



DIPARTIMENTO DI SCIENZE AGRARIE ALIMENTARI E AMBIENTALI

CORSO DI LAUREA IN: SCIENZE E TECNOLOGIE AGRARIE

**“EFFETTI DI INERBIMENTO E SOVESCIO
IN VIGNETO SULLA SOSTANZA
ORGANICA E SULLA COMPONENTE
MICROBICA DEL SUOLO”**

*“EFFECTS OF GRASSING AND GREEN MANURE IN THE VINEYARD
ON THE ORGANIC MATTER AND THE MICROBIAL COMPONENT OF
THE SOIL”*

TIPO TESI: sperimentale

Studente:
Diego Leone

Relatore:
PROF. COSTANTINO VISCHETTI

Correlatori:
DOTT.SSA ARIANNA DE BERNARDI

ANNO ACCADEMICO 2022-2023

*A mia madre, a mio padre,
agli avi e
a quel mondo agreste
che mi è sangue, spirito e vita.*

SOMMARIO

SOMMARIO	3
ELENCO DELLE TABELLE.....	5
ELENCO DELLE FIGURE	7
INTRODUZIONE	9
CAPITOLO 1 LE PRATICHE CONSERVATIVE	11
1.1 L'inerbimento	11
1.1.1 L'inerbimento in vigneto	14
1.1.2 Influenza degli inerbimenti sulla sostanza organica del suolo.....	17
1.1.3 Essenze per la realizzazione di inerbimenti controllati.....	18
1.1.4 Cure colturali degli inerbimenti.....	23
1.2 Il sovescio	25
CAPITOLO 2 LA SOSTANZA ORGANICA DEL SUOLO	29
2.1 Composizione della sostanza organica del suolo	32
2.1.1 Sostanze non umiche	33
2.1.2 Sostanze umiche	35
2.1.3 Organismi viventi	39
2.1.4 Altre forme di sostanza organica del suolo.....	40
2.2 Trasformazione della sostanza organica del suolo.....	42
2.2.1 Fattori che influenzano la trasformazione della sostanza organica del suolo	42
2.2.2 Degradazione e mineralizzazione della sostanza organica	45
2.2.3 Umificazione della sostanza organica.....	47
2.3 Ruolo della sostanza organica nella determinazione della fertilità del suolo	50
2.3.1 Influenza sulle proprietà fisiche.....	50
2.3.2 Funzioni nutrizionali.....	51
2.3.3 Attività enzimatiche.....	53
2.3.4 Funzioni fisiologiche	54
2.3.5 Interazione con molecole organiche di sintesi	54

CAPITOLO 3 SCOPO DELLA TESI	56
CAPITOLO 4 MATERIALI E METODI	57
4.1 Area di studio	57
4.1.1 Inquadramento del sito.....	57
4.1.2 Campionamento	58
4.2 Determinazione del pH	59
4.3 Determinazione del contenuto totale di metalli e microelementi.....	59
4.4 Determinazione della sostanza organica	60
4.5 Misura del Carbonio Biomassa	60
4.6 Misura della respirazione microbica basale del suolo.....	62
4.7 Estrazione dell'humus e frazionamento del Carbonio umico	63
CAPITOLO 5 RISULTATI E DISCUSSIONE.....	65
5.1 Analisi preliminari	65
5.2 Contenuto e composizione della sostanza organica del suolo.....	67
5.3 Crescita ed attività della biomassa microbica	72
Conclusioni.....	77
Ringraziamenti	78
BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA	80

ELENCO DELLE TABELLE

Tabella 1.1: Confronto tra le permeabilità di una superficie inerbita ed una lavorata (da Mez, 1965).....	12
Tabella 1.2: Asportazioni minime e massime del vigneto in un anno, calcolate sulla produzione media di molti ambienti del Centro Italia, pari a 10 t/ha (rielaborato da Silvestroni et al., 2004).....	15
Tabella 1.3: Effetto dell'inerbimento e delle lavorazioni sul contenuto percentuale di sostanza organica del terreno (da Baldini, 1988).....	17
Tabella 2.1: Valori di correlazione tra tessitura del suolo e dotazione di SO (da Businelli, 2009).....	30
Tabella 2.2: Composizione, classificazione e percentuali approssimate delle sostanze non umiche del suolo (da Senesi et al., 2005).....	33
Tabella 2.3: Composizione elementare (da Businelli, 2009, ad eccezione di quella in zolfo) e funzionale (da Senesi et al., 2005, compresa composizione in zolfo) degli acidi umici e degli acidi fulvici del suolo.....	38
Tabella 2.4: Caratteristiche delle diverse classi di materia organica disciolta in funzione delle dimensioni dei pori in cui si trovano (modificato da Zsolnay, 2003).....	41
Tabella 2.5: Tempo, in giorni (d), di inizio del processo di umificazione di residui vegetali (da Kononova, 1966).....	49
Tabella 5.1: Caratteristiche chimico-fisiche dei campioni della sperimentazione, analizzati secondo i protocolli del N.° 248 della Gazzetta Ufficiale.....	65
Tabella 5.2: Valori medi di pH e loro deviazione standard nei suoli analizzati secondo protocollo N.° 248 della Gazzetta Ufficiale.....	66
Tabella 5.3: Contenuto di alcuni elementi misurato in ogni campione (mg Kg ⁻¹).....	66
Tabella 5.4: Contenuto di sostanza organica del suolo (in %) calcolato su cinque repliche per ogni tesi analizzata per la determinazione del Carbonio Organico Totale (TOC).....	67
Tabella 5.5: Carbonio Estraiibile Totale (in g Kg ⁻¹) calcolato su tre repliche per ogni tesi analizzata.....	68
Tabella 5.6: Acidi umici (gC Kg ⁻¹).....	69

Tabella 5.7: Acidi fulvici (gC Kg ⁻¹).....	69
Tabella 5.8: Indici relativi alla SO calcolati per le tre tesi.....	71
Tabella 5.9: Valori di Carbonio Biomassa (mg Kg ⁻¹) dei campioni delle tre tesi.....	72
Tabella 5.10: Indici di attività microbica, carbonio della biomassa microbica, contenuto in azoto e rapporto C/N dei tre suoli alle due profondità.....	75

ELENCO DELLE FIGURE

Figura 1-1: Confronto dei sarmenti di potatura prodotti (kg/ceppo) fra viti in parcelle lavorate ed inerbite (da Silvestroni et al., 2004).	16
Figura 1-2: Quantità di uva (kg/ceppo) prodotta da viti in una parcella lavorata ed una inerbita (da Silvestroni et al., 2004).	17
Figura 1-3: Illustrazione botanica di <i>Trifolium alexandrinum</i> (da Baldoni et al., 1974)..	20
Figura 2-1: Contenuto di carbonio organico, in g/kg, nei suoli europei nel 2015 (da JRC, 2018).	31
Figura 2-2: Ripartizione dell'humus nelle tre categorie in quattro diversi tipi di suolo (da Stevenson e Cole, 1999).	37
Figura 2-3: I vari percorsi attraverso i quali può procedere la trasformazione della sostanza organica nel suolo (da Sequi, 1989).	45
Figura 2-4: Andamento del processo degradativo a carico della sostanza organica (da Businelli, 2009).	46
Figura 2-5: Trasformazione di polifenoli e chinoni nei radicali semichinonici oggetto della condensazione (da Businelli, 2009)	48
Figura 4-1: In rosso la superficie del sito della sperimentazione (immagine ottenuta con Google Earth Pro).	57
Figura 4-2: Il sito di studio; visibili la capezzagna (in basso a sinistra) e l'alternanza delle due tesi.	58
Figura 4-3: pHmetro e falcon contenenti i campioni utilizzati per l'analisi.	59
Figura 4-4: Fumigazione dei campioni sotto vuoto con cloroformio.	61
Figura 4-5: Surnatante filtrato dei campioni, con aggiunta dei reagenti; si noti la differenza di tonalità per le repliche dei campioni della stessa tesi a diverse profondità.	61
Figura 4-6: Viraggio del campione titolato con sale di Mohr.	62
Figura 4-7: Viraggio della soluzione di NaOH 0,2 M alla titolazione con HCl 0,1 M.	63
Figura 4-8: Estratti di terreno con sodio pirofosfato, centrifugati; si noti la diversa colorazione del surnatante fra le tesi e la capezzagna (da sinistra, due falcon sovescio, due inerbimento naturale e due capezzagna).	64

Figura 4-9: Procedimento della purificazione degli acidi fulvici su colonna di polivinilpirrolidone.	64
Figura 5-1: Istogramma raffigurante i valori di sostanza organica (in %), dei campioni analizzati.	67
Figura 5-2: Istogramma raffigurante il contenuto di Carbonio Estraiabile Totale (g Kg^{-1}) dei campioni analizzati.	69
Figura 5-5: Istogramma rappresentante il valore di Carbonio Biomassa (mg Kg^{-1}) dei campioni delle tre tesi analizzate.	73
Figura 5-6: Andamento della respirazione microbica (mgC g^{-1}) nelle due profondità delle tre tesi nel corso dei 45 giorni di durata dell'esperimento.	73
Figura 5-7: Respirazione cumulativa ($\text{C-CO}_2 \text{ Kg}^{-1}$).	74

INTRODUZIONE

Nel corso degli ultimi anni, è possibile registrare un crescente interesse da parte del mondo dell'agricoltura italiana e delle politiche comunitarie nei confronti di un cambio di rotta nelle tecniche di gestione dei suoli agrari. I temi del cambiamento climatico, della tutela dell'ambiente, del risparmio energetico e della riduzione dei costi di produzione in agricoltura, hanno svolto un importante ruolo di sensibilizzazione del comparto, ponendo l'accento sull'importanza dello stato di salute del suolo nel fronteggiare tali problemi. In particolare, una delle risorse che, più di altre, può incidere positivamente sul bilancio ambientale, è la sostanza organica del suolo, che condiziona molti dei processi che avvengono nel terreno, ma anche molti di quelli che lo coinvolgono come attore protagonista negli ecosistemi (compresi quelli agricoli, e quindi produttivi) di tutto il Pianeta (Fantappiè, 2010). Tale ruolo è stato riconosciuto, oltre che dal mondo scientifico, anche dall'opinione politica e pubblica, come testimonia il Protocollo di Kyoto della Convenzione sui Cambiamenti Climatici. Questo documento, all'articolo 3, riconosce il suolo come deposito essenziale per l'accumulo e l'immagazzinamento di carbonio, che altrimenti potrebbe essere trasferito in forma di anidride carbonica (CO₂) all'atmosfera, incidendo negativamente sul surriscaldamento globale (Protocollo di Kyoto della Convenzione sui Cambiamenti Climatici, 1997). Si evidenzia quindi la vitale importanza della preservazione e dell'incremento del contenuto di carbonio organico nel suolo; l'attenzione al suo tenore totale e alla sua qualità nelle superfici coltivate, è oggi essenziale, e lo sarà ancor più in futuro, per l'attuazione delle politiche di gestione sostenibile della produzione agricola (Di Legnino et al., 2014).

È opportuno prendere coscienza del fatto che l'impostazione della nuova Politica Agricola Comune 2023-2027 è molto sensibile nei confronti dell'uso di tecniche di gestione agronomica che permettano di limitare la perdita di sostanza organica del suolo. Vengono infatti incentivate pratiche definite "conservative", come le consociazioni e l'inerbimento negli arboreti, l'utilizzo di colture di copertura in pieno campo, o ancora il sistema a maggese e le rotazioni (Piano Strategico Nazionale per la Politica Agricola Comune 2023-2027, 2021). Fra le posizioni contrarie alla diffusione di queste tecniche ci sono quelle che si pongono a sostegno di un aumento della produttività del comparto agricolo nazionale, aumento che

potrebbe essere contrastato dalla sottrazione di superfici coltivabili incentivata dalle nuove politiche comunitarie (Casati, 2022). In opposizione a tale affermazione è opportuno ricordare che un più elevato tenore in sostanza organica, nel suolo, è correlato a migliori prestazioni produttive, oltre che ad una migliore difesa dai processi erosivi (Corti et al., 2017; Celi et al., 2017).

Per quanto concerne la situazione italiana, la lavorazione di tutta la superficie risultava, fino a pochi decenni fa, la pratica più utilizzata per la gestione del suolo nei vigneti. Da alcuni anni, però, nel settore viticolo si sta assistendo ad una inversione di tendenza di entità considerevole; inversione che viaggia sospinta da una serie di studi che provano l'efficacia, in vigneto, di metodi alternativi alla lavorazione, quantomeno per l'interfilare (uvadatavola.com, 2019). I vantaggi, in termini quali-quantitativi, che riguardano la sostanza organica nei suoli meno disturbati sono infatti evidenti (Parras- Alcántara et al., 2015); si pensi che secondo alcuni studi, i pascoli naturali, da soli, potrebbero contenere dal 10 al 30% delle riserve mondiali di carbonio organico del suolo (Brevik, 2012). In contrapposizione rispetto alle pratiche conservative, si pone la convenzionale lavorazione del terreno, che risulta essere fra i fattori più importanti che causano la degradazione del suolo; alla lavorazione si affianca, soprattutto nei vigneti delle zone collinari, la preparazione del letto d'impianto attraverso arature profonde (scasso) e livellamenti, cui conseguono ingenti perdite di sostanza organica, nutrienti e suolo stesso, attraverso fenomeni erosivi (Pagliai, 2009). Anche attuando rotazioni e letamazione, però, in presenza di suolo lavorato, si assiste ad una riduzione del contenuto di sostanza organica del suolo.

Due importanti pratiche agronomiche caratterizzate da crescente diffusione nei vigneti italiani sono l'inerbimento ed il sovescio, definite come pratiche idonee al miglioramento delle condizioni chimiche, fisiche e microbiologiche del suolo dai regolamenti Comunitari di Agricoltura Biologica (Reg. CEE 2092/91) e di Agricoltura Integrata (Reg. CEE 2078/92) (Mattii et al., 2016). Pertanto, l'adozione di tali tecniche, può ritenersi simile all'utilizzo dei fertilizzanti organici (Businelli, 2009). Da questi metodi conservativi, l'agricoltura "industriale" si è largamente svincolata, ma recentemente, con l'avvento delle sovie legate alla sostenibilità, ne è stata riscoperta la funzionalità in termini di riduzione dell'impatto dell'attività agricola sul sistema suolo, permettendogli di aumentare la capacità di immagazzinamento di sostanza organica, acqua e nutrienti; quindi, rappresentano uno dei modelli di agricoltura più avanzati ed in rapida evoluzione (Giardini, 2004; Corti et al., 2017).

Capitolo 1

LE PRATICHE CONSERVATIVE

1.1 L'inerbimento

L'inerbimento è una tecnica di gestione conservativa del suolo alternativa alla lavorazione, che consiste nel favorire l'insediamento e la crescita di un cotico erboso sulla superficie del terreno (Bocchi et al., 2018). Nel caso in cui l'inerbimento insista all'interno di un arboreto, esso è da ritenere a tutti gli effetti una forma di consociazione, con tutte le correlazioni che ne derivano, fra le specie coinvolte (Baldini, 1988).

I vantaggi che tale pratica agronomica possono apportare all'arboreto sono numerosi (molti di questi dipendono, per l'appunto, dall'aumento del tenore in sostanza organica del suolo):

- aumento del contenuto in sostanza organica del suolo (SO), con una minore mineralizzazione rispetto al caso in cui il terreno venga sottoposto a lavorazione.
- Riduzione, fin quasi all'azzeramento, dei processi erosivi; direttamente grazie alla protezione dall'effetto battente (agenti disagregatori) della pioggia ed al trattenimento fisico del suolo, indirettamente grazie al favorito accumulo di sostanza organica.
- Miglioramento delle caratteristiche fisiche del terreno, con particolare riferimento alla struttura, grazie all'aumento di SO e grazie anche alla presenza dei capillizi radicali nello strato superficiale. Si ricorda l'importante ruolo nella formazione di aggregati che svolgono anche le semplici molecole polisaccaridiche degli essudati radicali di un inerbimento.
- Miglioramento della transitabilità di macchine agricole, quindi della tempestività degli interventi nell'arboreto, con conseguente diminuzione della compattazione, grazie all'aumento di elasticità e portanza della superficie.
- Aumento della capacità idrica di campo fino a 6 volte, grazie al più elevato contenuto di SO e alla porosità, ed aumento della capacità d'infiltrazione dell'acqua nel suolo.
- Approfondimento di fosforo e potassio distribuiti in superficie con le concimazioni grazie al fatto che le piante erbacee costituiscono un ponte fra la superficie e gli orizzonti più profondi, assorbendo gli elementi nutritivi e rilasciandoli sottoforma di composti organici assimilabili dalle arboree.

- Riduzione dei rischi ambientali dovuti all'inquinamento derivante dalle molecole utilizzate per la concimazione e per i trattamenti fitosanitari.
- Riduzione della temperatura del terreno e conseguente effetto di depressione del vigore nelle piante arboree.
- Riequilibrio ed incremento delle popolazioni di organismi viventi edafici (terricoli) ed aumento della biodiversità nella pedosfera (Lal, 2004; Mez, 1965; Bocchi et al., 2018; Baldini, 1988; Giardini, 2004; Badalucco et al., 2005).

Tabella 1.1: Confronto tra le permeabilità di una superficie inerbita ed una lavorata (da Mez, 1965).

Profondità (cm)	Permeabilità (mm/h)	
	Terreno inerbito	Terreno lavorato
0÷15	119,3	29,2
15÷25	94,0	38,1
30÷40	63,5	66,0

Occorre però considerare che la pratica dell'inerbimento presenta anche alcuni svantaggi che possono intaccare, almeno in parte, la produttività dell'arboreto. È opportuno, perciò, valutare il reintegro dell'equilibrio fra i fattori dell'agroecosistema, come proposto nell'agricoltura biologica e dall'agroecologia, per ridurre al minimo gli effetti negativi di un sistema conservativo come quello di un arboreto inerbito (Altieri et al., 2015). Tali svantaggi consistono in:

- aumento della competizione per i nutrienti, e soprattutto per l'acqua, fra l'inerbimento e le piante arboree; questo problema può essere parzialmente arginato prevedendo l'installazione di un sistema per la fertirrigazione. In una prima fase dell'insediamento del cotico si osserva una parziale depressione della produttività dell'arboreto, ma con il graduale aumento della sostanza organica nel suolo, comunque, i problemi legati alla competizione si affievoliscono sempre più per l'aumento dell'acqua trattenuta e della disponibilità di elementi nutritivi.
- Sviluppo dell'apparato radicale della coltura arborea più superficiale. A causa dell'assenza del disturbo meccanico dovuto alle lavorazioni, le radici della coltura mancano di opportuno approfondimento, che risulta utile soprattutto in situazioni di carenza idrica. Per ovviare a tale problematica è consigliato impiantare l'inerbimento dopo alcuni anni di gestione del suolo per mezzo della lavorazione; ancora, è possibile cominciare ad attuare un inerbimento parziale prima di passare ad uno totale.

- Maggiore sviluppo di parassiti terricoli, i quali trovano nel suolo inerbito un ambiente più idoneo allo svolgimento del loro ciclo biologico.
- Aumento del rischio di brinate primaverili (Mez, 1965; Sansavini et al., 2012).

Questa tecnica può essere articolata in molteplici forme ed è quindi caratterizzata da diverse definizioni. Ad esempio, per inerbimento naturale si intende un cotico spontaneo insediato senza la messa in atto della semina di alcuna essenza, mentre nel caso dell'inerbimento artificiale (o controllato), la specie (o il miscuglio di specie) con la quale si desidera realizzare il tappeto erboso è accuratamente scelta e viene seminata. L'inerbimento naturale presenta ottimi vantaggi: l'assenza di costi d'impianto, l'insediamento spontaneo di specie adatte per ogni microclima, la maggiore biodiversità vegetale. I suoi difetti sono invece la lenta copertura del terreno e la presenza di specie piuttosto competitive. Ovviamente la velocità di insediamento del cotico naturale dipende dalla dotazione della banca del seme. I pregi dell'inerbimento artificiale si rivelano essere: l'elevata velocità di copertura del suolo, l'insediamento di specie adatte alle specifiche esigenze agronomiche e gestionali dell'agricoltore, il controllo ecologico delle erbe infestanti. Infine, gli svantaggi derivanti da questa pratica sono: il costo d'impianto, la difficile scelta della/e specie ideale/i, la difficile preparazione del letto di semina, che può essere d'intralcio alle cure colturali previste per l'arboreto.

Ancora, l'inerbimento può essere temporaneo oppure permanente. Quello temporaneo permane sul terreno per periodi limitati ad un anno al massimo; viene sfruttato soprattutto per apportare residui vegetali al terreno, quindi viene spesso utilizzato per la pratica del sovescio; anche la pacciamatura può essere effettuata a partire da inerbimenti temporanei. Il cotico erboso temporaneo può essere poi rinnovato o meno, nell'anno successivo. L'inerbimento permanente, invece, insiste sul suolo tutto l'anno e per più anni, senza essere rinnovato; tale definizione non esclude però la messa in atto di cure colturali come la trasemina e la scarificazione.

Infine, per quanto riguarda l'estensione della copertura erbacea, questa può essere realizzata sotto forma di inerbimento totale o parziale. Nel primo caso tutta la superficie dell'arboreto, sia la fila che l'interfila, è interessata dalla presenza del cotico. Per inerbimento parziale, invece, si intende la realizzazione dell'inerbimento solo sulla superficie dell'interfila (in particolare, l'inerbimento può interessare tutti gli interfilari oppure interfilari alternati); in questo caso il terreno sulla fila viene gestito tramite diserbo meccanico, fisico o chimico (Bocchi et al., 2018; Silvestroni et al., 2004).

1.1.1 *L'inerbimento in vigneto*

Per molto tempo, il vigneto, almeno in Italia, non è stato concepito come “sistema” e le lavorazioni sono state le protagoniste della gestione del suolo, soprattutto perché si è ritenuto a lungo che la priorità consistesse nell’assicurarsi che le risorse idriche fossero dirottate unicamente verso le viti. Solo a partire dagli anni '60, dal Settentrione, si è cominciato a sperimentare l’utilizzo degli inerbimenti. Più specificatamente, la realizzazione dell’inerbimento negli arboreti negli ultimi anni è orientata verso la coltivazione di un cotico naturale nell’interfila affiancato dalla disinfestazione del sottofila, operata attraverso un diserbo meccanico con rincalzatrici o sarchiatrici, a lame o a dischi, passate in superficie. A causa della competizione, anche dopo il raggiungimento di una situazione di equilibrio fra le specie consociate nell’arboreto, questo presenterà prestazioni produttive comunque inferiori alla gestione tradizionale con lavorazioni. Dal punto di vista della qualità, però, proprio per l’effetto di riduzione del vigore, i frutti risulteranno migliori, soprattutto in riferimento all’intensità di colorazione e al contenuto glucometrico (in particolare, in vigneti di vitigni a bacca rossa, aumentano zuccheri, polifenoli ed antociani nell’uva); anche i costi di produzione, nel lungo periodo, possono ritenersi ridotti: sia per il risparmio sulle operazioni di lavorazione del terreno, sia per quello legato all’uso di fertilizzanti (Silvestroni et al., 2004; Sansavini et al., 2012).

In generale, vite (*Vitis vinifera*) e pomacee hanno dimostrato di adattarsi meglio alla pratica dell’inerbimento rispetto alle drupacee (con particolare riferimento al pesco) (Baldini, 1988).

È però importante prendere in considerazione tutti i numerosi aspetti che riguardano l’inerbimento dei vigneti.

L’aspetto ecologico è forse quello più insidioso da trattare, soprattutto per il fatto che le ripercussioni sulla produttività possono dimostrarsi scarsamente evidenti, sfuggendo all’occhio poco attento di un operatore che possieda una concezione semplificata dell’agroecosistema (Altieri et al., 2015). La vegetazione spontanea, erbacea, arbustiva o arborea, che condivide con il vigneto l’habitat di un sito agricolo, può influenzare, in realtà, molti aspetti della produzione della coltura. Un esempio eclatante è individuabile nel ruolo delle fioriture delle essenze spontanee sulla difesa biologica del vigneto. Il polline che ne deriva, infatti, può depositarsi sulle foglie delle viti e fungere da fonte di sostentamento per alcuni acari Fitoseidi e per degli Antocoridi, i quali sono predatori di acari ed insetti dannosi per la pianta. Più conosciute sono invece le funzioni di rifugio che siepi, bordure e macchia forestale rappresentano per gli antagonisti delle specie fitofaghe (Ferrari et al., 2004).

