



DIPARTIMENTO DI SCIENZE AGRARIE ALIMENTARI E  
AMBIENTALI

CORSO DI LAUREA IN: SCIENZE AGRARIE E DEL TERRITORIO

VALORIZZAZIONE DI BIOMASSA DA  
PROCESSI AGRO-INDUSTRIALI MEDIANTE  
LA PRODUZIONE DI COMPOST

“VALORISATION OF BIOMASS FROM AGRO-INDUSTRIAL  
PROCESSES THROUGH COMPOST PRODUCTION”

TIPO TESI: sperimentale

Studente:  
MICHELE LILLINI

Relatore:  
PROF.SSA ESTER FOPPA  
PEDRETTI

Correlatore:  
PROF. CRISTIANO CASUCCI

DOTT. ALESSIO ILARI

ANNO ACCADEMICO 2020-2021

*Ai miei nonni che mi hanno trasmesso la loro  
passione per l'agricoltura e l'ambiente.*

*Ai miei genitori che mi hanno dato la possibilità  
di mettermi in gioco e supportato nelle mie scelte.*

*A tutti coloro con cui ho condiviso questi anni,*

*A Martina in particolar modo, che mi ha dato  
la motivazione in un anno difficile.*

*Michele*

# SOMMARIO

SOMMARIO .....	1
ELENCO DELLE TABELLE .....	4
ELENCO DELLE FIGURE .....	5
ELENCO DEI GRAFICI.....	6
CAPITOLO 1 IL COMPOST.....	7
1.1 Il processo di compostaggio.....	8
1.1.1 Fase preparatoria .....	9
1.1.2 Fase iniziale termofila .....	9
1.1.3 Fase di maturazione.....	11
1.1.4 Raffinazione .....	12
1.2 Parametri e indici di evoluzione del processo.....	12
1.2.1 Porosità del substrato.....	12
1.2.2 Umidità del substrato.....	13
1.2.3 Ossigeno .....	14
1.2.4 Temperatura.....	14
1.2.5 Rapporto carbonio – azoto C/N.....	15
1.2.6 pH.....	16
1.3 Tipologie di compostaggio.....	16
1.3.1 In cumulo.....	17
1.3.2 Bioreattori.....	18
1.4 Benefici agronomici e ambientali .....	19
1.5 Evoluzione della normativa riguardo il compost .....	20
CAPITOLO 2 BIOMASSA RESIDUALE .....	24
2.1 Digestato .....	25
2.1.1 L'utilizzo agronomico del digestato.....	28

2.1.2	Efficienza e distribuzione delle concimazioni con digestato .....	29
2.1.3	Problematiche e soluzioni .....	30
2.2	Pollina .....	31
2.3	Farine di cereali, scarti di biscottificio .....	33
2.4	Biochar .....	33
2.4.1	I benefici del Biochar: .....	35
	SCOPO DELLA TESI .....	37
	CAPITOLO 3 CASO DI STUDIO .....	38
	CAPITOLO 4 MATERIALI E METODI .....	39
4.1	Biomasse utilizzate.....	39
4.1.1	Digestato.....	39
4.1.2	Biochar .....	40
4.1.3	Pollina.....	40
4.1.4	Scarti di farine di cereali .....	40
4.2	Produzione del compost .....	40
4.2.1	Analisi CHN .....	42
4.2.2	Misurazione temperatura .....	43
4.2.3	Gli interventi durante il compostaggio .....	44
4.3	Distribuzione in campo .....	45
4.3.1	Campo sperimentale Crea .....	45
4.4	Campionamenti raccolta Girasole .....	48
4.5	Analisi statistica .....	48
	CAPITOLO 5 RISULTATI .....	49
5.1	CHN .....	49
5.2	Temperature di compostaggio.....	50
5.3	Raccolto Girasole .....	53
5.4	Analisi statistica significatività .....	54
	CAPITOLO 6 ANALISI E DISCUSSIONE DEI DATI .....	57
6.1	D4C - D8C - D12C .....	59
6.2	DPM – DSL - DMS .....	60
6.3	DFBy.....	60
6.4	DCT.....	61

6.5 Effetti delle concimazioni .....	62
6.6 Risultati analisi statistica.....	65
CAPITOLO 7 CONCLUSIONI.....	68
BIBLIOGRAFIA.....	70
SITOGRAFIA .....	74

# ELENCO DELLE TABELLE

Tabella 1 - Composizione tesi.....	41
Tabella 2 - Misurazione umidità campioni per CHN.....	42
Tabella 3 - Peso ammendante distribuito.....	45
Tabella 4 - Risultati analisi CHN.....	49
Tabella 5 - Rese raccolto girasole.....	53
Tabella 6 - Medie delle 3 repliche.....	65

# ELENCO DELLE FIGURE

Figura 1 La qualità della sostanza organica influisce sull'andamento del processo (fonte: Roberto Chiumenti, 2001).....	10
Figura 2- Processo di rivoltamento del compost (Fonte: venetoagricoltura.org)..	17
Figura 3 - Gerarchia dei rifiuti .....	21
Figura 4 - Impianto di biogas (fonte: assiteca.it) .....	26
Figura 5 - Il digestato solido (fonte: salvettiegervasi.com).....	28
Figura 6 – Biochar.....	35
Figura 7 - Digestato.....	39
Figura 8 - Cisterna IBC (fonte: packservices.it) .....	41
Figura 9 - Compostaggio delle 8 tesi .....	42
Figura 10 - Campo sperimentale Crea Osimo.....	46
Figura 11 - Disegno campo sperimentale.....	47
Figura 12 - Disegno campo sperimentale Girasole 2020 .....	63
Figura 13 - Disegno campo sperimentale Frumento 2021 .....	63

# ELENCO DEI GRAFICI

Grafico 1 - Tutte le prove.....	50
Grafico 2 - DPM (Digestato + Pollina).....	50
Grafico 3 - DMS (Digestato + Pollina + Insilato).....	50
Grafico 4 - DSL (Digestato + Insilato) .....	51
Grafico 5 - DFBy (Digestato + scarti di molitura).....	51
Grafico 6 - D4C (Digestato + Biochar 4%) .....	51
Grafico 7 - D8C (Digestato + Biochar 8%) .....	52
Grafico 8 - D12C (Digestato + Biochar 12%) .....	52
Grafico 9 - DCT (Digestato) .....	52

# Capitolo 1

## IL COMPOST

Il compost è un fertilizzante organico ottenuto dal trattamento sia dei rifiuti organici raccolti separatamente che da vari tipi di biomasse residuali. La ricchezza in humus, in flora microbica attiva e in microelementi fa del compost un ottimo prodotto adatto ai più svariati impieghi agronomici, dal florovivaismo fino alle colture praticate in pieno campo.

