piantagioni native di specie miste dovrebbero avere un beneficio ancora maggiore.

In secondo luogo, evitare colture con elevati requisiti di azoto o basse efficienze di utilizzo dell'azoto manterrà l'azoto reattivo aggiuntivo dall'ambiente. Le colture da biomassa non leguminose come le graminacee perenni e gli alberi a rotazione breve hanno bassi requisiti di azoto e alte efficienze di utilizzo dell'azoto e, se raccolte dopo la senescenza, rimuoveranno relativamente poco azoto durante il raccolto. Meccanismi nella sezione Impatti della perennizzazione sul ripristino della fertilità, in particolare radici persistenti che occupano un'ampia percentuale del volume disponibile del suolo, traslocazione pre-raccolta di N dalla biomassa fuori terra alle radici e relativamente poco N assegnato alla biomassa riproduttiva come i semi, risultando in rapporti C:N elevati alla raccolta, crea un ciclo N dell'ecosistema relativamente chiuso. Questo è ancora più vero quando si piantano specie in grado di acquisire la maggior parte o tutto il proprio N attraverso BNF (vedi sezione Conservazione dell'azoto). Si stanno accumulando prove empiriche di basse perdite di azoto dai sistemi di coltivazione di biomasse perenni, così come il potenziale di fissazione N associativa. Inoltre, piantare colture perenni da biomassa per la conservazione della biodiversità o la bioenergia o entrambe in porzioni di sottocampi a basso rendimento e non redditizie di terreni coltivati esistenti (potrebbe evitare una notevole quantità di perdite contemporanee di N da questo terreni coltivati).

Tutto sommato, quindi, la coltivazione di colture perenni di biocarburanti su terreni degradati potrebbe fornire una sostanziale mitigazione del clima ripristinando la fertilità del suolo a lungo termine. Le colture perenni non leguminose sono particolarmente attraenti: pochi input di gestione, accrescimento di materia organica del suolo a lungo termine e conservazione di N e P con biodiversità e altri benefici collaterali. La crescita dei mercati delle bioenergie, attualmente non realizzata, potrebbe rendere tali pratiche anche economicamente redditizie, fornendo una suite completa di servizi ecosistemici.

Pascolo intensivo a rotazione

La gestione del foraggio perenne come pascolo per il pascolo fornisce un secondo importante sistema di gestione per il ripristino dei terreni degradati. In contrasto con le attuali pratiche di pascolo che tendono a mantenere o aggravare ulteriormente i suoli degradati, spesso a causa del pascolo eccessivo, qui ci riferiamo alla gestione del pascolo che mira a mantenere la produzione di foraggio perenne in modo sostenibile ruotando gli animali nel paesaggio. Il pascolo a rotazione

può assumere molte forme diverse. Il pascolo a rotazione semplice (RG) sposta gli animali a bassa intensità con 2-14 pascoli per mandria. Il pascolo intensivo gestionale (MiG) sposta gli animali a intensità più elevate con oltre 16 pascoli per mandria e il pascolo adattivo multi-paddock (AMP) include spesso oltre 40 pascoli per mandria. I sistemi a bassa intensità tendono ad avere movimenti degli animali più fissi e pianificati, mentre i sistemi più intensivi sono più flessibili e tendono a spostare gli animali in base alla crescita del foraggio. Ruotando gli animali, al suolo e alla vegetazione perenne vengono forniti periodi senza pascolo che aiutano a mantenere e migliorare la fertilità del suolo e la produttività perenne.

I pascoli che contengono una vegetazione perenne e varia offrono foraggio che spesso può essere più produttivo e disponibile per una parte maggiore della stagione di crescita rispetto ai sistemi di pascolo che fanno molto affidamento su colture piantate annualmente per il foraggio durante tutto l'anno. L'aumento della produttività del foraggio perenne al pascolo potrebbe anche essere dovuto all'aumento della tolleranza alla siccità e allo stress di molte erbe perenni. Inoltre, nei pascoli perenni, non ci sono lavorazioni annuali o eventi di raccolta estremi, quindi rimane più biomassa sopra e sotto terra dopo gli eventi di pascolo, specialmente nei sistemi di pascolo AMP, che mirano a lasciare il 50% del foraggio non consumato. Con una maggiore produttività del foraggio perenne, queste terre sono in grado di sostenere più animali con maggiori tassi di allevamento senza gli effetti negativi del pascolo eccessivo. La perennizzazione diversifica anche la vegetazione disponibile per il pascolo, producendo spesso più foraggio nutrizionale e migliorando la salute del bestiame.