Dal punto di vista nutrizionale, invece, è stato riscontrato che, nel vigneto, la presenza di un inerbimento aumenta effettivamente il contenuto di fosforo assimilabile e di potassio scambiabile, tanto che è stato rilevato anche un più alto contenuto di fosforo nel mesofillo di viti all'invaiaitura. D'altro canto, la dotazione azotata disponibile per le arboree può risultare diminuita, tanto da portare all'ingiallimento anticipato delle foglie; si può ovviare a tale problema incrementando la presenza di *Fabacee* fra le specie dell'inerbimento. Dato che comunque le esigenze nutritive della vite risultano moderate rispetto ad altre colture da frutto (si veda la tabella 1.2), i dati sperimentali sembrano suggerire che in pochi anni l'agroecosistema vigneto si avvicini all'autosufficienza dal punto di vista degli elementi nutritivi.

Tabella 1.2: Asportazioni minime e massime del vigneto in un anno, calcolate sulla produzione media di molti ambienti del Centro Italia, pari a 10 t/ha (rielaborato da Silvestroni et al., 2004).

Elemento nutritivo	Contenuto minimo nell'uva (kg/10t)	Contenuto massimo nell'uva (kg/10t)
Azoto	2	20
Fosforo	2	5
Potassio	10	30
Magnesio	1	2,5
Calcio	0,4	2,5
Ferro	0,01	0,3

Ancora, in riferimento all'azoto, prima che venga raggiunto un equilibrio grazie all'accumulo di SO, la sua disponibilità nel terreno nei tre periodi di maggiore assorbimento radicale da parte della vite può non soddisfarne le esigenze proprio a causa della presenza dell'inerbimento. Tali momenti corrispondono alla fase fra il germogliamento (inizio aprile) e la fine della fioritura (inizio giugno), durante la quale vengono sfruttate soprattutto le riserve azotate accumulate negli organi legnosi con funzione di riserva, il periodo in prossimità dell'invaiaitura e la fase di accumulo di azoto nel post-raccolta. Gli interventi di trinciatura o di sfalcio dell'inerbimento andranno quindi collocati temporalmente in modo da non far coincidere l'elevata attività vegetativa dell'erbativo con quella di assorbimento dell'apparato radicale del vigneto. In compenso, la perdita d'acqua causata dall'erba può essere in parte controbilanciata dalla minore attività di traspirazione che le viti presentano se il suolo viene gestito con l'inerbimento (Silvestroni et al., 2004).

La presenza del cotico condiziona anche altri aspetti dell'attività viticola. Per quanto concerne lo sviluppo vegetativo della vite, la conseguenza più evidente della competizione con l'inerbimento per l'assorbimento di azoto e di acqua consiste in una riduzione del vigore dell'arborea. Difatti, in numerose prove sperimentali di confronto fra parcelle inerbite e parcelle lavorate, è stata evidenziata la ridotta crescita dei germogli in seguito all'allegagione (e quindi una minore necessità di intervenire con la cimatura) nelle parcelle con la presenza del tappeto erboso. Oltre a ciò, i grappoli risultano sviluppati più nella parte esterna della chioma e ricoperti da meno foglie, con una conseguente ottimizzazione dell'efficienza fotosintetica.

Dal punto di vista quantitativo, senz'altro la competizione con il cotico genera una riduzione della produzione, specialmente nei giovani impianti. Questo dato, però, giova al bilancio aziendale per la minore incidenza dei costi relativi al diradamento dei grappoli. Inoltre, l'effetto di depressione del vigore si manifesta più spiccatamente sull'attività vegetativa, rispetto alla produzione di uva. Si ricorda ancora che la qualità del mosto risulta migliorata, soprattutto per il grado glucometrico e la presenza di polifenoli ed antociani nei vitigni a bacca nera. Infine, si riporta anche il miglioramento nello stato sanitario delle bacche, sia per effetto della diminuzione di umidità che deriva dalla densità più contenuta della chioma, sia per la migliore tempestività degli interventi, sia per la presenza di una più equilibrata biocenosi nell'agroecosistema. In conclusione, un punto sicuramente a sfavore della presenza dell'inerbimento è l'abbassamento del contenuto di amminoacidi nel mosto. Questi rappresentano la frazione dell'Azoto Prontamente Assimilabile dai lieviti alcoligeni e la loro scarsa dotazione determina un prolungamento dei tempi di fermentazione (Silvestroni et al., 2004; Sansavini et al., 2012).

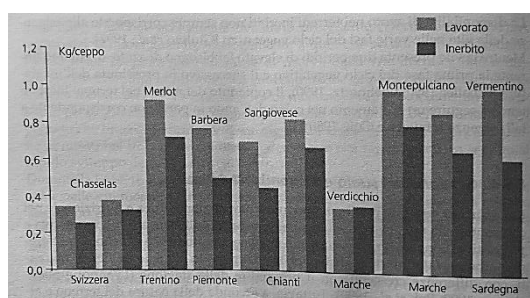


Figura 1-1: Confronto dei sarmenti di potatura prodotti (kg/ceppo) fra viti in parcelle lavorate ed inerbite (da Silvestroni et al., 2004).

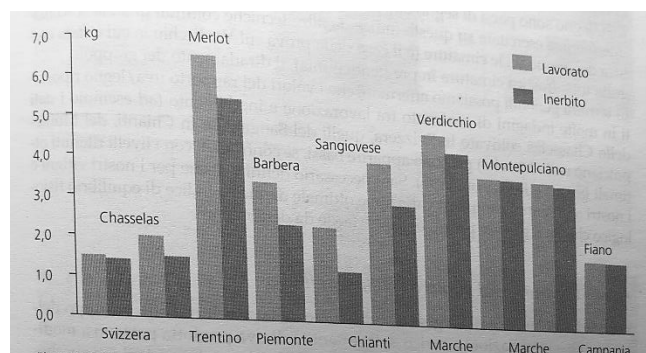


Figura 1-2: Quantità di uva (kg/ceppo) prodotta da viti in una parcella lavorata ed una inerbita (da Silvestroni et al., 2004).

1.1.2 Influenza degli inerbimenti sulla sostanza organica del suolo

Si è già accennato agli effetti delle lavorazioni sulla degradazione della sostanza organica del suolo. Durante le operazioni che causano disturbo, infatti, gli aggregati del suolo vengono in parte distrutti, esponendo la sostanza organica associata alla degradazione microbica (Jones et al., 2003; Angeletti et al., 2021); anche l'aumento dell'esposizione all'ossigeno ne provoca la veloce mineralizzazione. La messa a coltura dei suoli è indubbiamente correlata ai seguenti fattori di disturbo della dotazione di carbonio organico: conversione di pascoli e foreste a seminativi, aratura profonda dei campi, eccessivo carico di pascolamento, erosione del suolo, incendio della vegetazione boschiva. Come già si è visto, il mantenimento delle superfici indisturbate contrasta questi eventi e l'aumento di SO in un terreno inerbito è netto, soprattutto per quanto concerne gli orizzonti più superficiali del suolo, come è riportato nella tabella 1.3.

Tabella 1.3: Effetto dell'inerbimento e delle lavorazioni sul contenuto percentuale di sostanza organica del terreno (da Baldini, 1988).

Profondità (cm)	Contenuto di SO (%)	
	Terreno inerbito	Terreno lavorato
0÷5	3,5	1,9
5÷10	1,9	1,6
10÷15	1,3	1,4
15÷20	0,8	0,9

Ancora sullo stato di aggregazione, va riportata la caratteristica irreversibilità dello stato di cementante dell'humus. Perciò, per preservare un buono stato strutturale del suolo, occorre

necessariamente fare in modo che nuove molecole umiche si formino; è quindi essenziale introdurre coperture erbose permanenti nella rotazione colturale o nella gestione del suolo di arboreti.

In un sistema agricolo manca la fonte primaria di sostanze umiche, a differenza di un suolo forestale nel quale è presente la lettiera come fonte primaria. Nei suoli giovani, formati direttamente sulla roccia, sono invece licheni e muschi le fonti primarie di humus. Nei suoli senza copertura forestale, però, la fonte principale è rappresentata dai residui vegetali (soprattutto radici) di graminacee e leguminose perenni, a dimostrazione dell'importanza dell'introduzione di queste essenze anche in ambito agrario (Kononova, 1966).

La non lavorazione del suolo preserva gli aggregati strutturali del suolo e, in condizioni di suolo indisturbato, si riscontra una più elevata quantità di SO occlusa, quindi protetta, rispetto a sistemi dove le lavorazioni si susseguono annualmente. In particolare, la coltivazione di leguminose perenni sembra favorire l'instaurazione di legami con le particelle minerali e l'inclusione di sostanza organica all'interno degli aggregati, andando a determinare anche l'aumento della stabilità degli stessi (Angeletti et al., 2021).

Oltre all'aumento complessivo di carbonio organico, con inerbimenti permanenti del suolo si può riscontrare un aumento della componente umificata della SO. Questo dato sembra correlato alla presenza di apparati radicali più densi e più sottili (quindi più facilmente decomponibili) (Monaci et al., 2017). In generale, si può affermare che questo tipo di gestione del suolo risulta migliore per quanto riguarda tutti i parametri chimici della fertilità del suolo (Francaviglia et al., 2017).

1.1.3 *Essenze per la realizzazione di inerbimenti controllati*

La scelta delle specie è funzione delle caratteristiche pedoclimatiche del sito e agronomiche della coltura, ma anche dell'obiettivo dell'inerbimento. Ad ogni modo, i requisiti che non possono non essere richiesti ad un inerbimento sono l'adattabilità e le modeste esigenze idriche e nutrizionali (Mez, 1965). Fino agli anni '90 del ventesimo secolo, inoltre, tale scelta era limitata dalla ristrettezza del ventaglio di specie diffuse (soprattutto graminacee) che tra l'altro erano state selezionate per l'elevata produzione di biomassa in sistemi foraggeri, caratteristiche che ne aumentavano i fabbisogni idrici e nutrizionali. Anche le specie da tappeto erboso selezionate per usi sportivi e/o ornamentali, all'epoca disponibili, risultavano esigenti (Croce et al., 2006; Sansavini et al., 2012).

Classicamente, si ricorre a specie, o a miscugli di queste, appartenenti alle famiglie *Poaceae* e *Fabaceae*. Ad ogni modo, i requisiti tecnici di un buon inerbimento d'arboreto sono (Mez, 1965; Sansavini et al., 2012; Silvestroni et al., 2004):

- Elevata velocità di insediamento.
- Basse esigenze idriche e nutrizionali.
- Apparato radicale ben sviluppato in consistenza ma superficiale, in modo da favorire l'approfondimento di quello delle arboree.
- Bassa taglia e vigore contenuto, crescita lenta per un più agevole controllo.
- Buona attitudine rinettante (ossia di contenimento delle infestanti).
- Buona resistenza al calpestio.
- Ciclo vitale perenne (anche se nei miscugli da inerbimento sono comprese specie annuali), capacità di ricaccio adeguata e buona longevità.
- Ridotta attività durante il periodo estivo.

È possibile raggruppare le caratteristiche delle specie da inerbimento a seconda della famiglia della quale fanno parte; grosso modo le leguminose offrono al suolo un aumento del contenuto di azoto (grazie all'azotofissazione simbiotica), l'approfondimento dell'orizzonte strutturato (grazie alle radici fittonanti), una migliore copertura del suolo con conseguente decremento dell'evaporazione; inoltre, hanno un portamento prostrato. Le graminacee, invece, possiedono una maggiore capacità di trattenimento del suolo ed una maggiore resistenza al calpestio, determinando una migliore transitabilità.

Molto diffuso nell'ambito degli inerbimenti controllati tecnici (ossia quelli che non hanno funzione sportiva, ricreazionale o ornamentale) è l'uso di miscugli di specie; questi offrono il vantaggio, rispetto alla scelta di seminare un unico tipo erbaceo, di garantire l'adattabilità di almeno una specie fra quelle comprese. Nelle opere inerbite naturalmente, la dinamica di sviluppo del cotico passa per una prima fase durante la quale si manifesta la prevalenza delle eudicotiledoni a foglia larga; successivamente, invece la predominanza verte in favore delle monocotiledoni perenni. La composizione floristica, però, varia anche in funzione delle cure colturali che si riservano al prato; ad esempio, un ridotto numero di sfalci/trinciature, determina l'aumento della diffusione delle eudicotiledoni perenni appartenenti alle famiglie *Asteraceae* ed *Apiaceae* (Silvestroni et al., 2004; Croce, 2006).

1.1.3.1 Genere *Trifolium*

Le piante del genere *Trifolium* sono state introdotte in vigneto, specie in miscugli, in virtù delle loro proprietà di azotofissatrici dalle esigenze non eccessive. Inoltre, risulta molto comune la presenza di piante di questo genere fra la vegetazione spontanea dei vigneti; un esempio comune è quello di *Trifolium repens*. Le specie annuali risultano ottime anche per l'abbondante produzione di biomassa in primavera e per l'incremento di SO succulenta e molto facilmente aggredibile. In particolare, varie specie autorisemianti e sotterranee sono

state testate in ambienti con ridotti apporti meteorici di acqua e sono tutt'ora piuttosto diffuse (Sansavini et al., 2012; Silvestroni et al., 2004).

In alcuni casi si obietta la scarsa resistenza al calpestio di queste essenze vegetali, ma in ambienti come quello montano appenninico, è stato possibile riscontrare, con particolare riferimento a *Trifolium thalii*, un'ottima capacità di mantenimento del cotico erboso e di preservazione del suolo, sebbene sottile, dall'erosione e dalla degradazione meccanica. Questa pianta perenne ha un elevatissimo potere rizogeno (le radici si sviluppano a partire dal caule) e si propaga per via essenzialmente asessuata (in passato col pascolo ovino, di rado la specie riusciva a sviluppare infiorescenze) (Rivera, 1952). Tali ottime caratteristiche possono essere osservate anche in altre specie del genere, più adattabili a climi temperati (Baldoni et al., 1974).

Trifolium alexandrinum

Specie di origine mediorientale, intensamente coltivato in Egitto a scopo foraggero, con una diffusione attuale che comprende i paesi che si affacciano sul Mediterraneo.

Ha un ciclo vitale annuale. L'apparato radicale è fittonante, gli steli sono poco ramificati. Le numerose infiorescenze terminali a capolino conico allungato si compongono di fiori dalla corolla bianca.

Questa specie è adatta a climi temperato-caldi, per cui la semina è autunnale nelle regioni con inverno mite, primaverile se le temperature invernali sono rigide. L'adattabilità pedologica è molto elastica, purché si evitino pH acidi; condizioni di tessitura argillosa sono ben tollerate.

Lo sviluppo è piuttosto rapido, mentre la capacità di ricaccio non è la stessa per tutti i tipi diffusi: il maggior numero di tagli si ottiene dalla forma "Miskawi" (che è anche la più diffusa in Italia), mentre la "Fahl" ne produce uno solo (Baldoni et al., 1974).

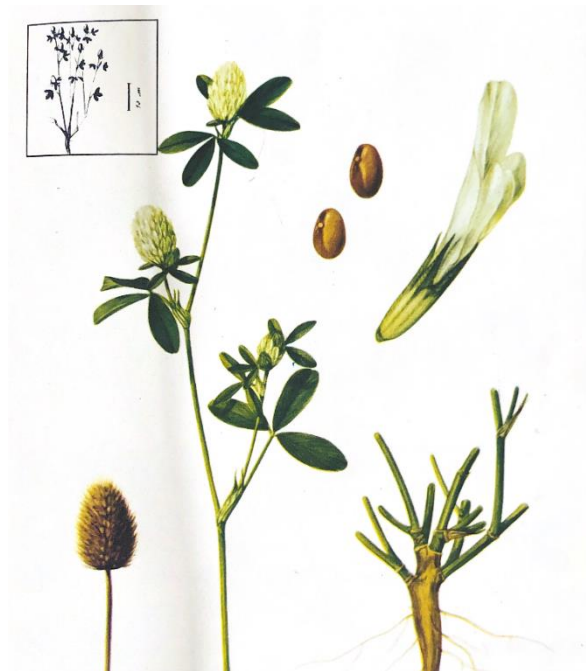


Figura 1-3: Illustrazione botanica di *Trifolium alexandrinum* (da Baldoni et al., 1974).

Trifolium repens

Questa specie risulta diffusa in vari ambienti di tutti i continenti, spesso come pianta spontanea.

Se ne distinguono almeno tre varietà: la *sylvestre* (nana), la *hollandicum* (media) e la *giganteum* (o trifoglio “ladino”, a foglie larghe). Possiede un’ottima capacità di diffondersi per stoloni. I capolini globosi sono portati su peduncoli eretti (scapi).

È particolarmente diffusa in climi temperati ed umidi, in terreni dalle condizioni di fertilità e tessitura variabili (meglio se non sciolti) ed anche con pH lievemente acidi.

Le modalità di diffusione fanno sì che questa pianta sia perenne, oltre che piuttosto rustica e resistente al calpestio. Ha anche buone caratteristiche per quanto concerne il contrasto dell’erosione (Baldoni et al., 1974).

Trifolium subterraneum e *Trifolium brachycalycinum*

Queste specie dai legumi sotterranei sono diffuse negli ambienti più caldi e con limitata piovosità. Il primo è una pianta annuale con una folta rete di steli prostrati che protegge la maturazione dei semi all’interno del suolo; questa caratteristica gli conferisce anche una buona capacità antierosiva. La succitata essenza si adatta a terreni tendenzialmente acidi, mentre il *brachycalycinum* preferisce condizioni di neutralità o di lieve alcalinità, ma si dimostra meno competitivo in quanto dallo sviluppo più tardivo (Santilocchi, 2015).

Queste specie di trifoglio presentano il pregio di essere scarsamente competitive, conseguente alla stasi di crescita estiva. D’altro canto, la suscettività al calpestio è elevata e le fallanze alla ripresa autunnale si dimostrano piuttosto diffuse; queste, pare siano dovute alla scarsa germinabilità dei semi, che si rivelano piuttosto duri. Tale difetto, che si riscontra anche in altre specie autoriseminanti come *T. yannicum* e *T. michelianum*, può essere ridotto con la pratica del pascolamento e con lo sfalcio, le quali stimolano la crescita prostrata e la riproduzione delle piante (Rivera, 1952; Santilocchi, 2022).

1.1.3.2 Genere *Medicago*

Questo genere di leguminose risulta poco diffuso negli inerbimenti controllati di arboreti a causa dell’elevata competitività per le risorse idriche. Tuttavia, fra la vegetazione spontanea dei vigneti non è infrequente incontrare specie come *Medicago lupulina* (Silvestroni et al., 2004), pianta dalla spiccata adattabilità pedoclimatica.

L’unica specie dimostratasi valida, in seguito a ricerche scientifiche, per l’uso in vigneto, è *Medicago polymorpha*; questa risulta adatta al clima delle zone mediterranee costiere e spicca per la tolleranza a suoli calcarei, per l’elevata attitudine rinettante e per la scarsissima

competitività nei confronti della vite, dopo poco tempo però, se ne evidenzia una scarsa persistenza (Santilocchi, 2015).

1.1.3.3 Altre *Fabaceae*

Miscugli di diverse leguminose sono utilizzati negli inerbimenti del vigneto (Santilocchi, 2015; Mez, 1965). Anche i trifogli *T. pratense* e *T. hybridum* sono utilizzati. La prima specie ha un'ottima attitudine azotofissatrice per l'abbondante formazione di tubercoli radicali, sebbene sia piuttosto esigente in termini di disponibilità di acqua; *T. hybridum* si sostituisce al *pratense* nei climi freddi. Di recente, anche il ginestrino (*Lotus corniculatus*) si è rivelato valido per la facile gestione, per la moderata competitività e per il controllo della dotazione amminoacidica del mosto (Santilocchi, 2022). Questa specie, classicamente una foraggera molto produttiva, possiede una buona adattabilità pedologica ed un'elevata resistenza al freddo (Baldoni et al, 1974).

1.1.3.4 Genere *Festuca*

Festuca arundinacea

L'elevata capacità di adattamento alle condizioni pedologiche, ai regimi termici e di umidità, rendono questa specie estremamente rustica e non poco competitiva, sia nei confronti delle altre erbacee sia nei confronti delle arboree, se in condizioni di scarsa fertilità. Sebbene molto adattabile, dalle notevoli velocità d'insediamento e resistenza al calpestio (Croce et al., 2006), questa specie sarebbe davvero adatta solo in compresenza di un impianto di fertirrigazione. In alternativa, solo delle varietà a taglia bassa si sono rivelate utili, anche in miscuglio con loietto ed altre graminacee (Silvestroni et al., 2004; Sansavini et al., 2012).

Festuca ovina

È fra le graminacee coltivate più resistenti al freddo, di conseguenza nel periodo estivo si dimostra poco attiva e nient'affatto competitiva; di fatti l'apparato radicale è piuttosto superficiale. La sua tendenza a formare feltro diminuisce l'azione compattante del passaggio delle macchine agricole, ma al contempo la rende poco persistente; rapidamente altre specie, infestanti, possono sostituirla.

Invece, *Festuca pseudovina* è una sottospecie nordeuropea della *F. ovina* che ne risolve i problemi. Dal punto di vista gestionale è ottima (richiede un unico taglio all'anno), così come per la persistenza nel tempo: è competitiva nei confronti delle erbacee ma le sue esigenze non contrastano con quelle dell'arboreto.

Festuca rubra

Si articola in due sottospecie: *F. rubra rubra* e *F. rubra commutata*. Fra le due, la più interessante è la prima, per la caratteristica botanica della presenza di rizomi-stoloni, ossia dei rizomi piuttosto superficiali che in estate disseccano e si portano in superficie. Questa caratteristica la rende capace di sopravvivere in condizioni di siccità spinta, evitando fenomeni di competizione (Croce et al., 2006).

1.1.3.5 Genere *Lolium*

Lolium perenne

Questa specie presenta il pregio di un velocissimo insediamento, ma d'altro canto ha elevate esigenze idriche, termiche (mal sopporta le alte temperature) ed è spiccatamente eliofila. È quindi piuttosto competitiva nei confronti della vite, anche se non ha una spiccata rusticità. Come per *F. arundinacea* si può far ricorso a varietà a taglia bassa; inoltre può essere usata in miscuglio proprio con questa festuca per poter garantire da subito la copertura del terreno (Sansavini et al., 2012).

Lolium rigidum e *Lolium multiflorum*

Il *Lolium rigidum* è un'annuale dallo sviluppo estremamente veloce e, quindi, dal ciclo molto breve. Si adatta bene a terreni calcarei in ambienti mediterranei ed è poco competitiva, ma risultata poco persistente. La loiessa (*L. multiflorum*) ha esigenze piuttosto elevate ma ottime capacità di accestimento e controllo delle infestanti (Baldoni et al., 1974).

1.1.3.6 Altre *Poaceae*

Numerose sono le specie di graminacee, appartenenti a diverse tribù e diversi generi, che possono entrare a far parte di un miscuglio per inerbimenti controllati. Fra queste si ricordano: quelle mesoterme del genere *Agrostis* (soprattutto *A. alba*), il fleolo (*Phleum pratense*), l'erba mazzolina (*Dactylis glomerata*), le specie del genere *Bouteloua* (Mez, 1965).

Degna di particolare attenzione è senz'altro *Poa pratensis*, una specie rizomatosa che, formando una fitta rete di rizomi, permette di mantenere il cotico erboso a lungo, e per questo viene utilizzata nei miscugli con diverse altre specie, anche delicate (Baldoni et al., 1974).

1.1.4 Cure colturali degli inerbimenti

Per un inerbimento, le cure colturali sono essenziali come per qualsiasi altra coltura; non si possono evitare la corretta preparazione del letto di semina, la concimazione, l'irrigazione, il drenaggio. Allo stesso modo, però, se tale inerbimento si trova consociato con una coltura

arborea, e se questa fornisce il reddito principale all'agricoltore, non si può prescindere dalla valutazione delle esigenze del ciclo fenologico dell'arborea, che sicuramente dovranno avere la precedenza.

Per quanto concerne la semina, questa dovrà essere predisposta nel rispetto delle regole agronomiche come per qualsiasi altra erbacea (ad esempio rispettando lo stato di tempera per effettuare le lavorazioni principali e quelle complementari); una o più erpicature ed una rullatura pre-semina possono sicuramente risultare sufficienti, nel caso dell'inerbimento, per completare il letto di semina. La distribuzione di semente nell'interfilare andrebbe eseguita con una seminatrice a file da interfilare, oppure ricorrendo alla semina meccanica a spaglio per un inerbimento totale; non è da escludere la semina a spaglio manuale. La dose di seme da utilizzare deve essere calcolata in base alla densità finale che si vuole ottenere; per cui, la dose sarà funzione delle dimensioni dei semi, della purezza e della germinabilità della semente usata, della mortalità stimata, e della manutenzione che si prevede di dedicare al tappeto erboso. La densità teorica da raggiungere, in linea generale, è stimata attorno alle 300-400 piante/m² per le leguminose e alle 600-800 piante/m² per le graminacee (Santilocchi, 2015). La profondità di semina non dovrebbe essere di oltre gli 1-2 cm, data la dimensione contenuta dei semi di specie da tappeto erboso.