Negli impianti industriali, il compost viene prodotto attraverso un processo che riproduce, accelerandolo, quanto già avviene normalmente in natura. Nell'ecosistema naturale si osserva la trasformazione della sostanza organica contenuta nei residui animali e vegetali ad opera di microrganismi presenti nel terreno, quali batteri, funghi, alghe e protozoi. Questi rivestono diverse funzioni ecologiche, tra le quali quella di decomporre la sostanza organica proveniente dagli organismi animali e vegetali morti, in parte utilizzandola per l'anabolismo cellulare a favore della crescita di nuovi organismi e in parte trasformandola in composti organici stabili, le sostanze umiche.

In natura l'humus è una vera e propria riserva di nutrimento per le piante, grazie alla sua capacità di liberare lentamente, ma costantemente, elementi nutritivi come l'azoto, il fosforo e il potassio. Le sostanze umiche, infatti, conferiscono al terreno anche importanti proprietà chimico-fisiche che contribuiscono all'instaurarsi di un ambiente fertile. (Veneto Agricoltura, 2009)

Il processo di compostaggio, che avviene in condizioni aerobiche controllate, decompone attraverso l'azione dei microrganismi la sostanza organica e permette di ottenere un prodotto biologicamente stabile in cui la componente organica presenta un elevato grado di evoluzione.

Da tali processi si possono ottenere compost, energia termica, energia elettrica e biocarburante. Essa è una vera e propria forma di ottimizzazione della gestione dei

rifiuti e contestualmente un processo di produzione di un bene di qualità con possibile valutazione economica di mercato.

Il compostaggio rappresenta una forma di trasformazione e riciclaggio particolarmente interessante per i seguenti motivi:

- permette la stabilizzazione del rifiuto: nella fase di ossidazione termofila i microrganismi, in presenza di ossigeno, ossidano la sostanza organica attraverso la mineralizzazione della frazione più facilmente fermentescibile.
- permette l'igienizzazione del rifiuto: la degradazione aerobica libera una notevole quantità di energia sotto forma di calore e nella massa di materiale, in fermentazione controllata, le temperature raggiunte (55-70°C) distruggono gli agenti patogeni, stabilizzando il prodotto dal punto di vista biologico.
- permette lo smaltimento della componente biodegradabile dei rifiuti solidi urbani, con recupero di materia e riduzione dell'impatto ambientale.
- evita fenomeni indesiderati che potrebbero aver luogo nel caso di trattamento dei rifiuti in discarica: produzione di biogas, percolato, odori.
- consente il trattamento della frazione organica putrescibile dei rifiuti, anche quelle contenenti notevoli quantità d'acqua, ovviamente con opportuna miscelazione con altre biomasse più asciutte.
- permette di utilizzare completamente la frazione organica disponibile senza produzione di eventuali sottoprodotti da smaltire.
- non richiede apporto energetico in quanto le reazioni sono spontanee.
- ha come risultato finale la produzione di compost, che si può considerare prezioso tenendo presente che il nostro paese lo importa con una spesa rilevante. ([www.tersan.it](http://www.tersan.it))

## **1.1 Il processo di compostaggio**

Il compostaggio è una tecnica attraverso la quale viene controllato, accelerato e migliorato il processo naturale a cui va incontro qualsiasi sostanza organica in natura, per effetto della degradazione microbica. Si tratta infatti di un processo aerobico di decomposizione della sostanza organica che permette di ottenere un prodotto

biologicamente stabile in cui la componente organica presenta un elevato grado di evoluzione. I microrganismi operano un ruolo fondamentale nel processo di compostaggio in quanto traggono energia per le loro attività metaboliche dalla materia organica, liberando acqua, biossido di carbonio, sali minerali e sostanza organica stabilizzata ricca di sostanze umiche, il compost appunto. (Marconi M., 1998)

Il processo si può suddividere schematicamente nelle seguenti fasi:

### 1.1.1 *Fase preparatoria*

Consiste nell'arrivo del materiale al centro di compostaggio, dove si provvede ad una adeguata separazione in base alla provenienza. Nel caso di rifiuti solidi urbani indifferenziati (RSU) è necessario separare vetro, plastica e metallo mediante appositi sistemi meccanici, al fine di ottenere la frazione umida (da cui si produrrà il compost). Gli scarti di diversa natura (sfalci, ramaglie, etc.) possedendo, consistenza, pezzatura e umidità differenti, devono opportunamente essere miscelati fra loro e triturati per garantire l'omogeneità del prodotto da compostare. Ciò viene attuato mediante appositi trituratori-miscelatori a coclee, fissi o azionati mediante forza motrice di un trattore. La pezzatura finale ottimale del materiale è di 1-7 cm di diametro.