Ci sono molti esempi di migliore fertilità del suolo da pascoli perenni che sono pascolati a rotazione. Quando i pascoli perenni vengono pascolati, gli animali mantengono i cicli dei nutrienti più chiusi e quindi conservativi, e anche economici: il letame generato in loco fornisce input organici di C, N e P che possono migliorare la ritenzione e la disponibilità dei nutrienti. Nei sistemi di pascolo AMP, l'uso di fertilizzanti e altri input è ridotto al minimo o addirittura eliminato; per esempio, [Mosier et al. \(2021\)](#) hanno scoperto che i pascoli AMP non fertilizzati avevano più suolo N rispetto ai pascoli non AMP fertilizzati annualmente. È stato anche dimostrato che i sistemi perenni pascolati a rotazione migliorano la salute del suolo attraverso indicatori fisici, chimici e biologici, con conseguente miglioramento della ritenzione idrica e dell'infiltrazione. Il recupero di terreni degradati utilizzando pascoli perenni a rotazione è stato dimostrato sia in regioni umide come gli Stati Uniti meridionali sia in pascoli semi-aridi in Africa e gli Stati Uniti occidentali.

Oltre ai benefici per la fertilità del suolo, il pascolo a rotazione nei pascoli perenni può anche ridurre alcune emissioni di gas serra. [Teague et al. \(2016\)](#) hanno rilevato che i sistemi di pascolo

con copertura erbosa annuale hanno prodotto un'impronta di gas serra inferiore rispetto alle terre coltivate con periodi di suolo nudo grazie all'aumento dell'accumulo di suolo C. Ulteriori riduzioni delle emissioni di gas serra, in particolare metano, possono essere ottenute attraverso il pascolo AMP. Ad esempio [Shrestha et al. \(2020\)](#) hanno scoperto che i sistemi di pascolo AMP hanno aumentato l'assorbimento di metano di 1,5 volte rispetto ad altri sistemi di pascolo. Anche i sistemi perenni pascolati a rotazione possono ridurre la quantità totale di CO₂ emissioni associate alla produzione rispetto ad altri sistemi di pascolo convenzionali attraverso un maggiore sequestro di C e un ridotto fabbisogno di foraggio esterno. Tuttavia, alcuni studi hanno rilevato che le emissioni di N₂O sono aumentate in questi sistemi rotazionali a causa di tassi di allevamento più elevati, sebbene queste emissioni siano state compensate da livelli più elevati di accrescimento di C nel suolo. Le riduzioni delle emissioni nette di gas a effetto serra riguarderanno anche gli obiettivi di sviluppo sostenibile legati all'azione per il clima.

I costi associati alla conversione di terreni agricoli degradati in sistemi di foraggi perenni che vengono pascolati a rotazione, come la necessità di più recinzioni, sono relativamente bassi e prontamente compensati da una maggiore produttività e ritorni economici, come dimostrato per le aree del Midwest degli Stati Uniti. Inoltre, con una maggiore produttività perenne e stagioni di crescita più lunghe, gli animali in questi sistemi diventano meno dipendenti da fonti esterne di foraggio, un altro risparmio sui costi. E in particolare negli ambienti aridi, la conversione da terreni coltivati con scarse prestazioni a pascoli perenni pascolati è interessante, soprattutto quando gli allevatori considerano gli aumenti previsti dell'intensità della siccità.

Tutto sommato, i sistemi di pascolo perenni che utilizzano il pascolo rotativo intensivo hanno il potenziale per fornire una serie migliorata di servizi ecosistemici rispetto ai pascoli degradati e ai terreni coltivati con prestazioni insufficienti mentre allo stesso tempo ripristinano la fertilità del suolo per fornire una base di terra sempre più produttiva per soddisfare futuro fabbisogno alimentare. L'aumento della produttività allevierà anche proporzionalmente le pressioni per convertire le aree naturali non pascolate in pascoli, fornendo significativi benefici indiretti alla biodiversità.