I tappeti erbosi per usi diversi da quello tecnico vengono coltivati con una serie di tecniche volte a prevenire o eliminare la compattazione del terreno e l'infeltrimento; fra le tecniche più importanti si ricordano il topdressing (ovvero il riporto in superficie di materiale sabbioso frammisto a torba) ed il verticutting (ossia il taglio verticale del tappeto erboso). Pur non escludendo la possibilità di adottare tali tecniche anche per gli inerbimenti d'arboreto, la tendenza è quella di evitare un aumento delle voci di spesa del bilancio per salvaguardare tutte le caratteristiche del cotico, quindi si sceglie di sacrificare funzioni come quella estetica evitando una coltivazione ottimale. Anche drenaggio, concimazione ed irrigazione sono da prevedere solo come complemento a quelli predisposti per la coltura arborea, fatta salvo l'irrigazione di soccorso in casi eccezionali.

Fra le cure che invece si riservano più di frequente all'inerbimento ci sono il rinfittimento e la rianimazione. La prima pratica consiste in una semplice trasemina, ossia una semina all'interno del tappeto erboso già insediato; la rianimazione invece si esegue per mezzo di una scarificazione che apporta benefici anche alla coltura arborea, in quanto ne consente il rinnovo radicale.

Infine, rimane da trattare l'utilizzazione dell'inerbimento. La strada che di norma si preferisce percorrere è quella della trinciatura. In alternativa si può optare per lo sfalcio, con

degli effetti differenti. Nel primo caso si hanno maggiori perdite di azoto per volatilizzazione, ma i residui possono essere utilizzati, grazie ad apposite andanatrici, per pacciamare il suolo sotto la fila. Ovviamente tale tecnica contribuisce anche all'apporto di nutrienti alla coltura; ad esempio, dalla trinciatura ed andanatura di un cotico di graminacee, si possono recuperare dalle 15 alle 20 unità di azoto ad ettaro all'anno. Ai residui erbacei si possono aggiungere anche quelli di potatura; in particolare, i sarmenti di un vigneto si decompongono piuttosto velocemente, accrescendo gli apporti di nutrienti. Lo sfalcio permette invece di ottenere la pacciamatura dell'interfila (Croce et al., 2006; Santilocchi, 2015; Silvestroni et al., 2004; Sansavini et al., 2012).

1.2 Il sovescio

Il sovescio è una pratica che consiste nella trinciatura e nell'interramento di una coltura al fine di incrementare la fertilità fisica, chimica e biologica del terreno (Spigarolo et al., 2016). Il termine inglese che indica questa tecnica è "green manure", letteralmente "letame verde" (Gualandri, 2015); la traduzione indirizza ottimamente all'idea che questa gestione conservativa del suolo sia da annoverare a tutti gli effetti fra gli ammendanti organici (Businelli, 2009). Tale pratica può essere messa in atto con diversi obiettivi specifici, fra i quali i più importanti sono: l'apporto di sostanza organica e di azoto; l'incorporazione di elevate quantità di biomassa al suolo dopo che il cotico erboso abbia espletato l'intercettazione di nitrati come coltura intercalare; la copertura del terreno per ridurre l'erosione nei periodi dell'anno durante i quali non sia presente la coltura principale (in inglese si indicano come "cover crops" le coltivazioni usate con questo scopo); l'ottenimento di effetti biocidi e biofumiganti, in particolare nematocidi, insieme alla degradazione di sostanze allelopatiche per il contrasto del fenomeno della stanchezza del terreno (Giardini, 2004).

Tradizionalmente si ricorre a questa tecnica agronomica in zone dove la zootecnia è poco diffusa, ma dove le risorse idriche non scarseggiano. Un uso massiccio della pratica del sovescio è messo in pratica, in varie forme, nell'agricoltura biodinamica; in questa particolare forma di agricoltura, si usa attuare essenzialmente sovesci polifiti con un numero molto elevato di specie, al fine di assicurare l'insistenza di un'elevata biodiversità all'interno del sistema produttivo. Per il regime biodinamico, fra le piante del miscuglio non può mai mancare la facelia (*Phacelia tanacetifolia*), alla quale vengono attribuite numerose proprietà (Paull, 2020).

A seconda della tecnica colturale con la quale si procede alla realizzazione di una coltura da sovesciare, si possono distinguere un sovescio totale ed uno parziale. Nel primo caso si

attua l'interramento di tutta la vegetazione della coltura, mentre la seconda variante del sovescio consiste nell'interramento dei residui colturali, ovvero della porzione di pianta che non costituisce la produzione della coltura.

Il sovescio parziale non va confuso con le pratiche di incoltura come la semina su sodo, in quanto per essere definita sovesciata, la porzione di pianta deve necessariamente essere interrata e quindi presuppone un disturbo del suolo (Mez, 1965). Riguardo questo metodo di gestione del suolo (e di utilizzo dei residui colturali) esistono da tempo alcune perplessità, soprattutto se l'oggetto dell'interramento sono i residui di cereali. Già Verri, nel 1820, descrive un decremento delle rese di frumento in seguito al sovesciamento, seppur totale, di un prato di segale in prefioritura (Verri, 1840). Studi approfonditi, invece, hanno riguardato il sovesciamento della paglia di frumento; a causa del basso contenuto di azoto (0,4% della sostanza secca) e conseguentemente dell'elevato rapporto carbonio/azoto (C/N), che si attesta attorno a valori di 80, il coefficiente isoumico (quantità in peso di humus che si forma dalla biomassa organica fresca) di questo materiale è piuttosto contenuto (all'incirca pari al 15%). Durante il processo di degradazione della paglia, quindi, i microrganismi necessitano di un apporto di azoto dall'ambiente circostante, sottraendolo alla disponibilità della coltura immediatamente successiva al sovescio parziale. È possibile ovviare alla depressione della produttività delle colture seguenti applicando un supplemento di concime azotato al momento dell'interramento della paglia (si considera 1kg di N per ogni 100 kg di sostanza secca interrata); più avanti nel tempo, le piante insediate nel suolo così gestito potranno invece beneficiare dei proventi della mineralizzazione sostanza organica umificata che si verrà gradualmente a creare. I residui di altre famiglie di colture sono invece più facilmente degradabili per il più elevato tenore in azoto; essi presentano, quindi, un più elevato coefficiente isoumico. Anche i residui di colture arboree debbono essere presi in considerazione, sebbene il loro elevato contenuto di lignina comporti dei tempi di decomposizione più lunghi (Giardini, 2004).

In ogni caso, l'effetto migliorativo del sovescio di residui colturali può essere accentuato operandone una più fina trinciatura e miscelandoli, ove possibile, ad ammendanti organici di origine animale. Si dimostra quindi efficace anche la pratica biodinamica dell'allestimento di preparati con materiali di origine vegetale ed animale (Paull, 2020).

Nel sovescio totale si utilizza l'intera pianta erbacea non ancora disseccata. Gli effetti benefici che si espletano nei confronti della chimica del suolo sono inferiori rispetto all'ammendamento a base di letame, ma il principale vantaggio è comunque quello dell'apporto di SO al terreno per un quantitativo che va dalle 4 alle 7 t/ha. Ancora, alcuni

elementi della nutrizione vegetale (soprattutto fosforo e potassio) sono resi più disponibili e dall'erba si può ottenere l'assorbimento dell'acqua e dei nitrati in eccesso; il contenimento dell'erosione non è trascurabile, così come gli effetti biocidi di certe specie. Inoltre, l'adozione della tecnica può accelerare i processi di umificazione che avvengono nel suolo. Difatti, è stato studiato che l'utilizzo di sovesci promuove quantitativamente il contenuto di sostanza organica disciolta (DOM) nel suolo; questa sembra inoltre più aromatica, umificata e stabile con l'utilizzo di specie dicotiledoni (Gao et al., 2018). Tra l'altro va considerato che uno degli elementi che sembra favorire l'aumento di aggregati nel suolo e la stabilizzazione della sostanza organica, è proprio l'apporto di residui vegetali con un elevato tenore in azoto (Angeletti et al., 2021); è la frazione più stabile della SO quella che sembra giovare di più dall'uso del sovescio, in quanto il suo contenuto può essere innalzato utilizzando questa tecnica (Morelli et al., 2020). Secondo uno studio di durata trentennale, l'uso di sovesci invernali determinerebbe un aumento della resa maggiore di oltre il 25% rispetto al maggese. Inoltre, questa pratica, apportando grandi quantitativi di SO fresca, può favorire il rinnovo della materia organica e dei nutrienti contenuti nel suolo. Infine, la decomposizione dei tessuti sovesciati offre una notevole spinta all'attività microbica finanche arrivando a modificare, in tempi relativamente lunghi, la struttura e la composizione della SO disciolta.

Di contro, si può pensare alla competizione che un inerbimento da sovescio può esercitare nei confronti di una coltura arborea consociata o anche alla mancata resa che una coltura, prossima alla maturazione dei frutti o in epoca idonea alla fienagione, potrebbe fornire se non fosse sovesciata.

Riguardo all'epoca in cui effettuare il sovesciamento, si può affermare che prolungando la permanenza del cotico sul suolo si ottengono l'aumento del contenuto di sostanza secca fotosintetizzata ed il miglioramento del coefficiente isoumico; quest'ultimo solitamente assume valori che vanno dal 10% al 20%.

Fra le piante da sovescio possono rientrare anche specie non coltivate che partecipano alla formazione del cotico spontaneo. Altre specie frequentemente adoperate sono:

- *Fabaceae*: favetta (*Vicia faba* var. *minor* e *Vicia faba* var. *equina*, molto diffuse nei sistemi agricoli tradizionali, soprattutto all'interno di arboreti), lupino (*Lupinus albus*), trifoglio incarnato (*Trifolium incarnatum*), veccia villosa (*Vicia villosa*), sulla (*Hedysarum coronarium*, la quale ha anche ottime proprietà di desalinizzazione e di approfondimento del terreno), in grado di apportare anche azoto grazie alla fissazione simbiotica.

- *Poaceae*: sorgo (*Sorghum vulgare*), segale (*Secale cereale*), orzo (*Hordeum spp.*), loiessa (*Lolium multiflorum*), loietto (*Lolium perenne*), ottime per la copertura del terreno e l'intercettazione dei nitrati.
- *Brassicaceae*: colza (*Brassica napus*), rafano (*Raphanus raphanistrum*), senape (*Sinapis alba*) caratterizzate da un importante effetto nematocida (Giardini, 2004).

Specificatamente per il vigneto, vengono indicate: orzo (gen. *Hordeum*), grano (gen. *Triticum*), avena (gen. *Avena*) e loiessa (*Lolium multiflorum*) per le graminacee; veccia (*Vicia spp.*), favino (*Vicia faba*), trifoglio (*Trifolium spp.*) e pisello (*Pisum spp.*) fra le leguminose; senape (*Sinapis alba*, *Brassica spp.*) e colza (*Brassica napus*) per le crucifere . In particolare, consociazioni di orzo e veccia possono essere impiegate in semine autunnali in siti particolarmente soggetti a fenomeni di natura erosiva, per preservare il suolo del vigneto durante i mesi invernali (Silvestroni et al., 2004).

Capitolo 2

LA SOSTANZA ORGANICA DEL SUOLO

La sostanza organica (SO) del suolo, in inglese “Soil Organic Matter”, è l’insieme di tutta la materia organica naturale presente nel terreno (Violante, 2013), o meglio l’insieme di tutta la materia organica naturale che lo costituisce, unitamente alla frazione solida inorganica, alla fase liquida (soluzione circolante) e a quella gassosa (aria tellurica). Tale materia risulta essenziale per l’ecosistema terrestre, in quanto rappresenta la maggiore riserva di carbonio nella biosfera (Celi et al., 2017), tanto che la quantità di carbonio organico nel suolo si stima essere, in massa, prossima ai 2200 Pg (1 Pg = 10^{15} g), ovvero circa la metà della dotazione complessiva di carbonio del pianeta (Senesi et al., 2005). Va inoltre ricordato che la considerevole quantità di carbonio stoccato nel suolo attraverso il sequestro di CO₂ riduce l’emissione di gas ad effetto serra che può scaturire dall’ecosfera (Lal, 2008).

La SO del suolo è una miscela molto complessa ed eterogenea di vari materiali organici, per la quale esistono molte classificazioni. Volendo utilizzare la variante più accreditata, la sostanza organica del suolo può essere divisa in SO vivente e SO non vivente; possono anche esservi distinte quattro classi di costituenti:

- organismi viventi (vegetali, animali, microbici) escluse macrofauna e macroflora;
- SO fresca non ancora decomposta, derivante da animali, vegetali o microrganismi;
- materiale decomposto ed in via di decomposizione (monomeri, oligomeri, polimeri);
- sostanze umiche (Landi et al., 2000).

Grazie alle sue numerose proprietà, la SO del suolo controlla molti processi fisici, chimici e biologici, esplicando numerosi effetti, diretti ed indiretti, sulla fertilità dei suoli; nell’ambito dei suoli agrari, quindi, riveste un ruolo fondamentale per la produzione agricola. Pertanto, i substrati di coltivazione che presentano un più elevato contenuto di SO, sono caratterizzati da prestazioni produttive migliori rispetto a suoli poveri di tale componente.

Risulta dunque utile conoscere il quantitativo di SO contenuto in un suolo, che, in peso, può oscillare da meno dell’1% nei suoli sabbiosi ed aridi all’1÷5% negli orizzonti superficiali (circa 0,15 m di spessore) dei suoli coltivati, fino a quasi il 100% in quelli organici. Occorre

precisare che sono il materiale pedogenetico, le condizioni ambientali, le specie vegetali insediate e le azioni antropiche (Post e Kwon, 2000) a determinare la quantità (ma anche la qualità) della SO in esso contenuta, in un bilancio che tiene conto da un lato degli apporti e dall'altro delle asportazioni (per mineralizzazioni, immobilizzazioni, perdite) (Miano e Senesi, 2005). A tal proposito, per la SO, come per gli elementi della nutrizione vegetale, possono essere stabilite delle soglie che ne correlino il contenuto nel suolo ad indici di scarsità, sufficienza o abbondanza (Businelli, 2009), come riportato nella Tabella 1.1.

Tabella 2.1: Valori di correlazione tra tessitura del suolo e dotazione di SO (da Businelli, 2009).

	Classi tessiturali secondo USDA		
	<u>Sabbioso</u>	<u>Franco</u>	<u>Argilloso</u>
	Sabbioso-franco	Franco-sabbioso-	Franco-argilloso
	Franco-sabbioso	argilloso	Argilloso-limoso
		Franco-limoso	Franco-argilloso-
		Argilloso-sabbioso	sabbioso
		Limoso	
Dotazione in SO	Sostanza organica (% peso/peso)		
Scarsa	< 1,2	< 1,4	< 1,7
Normale	1,2 ÷ 1,5	1,4 ÷ 2,1	1,7 ÷ 2,6
Buona	1,5 ÷ 2,1	2,1 ÷ 2,9	2,6 ÷ 3,8
Molto buona	> 2,1	> 2,9	> 3,8

Il suolo, a seguito della degradazione, o più in generale della trasformazione e perdita, della SO, può andare incontro al depauperamento della propria fertilità: un danno che può protrarsi per molti decenni, soprattutto in caso di perdita della frazione più resistente alla decomposizione: essenzialmente le molecole umiche. Un fattore determinante nell'ambito della perdita di sostanza organica è senz'altro l'attività antropica (Pisante e Santilocchi, 2010). In primo luogo, è la conversione dei suoli da naturali a coltivati a determinare una rapida perdita di sostanza organica, seguita poi dalle lavorazioni, soprattutto se profonde e che comprendano l'inversione degli strati pedologici, come quelle convenzionali (Lal, 2004). Inoltre, l'aumento del tenore in SO nel suolo risulta essere molto difficoltoso, poiché la velocità di decomposizione della stessa è proporzionale al quantitativo apportato. Quindi si

delinea la necessità dell'utilizzo, in agricoltura, di pratiche per prevenire la perdita di SO nei suoli e per favorirne il reintegro. Sono un esempio il mantenimento di coperture vegetali permanenti e gli avvicendamenti colturali, o ancora l'utilizzo di fertilizzanti organici, ovvero sostanze di natura organica in grado di aumentare la fertilità del suolo in senso lato; fra questi si distinguono ammendanti (materiali che migliorano le caratteristiche fisiche) e concimi (utilizzati per l'apporto di sostanze nutritive), che, in virtù delle proprietà della SO, si caratterizzano anche per effetti correttivi, ossia di correzione di anomalie del pH.

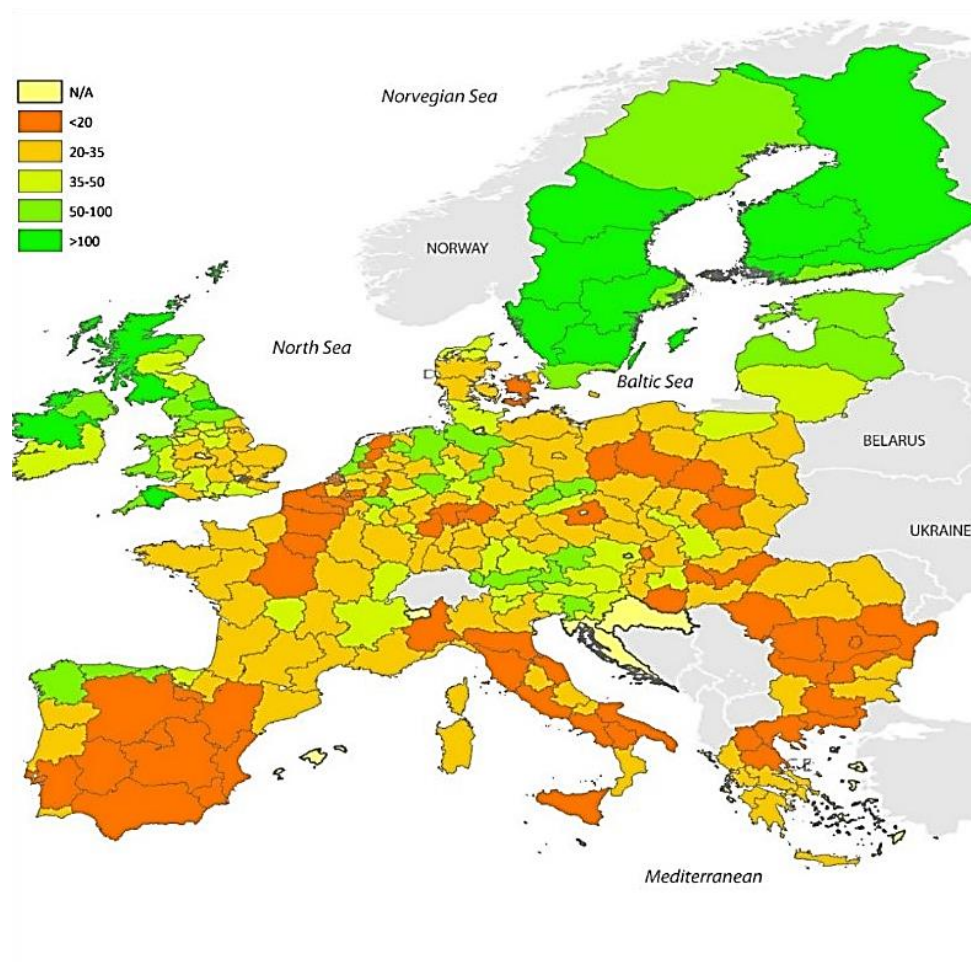


Figura 2-1: Contenuto di carbonio organico, in g/kg, nei suoli europei nel 2015 (da JRC, 2018).

2.1 Composizione della sostanza organica del suolo

La sostanza organica del suolo è costituita da diverse classi di composti organici, dall'origine e dallo stato di trasformazione variabili (Sequi, 1989). Difatti, agendo sulla SO fresca, diversi fattori chimico-fisici e biologici cooperano nella modificazione chimica delle molecole, prevalentemente attraverso processi di natura ossidativa. Questi processi richiedono tempi più o meno lunghi a seconda dei composti di partenza: ad esempio, carboidrati semplici o amminoacidi sono velocemente alterati dalla componente microbica del suolo, che ne ricava energia metabolica; d'altra parte, molecole più complesse, come lignine e cere, ma anche suberine, cutani, tannini e polifenoli, richiedono più tempo per la loro biodegradazione e possono rimanere a lungo nel suolo. È importante aggiungere che l'elemento più rappresentato nella sostanza organica del suolo è il carbonio, che la costituisce per il 40÷60%.

Ognuno dei componenti organici della SO del suolo può essere compreso in due grandi gruppi di sostanze: quelle non umiche e quelle umiche. Le prime comprendono qualsiasi composto organico di origine biologica (quelli di origine sintetica sono presenti in quantità trascurabile) che possa essere ricondotto a classi ben definite della chimica organica, essenzialmente glucidi, protidi e lipidi, ma anche composti minori; tutti i composti organici derivanti dal metabolismo di microrganismi terricoli come funghi, attinomiceti e batteri, possono essere compresi in tale frazione della SO (Stevenson e Cole, 1999). Fra le sostanze umiche, invece, si trovano composti derivanti dai processi di umificazione, ovvero dai processi di risintesi e ricombinazione di alcuni composti (Senesi et al., 2005; Celi et al., 2017).

Inoltre, occorre ricordare che nella definizione di sostanza organica del suolo, sono compresi anche gli organismi viventi del suolo (Landi et al., 2000) che, escludendo macrofauna e macroflora, sono riconducibili ai raggruppamenti della mesofauna e dei microrganismi, questi ultimi a loro volta suddivisibili in microfauna e microflora (White, 1982).

2.1.1 Sostanze non umiche

Tabella 2.2: Composizione, classificazione e percentuali approssimate delle sostanze non umiche del suolo (da Senesi et al., 2005).

Glucidi (5÷25% della SO)	Monosaccaridi e acidi uronici, oligosaccaridi, polisaccaridi.
Composti azotati (15÷45% della SO)	Amminoacidi, polipeptidi e proteine, amminozuccheri, acidi nucleici, eterocicli azotati, amine, amminoalcoli, colina, urea, vitamine, chitina, antibiotici acidi teicoici, etc.
Composti fosforati (1÷3% della SO)	Inositolfosfati, fosfolipidi, acidi nucleici, fosfoproteine, esteri fosforici, polisaccaridi fosforilati, glicerolfosfati.
Composti solforati (0,5÷3% della SO)	Esteri solforici, polisaccaridi solforati, colina-solfato, solfolipidi, amminoacidi solforati, disolfuri, mercaptani, solfoni, acidi solfonici, altri composti organici non definiti.
Lipidi (2÷20% della SO)	Grassi, cere, resine, steroli, terpeni, alcani, acidi grassi, glicerolo, alcoli alifatici, idrocarburi aromatici polinucleari, polifenoli, acidi fenolici, carotenoidi, etc.

Glucidi

I glucidi abbondano negli orizzonti più superficiali dell'ambiente pedologico, dove è maggiore il quantitativo di SO fresca (Celi et al., 2017), mentre il loro contenuto decresce con l'aumentare della profondità e con il procedere dell'umificazione. Derivano prevalentemente da SO vegetale e microbica, secondariamente da quella animale.

In particolare, i polisaccaridi sono i carboidrati più abbondanti nella SO, anche perché la loro struttura complessa li preserva dall'attacco enzimatico più a lungo rispetto agli zuccheri semplici. Essi sono presenti nel suolo in varie forme: complessati con metalli, adsorbiti (ovvero fissati) su particelle argillose o incorporati nelle macromolecole umiche. Per questi motivi, oltre che per la loro struttura chimica, queste molecole svolgono importanti funzioni che si ripercuotono sulla fertilità del terreno, sia dal punto di vista fisico che chimico: migliorano la struttura (hanno un'azione cementante nei confronti delle particelle minerali),

aumentano la Capacità di Scambio Cationico (CSC) grazie alla presenza di gruppi carbossilici come quelli esposti sugli acidi poligalatturonici, hanno ottima capacità di ritenzione idrica, data l'elevata idrofilia delle molecole, e modificano la disponibilità di ioni metallici nutritivi (Stevenson e Cole, 1999).

Frai polisaccaridi è opportuno ricordare le lignine, che, con l'alterazione, partecipano alla formazione di molecole polimeriche di grandi dimensioni e caratterizzate da gruppi ossidrilici fenolici. Queste molecole sono presenti nella parete secondaria delle cellule vegetali e si caratterizzano per alcune diversità nella struttura chimica riscontrate fra materiale proveniente da gimnosperme, angiosperme eudicotiledoni ed angiosperme monocotiledoni.