### 1.1.2 *Fase iniziale termofila*

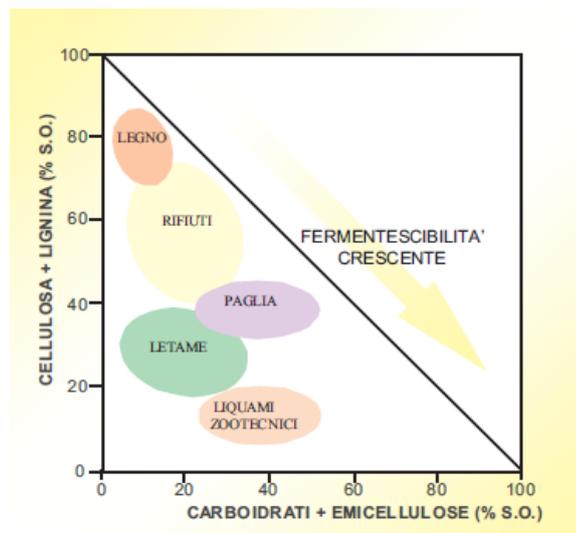
È la fase di avvio vero e proprio del processo di compostaggio, quando il substrato organico viene correttamente messo in cumulo e inizia la decomposizione della frazione organica più facilmente degradabile (zuccheri, acidi organici, amminoacidi) ad opera dei microrganismi aerobi, con consumo di ossigeno, liberazione di CO<sub>2</sub> e produzione di energia, necessaria a portare la temperatura del cumulo progressivamente fino al previsto regime termofilo. Questa fase, prettamente termofila, è nota anche come ***high rate phase*** e può durare alcune settimane, anche più di un mese essendo la sua durata influenzata dalle caratteristiche del substrato e dalla tecnica di compostaggio adottata. L'incremento in temperatura è assai marcato nelle 12-48 ore successive all'allestimento del cumulo e l'andamento è di rapida crescita fino a 55-60°C e se il calore non viene adeguatamente dissipato le temperature possono aumentare portando all'inattivazione della maggior parte dei microrganismi. La fase

termofila comporta anche la devitalizzazione dei semi delle piante infestanti eventualmente presenti nelle matrici di partenza.

L'aerazione forzata o il rivoltamento del cumulo sono dunque, indispensabili per consentire il raffreddamento del substrato oltre che per mantenere l'ossigenazione della biomassa al di sopra dei valori critici per l'attività della popolazione microbica aerobia. Durante questa fase del processo si ha la formazione temporanea di fitotossine, metaboliti naturali provenienti dalla degradazione dei materiali organici.

Le più importanti sostanze fitotossiche sono probabilmente l'azoto ammoniacale e gli acidi grassi volatili a catena corta, come gli acidi acetico, propionico e butirrico, ma si suppone che l'insieme delle fitotossine racchiuda una più ampia gamma di composti, tra cui ammine alifatiche ed aromatiche, nonché acidi organici a struttura più complessa e fenoli. Le fitotossine vengono velocemente metabolizzate dalle popolazioni microbiche che man mano si susseguono nella massa in trasformazione. Con il progredire del processo diminuiscono le sostanze solubili e contemporaneamente iniziano a formarsi sostanze pseudomiche. (Maynard, 2000)

Le temperature elevate, le condizioni di pH e di umidità che si instaurano nella massa in decomposizione, fanno sì che i batteri siano i microrganismi più attivi in questa fase. Alla fine della prima fase si dispone quindi di *compost fresco*. (Roberto Chiumenti, 2001)



**Figura 1** La qualità della sostanza organica influisce sull'andamento del processo (fonte: Roberto Chiumenti, 2001)

### 1.1.3 Fase di maturazione

Con la scomparsa dei composti più facilmente biodegradabili, metabolizzati nella prima fase del compostaggio, i processi metabolici di decomposizione interesseranno in questa fase le molecole organiche più complesse e si attueranno con velocità via via più lente, anche a seguito della morte di una buona parte della popolazione microbica per carenza di nutrimento. Con il conseguente progressivo abbassamento della temperatura cambiano anche le popolazioni di microrganismi attivi, con passaggio da quelle termofile a quelle mesofile prima e psicrofile successivamente.

In questa fase, infatti, le temperature scendono a valori di 40-45 °C per poi scendere progressivamente, stabilizzandosi poco al di sopra della temperatura ambiente. Questa fase può durare anche alcuni mesi.

Già nella fase mesofila appaiono gli attinomiceti: essi degradano attivamente amido, cellulosa e lignina, composti indispensabili per la sintesi delle sostanze umiche. L'intervento degli attinomiceti è fondamentale per l'umificazione, la loro presenza è facilmente rilevabile per la produzione di composti aromatici, come la geosmina, che conferiscono al prodotto finale il tipico odore di terriccio di bosco.

Si ha anche una intensa colonizzazione del materiale da parte di animali di piccole dimensioni (ad esempio collemboli, acari e millepiedi) che contribuiscono in modo considerevole allo sminuzzamento e al rimescolamento dei composti organici e minerali. (P. Sequi, 1996)

Le sostanze umiche hanno origine dalla trasformazione chimica e biologica di residui animali e vegetali e dalle attività di sintesi dei microrganismi: i composti formati tendono ad associarsi in complesse strutture chimiche stabili. L'umificazione è dovuta soprattutto alla polimerizzazione ossidativa degli acidi fenolici e dei fenoli ottenuti dal catabolismo della lignina, dei tannini e dei polifenoli, oppure per neosintesi microbica. La morfologia del prodotto ottenuto è simile a quella di un buon terriccio: la pezzatura è ridotta rispetto a quella del materiale di partenza, ma può presentare aggregazione glomerulare. Alla fine della seconda fase, denominata anche **curing phase**, si dispone di compost maturo, cioè stabilizzato. (Roberto Chiumenti, 2001)

#### 1.1.4 *Raffinazione*

Il compost prodotto può essere utilizzato tal quale o vagliato mediante appositi setacci meccanici con maglia vagliante di diverse dimensioni. Questo permette di eliminare una parte di eventuali corpi estranei come plastiche vetri (nel caso di compost da RSU) e di eliminare parti legnose indecomposte.

### 1.2 **Parametri e indici di evoluzione del processo**

I microrganismi hanno un ruolo fondamentale nella decomposizione della sostanza organica e vi è una relazione diretta tra la loro attività e l'evoluzione del processo di compostaggio. L'andamento e la velocità del processo sono strettamente dipendenti dai fattori che influenzano le condizioni ottimali per la vita dei microrganismi operanti nelle diverse fasi del processo. Parametri quali ossigeno, umidità e temperatura sono normalmente controllati per verificare il corretto andamento del processo, ma esistono altri parametri che influenzano le condizioni di vita dei microrganismi ed in particolare quelli che verranno descritti nei prossimi paragrafi:

#### 1.2.1 *Porosità del substrato*

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

La porosità libera della massa è strettamente dipendente da:

- dimensioni granulometriche del materiale da compostare,
- contenuto di umidità,
- spessore dello strato di materiale (altezza del cumulo).