Piantagioni di conservazione

All'estremità inferiore dello spettro dell'intensità di gestione perenne c'è la pratica di convertire le terre coltivate degradate in piantagioni di conservazione al fine di ripristinare la fertilità del suolo. La sua forma più semplice è la fase a maggese dell'agricoltura a maggese o a coltivazione mobile, che lascia semplicemente la terra a subire la successione ecologica con il suo ripristino della materia organica del suolo e della disponibilità di nutrienti, come notato in precedenza (sezione Introduzione). In molti casi oggi, tuttavia, il degrado del suolo ha superato il punto di rapida

ripresa e l'ubiquità delle piante invasive significa che la vegetazione che si riprende può avere poca somiglianza con la comunità nativa originaria con i suoi benefici di biodiversità associati. Spesso è giustificata una gestione della conservazione più diretta,

Un esempio di tale programma di gestione è l'USDA Conservation Reserve Program (CRP). Avviato come programma di messa a riposo per creare prezzi delle materie prime più elevati - la rimozione della terra dalla produzione crea prezzi più elevati riducendo l'offerta - il programma ora si rivolge a terre vulnerabili dal punto di vista ambientale, altrimenti soggette a un'elevata erosione e perdite di nutrienti, che possono essere convertite in habitat per la fauna selvatica e fornire altri benefici ambientali. In breve, i proprietari terrieri sono pagati per togliere dalla produzione terre vulnerabili al degrado e per sostituirle con sistemi perenni che riducano al minimo l'erosione del suolo e migliorino la salute del suolo, l'acqua qualità e habitat della fauna selvatica. Un vantaggio sempre più riconosciuto è stata la mitigazione dei gas serra ([Farm Service Agency, 2011](#)), ottenuta aumentando il sequestro di C nel suolo e riducendo l'uso di fertilizzanti N responsabili delle emissioni di protossido di azoto nel suolo (, aiutando contemporaneamente a raggiungere l'obiettivo di sviluppo sostenibile 13 , che affronta il cambiamento climatico e i suoi impatti.

Entro il 2011 il CRP aveva ridotto l'uso di fertilizzanti N e P rispettivamente di 275 e 55 milioni di kg , e tra il 1986 e il 2014 ha evitato oltre 7 miliardi di Mg di erosione del suolo. Studi precedenti hanno stimato che l'arruolamento di CRP ha avuto un risparmio medio di erosione di 38 Mg ha⁻¹. [Young e Osborn \(1990\)](#) hanno valutato la riduzione dell'erosione eolica fino a un miliardo di dollari USA, e [Ribaudo et al. \(1990\)](#) hanno valutato i miglioramenti della qualità dell'acqua a valle (dall'erosione idrica evitata e dalle perdite di nutrienti) di molte volte questo valore.

Gli effetti della conversione di terreni coltivati in terreni di conservazione come CRP hanno aumentato sensibilmente gli stock di C e N del suolo. Negli Stati Uniti, [Burke et al. \(1995\)](#) hanno mostrato miglioramenti del CRP nella stabilità e fertilità del suolo che hanno accompagnato l'accrescimento di C e N del suolo. I miglioramenti possono verificarsi rapidamente, spesso dopo soli 5 anni, probabilmente a causa della maggiore produttività delle piante da una varietà di erbe perenni seminate. D'altra parte, i tassi di recupero possono variare in base alle condizioni fisico-chimiche del suolo e dipendono anche dall'uso passato del suolo e dalla storia dei disturbi . In particolare, la ripresa può essere più lenta nelle regioni climatiche con minore produttività delle piante, come le regioni aride degli Stati Uniti occidentali.

Tendenze simili di recupero del suolo C sono state segnalate per le piantagioni di conservazione in Europa e in Asia. In Germania, [Breuer et al. \(2006\)](#) hanno mostrato maggiori depositi di C e N nel suolo nei siti convertiti in specie di praterie perenni rispetto ai siti sottoposti a colture continue.

In Russia e Cina, diversi autori hanno mostrato un alto potenziale per il recupero dello stock di suolo C nelle terre coltivate restituite alla vegetazione erbacea nativa. I tassi di accrescimento del suolo C per le praterie ripristinate in Russia erano quasi il 50% più alti rispetto alle foreste nella stessa regione. Allo stesso modo, sull'altopiano cinese del Loess, i terreni coltivati abbandonati convertiti in praterie hanno sequestrato più suolo C rispetto ai terreni boschivi ripristinati. [Zhang e Shao \(2018\)](#) hanno anche misurato un N, P e una fertilità complessiva del suolo più elevati dopo che le colture di mais e grano sono state convertite in praterie perenni.