Monosaccaridi ed oligosaccaridi sono presenti soprattutto in forma solubilizzata nella soluzione circolante e sono facilmente soggetti all'attacco enzimatico (Testini e Gessa, 1989).

Composti azotati

L'origine delle sostanze azotate del suolo è da ricondurre al mondo vegetale ma anche a quelli microbico ed animale ed anche in questo caso si riconfermano le maggiori prestazioni, in termini di contenuto, degli orizzonti pedologici più superficiali.

I composti azotati più rappresentati sono senz'altro gli amminoacidi, che ne costituiscono il 30÷45%; seguono gli amminozuccheri (5÷10%) e gli acidi nucleici (circa 1%).

Per quanto concerne le forme in cui si trovano tali composti, queste possono essere libere o legate ad altre sostanze di natura organica (anche umificate); abbondano anche forme complessate con metalli (quali ferro ed alluminio) e quelle adsorbite su particelle minerali. Sono però presenti anche macromolecole di natura enzimatica.

Composti fosforati

Frai composti fosforati costituenti la SO, i più comuni sono: gli inositolfosfatidi (sintetizzati dai microrganismi o derivanti dalla fitina), i fosfolipidi, gli acidi nucleici. Non tutti i composti organici fosforati sono stati però identificati.

Per quanto riguarda le forme presenti, solo pochi composti, come i fosfodiesteri, risultano essere biodisponibili, mentre la maggior parte delle molecole si trova in forme protette adsorbite sui minerali, incorporate nelle sostanze umiche, come polimeri o complessate con cationi metallici (Sequi, 1989).

Composti solforati

Sebbene una buona parte della componente solforata della SO non sia ancora stata ben definita, è indubbio che nella composizione figurino gli amminoacidi solforati cisteina e metionina, assieme a coenzimi e vitamine.

Tali molecole sono presenti sia in forme libere e degradabili (ricche di forme riducibili dello zolfo) sia in forme combinate, che hanno alla base soprattutto composti non riducibili e poco degradabili con legami diretti carbonio-zolfo, come solfoni (composti che contengono il gruppo funzionale solfonile $R-S(=O)_2-R_1$) ed acidi solfonici (con un gruppo idrossisolfonile $R-S(=O)_2-OH$) (Senesi et al., 2005).

Lipidi

Il contenuto di lipidi nella SO potrebbe essere correlato al pH del suolo: sembra infatti che nei suoli più acidi, i composti lipidici arrivino a costituire il 20% della SO totale, mentre scenderebbero nei suoli con valori di pH più alti. Inoltre, tali molecole sono più abbondanti in condizioni di asfissia del terreno, dato che l'anaerobiosi rende più lenta la loro degradazione. Come per gli altri componenti della SO, anche le molecole lipidiche subiscono dei riarrangiamenti; ad esempio, si evidenzia una modificazione del numero di atomi di carbonio delle catene degli idrocarburi vegetali presenti nel suolo. Anche la prevalenza di molecole con un numero pari o con un numero dispari di atomi di carbonio varia in funzione del tipo di suolo e delle essenze vegetali su di esso insediate (Casalicchio et al., 1973).

Rispetto ai polisaccaridi, le molecole lipidiche, in specie quelle che permangono più a lungo nel suolo, garantiscono un aumento della stabilità della struttura degli aggregati delle particelle minerali; questa proprietà incrementa di pari passo con la capacità di ritenzione idrica, a dispetto della natura apolare delle molecole lipidiche (Dinel et al., 1990).

2.1.2 Sostanze umiche

L'humus rappresenta la frazione colloidale della sostanza organica del suolo (Businelli, 2009) ed è costituito da macromolecole di neoformazione ad elevato peso molecolare, originate dalla policondensazione e polimerizzazione delle molecole non umiche operate essenzialmente da microrganismi (Kononova, 1966).

Questo colloide comprende una serie estremamente varia di composti, di natura ad oggi ancora poco definita. Sono però importanti alcuni limiti e rapporti compositivi, che lo caratterizzano specificatamente:

- in quanto al contenuto di elementi, si hanno: Carbonio (C) = 52÷58%, Ossigeno (O) = 34÷39%, Idrogeno (H) = 3,4÷4,8%, Azoto (N) = 3,8÷4,1%. In particolare,

l'azoto è presente prevalentemente in forma: amminoacidica, eterociclica (derivante dalle basi azotate) ed esosamminica (gruppo amminico che sostituisce un idrossile su di uno zucchero esoso);

- il rapporto C/N si attesta attorno a valori di 8÷13;
- il rapporto O/H indica il livello di ossidazione;
- l'aromaticità, riferita al carbonio totale, si aggira intorno al 50÷55%, indicando la compresenza nella molecola, quasi in egual misura, di parti aromatiche e alifatiche.

L'approfondimento delle conoscenze in merito alla struttura chimica delle sostanze umiche è fondamentale per comprendere al meglio la genesi e le proprietà di questi particolari composti del suolo. Ad oggi si può affermare che le micelle colloidali si compongono di una struttura interna e di una interfacies superficiale; la prima è costituita da anelli aromatici, fenolici, chinonici ed eterociclici in parte condensati ed in parte collegati da catene alifatiche o ponti ossigeno, azoto e zolfo. A costituire la parte superficiale, oltre a catene lineari, si trovano gruppi funzionali piuttosto reattivi, quali: i carbossilici (R-COOH), i fenolici (Ar-OH), gli alcolici (Alch-OH), i carbonili (=C=O), i metossilici (R-OCH₃), gli amminici (R-NH₂) e gli ammidici (R-CONH₂).

Una delle proprietà direttamente influenzate dai gruppi funzionali distribuiti sull'interfacies è la carica elettrica dell'humus; in particolare, sulla sua determinazione influiscono i gruppi carbossilici e quelli fenolici (gruppi acidi che, dissociandosi, acquisiscono carica negativa) ed i gruppi alcolici (basici, si caricano positivamente con la protonazione). La carica elettrica dell'humus è pH-dipendente e si rivela sempre in prevalenza elettronegativa. Ciò è dovuto al fatto che il pKa (valore di pH al quale la dissociazione di un composto è al 50%) del gruppo carbossilico è pari a pH 5 (viene assunto come valore quello relativo agli acidi monocarbossilici), mentre quello del gruppo fenolico è pari a pH 10. Entrambi tali valori di pKa decrementano, però, per la presenza di gruppi elettronattrattori sull'interfacies, posti nelle vicinanze di quelli dissocianti sopra citati, mentre la protonazione del gruppo alcolico è ignorabile, dato che avverrebbe a valori di pH troppo bassi. In tal modo quasi tutta la scala di pH è coperta dalla dissociazione dei gruppi acidi e la carica si mantiene sempre prevalentemente elettronegativa (Sequi, 2005; Businelli, 2009).

Di seguito si riportano alcune delle proprietà delle sostanze umiche:

- colorazione scura;
- dimensioni colloidali (da 2 nm a 2 µm) e conseguentemente elevata superficie specifica;

- carica elettrica negativa;
- capacità di adsorbire e scambiare molecole e ioni, cui si deve il ruolo di riserva di nutrienti;
- attività chelante nei confronti dei metalli;
- attività fito-fisiologica paraormonale;
- trattenimento di acqua, da 4 a 5 volte in più rispetto ai colloidi argillosi (Violante, 2013);
- esplicamento di potere tampone;
- ruolo di cementante per il miglioramento della struttura del suolo.

Data la natura colloidale delle sostanze umiche, per poterle separare dagli altri componenti del terreno, occorre avvalersi dell'estrazione con dei solventi che ne permettano il passaggio a fase dispersa. Attraverso l'estrazione ed il frazionamento dell'humus, illustrati più avanti, è possibile distinguere tre sue componenti, che differiscono per la solubilità e per alcune proprietà: l'umina, gli acidi umici (HA) e gli acidi fulvici (FA). Queste tre componenti sono presenti in diverso rapporto a seconda del tipo di suolo, come è riportato nell'esempio della figura 2-2 (Stevenson e Cole, 1999). Ulteriori tentativi di frazionamento di acidi fulvici ed acidi umici si sono rilevati poco significativi.

Umina

Rappresenta la frazione dell'humus insolubile a qualsiasi valore di pH, in quanto ritenuta saldamente associata alle particelle di argilla (complessi argillo-umici). Inoltre, occorre specificare che l'insolubilità dell'umina non si deve all'alterazione della struttura delle molecole di acidi umici (ai quali l'umina è risultata, chimicamente molto somigliante), bensì all'intimità del loro legame con le micelle argillose. Infine, è probabile che il peso molecolare di questi composti sia maggiore rispetto al peso di quelli delle altre classi (Violante, 2013; Kononova, 1966).

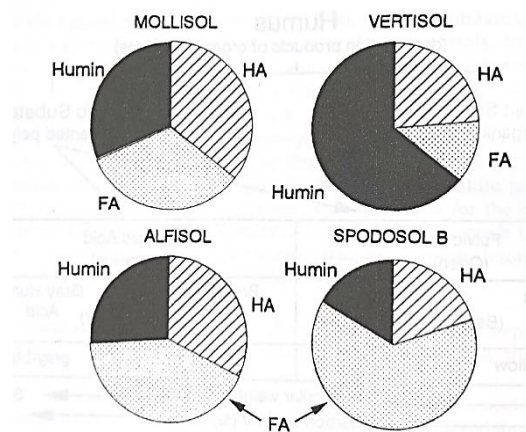


Figura 2-2: Ripartizione dell'humus nelle tre categorie in quattro diversi tipi di suolo (da Stevenson e Cole, 1999)

Acidi umici

Gli acidi umici costituiscono la frazione, delle sostanze umiche, insolubile in soluzione acquosa con ambiente acido ma solubile in quella con ambiente basico. A tale definizione appartengono vari acidi organici dalla struttura prevalentemente aromatica che sempre ne costituisce il nucleo (Testini e Gessa, 1989); difatti, gli acidi umici si formano per condensazione di polifenoli con composti azotati ciclici, oltre che con una piccola parte di residui di carboidrati e presumibilmente radicali semichinonici. Come riportato nella tabella 2.3, gli acidi umici presentano, rispetto ai fulvici, un più alto contenuto di carbonio ed azoto ed un tenore in ossigeno meno elevato, oltre ad avere peso molecolare generalmente maggiore, pur considerando le notevoli variazioni dovute all'eterogeneità dei composti.

La struttura delle molecole può essere considerata spugnosa, ricca di spazi interni; ciò determina i molteplici ruoli di tali sostanze nel suolo: dal trattenimento di acqua a quello di assorbimento di altre molecole. L'idrofilia di questi composti è però correlata al rapporto fra costituenti aromatici ed alifatici, il quale deriva a sua volta dal tipo di suolo preso in considerazione; in generale, una prevalenza di porzioni alifatiche determina una maggiore idrofilia (Kononova, 1966).

Tabella 2.3: Composizione elementare (da Businelli, 2009, ad eccezione di quella in zolfo) e funzionale (da Senesi et al., 2005, compresa composizione in zolfo) degli acidi umici e degli acidi fulvici del suolo.

Elementi (%)	Acidi Umici	Acidi Fulvici
C	57,2	49,5
H	4,4	4,5
N	2,4	0,8
S	0,8	1,9
O	36,0	45,2
Ceneri	7,9	2,0
Gruppi funzionali (cmoli/kg)		
Acidità totale	670	1030
Carbossili	360	820
Ossidrili fenolici	390	300
Ossidrili alcolici	260	610
Carbonili	290	270
Metossili	60	80

Acidi fulvici

Costituiscono la frazione di humus solubile in acqua a qualsiasi valore di pH, o meglio la porzione che non precipita in soluzione acquosa acida e che risulta dalla purificazione mediante cromatografia. Fra tutte le frazioni, sono quella a più basso peso molecolare; inoltre, presentano un più elevato tenore in ossigeno che si traduce in una maggiore presenza di gruppi funzionali reattivi (soprattutto gruppi carbossilici), determinando un'elevata attività nelle reazioni di scambio; da riportare, è anche l'elevata reattività dell'azoto contenuto in questi composti. Infine, gli acidi fulvici presentano una scarsa aromaticità, se messi a confronto delle altre molecole umiche.

Data la loro natura al limite delle proprietà colloidali, gli acidi fulvici rivestono una minore importanza agronomica e vengono considerati come prodotti intermedi nella genesi o nella degradazione delle molecole umiche a più alto peso molecolare (Businelli, 2009; Senesi et al., 2005).

2.1.3 *Organismi viventi*

Il suolo può e deve essere inteso anche come un habitat, sia nel caso dei suoli agrari, sia per quelli naturali. Questa esigenza nasce dal riscontro di un elevatissimo numero di specie di organismi viventi che svolgono il loro ciclo vitale (in tutto o in parte) al suo interno e che, di fatto, ne costituiscono una porzione, venendo compresi nella sostanza organica del suolo (Nannipieri et al., 2005). Considerando la presenza di organismi nel suolo in unità di peso, questi vengono indicati con il termine "biomassa" (White, 1982); la componente microbica, ne costituisce la frazione maggioritaria, con il primato delle specie batteriche (si stimano 1÷2 tonnellate per ettaro di terreno). Anche in termini qualitativi, i batteri si confermano al primo posto, con un numero stimato di specie presenti in un grammo di terreno pari a qualche milione. Fra i più importanti gruppi di batteri si possono ricordare: i nitrificanti autotrofi (come quelli dei generi *Nitrosomonas* e *Nitrobacter*), i batteri azotofissatori liberi (gen. *Azotobacter*) e simbionti (gen. *Rhizobium*), i denitrificanti (genn. *Pseudomonas*, *Bacillus*, *Paracoccus*, *Thiobacillus*) e infine i solfo, ferro e manganese-batteri (Violante, 2009).

Oltre ai batteri, il suolo è colonizzato da molte specie di Funghi (saprofiti, parassiti o simbionti), attinomiceti, alghe, protozoi (che costituiscono la microfauna). Inoltre, sono presenti piccoli invertebrati come Artropodi, Anellidi, Molluschi e Nematodi, che costituiscono la mesofauna, la quale si caratterizza per le dimensioni comprese fra gli 0,2 ed i 4 mm. Tutti questi componenti della SO sono importanti fattori nella determinazione delle

caratteristiche del suolo, contribuendo in vario modo ai processi di genesi e trasformazione chimica e fisica che lo riguardano (White, 1982).

Anche la macrofauna e la macroflora contribuiscono ai processi che interessano il suolo, sebbene non siano compresi nel sistema di classificazione della sostanza organica qui riferito (Landi et al., 2000). In particolar modo, gli organi ipogei delle piante assumono capitale importanza per tutti i processi che riguardano le radici e le proprietà che, di conseguenza, assume la rizosfera. Con il termine “rizosfera” viene indicata la porzione di suolo (compresa la biomassa microbica) a contatto con le radici; più in dettaglio, si indica come “endorizosfera” l’insieme di tessuti radicali superficiali colonizzati o colonizzabili dai microrganismi, si parla di “ectorizosfera” per gli strati di suolo a contatto con le radici, mentre il “rizopiano” separa le due zone sopra citate. Lo strato rizosferico, in virtù delle attività metaboliche della pianta e dei microrganismi, presenta una composizione chimica differente rispetto al resto del suolo, nonché variabile lungo la superficie della radice stessa. Anche le proprietà fisiche del terreno vengono condizionate dalla rizosfera, ad esempio grazie all’azione dell’accrescimento e dell’assorbimento radicale, ma anche grazie alla secrezione di mucigel da parte dell’apice radicale, nonché di altre sostanze mucillaginose prodotte dalla pianta e dal complesso microbico rizosferico (Pinton et al., 2017). Nel complesso le principali sostanze rilasciate dall’apparato radicale delle piante possono essere ricondotte a tre gruppi: le secrezioni (composti a basso peso molecolare rilasciati con funzione prevalentemente nutrizionale), le sostanze mucillaginose (con funzioni sulla fase solida del terreno) e le spoglie radicali (Sequi, 1989).

2.1.4 Altre forme di sostanza organica del suolo

La sostanza organica disciolta

Aggiungendo acqua deionizzata al terreno e operando una centrifugazione, è possibile ottenere la sostanza organica estraibile in acqua (WEOM) e da questa determinare il carbonio organico solubile in acqua (WSOC), attraverso ossidazione con bicromato di potassio e retrotitolazione con solfato ferroso (Monaci et al., 2017). La WEOM contiene una frazione importante della sostanza organica del suolo, che comprende anche molecole umiche: è la sostanza organica disciolta, anche se essa risulta solo parzialmente compresa nella WEOM (Zsolnay, 2003).

La sostanza organica disciolta, in inglese “dissolved organic matter” (DOM) è una delle componenti più attive del suolo e comprende la frazione di sostanza organica che risulta solubile nella soluzione circolante del suolo (Gao et al., 2018). Generalmente si usa definire

come DOM l'insieme delle particelle organiche disciolte con dimensioni inferiori a 0,45 μm ottenute attraverso filtrazione; la parte di sostanza organica che non passa il vaglio può essere invece definita come sostanza organica particellare (Zsolnay, 2003). Fra le componenti più rappresentate nella DOM figurano le sostanze derivanti direttamente dalla lettiera, gli essudati della rizosfera (Kalbitz et al., 2000 A) e, frai composti umici, gli acidi fulvici (Kalbitz et al., 2000 B).

Il movimento della DOM e la sua distribuzione negli orizzonti pedologici avvengono essenzialmente per mezzo di diffusione e flusso di massa secondo gradiente idrico; nel primo caso il processo si definisce in base alla tendenza della DOM a trasformarsi in forme solide o immobilizzate. Molti fattori interagiscono con il flusso di massa attraverso il quale la soluzione circolante contenente la DOM si muove; ad esempio, negli orizzonti con una bassa concentrazione in sostanza organica, pare che i composti organici disciolti tendano ad essere assorbiti dalle particelle minerali (Kalbitz et al., 2000 A). In base ai tempi e alle forze di ritenzione dell'acqua nei pori del terreno, la quantità e la qualità della DOM nella soluzione possono variare; difatti, i processi a carico della DOM saranno diversi fra quella contenuta nei micropori (dove influiscono forze adesione e coesione), nei mesopori e nei macropori (dove agisce la sola forza di gravità) (Miano e Senesi, 2005).

Tabella 2.4: Caratteristiche delle diverse classi di materia organica disciolta in funzione delle dimensioni dei pori in cui si trovano (modificato da Zsolnay, 2003).

	DOM I	DOM II	DOM III
Diametro dei pori (μm)	<0,2	0,2÷6	>6
Forze agenti sulla/nella soluzione	coesione e adesione	coesione	gravità e coesione
Tensione superficiale dell'acqua (kPa)	< -1500	-1500÷50	>50
Degradazione DOM (velocità)	lenta	moderata	rapida
Degradazione DOM (agenti)	abiotica, esoenzimi	microbica	biotica

La DOM III è da considerare la frazione mobile e disponibile, la DOM II è disponibile ma non mobile, La DOM I è solo potenzialmente disponibile. Quest'ultima può essere estratta solo in minima parte con la WEOM; per il resto deve essere tirata fuori dai micropori attraverso una soluzione a base di cloruro di calcio (CaCl_2) (Zsolnay, 2003).

La DOM, come già affermato, è una frazione molto attiva della SO. Per questo, svolge assume ruoli importanti in molti processi della pedosfera; ad esempio, influenza: il trasporto e la fissazione di C e N organici, la stabilizzazione degli aggregati, le condizioni redox, la disponibilità di elementi nutritivi e xenobiotici, la pedogenesi (Gao et al., 2018; Miano e Senesi, 2005).

La sostanza organica particellare

Per verificare la correttezza di pratiche agronomiche conservative, è opportuno tener conto delle variazioni qualitative e quantitative della sostanza organica più labile contenuta nel suolo. Un indice attendibile riguardo a questi parametri è stato identificato nella sostanza organica particellare, anglicizzato come “particulated organic matter” (POM), in quanto questa frazione risulta sufficientemente sensibile da tener traccia dei cambiamenti quali-quantitativi a breve termine della SO.

La suddivisione della POM in ulteriori frazioni che differiscono nel grado di decomposizione e nella somiglianza con i residui vegetali freschi, può migliorare la risoluzione delle differenze nelle caratteristiche della SO labile che derivano da diverse strategie di gestione del suolo agricolo. La suddivisione in sotto-frazioni avviene sulla base della densità delle particelle; questa caratteristica permette di distinguere la POM libera (fPOM) dalla POM occlusa (oPOM), legata a particelle minerali attraverso ponti di metalli. Il primo gruppo di sostanze si caratterizza per una densità $<1,6 \text{ g/cm}^2$, mentre l'oPOM ha valori compresi fra $1,6$ e $2,0 \text{ g/cm}^2$; quest'ultima costituisce la frazione meno umificata ma anche quella più resiliente della POM e pertanto conserva a lungo le proprie caratteristiche (Marriot e Wander, 2006).

2.2 Trasformazione della sostanza organica del suolo

2.2.1 Fattori che influenzano la trasformazione della sostanza organica del suolo

Tanto la componente solida inorganica quanto la sostanza organica del suolo sono caratterizzate dall'essere oggetto di numerose trasformazioni, sia di tipo fisico che di tipo chimico. I processi di trasformazione a carico della SO trovano le loro forme più estreme nell'eremacausi e nella fossilizzazione. Nel primo caso si ha la completa ossidazione e

gassificazione delle molecole organiche, grazie a condizioni ottimali di temperatura (piuttosto alta), areazione (con abbondante presenza di ossigeno) ed umidità. La fossilizzazione (o carbonificazione), invece, avviene molto più lentamente ed in condizioni di anaerobiosi e temperature generalmente basse; al termine di tale processo, la sostanza organica risulta in gran parte depurata dagli atomi di ossigeno, in favore di una saturazione del carbonio. Va comunque ricordato che il motore primario della biosintesi di molecole organiche è la fotosintesi clorofilliana (Miano e Senesi, 2005).

Volendo utilizzare un approccio più politico e forse poco ortodosso, si può notare come le regioni della Terra dove prevalgono i processi di eremacausi corrispondono ai paesi frai meno sviluppati o comunque con gravi problemi di approvvigionamento di beni alimentari (la cosiddetta “cintura della fame” che passa per l’Africa Centrale, l’America Centro-Meridionale e l’India); le zone del mondo caratterizzate da una diffusa carbonificazione della sostanza organica si identificano con quelle della rivoluzione industriale; da ultime, nelle regioni dove l’umificazione è prevalente, è probabilmente nata l’agricoltura. Questo ragionamento aiuta a comprendere la rilevanza che l’evoluzione della sostanza organica assume nell’influenzare la produzione agricola e quindi la vita dell’uomo (Testini e Gessa, 1989).

I fattori da cui dipende la trasformazione della SO sono essenzialmente (in ordine di importanza) il clima, la vegetazione e gli altri organismi viventi, la topografia, il materiale parentale (roccia madre) ed il tempo; si confermano essere gli stessi che determinano i processi della pedogenesi.

- *Clima*: i parametri climatici più influenti risultano essere l’umidità e la temperatura. Il primo parametro è condizionato sia dagli apporti in forma di precipitazioni, sia dalle perdite dovute a: evapotraspirazione, infiltrazione, scorrimento (superficiale o sotto-superficiale) e quindi legate alla topografia e alle caratteristiche fisiche del suolo. La temperatura (del suolo e dell’aria) si deve invece all’irraggiamento ed al colore del suolo, alla latitudine e all’altitudine, alla stagione e alla geografia del sito. Ad essa è strettamente correlata l’entità dell’attività microbica sulla SO, quindi la velocità di trasformazione (in climi relativamente caldi la SO tenderà a degradarsi, mentre temperature basse ne incentivano l’accumulo).
- *Vegetazione ed organismi viventi*: le essenze vegetali giocano un ruolo fondamentale, ma anche molto differenziato, nella pedogenesi e nell’evoluzione della SO; in particolare, l’insediamento di specie diverse, anche sullo stesso ordine di suolo, può portare a dinamiche completamente differenti nello sviluppo della

pedogenesi e nei processi a carico della SO. Ad ogni modo, si instaura un meccanismo biunivoco nel rapporto tra suolo e vegetazione in merito alla SO: da una parte le piante determinano l'evoluzione della SO nel suolo, dall'altra le proprietà del suolo hanno influenze sul contenuto di SO, che a sua volta condiziona la crescita della pianta. Microflora e microfauna, inoltre, si inseriscono nel ciclo del carbonio assumendo un ruolo chiave nei processi degradativi che interessano i residui organici e quindi nel ciclo del carbonio. Importante è il ruolo degli organismi che compongono la rizosfera, la cui vasta diversità è correlata proprio all'estrema varietà dei composti di origine vegetale (Miano e Senesi, 2005).