Più le particelle sono fini e a minor contenuto di sostanza secca, più elevata risulta la compattabilità del cumulo e minore la sua porosità; a parità degli altri fattori, poi, ad una maggior altezza del cumulo corrisponde una minore porosità del materiale, soprattutto negli strati più vicini alla base.

La pezzatura ottimale del materiale risulta dell'ordine di 25-75 mm. Nel caso in cui la matrice compostabile abbia dimensioni inferiori (erba, foglie, deiezioni zootecniche) sarà necessario utilizzare dei materiali strutturanti (corteccia, cippato ecc.). Ad elevati livelli di umidità della massa lo spazio lacunare può venire occupato in prevalenza dall'acqua, creando difficoltà di ossigenazione e conseguenti condizioni anaerobiche. Durante il processo la porosità della massa dovrebbe teoricamente diminuire, perché a seguito della decomposizione del prodotto e dell'assestamento del cumulo la granulometria del prodotto si riduce. In realtà, considerato che l'umidità del prodotto tende a decrescere con il procedere del processo, la porosità libera tende a restare costante, potendo anche aumentare. Esiste una elevata correlazione tra gli spazi lacunari e la massa volumica del materiale in cumulo, anche se l'umidità del prodotto e l'altezza del cumulo influiscono in entità rilevante sulla compattazione della biomassa e conseguentemente sulla massa volumica stessa che può infatti variare dai valori minimi di  $350 \text{ kg/m}^3$  per i materiali più grossolani, come la paglia, a massimi di  $900 \text{ kg/m}^3$  per i fanghi. Per ottenere una matrice compostabile dalle ottimali caratteristiche di massa volumica, indicativamente di  $600 \text{ kg/m}^3$ , risulta di massima importanza la miscelazione di diversi materiali. (P. Sequi, 1996)

### *1.2.2 Umidità del substrato*

L'acqua è un elemento fondamentale per la vita della maggior parte dei microrganismi attivi nel processo di compostaggio, in quanto è indispensabile per il verificarsi degli scambi nutritivi attraverso le membrane cellulari, funge da veicolo per gli enzimi e per i substrati solubili ed è il mezzo per far avvenire le reazioni chimiche. I valori di umidità ottimali del materiale sono compresi tra il 40 e il 65%: con valori inferiori al 40% si ha un notevole rallentamento dell'attività biologica, che si ferma raggiunto il limite del 25-30%, mentre con un'umidità superiore al 65%, la diffusione dell'ossigeno nella massa risulta difficoltosa, causando anche l'instaurarsi di condizioni anossiche. È possibile comunque compostare materiali con umidità elevata

a patto che vengano aggiunti materiali dotati di elevata sostanza secca, come segatura, paglia e biochar così da mitigare il contenuto d'acqua.

Il compostaggio determina una naturale diminuzione di umidità nel tempo, dovuta dalle alte temperature e quindi all'evaporazione. Un'eccessiva diminuzione comporta il blocco del processo: il materiale risulta apparentemente stabile ma i fenomeni biologici sono fermi. È opportuno quindi un costante monitoraggio e reintegrazione dell'umidità per mantenere attivi i microrganismi.

### 1.2.3 *Ossigeno*

La degradazione aerobica di un substrato ricco di carbonio determina un forte consumo di ossigeno, con produzione di anidride carbonica, acqua e calore quindi risulta indispensabile reintegrarlo nella massa nella quantità necessaria per un regolare andamento del processo e per mantenere vitali i microrganismi. La maggiore necessità di apporto di O<sub>2</sub> si ha all'inizio del processo, quando è massima l'attività di demolizione della sostanza organica da parte dei microrganismi: in questa fase la disponibilità di ossigeno negli spazi lacunari deve mantenersi intorno 5-15% in volume ma va comunque che non si vuole una completa mineralizzazione della sostanza organica, quindi, nella fase di maturazione-umificazione è sufficiente un minor livello di ossigenazione, compreso tra 1-5%.

L'ossigenazione della massa viene attuata con tecniche di introduzione di aria nei cumuli (ventilazione forzata in compressione e depressione) o con tecniche di rivoltamento. Con questi interventi oltre che garantire il necessario apporto di ossigeno alla massa, si favorisce l'eliminazione del calore in eccesso, l'eliminazione del vapore acqueo e dei gas formati negli spazi lacunari.

### 1.2.4 *Temperatura*

La temperatura della massa in compostaggio è il parametro che meglio indica l'andamento del processo ed è anche quello di più facile monitoraggio. Oltre che per una corretta trasformazione della sostanza organica da parte dei microrganismi ai fini di renderla disponibile per gli usi agronomici, va ricordato che la fase termofila è molto importante nel processo, perché igienizza il prodotto, con la distruzione dei

microrganismi patogeni, che si ottiene a temperature superiori ai 55 °C e inattiva i semi di erbe infestanti e i parassiti delle piante sopra a 60 °C. (Roberto Chiumenti, 2001)

Nella fase termofila va evitato un innalzamento della temperatura oltre i 70 °C, poiché ciò comporterebbe un'alta mortalità microbica, compromettendo l'efficienza del processo. Per tale ragione è necessario intervenire con il rivoltamento della massa o con una appropriata ventilazione forzata del cumulo così da abbassare momentaneamente la temperatura, ossigenare la massa, ripristinare le condizioni aerobiche e quindi aumentare nuovamente le attività esotermiche.

La maggiore o minore rapidità con cui si raggiungono temperature elevate all'inizio del processo dipende dalle caratteristiche del materiale di partenza: tanto più questo è di facile biodegradabilità, tanto più velocemente si arriva ai regimi termofili. Il processo si considera concluso quando le temperature si stabilizzano in equilibrio con quelle ambientali.