La conversione di terreni degradati in piantagioni di conservazione avvantaggia molteplici taxa, compresi quelli che costituiscono comunità microbiche del suolo. [Matamala et al. \(2008\)](#), ad esempio, hanno mostrato il recupero della comunità microbica in una prateria restaurata convertita da terreni coltivati, sebbene il recupero sia stato a un ritmo molto più lento rispetto agli stock di C e N del suolo. Allo stesso modo, hanno mostrato un lento ma consistente aumento della biomassa microbica su terreni CRP piantati con erbe perenni autoctone. Nell'altopiano del Loess in Cina, aumenti documentati della ricchezza di specie microbiche e della biomassa, nonché una maggiore attività microbica, dopo la conversione delle terre coltivate in praterie perenni. La maggior parte degli autori collega il recupero ai sistemi di radicazione perenni e agli aumenti associati degli apporti di C dovuti al turnover delle radici e all'essudazione.

Ad eccezione del ritorno economico diretto o della produzione alimentare, i servizi ecosistemici forniti dalle piantagioni di conservazione sono considerevoli. La rimozione della terra dalla produzione e dei suoi input associati elimina immediatamente molti dei costi ambientali dell'agricoltura e avvia il ripristino di servizi di supporto come la biodiversità e la fertilità del suolo e servizi di regolazione come il controllo delle inondazioni. Tuttavia, elimina anche la maggior parte dei servizi di approvvigionamento, il che significa il ritorno economico diretto derivante dalla produzione di cibo, fibre o carburante. Ciò detto, con il potenziale pagamento dei servizi ecosistemici che può includere il pagamento per i benefici della biodiversità come l'impollinazione e la soppressione naturale dei parassiti, i ritorni economici diretti possono diventare un servizio ecosistemico aggiuntivo fornito dalle piantagioni di conservazione. Alla fine, ovviamente, il rimpatrio di queste terre per la produzione alimentare gioverà alla futura sicurezza alimentare, poiché le terre un tempo degradate riacquisteranno la loro capacità di produrre colture alimentari.

Ritorno alla produzione alimentare dopo il ripristino della fertilità del suolo con le piante perenni

Per interrompere il ciclo di degrado, il recupero deve essere una parte fondamentale di qualsiasi iniziativa di ripristino del suolo. Non ha molto senso investire decenni nella gestione che ripristini

la capacità produttiva di un sistema, sia attraverso la produzione di bioenergia, il pascolo intensivo a rotazione, le piantagioni di conservazione o una qualsiasi di una serie di altre pratiche, solo per consentire al sistema di degradarsi nuovamente una volta tornato alla normalità. produzione di cibo. Pertanto, il sistema di produzione implementato dopo il recupero deve essere sostenibile. L'obiettivo di sviluppo sostenibile incarna questa sfida: garantire sistemi di produzione alimentare sostenibili e attuare pratiche agricole resilienti che aumentino la produttività e la produzione; che aiutano a mantenere gli ecosistemi, rafforzare la capacità di adattamento ai cambiamenti climatici, condizioni meteorologiche estreme, siccità, inondazioni e altri disastri;

Questo è un compito arduo coerente con la necessità di incorporare pratiche sostenibili su terreni che non sono attualmente degradati (vedi altri documenti in questa raccolta). Si applicano i principi delineati nella sezione Impatti della perennizzazione sul ripristino della fertilità. Per sostenere la fertilità saranno necessarie pratiche che incorporino la gestione ecologica dei nutrienti, attingendo ai principi dell'agricoltura organica e rigenerativa per mantenere depositi stabili di SOC e collegare i cicli C, N e P per fornire nutrienti con una piccola perdita ambientale. La prima e più importante è la necessità di diversificare le rotazioni. Le rotazioni complesse che includono colture perenni per foraggio o maggese hanno, per i motivi descritti in precedenza, cicli di nutrienti più efficienti delle rotazioni più semplici. I sistemi agricoli esportano C, N, P e altri elementi con il raccolto,

Altre pratiche che sarà importante coinvolgere includono la non lavorazione per mantenere meglio la salute del suolo; gestione dei nutrienti a tasso variabile e piantagioni di conservazione del sottocampo per evitare un'eccessiva fertilizzazione delle aree a bassa resa di un dato campo; uso minimo e mirato di pesticidi per mantenere intatte e perfettamente funzionanti le reti alimentari del suolo; e l'integrazione degli animali attraverso il pascolo periodico o la restituzione del letame. Se i cereali perenni diventeranno agronomicamente vitali nei prossimi decenni, si aprirà un nuovo percorso per incorporare le colture perenni nei terreni coltivati a cereali. Incorporare le piante perenni nelle rotazioni post-recupero è quindi un aspetto chiave della gestione sostenibile e rigenerativa del suolo.