- *Topografia*: influenza essenzialmente il microclima, che può essere definito come l'insieme delle condizioni climatiche che caratterizzano le vicinanze della superficie del terreno. Difatti l'altitudine, l'esposizione ed i rilievi condizionano l'entità delle precipitazioni e le temperature, mentre la pendenza determina i processi di allontanamento della frazione liquida e l'erosione.
- *Materiale parentale*: i minerali di natura litologica e gli ioni che ne derivano operano un importante condizionamento dell'attività microbica sulla SO e determinano la formazione di complessi organo-minerali ed organo-metallici che preservano le molecole organiche dall'attacco dei microrganismi. Anche struttura e tessitura risultano fondamentali, in tal ambito. Suoli di natura prevalentemente argillosa si caratterizzano per un tenore in SO mediamente più elevato rispetto a terreni sciolti; ciò è dovuto alla più diffusa presenza di complessi organo-minerali, ad esempio argille di tipo montmorillonitico hanno un'ottima efficienza nell'assorbimento di molecole organiche.
- *Tempo*: dopo un periodo di latenza, il contenuto di sostanza organica nel suolo cresce rapidamente nei primi anni di formazione del suolo. Successivamente il tasso di accumulo rallenta ed il contenuto di SO si stabilizza attorno ad un equilibrio determinato dal tipo di suolo e soprattutto dalle condizioni climatiche del sito. Il raggiungimento dell'equilibrio impiega tempi molto variabili in relazione agli altri fattori pedogenetici. Inoltre, grazie all'associazione a minerali e metalli, con il tempo si assiste alla migrazione del carbonio organico verso gli strati più profondi del suolo (Celi et al., 2017; Stevenson e Cole, 1999).

Tutti questi fattori contribuiscono a provocare le trasformazioni più importanti che possono riguardare la SO del suolo: decomposizione e mineralizzazione, umificazione.

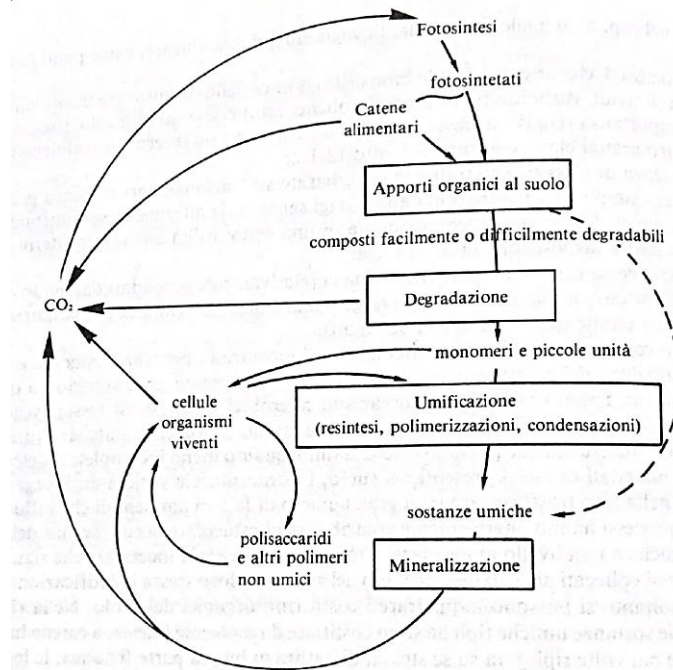


Figura 2-3: I vari percorsi attraverso i quali può procedere la trasformazione della sostanza organica nel suolo (da Sequi, 1989).

2.2.2 Degradazione e mineralizzazione della sostanza organica

Quando viene utilizzato il termine “mineralizzazione” riferito alla SO, soprattutto in ambito agronomico, si intende indistintamente sia la degradazione di residui di organismi viventi e sostanze non umiche, sia la mineralizzazione vera e propria che riguarda le molecole umiche. È comunque importante tener presente che non esistono molecole che, per quanto complesse, possano resistere alla degradazione microbica attraverso idrolisi enzimatica, ovviamente in tempi adeguati (Sequi, 1989).

Nella definizione di degradazione rientrano tutti i processi, non solo di natura idrolitica, che hanno come prodotto finale dei monomeri. Inizialmente i residui organici vengono amminutati, e quindi preparati all’aggressione da parte dei microrganismi (viene aumentata la superficie specifica), dalla mesofauna di vario genere, che svolge anche azioni digestive nei confronti di tali corpi. Successivamente la degradazione procede grazie al corredo enzimatico del metabolismo della microflora (la microfauna actinomicotica subentra come prevalente in un secondo momento a spese delle componenti organiche facilmente decomponibili); sul substrato in degradazione, vengono ad instaurarsi prima colonie fungine e successivamente

popolazioni batteriche (Kononova, 1966). La diminuzione delle dimensioni delle particelle organiche che si degradano, è accompagnata dal decrescere delle dimensioni degli organismi responsabili della decomposizione. Con l'avanzare del processo, si producono: ulteriore biomassa (la popolazione microbica cresce), CO_2 , H_2O , piccole quantità di ammonio (NH_4^+ , in gran parte riciclato), prodotti solforati inorganici, acidi organici ed altri composti intermedi parzialmente ossidati. La perdita di costituenti, in questa fase, è rappresentata soprattutto dalla CO_2 , decretando quindi un'esponenziale diminuzione del rapporto C/N, che diviene indice del grado di mineralizzazione della SO.

I tempi con i quali avvengono i processi di degradazione variano in funzione del substrato di partenza, della consistenza fisica di tale matrice organica, delle sue caratteristiche fisiche e delle condizioni climatiche. Un ruolo molto importante è da attribuire alle condizioni di aerobiosi o anaerobiosi (in tal caso la degradazione è molto più lenta).

Come riportato nello schema della figura 2-4, dopo una rapida degradazione iniziale della sostanza organica fresca, si ha un rallentamento della decomposizione che si deve a vari motivi; in primis i componenti rimasti della SO fresca sono quelli più difficilmente aggredibili (e quindi hanno tempi di decomposizione lunghi); inoltre, i componenti

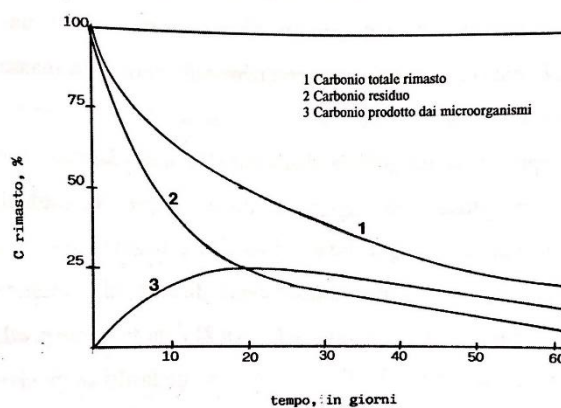


Figura 2-4: Andamento del processo degradativo a carico della sostanza organica (da Businelli, 2009).

degradati possono essere rielaborati in molecole più resistenti, che in alcuni casi possono ricoprire il materiale iniziale e proteggerlo dall'attività microbica (Businelli, 2009). Molto estesi sono ritenuti i tempi di degradazione della lignina. Tale processo comunque inizia da subito con l'attacco delle catene laterali più esposte da parte di ossidasi ed idrolasi varie, di origine prevalentemente fungina. Questo processo di depolimerizzazione trova i suoi prodotti intermedi in monomeri ed oligomeri; i primi subiscono una trasformazione ad o-difenoli, che possono essere aggrediti con facilità e degradati, mentre gli oligomeri possono andare in contro all'apertura degli anelli aromatici in seguito all'azione di alcune fenolossidasi.

Quando la SO, si trova negli orizzonti pedologici minerali, abbondano le interazioni con le particelle inorganiche del suolo. Si ha così la formazione di micro e macroaggregati, nei quali le particelle minerali proteggono, e a volte racchiudono, la SO (fresca, ma anche

parzialmente decomposta) e la preservano chimicamente dall'attacco enzimatico o fisico dei microrganismi. In alcune condizioni la protezione è tale da rimanere efficace per millenni.

Delle condizioni particolari di decomposizione si verificano in stato di anaerobiosi, in terreni per loro natura asfittici o nel caso di ristagni idrici prolungati. Con tali presupposti, si può assistere ad un accumulo di SO, che si degrada più lentamente perché viene utilizzata come donatore di elettroni da microrganismi con metabolismo anaerobico (dalla minore efficienza energetica) che utilizzano accettori di elettroni diversi dall'ossigeno. In alcuni casi possono instaurarsi processi fermentativi che portano alla produzione di acidi organici a catena corta (tossici per le colture), come acido lattico od etanolo (Celi et al., 2017).

La mineralizzazione della sostanza organica umificata

Le molecole umiche possono essere degradate dai microrganismi per l'utilizzo nel loro metabolismo, in particolare come fonte di azoto. Ciò è possibile per due fattori: in primis le molecole umiche non sono isolate dalle restanti componenti della sostanza organica del suolo, ma si trovano spesso a stretto contatto con molecole organiche più facilmente aggredibili; in secondo luogo, l'humus viene attaccato da complessi microbici in cui le differenti specie hanno capacità degradative diverse. In particolare, i batteri in grado di decomporre gli acidi umici sono dotati di un'intensa attività della catalasi e della perossidasi.

Il processo di ossidazione delle sostanze umiche, che porta alla loro degradazione fino a composti inorganici, deve essere, in virtù delle modalità della loro stessa formazione, necessariamente molto lento. A mettere in moto la mineralizzazione dell'humus può essere il cosiddetto "effetto innesco", dovuto all'apporto di materia organica fresca al terreno. La crescita della popolazione microbica che ne deriva, fa sì che l'intensa attività dei microrganismi venga ad interessare la sostanza organica umificata nel momento in cui si manifesta la scarsità di nutrienti più facilmente aggredibili (gli stessi apportati) (Kononova, 1966; Sequi, 1989; Miano e Senesi, 2005).

2.2.3 Umificazione della sostanza organica

È opinione condivisa che l'humus si formi a partire da composti di neoformazione, essenzialmente sostanze polifenoliche (molecole con vari gruppi fenolici, in cui si ha un gruppo ossidrilico -OH direttamente legato ad un atomo di carbonio dell'anello benzenico) e chinoniche (composti aromatici derivati dal benzene sul cui anello un numero pari di gruppi -CH= è sostituito da altrettanti gruppi -C(=O)-), almeno per quanto riguarda il nucleo strutturale della molecola (Businelli, 2009).

Esistono differenti composti di partenza e molteplici reazioni chimiche che possono portare alla formazione delle macromolecole umiche; è probabile che i vari percorsi possibili non avvengano contemporaneamente ma dipendano dalle condizioni ambientali (pedoclimatiche), nonché dalla natura della SO fresca di partenza, che caratterizzano ogni suolo.

Si può schematizzare il processo di umificazione riconducendolo a due fasi importanti: la prima è la decomposizione dei residui organici in composti più semplici (oltre alla parte di questi che viene completamente degradata), grazie alla moltitudine di enzimi ossidanti di cui sono dotati i microrganismi; la seconda fase consiste nella sintesi delle molecole umiche attraverso la resintesi cellulare, la condensazione e la polimerizzazione per addizione nucleofila dei composti derivanti dalla degradazione. Queste trasformazioni sono in parte di natura chimica, quindi non operate da organismi viventi, ed in parte di natura biochimica, ma si sottolinea comunque la prevalenza dell'intervento dei microrganismi in questa seconda fase dell'umificazione.

La resintesi riguarda alcuni metaboliti cellulari che vengono riversati all'esterno della cellula per svolgere funzioni nell'habitat del microrganismo e che prendono parte al processo di sintesi delle macromolecole di humus; fra questi metaboliti ci sono proteine (essenzialmente enzimi extracellulari), carboidrati e sostanze fenoliche varie, che hanno comunque fatto parte del plasma microbico.

La condensazione è una polimerizzazione nella quale, in seguito all'unione dei composti, oltre alla formazione di un dimero e poi di un polimero, si libera acqua o un'altra specie chimica a basso peso molecolare. Nel processo di umificazione, la condensazione avviene soprattutto a partire dalla formazione di semichinoni radicalici molto reattivi, i quali a loro volta possono derivare da sostanze polifenoliche e da sostanze chinoniche, come riportato nella figura 2-5. Questa reazione interessa però anche i carboidrati riducenti e composti azotati. Per quanto concerne i carboidrati, nel processo di umificazione è compresa la loro

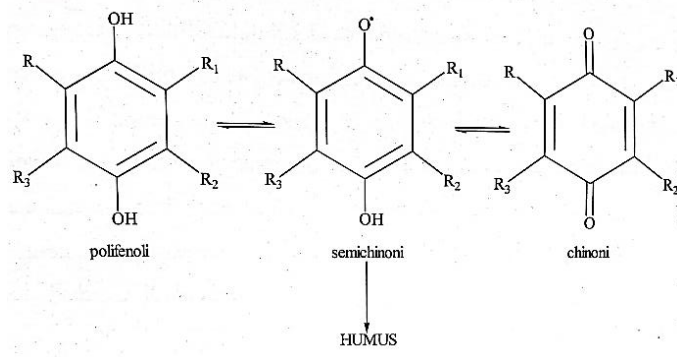


Figura 2-5: Trasformazione di polifenoli e chinoni nei radicali semichinonici oggetto della condensazione (da Businelli, 2009)

trasformazione biochimica da catene alifatiche a composti aromatici come i polifenoli derivanti dalla fermentazione.

La polimerizzazione per addizione nucleofila avviene attraverso dei processi del metabolismo microbico, soprattutto grazie ad enzimi come perossidasi, fenolossidasi e laccasi, che agiscono sempre a partire da monomeri fenolici. La condensazione è però la reazione prevalente.

In generale, occorre evidenziare il ruolo chiave della lignina. Questa molecola è soggetta a parziale degradazione sino a molecole organiche aromatiche a basso peso molecolare (i composti di neoformazione sopra citati), con un processo che avviene secondo le modalità trattate nel precedente paragrafo, che prendono parte ai processi di condensazione e polimerizzazione che portano alla formazione dell'humus quale polimero amorfo con una massa fra i 2000 ed i 300000 dalton.

Per quanto riguarda i tempi occorrenti per l'umificazione, questi variano con le condizioni ambientali e in base alla composizione chimica dei residui di partenza. Come esempi, si possono consultare i dati riportati nella tabella 2.5:

Tabella 2.5: Tempo, in giorni (d), di inizio del processo di umificazione di residui vegetali (da Kononova, 1966).

Residuo:	Foglie di trifoglio	Radici di trifoglio ed erba medica	Radici di Agropyron tenerum	Radici di Agropyron cristatum	Foglie di nocciolo	Aghi di pino silvestre
Osservazioni:						
Inizio di cambiamenti visibili (d)	2-4	5-8	20-30	20-25	5-8	30-35
Comparsa di sostanze umificate (d)	14-20	60-75	180-200	180-200	25-30	120-180

Nell'esempio tabulato, i tempi più brevi, per la comparsa delle prime sostanze umiche, sono raggiunti dai residui a base di foglie di leguminose (trifoglio) e specie forestali (nocciolo), ma anche i tempi impiegati dalle radici di foraggiere sono piuttosto brevi; i tempi più prolungati

sono legati alle radici di graminacee perenni e alle foglie di conifere. Questi risultati si devono, almeno in parte, alla diversificata natura della lignina presente nelle varie essenze vegetali (Kononova, 1966).

2.3 Ruolo della sostanza organica nella determinazione della fertilità del suolo

Il contenuto di sostanza organica è il miglior indicatore della fertilità di un suolo, in quanto è l'unico che influenza tutte le caratteristiche del terreno: fisiche, chimiche, biologiche e nutrizionali.

2.3.1 Influenza sulle proprietà fisiche

La maggior parte delle proprietà fisiche del suolo viene influenzata dalla sostanza organica, ma è soprattutto la struttura ad essere strettamente connessa al contenuto di SO nel suolo, ovviamente con delle modalità variabili che dipendono anche dalla tessitura, dalle lavorazioni, dalla gestione agronomica del suolo. La presenza di una struttura ottimale, nel terreno, è determinante affinché sia presente un'adeguata porosità e lo scambio fra le fasi solida, liquida e gassosa possa procedere con nelle migliori condizioni.

Lo stato strutturale del suolo si basa sulla presenza macro e micro-aggregati; i primi sono creati soprattutto grazie alla presenza di radici ed ife di miceli fungini. Entrambi questi agenti biotici costituiscono delle fitte reti intorno alle particelle solide; quindi, fra le essenze vegetali sono le graminacee (con il loro apparato radicale di natura sottile e fitta) a primeggiare nella funzione di stabilizzazione della struttura. Anche gli essudati radicali e le mucillagini di natura microbica contribuiscono alla formazione di tali aggregati. È opportuno non dimenticare il ruolo della mesofauna (ed in particolare dei lombrichi) nella creazione di spazi vuoti e di aggregazioni, che si formano spesso nei canali alimentari degli Anellidi terricoli.

Per quanto concerne i micro-aggregati, invece, sono le sostanze organiche ad interagire con le frazioni più fine del suolo e a tenerle insieme. I polisaccaridi rappresentano senz'altro un importante legante fra le particelle granulometriche, ma, essendo facilmente degradabili, gli aggregati che risultano dall'interazione con essi, sono da considerarsi piuttosto labili. Le sostanze umiche, invece, se in stato flocculato, per la presenza di un'abbondante diffusione di controioni flocculanti, acquisiscono un importante ed irreversibile ruolo cementante. Queste molecole risultano essere, quindi, degli agenti strutturanti che garantiscono un'elevata stabilità. Proprio per la formazione di aggregati stabili e per l'aumento della capacità di ritenzione idrica, la presenza di SO garantisce un importante ruolo di contrasto ai fenomeni erosivi.

Oltre alla struttura, esistono strette connessioni fra il tenore in sostanza organica ed altre proprietà fisiche del suolo.

La densità apparente è fortemente condizionata dal contenuto di SO. Questo gruppo di sostanze ha un peso specifico inferiore rispetto a molti componenti minerali del suolo, ma contribuisce in misura piuttosto ridotta alla massa totale. Di per sé, quindi, non avrebbe ingerenze notevoli sulla densità apparente, se non fosse che condiziona di molto la porosità del terreno. Per rendere l'idea dell'influenza su questo aspetto della fertilità del suolo, un aumento del contenuto di SO in un suolo di entità pari all'1%, causa nientemeno che una riduzione superiore al 30% della densità apparente.

Il colore è un altro aspetto fisico del suolo condizionato dal quantitativo di SO; essa, infatti tende a far assumere alla terra un colore più scuro, con ripercussioni sull'assorbimento della radiazione solare.

La ritenzione idrica è molto elevata nella SO e soprattutto nell'humus, grazie alla struttura spugnosa di alcuni suoi componenti. In generale, la SO è in grado di trattenere acqua fino a 20 volte il proprio peso (anche se questa risulta poco disponibile per l'assorbimento radicale a causa dell'elevato potenziale idrico), oltre a determinare una maggiore porosità e quindi un maggiore immagazzinamento d'acqua negli spazi vuoti.

La temperatura del suolo risulta condizionata dai due aspetti precedentemente esposti; in parte per la radiazione solare assorbita, in parte per la capacità termica dell'acqua, se aumenta la SO del suolo, tendenzialmente aumenta anche la temperatura e diminuiscono gli sbalzi termici (Badalucco et al., 2005; Celi et al., 2017; Kononova, 1966).

2.3.2 Funzioni nutrizionali

Gli effetti della SO sulla nutrizione vegetale possono essere divisi in diretti ed in indiretti.

Attraverso la mineralizzazione, ad esempio, vengono messi direttamente a disposizione dell'assorbimento radicale i costituenti delle molecole organiche, i quali vengono trasformati in forme inorganiche di macro e micronutrienti. Uno degli elementi di cui la SO costituisce una fonte essenziale è senz'altro l'azoto. Anche il rilascio di microelementi è una funzione tipica ed insostituibile della materia organica, soprattutto considerando che una concimazione a base di tali specie chimiche risulterebbe difficilmente attuabile, da un punto di vista economico, sulle colture in pieno campo. Non va poi dimenticata la presenza, nel suolo, di vitamine; anche se le piante possono prodursene autonomamente, un supplemento può comunque avere effetti positivi.

Indirettamente la sostanza organica agisce attraverso i processi di strutturazione, immobilizzazione, chelazione, adsorbimento cationico ed aumento della solubilità.

Innanzitutto, il miglioramento e la conservazione della porosità rendono possibile un corretto svolgimento degli scambi, anche nutrizionali, fra le fasi del terreno e fra suolo e pianta. Inoltre, alcune molecole organiche sono in grado di porsi negli interspazi delle argille facendo in modo che alcuni ioni non vengano intrappolati nelle particelle minerali.

L'immobilizzazione dei nutrienti, invece, consiste nel loro assorbimento all'interno delle cellule dei microrganismi; in tal modo entrano a far parte della biomassa microbica stessa e vengono preservati dalla perdita (ad esempio per insolubilizzazione o per lisciviazione, a seconda della natura chimica delle specie immobilizzate).

Grazie ai gruppi funzionali reattivi, le sostanze umiche sono in grado di creare dei complessi e dei chelati con i metalli di transizione, i quali potrebbero rendersi indisponibili con la cristallizzazione. Nella chelazione, i gruppi coordinanti (ossia quelli della macromolecola umica) sono legati fra di essi, oltre che con il metallo. Le sostanze chelate, quindi, possono essere rilasciate lentamente con la mineralizzazione o essere strappate da composti presenti nelle secrezioni radicali, con una capacità chelante superiore rispetto a quella della SO; in questo modo si creano dei chelati solubili disponibili per l'assorbimento radicale.

L'humus ha poi un'elevata capacità di scambio cationico (Businelli, 2009) che gli permette di trattenere gli elementi (quelli in forma cationica) originati dalla stessa mineralizzazione o anche derivanti dalla concimazione minerale. Si stima che dalla SO dipenda fino al 70% della capacità di scambio cationico.

La disponibilità dei nutrienti può aumentare attraverso la solubilizzazione di alcuni composti, che è messa in atto grazie alla parziale acidificazione che deriva dalla stimolazione alla respirazione microbica favorita dalla presenza di materia organica, anche se il tamponamento da parte delle micelle colloidali attenua questo effetto. Alcuni elementi, tra cui il boro, vengono resi maggiormente assimilabili grazie all'affinità considerevole con le sostanze umiche. Un macronutriente la cui disponibilità giova della presenza di SO è senz'altro il fosforo, grazie all'attività enzimatica del suolo ma anche attraverso un meccanismo che prende il nome di "protezione dei fosfati". Il fosforo, difatti, viene protetto dalla fissazione fosfatica, che avviene per adsorbimento anionico positivo specifico, sottoforma di ione monofosfato ($H_2PO_4^-$), sul complesso di scambio di ossidrossidi a base di alluminio, i quali hanno carica positiva a valori di pH sopra la neutralità. In presenza di SO, i fosfati possono legarsi attraverso ponti di ferro o di alluminio, i quali vengono scissi da alcune sostanze

comprese nelle secrezioni radicali, rendendo possibile alle piante l'assorbimento del fosforo (Badalucco et al., 2005; Nannipieri et al., 2005; Sequi, 1989; Stevenson e Cole, 1999).

2.3.3 Attività enzimatiche

Durante i mesi invernali con temperature più rigide e poco favorevoli allo sviluppo dei microrganismi edafici, una concimazione azotata a base di urea presenta un esito positivo (compatibilmente con la fase fenologica della coltura). L'urea viene infatti idrolizzata ad azoto ammoniacale in pochi giorni, anche se in teoria l'assenza di organismi dotati di enzimi idrolitici non permetterebbe questo processo.

L'esempio sopra riportato collima con la constatazione della presenza di molecole di natura enzimatica nella sostanza organica del suolo. Non ci si riferisce solo agli enzimi microbici, bensì anche a sostanze attive extracellulari; infatti, l'attività catalitica enzimatica avviene nel suolo anche in assenza di organismi viventi. La SO, così, può essere considerata ancor più in un'ottica di componente attiva, piuttosto che meramente passiva, del suolo. Ben quattro classi di enzimi possono essere annoverati fra quelli presenti nel terreno: idrolasi, ossidoreduttasi, liasi, e transferasi.