### *1.2.5 Rapporto carbonio – azoto C/N*

Carbonio, azoto, fosforo e potassio sono naturalmente contenuti nella maggior parte delle matrici compostabili e la loro presenza è fondamentale per il processo, in quanto utilizzati dai microrganismi come unità strutturali e fonti di energia. Il substrato da compostare deve avere un equilibrato rapporto tra carbonio e azoto, la carenza di uno dei due elementi è un fattore limitante per l'attività microbica e il suo sviluppo. L'azoto viene ottenuto per scissione delle proteine in peptidi ed aminoacidi liberi, questi possono essere soggetti ad un'assimilazione diretta o ad un'ulteriore scissione con produzione di ammoniaca. Durante le diverse fasi del processo le popolazioni microbiche utilizzano un terzo del carbonio combinandolo con l'azoto per formare il protoplasma cellulare; la parte restante è ossidata ad anidride carbonica. Considerando che in genere vengono utilizzati trenta atomi di carbonio per ogni atomo di azoto, si deduce che il rapporto ottimale C/N all'inizio del compostaggio dovrebbe attestarsi su un valore di 30. In condizioni di eccesso di carbonio ( $C/N > 30$ ) si ha un rallentamento della decomposizione, con allungamento della durata del processo. Per contro, un valore  $C/N < 20$ , provoca la liberazione dell'eccesso di azoto sotto forma di  $NH_3$ . La liberazione di ammoniaca in atmosfera è particolarmente elevata in presenza di un elevato tenore di azoto e alti valori di temperatura e pH. Qualora si sia in presenza di

biomasse con C/N 5-15 è opportuna, quindi, una loro miscelazione con residui lignocellulosici (C/N 100-300): in tal modo si giunge ad un bilanciamento del rapporto garantendo le condizioni ottimali per il processo. Il rapporto C/N diminuisce nel tempo in quanto si verifica una perdita di carbonio per emissione di CO<sub>2</sub>, mentre l'azoto, componente delle strutture aromatiche delle sostanze umiche, tende a rimanere nella massa. Alla fine del processo di compostaggio il C/N risulta inferiore a quello di partenza: in condizioni ottimali si arriva a valori C/N di 15 - 20. Con un valore troppo basso del rapporto C/N il compost può essere tossico per le piante, per il potenziale rilascio di ammoniaca, con un valore troppo alto, invece, può determinare una competizione tra radici e microrganismi del suolo per il poco azoto disponibile.

### 1.2.6 pH

Il processo di compostaggio avviene con pH estremamente variabili, ma i valori ottimali per la miscela di partenza sono compresi tra 5,5 e 8,0, considerato che i batteri preferiscono un pH vicino alla neutralità e che i funghi preferiscono pH acidi. All'inizio del processo si ha un naturale spostamento di pH verso valori acidi a seguito della formazione di CO<sub>2</sub> e di acidi organici; successivamente il pH sale fino ad 8-9 a causa dell'eliminazione di CO<sub>2</sub> con l'aerazione ed a seguito della decomposizione delle proteine con produzione di ammoniaca. Alla fine del processo si registra un pH neutro o leggermente alcalino; in molti casi risulta difficile rispettare il valore limite imposto dalla legge nazionale (pH max 8,5).

## 1.3 Tipologie di compostaggio

Il processo di compostaggio a scala industriale può essere accelerato e ottimizzato in vario modo, a seconda delle tecnologie adottate negli impianti. Si parte da una prima distinzione tra *sistemi aperti* che sono quelli che vengono realizzati all'aperto o in locali non completamente chiusi; e i *sistemi chiusi* che si riferiscono a processi realizzati in ambienti confinati, nei quali è possibile il controllo dell'aria in uscita dai cumuli. Per la prima fase del processo e anche per lo stoccaggio delle diverse biomasse si sta ricorrendo sempre più a quest'ultima soluzione, allo scopo di contenere le emissioni di odori molesti in atmosfera, che oggi costituiscono il problema maggiore

di questi impianti, soprattutto per quelli destinati a trattare biomasse di facile degradazione biologica. Il beneficio sostanziale sta nel non subire interferenze meteorologiche ed evitare dispersioni di calore, indispensabile per la vitalità del processo.

Le differenti tipologie di compostaggio sono riportate qui di seguito.

### 1.3.1 *In cumulo*

Si tratta di un sistema estensivo, adatto per matrici a bassa fermentescibilità, quali gli scarti verdi e quelli con elevata componente cellulosica. Tale sistema prevede solitamente un pretrattamento di condizionamento, cioè la triturazione del materiale, per aumentare la superficie a contatto con l'aria e la porosità della matrice. Il materiale organico viene sistemato in cumulo-andana di dimensioni variabili: in altezza da 1 metro ad oltre 3 metri e in larghezza da 2 metri fino ai 6-7 metri. Fino a queste larghezze esiste la possibilità di rivoltamento della massa in un unico intervento; quando la larghezza del cumulo supera i 7 metri, il materiale viene rivoltato in più passate. Tale processo è quello dei ***cumuli rivoltati***; il rivoltamento consente il miscelamento dei materiali di partenza, ne riduce la pezzatura, ne facilita l'aerazione e ne regola la temperatura, garantendo una sufficiente igienizzazione ed una omogenea stabilizzazione. I rivoltamenti sono più frequenti nel primo periodo (cadenza giornaliera), nel quale l'attività microbica è più intensa e si deve evitare l'accumulo eccessivo di calore; successivamente, la stabilizzazione aumenta, e i rivoltamenti possono essere meno frequenti. Con questo metodo, la fase di compostaggio attivo dura solitamente da tre a nove settimane a seconda della natura del substrato di partenza e della frequenza dei rivoltamenti.