Ostacoli all'adozione

Agricoltori e proprietari terrieri hanno numerose opzioni per incorporare piante perenni nelle loro strategie di produzione e gestione del territorio, che vanno da rotazioni colturali più complesse che includono colture perenni come erbe foraggere e leguminose alla creazione di sistemi di colture perenni come quelli per la bioenergia cellulosica, il pascolo a rotazione e le piantagioni di conservazione sopra menzionate. Perché queste pratiche non sono più ampiamente adottate? Le

barriere non sono, in generale, legate alle lacune di conoscenza: oggi disponiamo delle conoscenze fondamentali per implementare sistemi di colture perenni riparatrici e la maggior parte degli agricoltori ha le conoscenze e le competenze per stabilirli e gestirli con successo. Piuttosto, le barriere sono in gran parte socioeconomiche, legate al commercio globale e alle politiche nazionali che premiano lo status quo. Tre barriere, in particolare, si distinguono.

Il primo è la continua pressione della domanda alimentare globale. Si prevede che le esigenze alimentari globali continueranno la loro traiettoria ascendente; le proiezioni di un fabbisogno alimentare superiore del 30-50% entro la metà del secolo a causa della crescita della popolazione e del reddito eserciteranno continue pressioni sugli agricoltori affinché intensifichino ed espandano la produzione alimentare. Nella misura in cui l'espansione della produzione non può essere soddisfatta dall'intensificazione, ci saranno pressioni per utilizzare per la produzione alimentare terre degradate con i loro limiti intrinseci di produzione e conservazione dei nutrienti. In secondo luogo sono le politiche che rafforzano e premiano il raccolto annuale su terreni agricoli degradati. Negli Stati Uniti, l'assicurazione del raccolto incentiva l'agricoltura anche su terreni non redditizi poiché gli agricoltori vengono compensati per i bassi raccolti annuali, che si verificano sempre più frequentemente su tali terreni, creando una spirale discendente di feedback positivi. Inoltre, l'assicurazione del raccolto negli Stati Uniti e le sovvenzioni altrove non incentivano la gestione ecologica e sono in ogni caso disponibili solo per pochi prodotti selezionati, scoraggiando direttamente la diversità delle colture premiando invece i sistemi di produzione a bassa diversità e ad alto input. Non esiste un mercato globale per la fertilità del suolo o la diversificazione dei terreni coltivati, e con le attuali politiche che creano blocchi finanziari che scoraggiano le pratiche rigenerative, l'abbandono della terra è troppo spesso il risultato finale.

Un ultimo grande ostacolo è la mancanza di mercati per alcuni dei più promettenti sistemi di colture perenni riparatrici. Negli esempi precedenti, né le colture bioenergetiche cellulosiche né le piantagioni di conservazione hanno mercati contemporanei, né i mercati regionali per diverse colture di cereali sono sufficientemente disponibili: anche nel Midwest degli Stati Uniti, colture comuni come la colza (Brassica rapa) non possono essere coltivate per mancanza di lavorazioni vicine impianti. Pertanto, non solo vi sono spesso disincentivi per l'allontanamento da terreni agricoli degradati, ma non vi sono nemmeno incentivi immediati - e anzi disincentivi - per l'adozione di pratiche rigenerative.

Due soluzioni sembrano sostenibili, soprattutto nei paesi più ricchi: rimuovere gli incentivi perversi che motivano il degrado del suolo e pagare gli agricoltori per la fornitura di servizi ecosistemici. Espandendo i pagamenti dei sussidi alle colture, diretti o indiretti, per includere

ulteriori colture annuali e perenni, i produttori potrebbero essere premiati per la gestione della diversità delle colture per la gestione ecologica dei nutrienti e il relativo ripristino del suolo. I co-benefici della diversificazione includono la resilienza alle condizioni meteorologiche estreme, un approvvigionamento alimentare più stabilizzato e l'evitare penalità di rendimento associate a continue rotazioni .

In secondo luogo, i pagamenti per i servizi ecosistemici forniscono alla società un mezzo per compensare direttamente i proprietari terrieri e gli operatori per pratiche agricole che altrimenti non adotterebbero. Sono stati generati lunghi elenchi di servizi candidati e i mercati nascenti stanno pagando gli agricoltori per il sequestro del suolo C e una gestione più precisa dell'N, anche se i pagamenti sono attualmente insufficienti per motivare l'adozione. Ma i pagamenti per le pratiche di mitigazione del clima sono stati recentemente proposti negli Stati Uniti e potrebbero consentire incentivi

per il sequestro del suolo C utilizzando pratiche di coltivazione più diverse che includono colture perenni.