Il suolo è in grado di catturare gli enzimi sintetizzati dai microrganismi, sia quelli che agiscono all'interno della cellula e che ne fuoriescono al momento della lisi cellulare in seguito a morte (endoenzimi) sia quelli che vengono spontaneamente riversati all'esterno della membrana plasmatica per svolgere delle funzioni nell'ambiente pedologico (esoenzimi). Questo accumulo di enzimi è permesso dalla loro immobilizzazione, vale a dire il passaggio da catalizzatore omogeneo (in grado di agire in una sola fase) a catalizzatore eterogeneo (che può esplicare la sua attività sul substrato in fasi diverse). L'immobilizzazione è permessa dall'adsorbimento degli enzimi su particelle solide del terreno, in particolare di natura colloidale (argille, sostanze umiche, ossidrossidi, ma anche complessi organo-minerali); a permettere l'adsorbimento sulle micelle umiche sono interazioni elettrostatiche, forze di Van der Waals, legami idrogeno e interazioni con gruppi idrofobici della macromolecola.

Con l'immobilizzazione, avviene anche la stabilizzazione degli enzimi, cui si deve la capacità di permanere in forma attiva nel terreno anche in presenza di agenti denaturanti fisici, chimici o biologici, tanto che la temperatura di inattivazione dell'attività enzimatica nel suolo risulta di 20°C più elevata rispetto a quella sufficiente per lo stesso enzima in forma di catalizzatore omogeneo. Infine, con la stabilizzazione, viene modificato anche il pH ottimale per l'attività dell'enzima, a causa di una parziale modifica della porzione di enzima limitrofa al sito attivo (Nannipieri et al., 2005; Badalucco et al., 2005).

2.3.4 *Funzioni fisiologiche*

Le attività fisiologiche attribuite alla sostanza organica del suolo sono essenzialmente delle attività paraormonali, ovviamente in riferimento agli ormoni vegetali quali auxine, gibberelline, citochinine, etilene, acido abscissico e siderofori. Questi, possono infatti essere prodotti anche dalla microflora edafica; inoltre, è probabile che le stesse molecole umiche, sia in maniera diretta che in modo indiretto, possano esercitare attività sul funzionamento dell'organismo vegetale. È opportuno però ricordare che la conoscenza in merito a tali aspetti non è ancora del tutto completa.

Le funzioni paraormonali delle sostanze umiche che sembrano essere state osservate possono essere divise in cinque gruppi.

In primo luogo, ci sono gli aspetti legati alla nutrizione delle piante: le macromolecole di humus influenzano specifiche attività enzimatiche delle cellule radicali, che sono deputate all'assorbimento di nutrienti; in particolar modo si fa riferimento alle permeasi. Indirettamente, poi, la sostanza organica svolge un ruolo importante per limitare gli sbilanciamenti nei rapporti fra i nutrienti.

Un'altra funzione importante sembra essere lo stimolo della divisione cellulare, che risulta collegata alla proliferazione dei tessuti radicali, attraverso l'agevolazione dell'attività di duplicazione del DNA.

Se invece l'influenza delle molecole umiche si sposta su trascrizione, traduzione e sintesi proteica, pare venga stimolato l'accrescimento della pianta.

Un ritardo della senescenza potrebbe dipendere dall'influenza sulla biosintesi proteica.

Infine, l'adsorbimento e di fatto il trasporto di fitormoni, nonché una serie di interazioni con sostanze inibitrici o stimolanti della fisiologia vegetale da parte della SO, potrebbero avere influenze su altri aspetti del funzionamento dell'organismo vegetale, come ad esempio i processi della respirazione e della fotosintesi (Sequi, 1989).

2.3.5 *Interazione con molecole organiche di sintesi*

Molecole di sintesi estranee alla comune composizione del suolo, siano esse organiche od inorganiche, possono pervenire ad esso attraverso la somministrazione volontaria in ambito agricolo, oppure accidentalmente con apporti legati sempre alle pratiche agronomiche o invece dovuti all'inquinamento atmosferico. Questi composti, se influiscono sulla vita degli organismi del suolo, vengono classificati come xenobiotici ed imprescindibilmente causano degli squilibri ecologici nell'habitat pedologico.

La sostanza organica riduce gli effetti legati a queste molecole grazie all'inattivazione derivante dal loro utilizzo nel metabolismo batterico e grazie all'adsorbimento sulle molecole umiche (Sequi, 1989). Difatti grazie all'elevata superficie specifica, alla capacità di scambio cationico, alla presenza di gruppi idrofobi ed idrofili, le sostanze umiche possono adsorbire, e di fatto trattenere, molti contaminanti rallentandone la lisciviazione e di fatto preservando le falde acquifere (Braschi, 2021).

Anche gli antibiotici possono arrivare al terreno (o se di natura endogena possono essere frutto del metabolismo microbico stesso (Kononova, 1966)) ed interagire con la sostanza organica. In caso di apporti di letame, digestato ed altri ammendanti organici, soprattutto di origine animale, la materia organica stessa può essere fonte di sostanze antibiotiche; per ovviare a tale problema si rende necessario sottoporre il materiale contaminato a digestione anaerobica seguita da compostaggio aerobico, preventivamente allo spandimento al suolo (Cocco et al., 2022).

Capitolo 3

SCOPO DELLA TESI

Il presente lavoro di tesi si inserisce nel progetto bandito dal Ministero dello Sviluppo Economico (oggi Ministero delle Imprese e del Made in Italy) della Repubblica Italiana in data 2/08/2019 e denominato “Agrifood”, in cui il gruppo di ricerca di Chimica Agraria dell’Università Politecnica delle Marche partecipa in collaborazione con altri gruppi.

Lo scopo del presente lavoro è quello di valutare l’evoluzione della sostanza organica nel suolo di parcelle dell’interfilare di un vigneto del centro Italia, più precisamente dell’entroterra marchigiano, gestito con tecniche conservative. I trattamenti che caratterizzano le parcelle valutate sono: sovescio effettuato con trifoglio alessandrino (inerbimento temporaneo); inerbimento naturale permanente. A tal fine, oltre alle più comuni indagini sulle proprietà fisiche e chimiche del suolo, sui campioni prelevati sono state eseguite analisi del contenuto di carbonio organico e di quello umificato e non umificato ed è stato eseguito il frazionamento tra acidi umici ed acidi fulvici. Per la valutazione dell’attività della biomassa microbica del suolo è stato determinato il carbonio della biomassa e la respirazione basale del suolo, indice generale dell’attività microbica e della mineralizzazione della sostanza organica.

Lo scopo finale del lavoro è stato quello di valutare la capacità di resistenza alla degradazione della sostanza organica apportata con il sovescio o con l’inerbimento permanente, rispetto ad un suolo non gestito, e la qualità dell’humus formato che influenza direttamente la fertilità fisica chimica e biologica del suolo.

Capitolo 4

MATERIALI E METODI

4.1 Area di studio

4.1.1 Inquadramento del sito

L'azienda agricola presso la quale sono stati prelevati i campioni è denominata "Azienda Agricola Edoardo Dottori"; questa insiste nel comune di Maiolati Spontini, nell'entroterra della provincia di Ancona. L'estensione della superficie destinata alla prova sperimentale è pari a quattro ettari. Le coordinate del sito sono: 43°27'36''N 13°09'11''E.

Secondo la Worldwide Bioclimatic Classification System (Rivas-Martínez e Bases, 1993), il territorio ricade nella variante Sub-Mediterranea del macro-bioclima Temperato.

Il tipo di suolo può essere classificato come Halpic Calcisol, come riportato nella carta dei suoli d'Italia (Assam, 2016).



Figura 4-1: In rosso la superficie del sito della sperimentazione (immagine ottenuta con Google Earth Pro).

Per quanto concerne le caratteristiche agronomiche del vigneto, si riportano i seguenti dati: l'esposizione prevalente è a Nord-Est con una pendenza del 20%; l'impianto, a Verdicchio, possiede nove anni (la piantumazione risale al 2014) ed è allevato a guyot bilaterale su portinnesto 1103 Paulsen. Il sesto d'impianto è di 3 m fra le file per 1,10 m lungo fila. Il suolo dell'interfila è inerbito, così come quello sotto la fila.

4.1.2 Campionamento

Il prelievo dei campioni è avvenuto in data 9 novembre 2022.

Il monitoraggio riguarda due differenti metodi di gestione del terreno ed un testimone:

- (1) Gestione dell'interfila con inerbimento controllato e sovesciato a base di *Trifolium alexandrinum* (trifoglio alessandrino); il trifoglio viene sfalciato due volte durante la stagione vegetativa e sovesciato alla fine di questa (indicativamente a fine ottobre) con trinciatura ed interrimento (tramite lavorazione superficiale); viene poi riseminato annualmente con una dose di circa 30 kg/ha. Questo tipo di gestione viene ripetuto da 5 anni.
- (2) Gestione dell'interfila con inerbimento naturale permanente, mai lavorato.
- (3) Testimone: capezzagna con sporadico inerbimento.

Per ognuna delle tesi e per il testimone sono stati individuati cinque punti di prelievo, dislocati equidistanti su tutta la lunghezza dell'interfilare o della capezzagna, rispettivamente. La scelta degli interfilari per le due tesi è ricaduta su quelli centrali nell'appezzamento, di modo da essere più rappresentativo della gestione a inerbimento controllato o naturale. Per ogni punto, sono stati estratti due campioni dal peso di circa 1 kg: il primo campione (T; Top-layer) ad una profondità da 0 a 0,2 m, il secondo campione (D; Deep-layer) da 0,2 a 0,4 m. Per la capezzagna e la tesi 2 è stato necessario asportare lo strato più superficiale del terreno eliminando il cotico erboso, prima del prelievo dei campioni.

In laboratorio si è provveduto all'essiccazione all'aria ed alla staccatura manuale del suolo a 2 mm. In seguito alla staccatura, i cinque campioni della stessa profondità e della stessa tesi sono stati riuniti in un campione unico prelevando 200 g da ognuno (per un totale di 1 kg); su questi campioni sono state condotte le analisi, ciascuna in cinque repliche per le elaborazioni statistiche successive.



Figura 4-2: Il sito di studio; visibili la capezzagna (in basso a sinistra) e l'alternanza delle due tesi.

4.2 Determinazione del pH

Il pH del suolo, preventivamente essiccato e stacciato a 2 mm, è stato misurato per via potenziometrica nella sospensione suolo-acqua distillata mescolati nel rapporto 1:2,5 (m/m) e lasciati riposare per due ore (Gazzetta Ufficiale n.248).

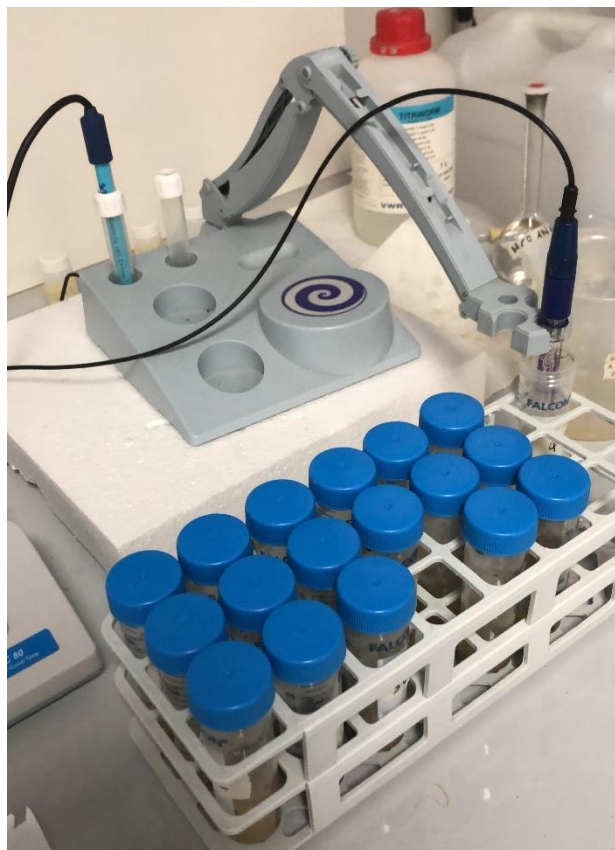


Figura 4-3: pHmetro e falcon contenenti i campioni utilizzati per l'analisi.

4.3 Determinazione del contenuto totale di metalli e microelementi

Per la determinazione degli elementi Cr, Cu, Fe, K, Mn, Ni, Pb e Zn è stato seguito il protocollo in acqua regia di Kasassi et al. (2008), con alcune modifiche: 0,5 g di terreno secco e 2 mL di perossido di idrogeno (H_2O_2) al 30% sono stati lasciati reagire durante la notte; dopo 12 h è stato effettuato l'attacco acido aggiungendo 7 mL di HNO_3 . Le provette sono state quindi poste in un bagno d'acqua preriscaldato ($>85\text{ }^\circ\text{C}$) per 15 ore; al termine delle quali i campioni sono stati filtrati. L'analisi degli estratti così ottenuta è stata effettuata mediante spettrometria di emissione ottica (ICP-OES, Agilent mod. 5800).

4.4 Determinazione della sostanza organica

Il principio per la determinazione della sostanza organica si basa sul metodo Walkley-Black (1934) che prevede l'ossidazione del carbonio organico presente nel campione di terreno ad anidride carbonica in ambiente acido, mediante soluzione di bicromato di potassio in presenza di acido solforico.

In breve, il procedimento prevede di aggiungere ad una quantità nota di suolo secco e setacciato a 2 mm 10 ml della soluzione 1N di $K_2Cr_2O_7$, 20 ml di acido solforico ed attendere l'ossidazione per 30 minuti. La reazione viene bloccata con acqua deionizzata ed in seguito vengono aggiunti H_3PO_4 (aumenta l'acidità rendendo più netto il viraggio) e l'indicatore difenilammina. La titolazione con sale di Mohr (solfato ferroso ammonico) 0.5 N viene condotta goccia-goccia in beuta mantenuta in agitazione con ancorotta.

Parallelamente viene effettuata anche la prova in bianco per determinare il fattore di correzione (rapporto tra ml teorici/ml reali) che tiene conto della facile ossidazione del Fe dunque dell'instabilità del titolo della soluzione di Sale di Mohr.

Per passare dal C organico determinato, si assume che il esso è il 58% della Sostanza Organica Totale (SO) per sapere la percentuale di SO basta moltiplicare il C% 1,72.

4.5 Misura del Carbonio Biomassa

La tecnica consiste nel calcolare la differenza tra la quantità di carbonio organico, solubile in solfato di potassio, di un campione di suolo fumigato (F) e quello dello stesso campione non fumigato (NF) (Vance *et al.*, 1987). Il procedimento analitico prevede la fumigazione con cloroformio che ha azione biocida, in appositi essiccatori dove viene creato il vuoto e mantenuto per un minimo di 16 ore. I campioni F e NF vengono addizionati con soluzione estraente di solfato di potassio (K_2SO_4 0,5 M), agitati centrifugati e filtrati. Una volta completata l'estrazione (F e NF), viene prelevata una nota aliquota di estratto al quale sono aggiunti H_3PO_4 , $K_2Cr_2O_7$ (0.4N) e H_2SO_4 . Tutti i campioni vengono messi in stufa a 120°C per 30 minuti..

In parallelo viene condotta la prova in bianco dove, al posto degli estratti viene utilizzata la sola soluzione ml di K_2SO_4 .

La reazione di ossidoriduzione viene bloccata con H_2O e viene aggiunto l'indicatore fenoltaleina. Segue la titolazione del cromato in eccesso con il Fe del sale di Mohr (0.033 N) che fa virare i campioni da arancio-giallo a verde chiaro.

Il C-Biomassa viene espresso come mg C/Kg di campione dalla differenza tra g C/Kg misurati nello stesso campione fumigato e non fumigato e moltiplicato per un apposito fattore di correzione empirico 2,64 e calcolato come segue:

$$\text{mg C biomassa /Kg} = [(C-F) * f * N * 3 * dil] * 1000 / P$$

C= ml teorici Sale di Mohr usati nella titolazione del bianco

F= ml Sale di Mohr usati nella titolazione del campione F

f= fattore di correzione

N= normalità del Sale di Mohr

3= peso equivalente del C (massa 12/ valenza in reazione redox 4)

dil = fattore diluizione dato da rapporto fra ml totali della soluzione estraente usati per campione e ml di estratto usati nella titolazione

P= peso in g del campione

1000 = fattore percentuale per convertire in mg/Kg



Figura 4-4: Fumigazione dei campioni sotto vuoto con cloroformio.

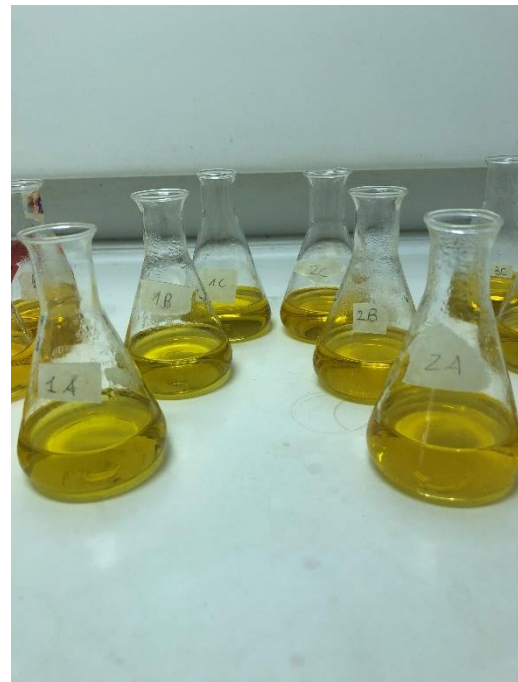


Figura 4-5: Surnatante filtrato dei campioni, con aggiunta dei reagenti; si noti la differenza di tonalità per le repliche dei campioni della stessa tesi a diverse profondità.



Figura 4-6: Viraggio del campione titolato con sale di Mohr.

4.6 Misura della respirazione microbica basale del suolo

La respirazione del suolo viene determinata attraverso un metodo titrimetrico di misurazione della CO₂ sviluppata dalla biomassa microbica (Bloem et al.,2008). Durante l'incubazione del suolo all'interno di un sistema chiuso, la CO₂ evoluta viene intrappolata da una soluzione di NaOH (0,2 M) e successivamente titolata con HCl (0,1 M) dopo l'aggiunta di BaCl₂ (0.75N) e l'indicatore fenoftaleina. Le titolazioni caratterizzate da un viraggio da magenta a bianco vengono eseguite regolarmente (a distanza di 3 giorni e via via più dilazionando nel tempo), finché non si ottiene la stabilizzazione della respirazione con valori simili in titolazioni successive. I risultati sono espressi come mg di C respirato su g di suolo e si calcolano come a seguire:

$$\text{mg C respirato/Kg} = [(B-C) * N * 6] * 1000 / P$$

B= ml HCl usati per i bianchi

C= ml HCl usati nel campione

N= Normalità del titolante (HCl)

6= peso equivalente Carbonio (massa 12/ 2 valenza in reazione formazione di CO₂)

P= peso in grammi di campione

1000= fattore percentuale per convertire in mg/Kg



Figura 4-7: Viraggio della soluzione di NaOH 0,2 M alla titolazione con HCl 0,1 M.

4.7 Estrazione dell'humus e frazionamento del Carbonio umico

Il carbonio totale estraibile (TEC) viene estratto ponendo il suolo secco stacciato a 0,5 mm con una soluzione 0,1 M di sodio pirofosfato ($\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) e sodio idrossido (NaOH) (Schnitzer, 1982). L'estrazione riguarda una buona percentuale di humus (80% circa) mentre il restante rimane legato alle componenti minerali del suolo e costituisce l'umina. Di questo estratto un'aliquota viene tenuta da parte per la titolazione del TEC, mentre la restante è dedicata al frazionamento e determinazione dei componenti umici e fulvici. Il frazionamento viene eseguito aggiungendo all'estratto H_2SO_4 al 50% (fino a portare il pH della soluzione tra 1 e 2), tale soluzione provoca la neutralizzazione dei gruppi funzionali acidi e la precipitazione degli acidi umici (HA); gli acidi fulvici (FA) rimangono sospesi unitamente alle impurità organiche.

Per purificare gli FA l'estratto viene fatto passare attraverso resine di polivinilpirrolidone (PVP) che intrappola solo la componente umica che viene infine recuperata per lisciviazione con NaOH (0,5 M).

La titolazione viene dunque eseguita sulle tre aliquote separatamente per la determinazione del TEC, FA e degli HA seguendo lo stesso metodo utilizzato per il carbonio organico.

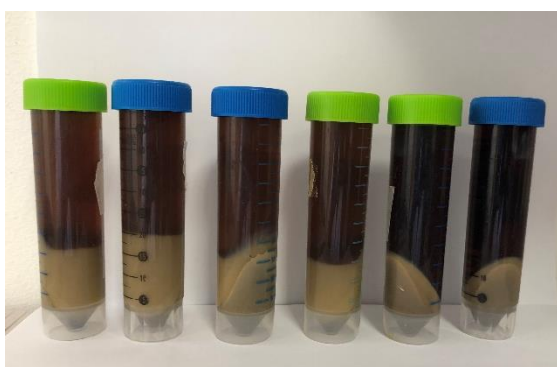


Figura 4-8: Estratti di terreno con sodio pirofosfato, centrifugati; si noti la diversa colorazione del surnatante fra le tesi e la capezzagna (da sinistra, due falcon sovescio, due inerimento naturale e due capezzagna).

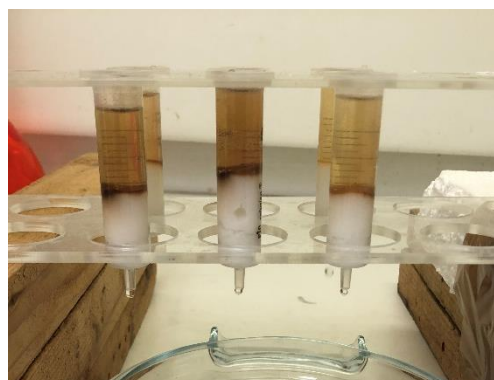


Figura 4-9: Procedimento della purificazione degli acidi fulvici su colonna di polivinilpirrolidone.

Capitolo 5

RISULTATI E DISCUSSIONE

5.1 Analisi preliminari

Tabella 5.1: Caratteristiche chimico-fisiche dei campioni della sperimentazione, analizzati secondo i protocolli del N.° 248 della Gazzetta Ufficiale.

Tesi	Tessitura	Sabbia g Kg ⁻¹	Limo g Kg ⁻¹	Argilla g Kg ⁻¹	Conducibilità Ds m ⁻¹	Capacità di scambio cationico meq 100 g ⁻¹	N (tot) g Kg ⁻¹	P (assimilabile) mg Kg ⁻¹
1T	tend. argilloso	309	340	351	0,746	2,2	1,45 mediamente dotato	12,1 medio
1D	tend. argilloso	302	356	342	0,729	21,2	0,65 scarsamente dotato	3,7 molto basso
2T	tend. argilloso	279	379	342	0,708	21	0,95 scarsamente dotato	6,1 basso
2D	tend. argilloso	321	358	321	0,612	20	0,75 scarsamente dotato	2,6 molto basso
3T	tend. argilloso	333	343	324	1,068	22,1	0,85 scarsamente dotato	8,1 basso
3D	tend. argilloso	362	326	312	0,691	21,3	0,7 scarsamente dotato	7,1 basso

Nella Tabella 5.1 sono riportate le analisi chimico-fisiche inerenti i campioni di suolo analizzato. Molti dei parametri si confermano simili: la tessitura può essere classificata come tendenzialmente argillosa. La conducibilità elettrica si attesta attorno a valori che indicano il terreno come “non salino”, mentre la capacità di scambio cationico può essere

definita come medio-alta. Da media a scarsa è la dotazione in azoto (g Kg^{-1}) e fosforo assimilabile (mg Kg^{-1}).

Anche i dati relativi al valore di pH in soluzione acquosa, si rivelano costanti in tutti i campioni analizzati; ciò si deve al fatto che i suoli sono relativi al medesimo sito di campionamento. I valori riscontrati sono riportati nella tabella 5.2 e definiscono il terreno come basico

Tabella 5.2: Valori medi di pH e loro deviazione standard nei suoli analizzati secondo protocollo N.° 248 della Gazzetta Ufficiale.

Tesi	Media e deviazione standard
1T	8,17±0,08
1D	8,32±0,08
2T	8,21±0,06
2D	8,32±0,04
3T	8,21±0,03
3D	8,23±0,05

Infine, nella Tabella 5.3, è riportato il contenuto di elementi nutritivi di ciascun campione di suolo, espressi in mg Kg^{-1} .

Tabella 5.3: Contenuto di alcuni elementi misurato in ogni campione (mg Kg^{-1}).