***Figura 2- Processo di rivoltamento del compost (Fonte: venetoagricoltura.org)***

Nel caso dei *cumuli statici areati*, il processo di compostaggio avviene senza rivoltamento ma con ventilazione forzata della massa ma solo in casi limite, con un materiale ottimizzato in tutti i parametri di processo, dato che la zona interessata da processi anaerobici in queste condizioni può essere molto estesa. L'ossigenazione avviene per mezzo di tubi diffusori in cui circola aria in forma passiva o forzata. Nel primo caso (circolazione passiva), l'apparato di tubi bucherellati è posto sul basamento (che ospita il cumulo) sopra uno strato di compost maturo e termina all'esterno del cumulo con estremità aperte; i tubi posizionati con i fori rivolti verso il basso (per evitare rischi di ostruzione ed il drenaggio della condensa) permettono la diffusione dell'aria attraverso il profilo del cumulo e a processo ultimato vengono semplicemente rimossi. I cumuli non superano l'altezza di 1-1,2 m, e possono essere ricoperti con uno strato coibentante di 10 cm circa, solitamente costituito da compost maturo, che assorbe anche le emissioni maleodoranti. Nel secondo caso (circolazione forzata), sono previsti apparati di tubi, anche essi opportunamente bucherellati, che costringono l'aria a passare forzatamente attraverso la matrice in compostaggio per aspirazione dalla superficie o per insufflazione nel substrato; i cumuli hanno solitamente altezza non superiore a 2,5 m.

Questa metodologia di compostaggio è, in definitiva, una soluzione con minor interesse pratico, dato che non consente di produrre del materiale omogeneo: i cumuli statici sono oggi utilizzati solo per lo stoccaggio dei materiali in attesa di essere compostati e, comunque, ciò dovrebbe avvenire solo per tempi limitati. Infatti, per alcune matrici ad elevato indice respiratorio come l'erba proveniente dagli sfalci urbani, durante lo stoccaggio si innesca l'avvio di processi anaerobici, con risultati negativi in ordine alle emissioni di odori molesti.

### 1.3.2 *Bioreattori*

Possiamo definire *bioreattori* tutti gli impianti aventi caratteristiche costruttive diverse da una semplice pavimentazione e dotati di tecnologia avanzata. Si tratta di impianti generalmente usati per la prima fase del processo (ossidazione accelerata) che necessita di un controllo di processo superiore a quella della seconda fase, soprattutto in ordine ai problemi ambientali. Nella maggior parte di questi impianti, infatti, si ha

anche il trattamento dell'aria espulsa, per limitare le emissioni in atmosfera di inquinanti gassosi, polveri e la raccolta e il trattamento dei percolati.

Indipendentemente dalla tipologia costruttiva si tratta di impianti a processo controllato, con sonde che misurano la temperatura dell'aria e controllano l'andamento dei processi biologici tramite misurazione costante di ossigeno e anidride carbonica.

Si differenziano in:

- Reattori chiusi: cilindri rotanti, silos e biocelle;
- Reattori aperti: trincee dinamiche.

La seconda fase, di biostabilizzazione aerobica vera e propria del materiale, avviene solitamente in uscita dai reattori, attraverso uno dei sistemi in cumulo.

Esistono anche i moderni impianti che possono avere una gestione del processo più complessa, che integra un trattamento anaerobico del materiale con il trattamento aerobico proprio del compostaggio. Questi impianti "complessi" ricavano biogas dalla digestione anaerobica della sostanza organica, ottenendo successivamente energia elettrica e termica. Essi rappresentano l'evoluzione tecnica e ambientale di questo settore inserito nella filiera del trattamento dei rifiuti organici, in quanto con l'energia elettrica autoprodotta riescono a soddisfare le richieste di energia necessarie alla fase aerobica del processo, rendendosi praticamente autosufficienti dalle fonti esterne di energia elettrica, quest'ultima in gran parte di derivazione fossile.

## **1.4 Benefici agronomici e ambientali**

L'interruzione del ciclo del Carbonio, derivato dalla modifica dell'assetto produttivo agrario, dalla banalizzazione degli ordinamenti produttivi agricoli e dalla sempre maggiore avversione dell'opinione pubblica verso impatti caratteristici del ciclo zootecnico (che ha comportato il calo del patrimonio zootecnico negli ultimi 30 anni, Fonte: Istat), è alla base della diminuzione del contenuto di sostanza organica nei suoli che oggi ha raggiunto livelli preoccupanti e che rischia di portare alla desertificazione dei terreni agricoli a causa del depauperamento in sostanza organica, scesa in alcune aree sotto l'1%. Il ricorso al compost costituisce quindi una scelta alternativa rispetto alle matrici organiche che classicamente in passato venivano utilizzate in agricoltura

(letame). Gli ammendanti compostati, infatti, costituiscono la vera alternativa per la reintegrazione della sostanza organica nel terreno. (V. Tabaglio, 2008).

Sicuramente il compost trova maggior utilizzo nel florovivaismo e in orticoltura grazie al maggior valore economico dei prodotti ottenuti.

Nel caso dell'impiego del compost su colture a pieno campo, date le condizioni di intervento e la ridotta redditività delle medesime, i criteri di scelta sono sicuramente orientati in ordine di priorità verso l'economicità e successivamente verso l'omogeneità fisica e qualitativa del prodotto. Il prodotto pellettato è certamente il più ambito dal mercato, quello che meglio si presta a una valorizzazione del compost, ma che presenta oneri economici rilevanti che generano minore concorrenzialità rispetto ad altre frazioni organiche.

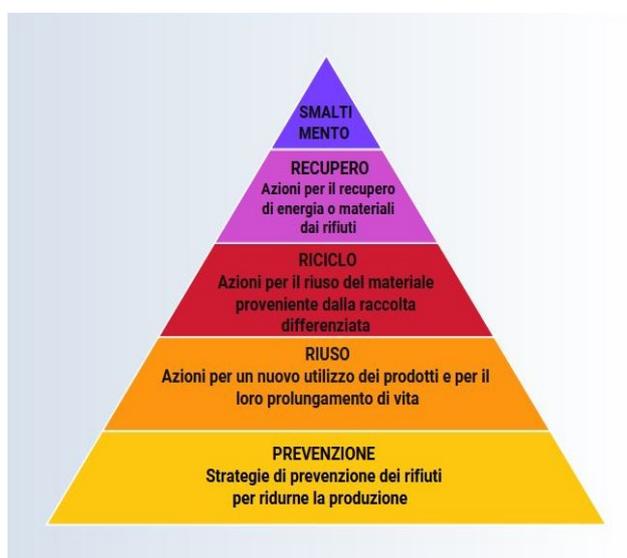
L'impiego del compost può fornire un contributo significativo a livello *ambientale* nel fronteggiare le sfide poste oggi al settore agricolo e non solo. Il suo uso è già di per sé una pratica "ecologica", perché viene impiegato un materiale che deriva dal recupero in condizioni controllate di matrici organiche selezionate altrimenti destinate allo smaltimento in discarica. (Amlinger *et al.*, 2007)