3. CONCLUSIONI

C'è abbondanza di terreni degradati nel mondo che necessitano di ripristino della fertilità del suolo per soddisfare le esigenze di sicurezza alimentare attuali e future. L'utilizzo della personalizzazione per ripristinare la fertilità perduta sembra possibile attraverso pratiche che promuovono l'accrescimento di C e l'uso efficiente e la conservazione di N e P.

I suoli garantiscono servizi ecosistemici cruciali come la fornitura di cibo, il sequestro del carbonio e la purificazione dell'acqua. Ospitano oltre il 25% di tutta la biodiversità e forniscono più del 95% di cibo a miliardi di persone. Inoltre, rappresentano il più grande bacino terrestre di carbonio tanto che l'Unione europea pone il concetto di "suoli sani" al centro del Green Deal europeo per raggiungere la neutralità climatica, l'inquinamento zero, l'approvvigionamento alimentare sostenibile e un ambiente resiliente.

Eppure, come stimano gli scienziati del Centro comune di ricerca della Commissione europea (il Joint Research Centre, JRC) il 13% dei suoli nell'UE soffre di elevati livelli di erosione con costi annuali di 1,25 miliardi di euro a causa della perdita di produttività agricola. Ogni anno, le terre coltivate perdono 7,4 milioni di tonnellate di carbonio a causa di una gestione non sostenibile. E secondo una relazione della Corte dei conti europea, il 25% dei terreni dell'Europa meridionale e orientale è ad alto rischio di desertificazione.

4. BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA

- <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fsufs.2021.706142/full>
- <https://www.codiferro.it/compost-cosa-e-compostaggio/>
- https://www.google.com/search?q=compostaggio+domestico&tbm=isch&source=iu&ictx=1&vet=1&sa=X&ved=2ahUKEwiQzaXV8uX-AhWL_CoKHTuRAE8Q_h16BAgJEAU&biw=1920&bih=904&dpr=1#imgrc=JMmk_2J0qZVK1M
- <https://www.terzobinario.it/torquati-no-al-compostaggio-anaerobico-a-cesano-e-osteria-nuov>
- <https://www.arpa.veneto.it/arpavinforma/pubblicazioni/la-tecnologia-del-compostaggio>
- Cappelli S., Aureli M.L. 1998. L'utilizzo del compost in agricoltura. – ARSSA.
- Ciavatta C., Sitti L., Govi M., Gessa C. 1997. Criteri per un corretto utilizzo dei reflui zootecnici e di biomasse di rifiuto: qualità del carbonio organico. Giornate distudio PANDA, Roma 27-29 marzo 1996, Agric. Ric.,173:37-44
- Cortellini L. 2001. Compost: Normativa di riferimento enovità. Compost: produzione ed utilizzo. Atti del 2°Corso Nazionale di Specializzazione.
- Cristoforetti A. 1997. Le tecnologie per il compostaggio. Supplemento a L'Informatore Agrario, 44:23-31.
- Farini A., Vandoni M.V., Allieri L., Ferrari A.M., No-vella P. 1982. Effetti della somministrazione di materiali organici sulle caratteristiche chimiche e biologiche del suolo. Nota II, Riv. Agron., 16:384-391.
- Giovanni Fecondo, Grazia Guastadisegni, Mario D'Ercole, Maria Del Bianco , Pietro Antonio Buda, 2008. *“Use of quality compost on arboreus cultivation to improve soil fertility (Utilizzo di compost di qualità su colture arboree per il miglioramento della fertilità del terreno). Italian Journal of Agronomy Open Access, Volume 3, Issue SUPPL. 2, Pages 31 - 3*
- Massimo Zaccardelli, Domenico Ronga, Riccardo Scotti, Giovanni Ragosta, Catello Pane, 2013. *Valutazione dei sottoprodotti della filiera del biodiesel come ammendanti organici in orticoltura. La valorizzazione dei sottoprodotti nell'ambito zootecnico, pg. 37-43.*
- Samantha Mosier , S. Carolina Córdova and G. Philip Robertson, 2021. Restoring Soil Fertility on Degraded Lands to Meet Food, Fuel, and Climate Security Needs via Perennialization, Front.