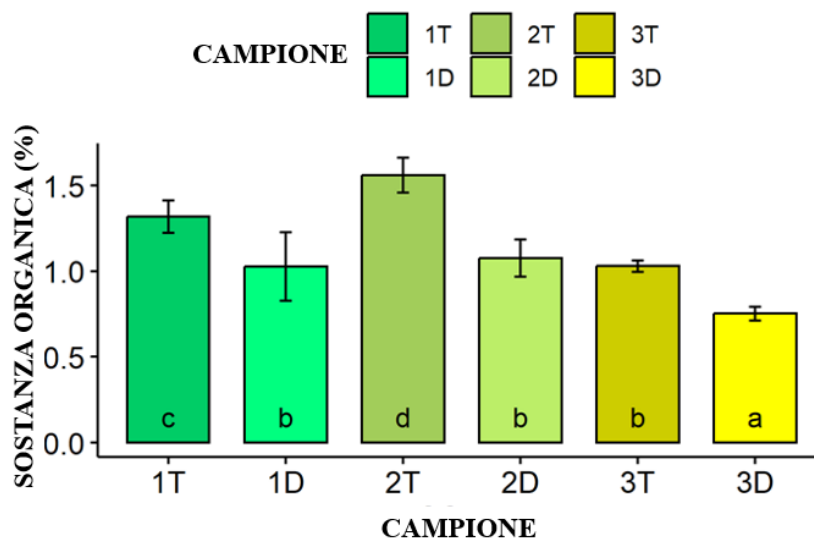
Tesi	Cr	Cu	Fe	K	Mn	Ni	Pb	Zn
1T	52,42	40,99	24532,80	4597,81	550,78	41,58	9,75	64,85
1D	51,22	45,04	24732,80	4122,32	583,83	40,28	11,35	58,80
2T	54,87	45,24	26499,47	4756,05	562,03	42,78	9,95	63,40
2D	52,37	30,09	25599,47	4448,80	539,88	41,28	9,35	56,25
3T	52,82	53,59	24132,80	3902,55	624,83	41,03	10,60	59,25
3D	57,97	43,39	29182,80	4572,80	801,93	44,23	14,85	68,85

5.2 Contenuto e composizione della sostanza organica del suolo

Tabella 5.4: Contenuto di sostanza organica del suolo (in %) calcolato su cinque repliche per ogni tesi analizzata per la determinazione del Carbonio Organico Totale (TOC).

Tesi	Repliche	Media	Deviazione Standard
1T	5	1,32 ^c	0,10
1D	5	1,03 ^b	0,20
2T	5	1,56 ^d	0,10
2D	5	1,08 ^b	0,11
3T	5	1,03 ^b	0,03
3D	5	0,75 ^a	0,04

Figura 5-1: Istogramma raffigurante i valori di sostanza organica (in %), dei campioni analizzati.



1 = sovescio; 2 = inerbimento permanente; 3 = capezzagna

T = 0-20 cm; D = 20-40 cm

Le lettere minuscole indicano le Differenze Minime Significative al 95%.

Come riportato nella Tabella 5.4, e come visualizzabile nel grafico riportato in Figura 5-1, il contenuto di carbonio organico fra le diverse tesi risulta statisticamente differente. Infatti,

per quanto riguarda gli orizzonti superficiali (campioni da 0 a 20 cm di profondità), il contenuto di sostanza organica si presenta maggiore nel caso del suolo gestito con inerbimento naturale permanente (media dell'1,56%). Segue la gestione con *Trifolium alexandrinum* sovesciato (1,32%) ed infine la capezzagna (con l'1,03%). I primi due dati possono essere considerati nella media indicata per i vigneti (che va dall'1,2 al 2%), mentre per la capezzagna il tenore risulta basso.

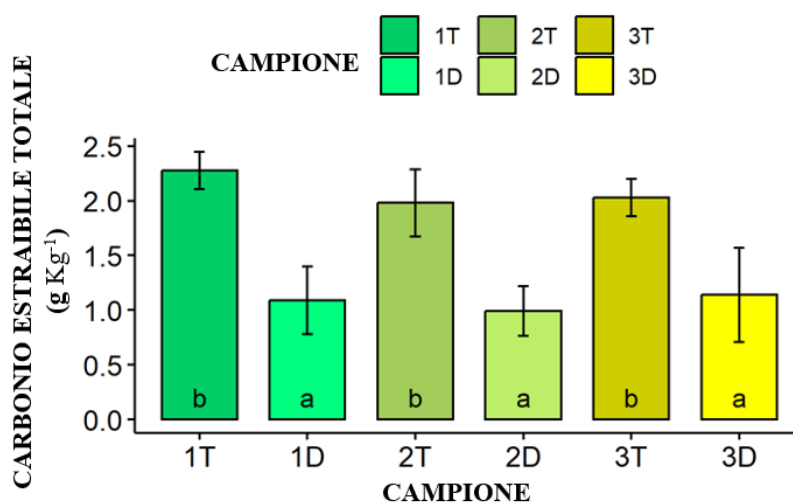
Per quanto riguarda gli orizzonti compresi fra i 20 ed i 40 cm, l'andamento del contenuto di SO rispecchia quello della superficie, ma con valori più bassi. La differenza fra le due tesi di gestione conservativa non è statisticamente significativa, mentre il contenuto di SO si conferma in entrambi i casi maggiore rispetto a quello della capezzagna, probabilmente a fronte di una maggiore presenza di residui radicali sotto gli inerbimenti.

Sebbene i risultati che scaturiscono dall'analisi dei campioni di suolo gestito con tecniche conservative siano incoraggianti, occorrerebbero più anni affinché il contenuto di sostanza organica si attesti attorno al valore accettabile del 2%. Inoltre, il semplice incremento quantitativo della SO in un suolo non comporta automaticamente che sia incrementata la fertilità generale dello stesso. È infatti necessario condurre ulteriori indagini (di tipo qualitativo), per comprendere se le pratiche dell'inerbimento e del sovescio influenzino in qualche modo la degradazione della SO o la sua trasformazione in forme più resilienti, come l'humus. A tal proposito è stato valutato il Carbonio Estraiabile Totale (indicato con la sigla inglese "TEC"), che comprende la frazione di carbonio organico non interessata da legami stabili alle strutture minerali del suolo; dall'estrazione viene quindi esclusa l'umina. Fanno invece parte del TEC altre sostanze, umificate e non; fra le prime, le frazioni principali che possono essere ricavate sono quella degli acidi umici (HA) e quella degli acidi fulvici (FA).

Tabella 5.5: Carbonio Estraiabile Totale (in g Kg⁻¹) calcolato su tre repliche per ogni tesi analizzata.

Tesi	Repliche	Media	Deviazione Standard
1T	3	2,28 ^b	0,17
1D	3	1,09 ^a	0,31
2T	3	1,98 ^b	0,31
2D	3	0,99 ^a	0,23
3T	3	2,03 ^b	0,17
3D	3	1,14 ^a	0,43

Figura 5-2: Istogramma raffigurante il contenuto di Carbonio Estraiabile Totale (g Kg^{-1}) dei campioni analizzati.



1 = sovescio; 2 = inerbimento naturale; 3 = capezzagna.

T = 0-20 cm; D = 20-40 cm.

Le lettere minuscole indicano le Differenze Minime Significative al 95%.

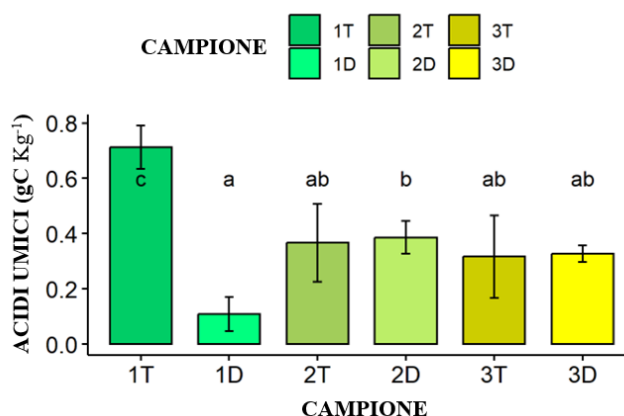
Tesi	Repliche	Media	Deviazione Standard
1T	3	0,71 ^c	0,08
1D	3	0,11 ^a	0,06
2T	3	0,37 ^{ab}	0,14
2D	3	0,39 ^b	0,06
3T	3	0,32 ^{ab}	0,15
3D	3	0,33 ^{ab}	0,03

Tabella 5.6: Acidi umici (gC Kg^{-1}).

Tesi	Repliche	Media	Deviazione Standard
1T	3	0,34 ^{ab}	0,05
1D	3	0,22 ^a	0,02
2T	3	0,33 ^{ab}	0,06
2D	3	0,19 ^a	0,09
3T	3	0,49 ^b	0,15
3D	3	0,37 ^{ab}	0,05

Tabella 5.7: Acidi fulvici (gC Kg^{-1}).

Figura 5-3: Istogramma raffigurante gli acidi umici ($gC Kg^{-1}$) dei campioni analizzati.

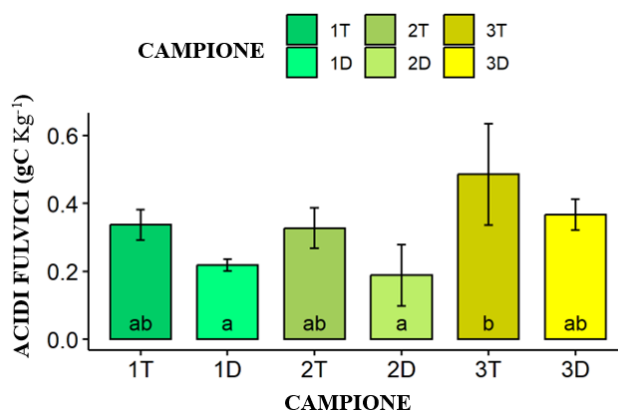


1 = sovescio; 2 = inerbimento naturale; 3 = capezzagna.

T = 0-20 cm; D = 20-40 cm.

Le lettere minuscole indicano le Differenze Minime Significative al 95%.

Figura 5-4: Istogramma raffigurante gli acidi fulvici ($gC Kg^{-1}$) dei campioni analizzati.



1 = sovescio; 2 = inerbimento naturale; 3 = capezzagna.

T = 0-20 cm; D = 20-40 cm.

Le lettere minuscole indicano le Differenze Minime Significative al 95%.

Osservando i dati che sono riportati nella tabella 5.5 e raffigurati nella figura 5-2, è possibile notare come il valore del TEC sia simile per tutte le tesi. Ciò indicherebbe che le tecniche di gestione conservativa del suolo siano poco efficaci nell'incrementare questa frazione di carbonio organico libera da legami stabili. Ad una maggiore profondità, i quantitativi sono pressappoco allineati, ma comunque più bassi rispetto ai valori dei campioni

superficiali; dove l'attività microbica è più intensa e gli apparati radicali sono più rigogliosi, questa forma di carbonio organico appare essere più abbondante.

In quanto agli acidi umici, fra i dati rappresentati nella figura 5-3, spicca il valore riscontrato nel terreno superficiale dell'interfilare sovesciato; questo appare molto più alto rispetto ai valori trovati per le altre due tesi e, pertanto, indica un effetto positivo della pratica sul contenuto di SO e sulla comparsa di forme di carbonio organico resistenti alla degradazione. Al contrario, nei campioni più profondi, il carbonio degli acidi umici è risultato inferiore rispetto a quello trovato per l'interfilare inerbito e la capezzagna. Tali considerazioni sono in accordo con quanto sperimentato in altri lavori su vigneto (Morelli et al., 2022; Simansky et al., 2023).

Per quanto riguarda gli acidi fulvici, non sembrano esserci differenze fra le tre tesi sia per i campioni di suolo superficiale che per quelli di suolo in profondità.. Solo nel caso della capezzagna si riscontrano valori più alti delle altre due tesi anche se statisticamente non significativi. Questi dati, incrociati con quelli relativi agli acidi umici, si risolvono nel rapporto C_{HA}/C_{FA} , che funge da importante indice di qualità dell'umificazione: perché tale processo proceda in modo ottimale, il valore del rapporto deve essere maggiore di uno. Questo fattore è importante perché sono gli acidi umici, con le loro caratteristiche, ad incidere positivamente sulla fertilità chimica e sull'attività microbica.

In base ai dati raccolti, sono stati calcolati degli indici riportati nella tabella 5.8: il rapporto TEC/TOC; la frazione non umificata (NH) calcolata come la differenza fra il TEC e la somma di HA e FA; l'Indice di Umificazione (HI), che è il rapporto tra la frazione non umificata e la somma di HA e FA; il Grado di Umificazione (DH), ovvero il rapporto fra la somma di HA e FA ed il TEC; il rapporto tra acidi umici ed acidi fulvici (C_{HA}/C_{FA}).

Tabella 5.8: Indici relativi alla SO calcolati per le tre tesi.

Tesi	TOC (%)	TEC/TOC (%)	NH (g Kg ⁻¹)	HI	DH (%)	C_{HA}/C_{FA}
1T	0,7674	29,79	1,23	1,17	46,09	2,11
1D	0,5988	18,26	0,76	2,33	30,00	0,50
2T	0,9070	21,88	1,29	1,86	35,00	1,12
2D	0,6279	15,87	0,42	0,72	58,00	2,05
3T	0,5988	25,46	1,23	1,53	39,51	0,65
3D	0,4360	16,18	0,45	0,64	60,87	0,89

TOC = Carbonio Organico Totale; TEC = Carbonio Estraiabile Totale; NH = frazione non umificata; HI = Indice di Umificazione; DH = Grado di Umificazione; HA = acidi umici; FA = acidi fulvici.

L'Indice di Umificazione (HI) è pari a 0 in presenza di una completa umificazione della SO; i valori riportati nella tabella 5.8 indicano un elevato HI (e cioè una bassa umificazione negli strati superficiali; nello strato profondo del suolo sovesciato l'umificazione è ancora minore, mentre nei due strati profondi del suolo con inerbimento permanente e della capezzagna si ha una buona umificazione, grazie all'azione indisturbata della flora microbica sulla sostanza organica presente.

Il Grado di Umificazione (DH) negli strati superficiali è più alto per il terreno sovesciato che per quello del terreno inerbito e della capezzagna., mentre più in profondità il maggior DH si ha nella capezzagna, seguita dalla superficie inerbita. Questo potrebbe essere dovuto al fatto che a tali profondità, in queste parcelle, il suolo sia stato lasciato indisturbato più a lungo (almeno nove anni nel caso della capezzagna, dall'epoca dell'impianto del vigneto).

Anche se il Grado di Umificazione risulta basso, nelle tesi superficiali di sovescio ed inerbimento il rapporto C_{HA}/C_{FA} è alto ed indica l'efficace influenza delle pratiche conservative sulla qualità della sostanza organica del suolo, essendo gli acidi umici i principali responsabili della fertilità biologica dei suoli.

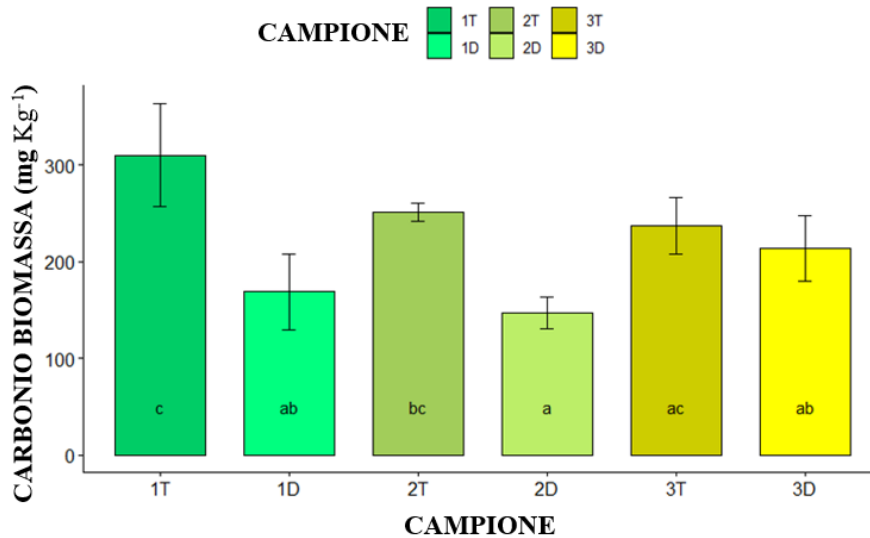
5.3 Crescita ed attività della biomassa microbica

Nel caso della biomassa microbica, come rappresentato nella figura 5-5, i suoli gestiti con pratiche conservative non mostrano aumenti particolarmente evidenti, se non in maniera moderata nel terreno interessato dal sovescio. Infatti, come mostrato anche da altri autori (Saviozzi et al., 2001; Monaci et al., 2017), il sovescio e l'inerbimento non sono strettamente connessi all'aumento della biomassa microbica, mentre influenzano positivamente la sua attività. Per questo è necessario condurre indagini sulla respirazione microbica del suolo.

Tabella 5.9: Valori di Carbonio Biomassa ($mg Kg^{-1}$) dei campioni delle tre tesi.

Tesi	Repliche	Media	Deviazione Standard
1T	3	310,01 ^c	53,30
1D	3	168,98 ^{ab}	39,19
2T	3	250,88 ^{bc}	9,21
2D	3	146,69 ^a	16,48
3T	3	236,83 ^{ac}	28,97
3D	3	213,72 ^{ab}	33,93

Figura 5-3: Istogramma rappresentante il valore di Carbonio Biomassa (mg Kg^{-1}) dei campioni delle tre tesi analizzate.



1 = sovescio; 2 = inerbimento naturale; 3 = capezzagna.

T = 0-20 cm; D = 20-40 cm.

Le lettere minuscole indicano le Differenze Minime Significative al 95%.

In quanto alla respirazione microbica, come si può osservare nella figura 5-6, l'attività maggiore è stata riscontrata nel suolo nel quale viene praticato il sovescio, con notevoli differenze fra le due profondità. Lo stesso vale per il suolo su cui insiste l'inerbimento naturale permanente. L'attività più bassa misurata è stata quella relativa alla capezzagna.

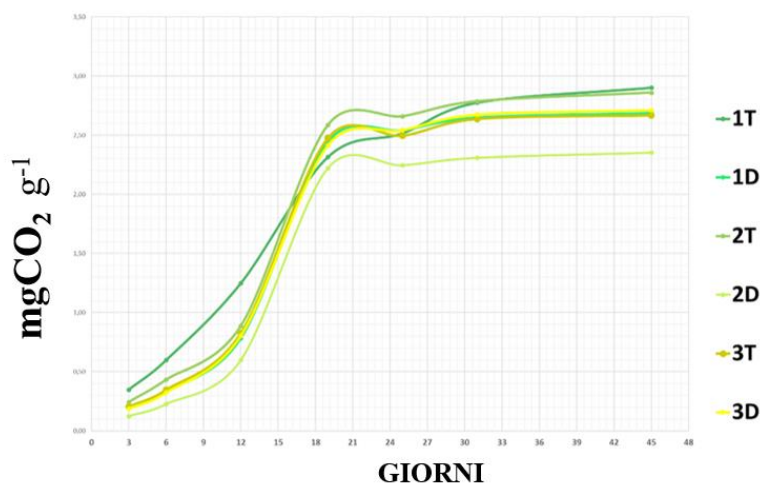


Figura 5-4: Andamento della respirazione microbica (mgC g^{-1}) nelle due profondità delle tre tesi nel corso dei 45 giorni di durata dell'esperimento.

L'analisi della respirazione microbica ha permesso di calcolare una serie di indici che semplificano la comprensione dei dati ottenuti. Tali indici vengono riportati nella tabella 5.10. Innanzitutto, è stata calcolata la respirazione basale (C_{bas}), ovvero il valore della respirazione registrato all'ultimo giorno dell'incubazione ed espresso come mg di C-CO₂ per Kg di suolo al giorno (d⁻¹). La respirazione cumulativa (C_{cum}), invece, è la somma totale di tutta la CO₂ prodotta durante la prova; essa viene espressa in C-CO₂ per Kg di suolo e può essere visualizzata nella figura 5-7, nella quale si nota una elevata differenza tra il suolo superficiale del terreno sovesciato e gli altri due e, all'interno di ogni tesi, differenza tra il suolo superficiale e quello in profondità nelle tesi con inerbimento e sovescio.

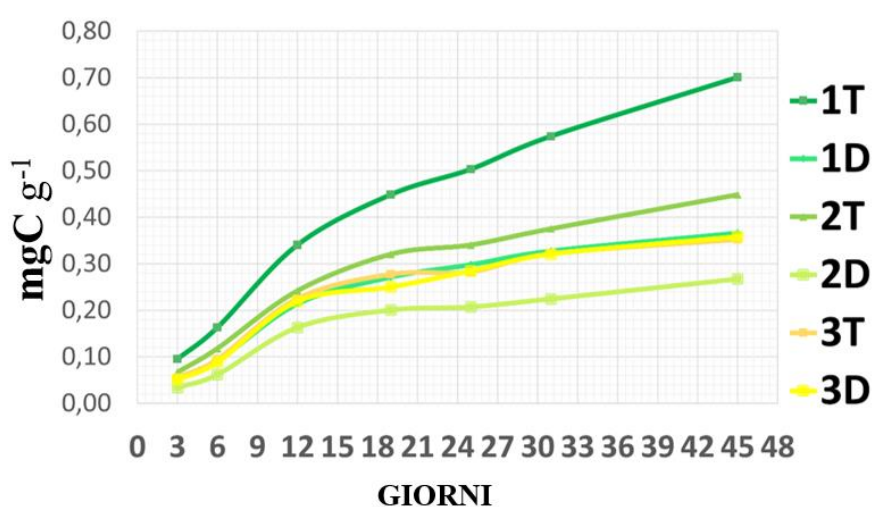


Figura 5-5: Respirazione cumulativa (C-CO₂ Kg⁻¹).

Altri indici sono: il quoziente metabolico (q_{CO_2}), che è la produzione oraria di anidride carbonica per unità di biomassa microbica. Valori ottimali di questo parametro risultano essere quelli inferiori all'unità; in tal caso denotano l'assenza di stress per la biomassa microbica che non viene disturbata da fattori esterni. Esso rappresenta il rapporto tra l'attività (respirazione basale) e il contenuto di carbonio della biomassa microbica e si esprime in mgC-CO₂ h⁻¹ mgCmic⁻¹ (Anderson e Domsch, 1993).; il quoziente di mineralizzazione (q_M) è il rapporto tra la respirazione cumulativa ed il Carbonio Organico Totale (TOC) espresso in percentuale. Tutti i parametri (C_{bas} , C_{cum} , q_{CO_2} , q_M) correlati all'attività microbica nei tre suoli alle due profondità testate sono riportati in Tabella 5-10, insieme al contenuto di carbonio della biomassa microbica (C_{mic}), al contenuto in azoto e al rapporto C/N.

Tabella 5.10: Indici di attività microbica, carbonio della biomassa microbica, contenuto in azoto e rapporto C/N dei tre suoli alle due profondità.

Tesi	Cmic	Cbas	Ccum	qCO ₂	qM	N	C/N
T1	310,01 ^c	9,05	700,7	1,22	9,17	1,45	5,27
D1	168,98 ^{ab}	2,76	379,3	0,68	6,36	0,65	9,17
T2	250,88 ^{bc}	5,24	448,7	0,87	4,96	0,95	9,53
D2	146,69 ^a	3,05	267,3	0,87	4,28	0,75	8,32
T3	236,83 ^{ac}	2,19	352,0	0,39	4,42	0,85	9,38
D3	213,72 ^{ab}	2,67	358,0	0,52	5,09	0,70	10,05

La respirazione basale è risultata più alta nel suolo sovesciato, seguito dal suolo con inerbimento permanente e da quello della capezzagna. I due suoli inerbiti mostrano differenze alle due profondità, che hanno un diverso contenuto di carbonio microbico. I valori derivati di qCO₂ sono risultati sempre inferiori all'unità escluso il suolo sovesciato alla profondità 0-20 cm che comunque mostra un valore vicino all'unità (1,22) e ciò sta ad indicare che in tutte le tesi la biomassa microbica non subisce particolari disturbi dovuti a fattori esterni e mostra un basso livello di stress. Altri lavori sull'argomento mostrano valori di qCO₂ comparabili con quelli del presente esperimento per suoli con inerbimenti permanenti o sovesci (Saviozzi et al, 2001; Yan et al, 2003; Francaviglia *et al.*, 2017). Gli alti valori di qCO₂ riportati in alcuni lavori di letteratura sono spesso associati ad un alto rapporto C/N della sostanza organica, con un incremento di respirazione basale associato all'aumento dei valori C/N (Spohn, 2015; Vittori Antisari *et al.*, 2021). Il presente esperimento sembra non confermare questo andamento, essendo il suolo T1 quello con più alto valore di Cbas e quindi di qCO₂ ma anche quello con più basso rapporto C/N; ciò può essere dovuto al basso range di variazione del rapporto C/N in questo esperimento (da 5,27 a 10,05) che è lontano dai valori di 24-30 richiesti per il miglior metabolismo microbico. Questo non toglie che la componente microbica nel presente lavoro presenti un ottimo metabolismo, indicato dai bassi valori di qCO₂, non disturbato dal basso rapporto C/N probabilmente perché la microflora è comunque impegnata nella mineralizzazione della sostanza organica apportata con le concimazioni organiche, oltre

che di quella apportata con le pratiche conservative. Ciò è anche dimostrato dall'elevato rilascio di azoto nel suolo sovesciato.