Il compost è caratterizzato inoltre da un elevato contenuto di sostanza organica stabilizzata che, distribuita sul suolo, ha due importanti effetti: il primo è un miglioramento generale delle caratteristiche chimico-fisiche del terreno, che risulta pertanto salvaguardato da fenomeni di erosione; il secondo è un progressivo accumulo di carbonio nel suolo, che assume così una funzione di immagazzinamento del carbonio (carbon sink) nell'ambito della lotta all'effetto serra. Infine, il compost migliorando la fertilità del terreno, può essere impiegato per integrare o sostituire in misura variabile la concimazione chimica, la cui riduzione può avere importanti riflessi sia ambientali che economici. (Centemero, 2002)

## **1.5 Evoluzione della normativa riguardo il compost**

La produzione di compost è regolata da leggi a livello europeo e nazionale sebbene spesso venga immaginata come un semplice "fai da te". Da sempre la gestione dei rifiuti è stata una delle problematiche di maggior rilievo per le politiche ambientali della Comunità Europea. Il quadro normativo a livello europeo comprende la Direttiva

Quadro sui rifiuti (75/442/CEE), la Direttiva sui rifiuti pericolosi (91/689/CEE) ed il Regolamento sul trasporto dei rifiuti (Reg. 259/93). Queste normative avevano il compito di regolare la gestione dei rifiuti per evitare danni all'ambiente e alle persone. Successive integrazioni furono introdotte con normative riguardanti il trattamento dei rifiuti con la Direttiva sulle discariche (99/31/CE), la normativa sull'incenerimento (2000/76/CE) e le operazioni di smaltimento con la Direttiva fanghi (86/278/CEE) e la direttiva sugli imballaggi (94/62/CE). La politica dei rifiuti dell'Unione Europea è basata sul concetto di “gerarchia dei rifiuti” secondo la quale esistono delle opzioni preferenziali fra le diverse modalità di gestione dei rifiuti iniziando dalla prevenzione e terminando con lo smaltimento in discarica. Fra le opzioni intermedie figurano il riciclaggio con la produzione di compost ed il recupero dell'energia.



**Figura 3 - Gerarchia dei rifiuti**

L'Italia, nel 1997, ha pubblicato il Decreto Legislativo n.22 del 5 febbraio “Attuazione delle direttive 91/156/CEE, 91/689/CEE sui rifiuti pericolosi e 94/62/CE sugli imballaggi e sui rifiuti da imballaggio”. Il Decreto Legislativo 22/97 (Decreto Ronchi) riconosce il ruolo del riciclaggio come tecnologia appropriata per la gestione dei rifiuti e fissava obiettivi specifici da raggiungere negli anni successivi in termini di recupero della frazione organica dei rifiuti solidi urbani. Inoltre, il Decreto 22/97 ha attribuito alla legge 748/84 sui fertilizzanti tutte le competenze riguardanti la definizione delle caratteristiche di qualità dei compost utilizzabili in agricoltura senza alcuna restrizione di tipo quantitativo se non del rispetto delle buone pratiche agricole. La legge “Nuove

norme per la disciplina dei fertilizzanti” del 19 ottobre 1984 n. 748 e successive modifiche ed integrazioni, individuava, prima della sua recente abrogazione, quattro tipologie di ammendanti: ammendante vegetale semplice non compostato, ammendante compostato verde, ammendante compostato misto ed ammendante torboso composto. Inizialmente l'utilizzo di queste matrici compostate ha avuto serie problematiche per via della mancanza di una normativa appropriata, erano stati prodotti e commercializzati compost scadenti, che avevano provocato danni evidenti alla diffusione di quelli di qualità certificata. La presenza di metalli pesanti facilmente accumulabili nel terreno e tossici per le colture rappresentava il pericolo maggiore. Una modifica alla legge 748/84 (Decreto 27 marzo 2000) ha fissato per tutte le tipologie di compost dei limiti massimi di concentrazione di metalli pesanti. La normativa prevede inoltre per gli ammendanti compostati misti una limitazione nell'uso dei fanghi. Quindi si è andata consolidando l'idea di dover procedere alla revisione di alcune caratteristiche chimiche e fisiche ma anche di natura microbiologica e sanitaria, in particolare le principali perplessità riguardano il carbonio organico, gli inerti, i parametri biologici e microbiologici. (Veneto Agricoltura, 2009)

La pubblicazione sul Supplemento Ordinario alla Gazzetta Ufficiale n.141 del 20 giugno 2006, del decreto legislativo 29 aprile 2006 n. 217, “Revisione della disciplina in materia di fertilizzanti”, in recepimento del Reg. 2003/2003 relativo ai concimi, norma le caratteristiche del compost e detta regole sulla disciplina dei fertilizzanti e prevede sanzioni amministrative per la commercializzazione non conforme alle disposizioni dettate. Tale decreto non regola lo spandimento su terreno, a scopo di deposito finalizzato alla produzione di compost, la concimazione o correzione dei residui o reflui, i quali restano soggetti alla disciplina sui rifiuti o alla normativa sulle acque, ovvero disposizioni che regolano lo spandimento di fanghi in agricoltura. Attualmente il quadro normativo Comunitario mette in stretta relazione i temi di recupero della sostanza organica e di gestione dei rifiuti organici con la tutela del suolo, dei terreni e con le più ampie tematiche affrontate dal Protocollo di Kyoto sulla protezione del pianeta dai cambiamenti climatici. (Bieñ *et al.*, 2007)