Riguardo ai valori di q_M , è possibile osservare che il suolo sovesciato presenta un valore elevato per lo strato superficiale, dovuto all'elevata respirazione basale che potrebbe sì provocare un rilascio elevato di CO_2 ma che nello stesso tempo rifornisce il suolo di quantità maggiore di elementi nutritivi.

Conclusioni

Il presente lavoro mette in evidenza l'importanza di pratiche conservative nella moderna viticoltura, come il sovescio e/o l'inerbimento permanente.

Si è riscontrato un aumento generalizzato del carbonio organico soprattutto negli strati superficiali di suolo, anche se la qualità della sostanza organica è risultata differente in termini di parametri di umificazione e della componente acidi umici.

Il suolo sovesciato ha mostrato la formazione di un humus di buona qualità.

Il contenuto di carbonio microbico non ha mostrato differenze significative tra le tesi, ma l'attività della biomassa microbica è risultata differente nei diversi suoli: il suolo sovesciato ha mostrato la più alta respirazione basale, indicando una bassa efficienza in termini di bilancio della CO₂ ma comunque un livello maggiore di mineralizzazione e quindi un maggiore rilascio di elementi nutritivi, tra i quali l'azoto.

Probabilmente per avere un miglior bilancio della CO₂ emessa sarebbe più opportuno eseguire un sovescio con un miscuglio di essenze piuttosto che con una sola, ma la questione resta aperta in quanto la scelta di una leguminosa potrebbe invece dare risultati migliori in termini di rilascio di elementi nutritivi.

Ringraziamenti

“Chi si darà all’agricoltura, sappia che dovrà avere la conoscenza di quest’arte, la facoltà di esercitarla ed il desiderio di portarla a compimento”

Sono solo al primo passo, dei tre raccomandati dal grande “agronomo” romano Columella nel “*De re rustica*”, ma fremo per potermi dedicare anche agli altri due. Quella dell’Agricoltura è senz’altro una delle attività umane (o delle arti, come preferisce l’Agronomo) più interessanti ed appaganti, ma è anche fra le più difficili e distanti dal modello ideale tratteggiato dalla società dei nostri giorni. Ciononostante, intendo dedicare ad Essa tutte le mie energie, tutta la mia fatica, le mie speranze e le delusioni che inevitabilmente faranno capolino dietro ogni curva.

Se sto inerpicandomi sul sentiero della mia vita nell’Agricoltura, però, lo devo in gran parte all’aiuto di molti, perché sono poche le verità più sminuite di quella contenuta nel proverbio: “l’unione fa la forza”. Ed io ho avuto la fortuna di trovare sempre l’ausilio di grandi donne e grandi uomini, nella formazione agraria, quanto nelle altre tappe della vita. Per questo non posso che ringraziare, qui, coloro che mi hanno sostenuto nel portare a compimento il lavoro conclusivo del mio percorso di Laurea.

Non me ne vogliano gli altri (e gli atei), ma come mi ha sempre raccomandato don Giampietro, il primo ad essere ringraziato deve essere il Padre Eterno. Nel Suo disegno spero di concludere il mio scosceso sentiero, ma senz’altro per Sua volontà ho raggiunto questa prima meta universitaria.

Poi ringrazio, colmo di sincera gratitudine, il mio relatore: il Prof. Costantino Vischetti. Il suo indiscusso valore accademico, si accompagna all’incredibile talento nella docenza; questo, insieme all’interesse per la disciplina della Chimica del Suolo, mi ha indirizzato nel chiedergli di poter svolgere con lui il mio lavoro di tesi.

Rivolgo i miei ringraziamenti anche alla mia correlatrice, la Dott.ssa Arianna De Bernardi, che non ha mai mancato di offrirmi il suo supporto e consiglio. Insieme a lei esprimo la mia riconoscenza alle dottoresse Enrica Marini (che avrebbe dovuto essere la mia seconda correlatrice) e Francesca Tagliabue, sempre disponibili. Ancora, esprimo la mia gratitudine al Dott. Gianluca Brunetti, a tutto il gruppo di Chimica Agraria e a tutti i docenti del Dipartimento

di Scienze Agrarie, Alimentari ed Ambientali dell'Università Politecnica delle Marche che hanno incrociato il mio percorso.

Ma otto anni di studi in agraria non sono stati sudati solo all'università... considero l'istruzione tecnica una delle migliori, purché condotta in maniera funzionale e purché chi la sceglie abbia le idee chiare; purtroppo la Scuola Italiana sta approdando al porto delle nuove e mediocri idee pedagogiche della Società Occidentale, ma ancora una volta devo ribadire di essere stato fortunato: ho fatto appena in tempo a conoscere il "vecchio" sistema. Per questo voglio ringraziare anche i miei professori dell'Istituto Tecnico Agrario. Ci sono quelli dello "Zoli" di Atri, dove ho frequentato i primi tre anni, e quelli del prestigioso "Ciuffelli" di Todi, presso il quale sono emigrato e sono giunto al diploma. Ringrazio in particolare: il Prof. Giulio Travaglini, il più carismatico ed esigente, incallito fumatore di pipa; il Prof. Francesco Nicola Giammarino, con la sua conoscenza moderna ed esauriente e la sua pazienza; il Prof. Enrico Fortunati, con la sua didattica impareggiabilmente chiara ed efficace; il Prof. Stefano Virgili, dall'approccio virtuoso e politico. Grazie anche a tutti gli altri docenti, che davvero hanno "lasciato il segno", grazie a tutti i tutori e gli educatori, perché anche loro sono complici della riuscita di questa tesi.

Il mio amore per l'Agricoltura viene da lontano, dalle mie Radici. Un grazie immenso spetta alla mia meravigliosa e, lo dico con orgoglio, tradizionale famiglia, di umili origini contadine (o "cafone", con le parole di Silone), trapiantata in città ma senza mai essersi allontanata dai rituali e dalla genuinità del mondo rurale. Grazie per il supporto, economico, affettivo ed intellettuale, ma soprattutto grazie per aver accolto la mia vocazione. Non è facile accettare che il proprio figlio scelga di voler vivere di Agricoltura. Quindi grazie a papà Alessandro e mamma Manuela, grazie anche a mia sorella Sofia Maria. Grazie poi ai nonni: Dino, Erlinda, Maria e Orlando (in ordine alfabetico, per non offendere nessuno). Grazie poi a tutte le altre persone della mia famiglia, allargata solo per definizione, stretta nella sostanza: zie e zii, cugine e cugini, prozie e prozii...

Grazie anche a te, Diana, che sei stata il primo capitolo di questo libro.

Mancano solo loro: le Amiche e gli Amici quelli che hanno inciso di più e quelli che lo hanno fatto di meno. Che cosa sarebbe l'uomo senza amici? Proprio nulla, davvero! Per questo grazie tante, siate voi compagni d'infanzia, d'amore o d'avventura, del Convitto tuderte o dell'università, di ogni altro contesto in cui ho vissuto e nel quale abbiamo potuto godere del semplice stare insieme, fra una pausa e l'altra della solitudine.

Grazie a tutti, sempre viva l'Agricoltura !!!

BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA

Altieri M.A., Nicholls C.I., Ponti L.. “Agroecologia – Una via percorribile per un pianeta in crisi”. Bologna: Edagricole, 2015.

Anderson, T.H., Domsch, K.H., 1993. The metabolic quotient for CO₂ (qCO₂) as a specific activity parameter to assess the effects of environmental conditions, such as pH, on the microbial biomass of forest soils. *Soil Biol. Biochem.* 25, 393–395.

Angeletti, C., Monaci, E., Giannetta, B., Polverigiani, S., & Vischetti, C. (2021). Contenuto di sostanza organica del suolo e composizione chimica in due sistemi di gestione a rotazione in un clima mediterraneo. *Pedosfera*, 31 (6), 903-911.

ASSAM. Suoli e Paesaggi Delle Marche: Programma Interregionale Agricoltura e Qualità, Misura 5, Carta dei Suoli, Scala 1:250.000 (D.G.R. n. 2805 del 18/12/2000); ASSAM: Ancona, Italy, 2006.

Badalucco L., De Nobili M., Grego S.: “La fertilità”, pp. 345-373. In: Sequi P., “Fondamenti di chimica del suolo”. Bologna: Pàtron Editore, 2005.

Baldini E.. “Arboricoltura generale”. Bologna: CLUEB, 1988, pp. 132-136.

Baldoni R., Kökény B., Lovato A.. “Le piante foraggere”. Roma: Ramo editoriale degli agricoltori, 1974.

Bloem, J., Hopkins, D. W., & Benedetti, A. (Eds.). (2005). *Microbiological methods for assessing soil quality*. Cabi.

Bocchi S., Spigarolo R., Ronzoni S., Caligiore F.. “Produzioni Vegetali – Coltivazioni Arboree”. Torino: Mondadori Education, 2018, pp. 76-81.

Braschi I.: “La sostanza organica del suolo? Un potente schermo per proteggere l’oro blu”, 20/12/2021. Consultato in data 20/04/2023 ATT: <https://resoilfoundation.org/editoriali/sostanza-organica-suolo-salute-acqua/>.

Brevik, CE (2012). Suoli e cambiamenti climatici: flussi di gas e processi del suolo. *Suolo Oriz.* 53 (4), 12-23.

Businelli M.. “Chimica del suolo”. Perugia: Morlacchi Editore, 2009.

Casalicchio G. – Lercker G. – Pallotta U.. “Ricerche sulla costituzione della frazione lipidica del suolo”. In: “Bollettino n. 7 della Società Italiana della scienza del suolo”. Firenze: Società Italiana della scienza del Suolo, 1973.

Casati Davide: “Ripensare la Politica agricola comune: le lezioni della pandemia e della guerra in Ucraina”, 16/03/2022 .Consultato in data 19/03/2023 ATT: <https://www.georgofili.info/contenuti/ripensare-la-politica-agricola-comune-le-lezioni-della-pandemia-e-della-guerra-in-ucraina/18025>.

Celi L., Miano T., Senesi N.: “Sostanza organica del suolo”, pp. 83-102. In Sequi P., Ciavatta C., Miano T.. “Fondamenti di chimica del suolo”. Bologna: Pàtron Editore, 2017.

Cocco S., Cardelli V., Serrani D., Camponi L., Salvucci A., Corti G.: “Suolo e abuso di antibiotici, smettiamo prima che sia tardi”, 14/02/2022. Consultato in data 20/04/2023 ATT: <https://resoilfoundation.org/editoriali/suolo-antibiotici-pericolo/>.

Corti G., Cocco S., Muscolo A., Nardi S.: “Suoli forestali e agrari”, pp. 221-234. In Sequi P., Ciavatta C., Miano M.: “Fondamenti di chimica del suolo”. Bologna: Pàtron Editore (2017).

Croce P., De Luca A., Falcinelli M., Modestini F.S., Veronesi F.. “Tappeti erbosi – cura, gestione e manutenzione delle aree verdi pubbliche e private”. Bologna: Edagricole, 2006.

Di Leginio, M., Fumanti, F., Giandon, P., & Vinci, I. (2014). L'importanza della sostanza organica nei suoli: La situazione in Italia e il progetto Sias.

Dinel, H., Schnitzer, M., & Mehuys, G. R. (1990). “Soil lipids: origin, nature, content, decomposition, and effect on soil physical properties”. In: Bollag J., Stotzky G., “*Soil biochemistry*”. Volume 6., pp. 397-429. New York: Marcel Dekker, 1990.

Fantappiè, M., L'Abate, G., & Costantini, E. (2010). Variazioni di carbonio organico nei suoli italiani dal 1979 al 2008. *Biologi Italiani*, 50.

Ferrari R., Reggiani A., Boriani L., Pozzati M.: “Il vigneto nell’agroecosistema”, pp. 21-40. In: Cozzolino E., ”Viticoltura ed enologia biologica – Mercato, tecniche di gestione, difesa, vinificazione e costi”. Bologna: Edagricole, 2004.

Francaviglia, R., Dell’Abate, M. T., Benedetti, A., & Mocali, S. (2015). Metodologie per la determinazione dei parametri chimici, biochimici e microbiologici del suolo. *Ital. J. Agron. Questo volume*.

Francaviglia, R., Renzi, G., Ledda, L., & Benedetti, A. (2017). I pool di carbonio organico e la fertilità biologica del suolo sono influenzati dall'intensità dell'uso del suolo negli ecosistemi mediterranei della Sardegna, Italia. *Scienza dell'ambiente totale* , 599 , 789-796.

GAO, S. J., GAO, J. S., CAO, W. D., ZOU, C. Q., Huang, J., BAI, J. S., & DOU, F. G. (2018). Effects of long-term green manure application on the content and structure of dissolved organic matter in red paddy soil. *Journal of integrative agriculture*, 17(8), 1852-1860.

Giardini L.: “Agronomia generale, ambientale e aziendale” quinta edizione, pp.200-210, 448-456. Bologna: Pàtron Editore, 2004.

Gualandri C.. “Farming the future”. Socrate: Trinity Whitebridge, 2015.

Il Protocollo di Kyoto della Convenzione sui Cambiamenti Climatici (1997), consultato in data 10/04/2023 ATT: mase.gov.it.

A- Kalbitz, K., Solinger, S., Park, J. H., Michalzik, B., & Matzner, E. (2000). Controls on the dynamics of dissolved organic matter in soils: a review. *Soil science*, 165(4), 277-304.

B- Kalbitz, K., Geyer, S., & Geyer, W. (2000). A comparative characterization of dissolved organic matter by means of original aqueous samples and isolated humic substances. *Chemosphere*, 40(12), 1305-1312.

Kasassi, A.; Rakimbei, P.; Karagiannidis, A.; Zabaniotou, A.; Tsiouvaras, K.; Nastis, A.; Tzafeiropoulou, K. Soil contamination by heavy metals: Measurements from a closed unlined landfill. *Bioresour. Technol.* 2008, 99, 8578–8584.

Kononova M. M.. “Soil organic matter. Its nature, its role in soil formation and in soil fertility”, seconda edizione. Oxford: Pergamon Press (1966).

Lal, R. (2004). Attività agricole e ciclo globale del carbonio. *Ciclo dei nutrienti negli agroecosistemi*, 70, 103-116.

Lal R. 2008. Soils and sustainable agriculture: A review. In Lichtfouse E, Navarrete M, Debaeke P, Véronique S, Alberola C (eds.) Sustainable Agriculture. Springer, Dordrecht. pp. 57–64.

Landi, L., Renella, G., & Nannipieri, P. (2000). Indicatori chimici della qualità del suolo: il ruolo della sostanza organica. *Memorie di scienze fisiche e naturali, Rendiconti Accademia Nazionale delle Scienze detta dei XL*, 24, 239-248.

Marriott, E. E., & Wander, M. (2006). Qualitative and quantitative differences in particulate organic matter fractions in organic and conventional farming systems. *Soil Biology and Biochemistry*, 38(7), 1527-1536.

Mattii, G. B., Cataldo, E., & Salvi, L. (2016). La gestione dell'interfilare per il miglioramento della qualità delle uve di Merlot. In *Acta Italus Hortus Riassunti dei lavori presentati al VI Convegno Nazionale di Viticoltura Pisa, 4-7 luglio 2016* (Vol. 19, pp. 67-68). Società di Ortoflorofruitticoltura Italiana (SOI).

Mez E.: "Inerbimento" pp. 1131-1132. In: "Enciclopedia agraria italiana – Vol. 5". Roma: Ramo Editoriale degli Agricoltori, 1965.

Miano T.M., Senesi N.: "Sostanza organica e ciclo del carbonio", pp. 208-227. In: Sequi P., "Fondamenti di chimica del suolo". Bologna: Pàtron Editore, 2005.

Ministero per le Politiche Agricole (1999). Metodi ufficiali di analisi chimica del suolo. D.M. del 13/09/99, Gazzetta Ufficiale n. 248 del 21.10.99.

Monaci, E., Polverigiani, S., Neri, D., Bianchelli, M., Santilocchi, R., Toderi, M., ... & Vischetti, C. (2017). Effetto dei sistemi di rotazione delle colture contrastanti sulle proprietà chimiche e biochimiche del suolo e sulla crescita delle radici delle piante in agricoltura biologica: primi risultati. *Rivista Italiana di Agronomia*, 12 (4).

Morelli R., Bertoldi D., Baldantoni D., Zanzotti R.: "Più sostanza organica stabile con il sovescio nel vigneto", 11/05/2020. L'Informatore Agrario. Consultato in data 20/03/2023
ATT: <https://www.informatoreagrario.it/filiere-produttive/vitevino/piu-sostanza-organica-stabile-con-il-sovescio-nel-vigneto/>.

Morelli, L., Bertoldi D., Baldantoni, D., Zanzotti R., 2022. Labile, recalcitrant and stable soil organic carbon: comparison of agronomic management in a vineyard of Trentino (Italy). *BIO Web of Conferences* 44, 02007. <https://doi.org/10.1051/bioconf/20224402007>.

Nannipieri P., Dumontet S., Gianfreda L.: “Il suolo come sistema biologico”, pp. 148-174. In: Sequi P., “Fondamenti di chimica del suolo”. Bologna: Pàtron Editore, 2005.

Pagliai, M. (2009). Conoscenza, conservazione e uso sostenibile del suolo: aspetti fisici e morfologici. *Ital J Agron*, 3, 151-160.

Parras-Alcántara, L., Díaz-Jaimes, L., & Lozano-García, B. (2015). Organic farming affects C and N in soils under olive groves in Mediterranean areas. *Land Degradation & Development*, 26(8), 800-806.

Paull, J. (2020). Translations of Rudolf Steiner's agriculture course (Koberwitz, 1924): The seminal text of biodynamic farming and organic agriculture. *International Journal of Environmental Planning and Management*, 6, 94-97.

Piano Strategico Nazionale per la Politica Agricola Comune 2023-2027 (2021), consultato in data 10/04/2023 ATT: https://www.reterurale.it/downloads/PSP_Italia_15112022.pdf.

Pinton R., Sacchi G. A., Mimmo T.: “Suolo rizosferico”, pp. 125-159. In: Sequi P., “Fondamenti di chimica del suolo”. Bologna: Pàtron Editore, 2017.

Pisante, M., & Santilocchi, R. (2010). Sequestro di CO₂. *An International Journal of Agroecosystem Management*, 4, 91-96.

Post, W. M., & Kwon, K. C. (2000). Soil carbon sequestration and land-use change: processes and potential. *Global change biology*, 6(3), 317-327.

Rivas-Martínez, S. Bases para una nueva clasificación bioclimática de la tierra. Universidad Complutense de Madrid. *Folia Bot. Matritensis* 1993, 10, 23.

Rivera V. (1952). “L’importanza di un trifoglio d’alta montagna per il mantenimento della cotica erbosa, a difesa dalla degradazione del suolo”. In: CNR (1952) “Convegno sulla difesa del suolo e le sistemazioni fluviali e montane”. Spoleto: Panetto & Petrelli, pp219-222.

Robert J.A. Jones, Roland Hiederer, Ezio Rusco, Peter J. Loveland and Luca Montanarella
European Soil Bureau Research Report No.15, EUR 21209, 40pp. Office for Official
Publications of the European Communities, Luxembourg, 2003.

Sansavini S., Costa G., Gucci R., Inglese P., Ramina A., Xiloyannis C.. “Arboricoltura
generale”. Bologna: Pàtron Editore, 2012, pp.462-484.

Santilocchi R.. “Gestione del suolo degli arboreti”. Ancona: Associazione Italiana per la
Gestione Agronomica e Conservativa del Suolo, 2015.

Santilocchi R.: comunicazione personale nel corso universitario di “Tappeti erbosi”.
Università Politecnica delle Marche, 2022.

Saviozzi, A., Levi-Minzi, R., Cardelli, R., Riffaldi, R., 2001. A comparison of soil quality in
adjacent cultivated, forest and native grassland soils. *Plant and Soil*, vol. 233, No. 2, pp. 251-
259.

Schnitzer, M., 1982. Organic matter characterization, in: Page, A.L., Miller, R.H., Keeney,
D.R. (Eds.), *Methods of Soil Analysis*. Madison, WI, USA, pp. 581–594.

Senesi N., Miano T.M., “Fasi solide - Le componenti organiche” pp 80-88. In: Sequi P.,
“Fondamenti di chimica del suolo”. Bologna: Pàtron Editore, 2005.

Sequi P.: “Sostanza organica e ciclo del carbonio”, p. 248-277 e “Le funzioni agronomiche
della sostanza organica”, pp. 279-290. In: Sequi P., “Chimica del suolo”. Bologna: Pàtron
Editore, 1989.

Silvestroni O., Palliotti A., Santilocchi R.: “Gestione del suolo”, pp. 163-196. In: Cozzolino
E., “Viticoltura ed enologia biologica – Mercato, tecniche di gestione, difesa, vinificazione e
costi”. Bologna: Edagricole, 2004.

Šimanský, V., Jonczak, J., Piķuła, D. & Lukac, M, 2023. Grass sward cover improves soil
organic carbon and nitrogen in a vineyard. *Soil Science and Plant Nutrition*.
DOI:10.1080/00380768.2023.2208154.

Spigarolo R., Bocchi S., Ronzoni S., Altamura G.. “produzioni vegetali – agronomia generale
e meccanizzazione”. Milano: Mondadori Education, 2016, p. 460.

Spohn, M., 2015, Microbial respiration per unit microbial biomass depends on litter layer carbon-to-nitrogen ratio. *Biogeosciences*, 12, 817–823. doi:10.5194/bg-12-817-2015.

Stevenson F. J., Cole M. A.. “The carbon cycle” in “Cycles of soil”, seconda edizione. Canada: John Wiley & Sons, Inc, 1999, p. 5..

Testini C., Gessa C.: “Le fasi solide”, pp. 117-149. In: Sequi P., “Chimica del suolo”. Bologna: Pàtron Editore, 1989.

Uvadatavola.com (redazione): “L’inerbimento in viticoltura, una valida alternativa alle lavorazioni del suolo (prima parte)”, 23/10/2019. Consultato in data 30/03/2023 ATT: <https://www.uvadatavola.com/l-inerbimento-in-viticoltura-una-valida-alternativa-alle-lavorazioni-del-suolo-prima-parte/#:~:text=La%20sostanza%20organica%2C%20quindi%2C%20funger%C3%A0,quindi%20di%20scendere%20pi%C3%B9%20velocemente.>

Vance, E.D., Brookes, P.C., Jenkinson, D.S., 1987. An extraction method for measuring soil microbial biomass C. *Soil biology and Biochemistry* 19, 703–707.

Verri, C. (1840). *Saggi di agricoltura pratica sulla coltivazione dei gelsi e delle viti con giusta delle operette sul gelso, la vite il sovescio, l'erba medica, il seme de bachi et la foglia*. Silvestri.

Violante P.. “Suolo e qualità dell’ambiente”. Milano: Edagricole, 2009, pp 55-83.

Violante P.. “Chimica e fertilità del suolo”. Milano: Edagricole, 2013.

Vittori Antisari, L., Ferronato, C., De Feudis, M., Natali, C., Bianchini G. and Falsone G. , 2021. Soil Biochemical Indicators and Biological Fertility in Agricultural Soils: A Case Study from Northern Italy. *Minerals*, 11(2): 219. <https://doi.org/10.3390/min11020219>.

Walkley, A. and I.A. Black. 1934. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Sci.* 37:29-38.

White R. E.. “Introduzione ai principi e all’applicazione della scienza del suolo” Torino: edizioni libreria cortina, 1982, pp 25-30 (traduzione di Arduino E. e Zanini E.). “Introduction to the Principles and Practice of Soil Science”. Oxford: Blackwell Scientific Publications, 1979.

Yan, T., Yang, L., Campbell C.D. 2003, Microbial biomass and metabolic quotient of soils under different land use in the Three Gorges Reservoir area. *Geoderma*, 115:129 - 138. doi:10.1016/S0016-7061(03)00082-X.

Zsolnay, Á. (2003). Materia organica disciolta: artefatti, definizioni e funzioni. *Geoderma*, 113 (3-4), 187-209.