Andando ad affrontare i collegamenti tra compost e problematiche di tutela dei terreni, si deve tenere in considerazione la Direttiva Nitrati (Dir. 91/676/CEE) che ha dettato i

principi fondamentali sulle pratiche di fertilizzazione dei terreni agricoli nell'ottica della salvaguardia delle acque sotterranee e superficiali dall'inquinamento causato da nitrati. La normativa nazionale fa riferimento a due principali argomenti d'intervento: la gestione dei rifiuti e la commercializzazione e l'utilizzo dei fertilizzanti. Il Testo Unico in materia ambientale n.152 del 3 aprile 2006, che abroga il D.Lgs 22/97, interessa per diversi aspetti il settore degli ammendanti e del compost in particolare. Recentemente il Testo Unico è stato modificato dal D.Lgs n.4 del 16 gennaio 2008 riportante ulteriori disposizioni correttive ed integrative in particolare viene riportata la definizione di "compost di qualità" come "prodotto ottenuto dal compostaggio di rifiuti organici raccolti separatamente, che rispetti i requisiti e le caratteristiche stabilite dell'allegato 2 del D.lgs. n. 217 del 2006 e successive modifiche ed integrazioni". (A. Bozzolo, 2010)

## Capitolo 2

# BIOMASSA RESIDUALE

Le biomasse residuali comprendono materiali di origine biogenica eterogenea (vegetale e animale, ma anche la parte biodegradabile dei rifiuti) che possono essere anche molto diversi tra loro per caratteristiche chimiche e fisiche. Di conseguenza, anche le loro utilizzazioni possono essere molteplici. È possibile classificarle per comparto di provenienza:

1. Forestale e agroforestale: residui delle operazioni selvicolturali o delle attività agroforestali, utilizzazione di boschi cedui, etc.;
2. Agricolo: residui colturali provenienti dall'attività agricola (come paglie, stocchi, sarmenti di vite, ramaglie di potatura, etc.) e dalle colture dedicate;
3. Zootecnico: reflui zootecnici;
4. Agro-industriale: residui provenienti dalle industrie del legno o dei prodotti in legno e dell'industria della carta, nonché residui dell'industria agroalimentare (sanse, vinacce, noccioli, lolla di riso, etc.) e dalla produzione di energia da biomasse;
5. Rifiuti urbani: residui delle operazioni di manutenzione del verde pubblico e frazione umida di rifiuti solidi urbani proveniente dalla raccolta differenziata. (Merçi and Italiana, 2012)

## 2.1 Digestato

Il digestato è il sottoprodotto del processo di digestione anaerobica e può essere utilizzato come materiale fertilizzante sulle principali colture agrarie.

La digestione anaerobica, infatti, determina una riduzione della sostanza organica meno stabile, ma non riduce la dotazione di azoto, fosforo e potassio della biomassa caricata nel digestore. In particolare, durante il processo di digestione anaerobica si assiste alla mineralizzazione di parte dell'azoto organico in azoto ammoniacale, con una ripartizione che dipende strettamente dalle caratteristiche iniziali della biomassa; è chiaro che la tipologia di biomassa condiziona anche la quantità degli altri nutrienti che si ritrovano nel digestato.

È possibile suddividere la digestione anaerobica in quattro stadi:

1. Idrolisi, dove le molecole organiche subiscono scissione in composti più semplici quali i monosaccaridi, amminoacidi e acidi grassi.
2. Acidogenesi, dove avviene l'ulteriore scissione in molecole ancora più semplici come gli acidi grassi volatili (ad esempio acido acetico, propionico, butirrico e valerico), con produzione di ammoniaca, anidride carbonica e acido solfidrico quali sottoprodotti.
3. Acetogenesi, dove le molecole semplici prodotte nel precedente stadio sono ulteriormente digerite producendo biossido di carbonio, idrogeno e principalmente acido acetico.
4. Metanogenesi, con produzione di metano, biossido di carbonio e acqua.

Il processo di digestione anaerobica può essere condotto in condizioni mesofile (a temperature di circa 35°C), termofile (a circa 55°C) o, più raramente, a freddo (digestione psicofila). La temperatura di reazione determina in genere anche la durata del processo (tempo di residenza o di ritenzione). I tempi sono mediamente compresi tra 15 e 50 giorni se il processo avviene in mesofilia, tra 14 e 16 se avviene in termofilia e di 60-120 giorni in psicofilia.

Durante la digestione termofila si possono ottenere velocità metaboliche più alte e conseguentemente una crescita specifica e dei tassi di conversione maggiori rispetto al processo mesofilo. (Zábranská *et al.*, 2000) I tassi di conversione possono essere due

o tre volte maggiori rispetto alla condizione mesofila, in funzione del tipo di substrato che deve essere digerito. (Ge, Jensen and Batstone, 2011)

Il tempo di permanenza idraulica (HRT) esprime il tempo medio di permanenza del substrato nel digestore ed anche questo fattore, insieme alle temperature, incidono sulla produzione metanigena e sull'inattivazione o distruzione dei patogeni. (Bordoni A., 2010)

In questi impianti le biomasse agricole e agro-industriali in ingresso sono degradate per via biologica e i prodotti che si ottengono sono:

- Biogas, il prodotto principale formato principalmente da  $\text{CH}_4$  e  $\text{CO}_2$ , cioè da carbonio, idrogeno e ossigeno (elementi "catturati" dalle colture dall'ambiente di coltivazione, aria, acqua, suolo), avviato a valorizzazione energetica con produzione di energia elettrica e calore e/o biometano, cioè biogas raffinato a metano;
- Digestato, un materiale che, rispetto alle biomasse di partenza, si presenta omogeneo, con un tenore di umidità più elevato perché parte della sostanza secca è stata degradata biologicamente, cioè demolita dai batteri per la produzione di biogas. La sostanza organica che rimane risulta più stabile e contiene elementi chimici, quali azoto, fosforo e potassio, in forma più o meno complessa, che possono tornare utile al suolo per fornire nutrimento alle colture.



*Figura 4 - Impianto di biogas (fonte: assiteca.it)*

Nella maggior parte degli impianti, il digestato è sottoposto a separazione solido-liquido con produzione di due frazioni, quella palabile e quella chiarificata. I motivi di tale scelta sono diversi; si ricordano, tra i principali, la possibilità di ricircolare la frazione liquida, l'assenza di formazione di croste superficiali negli stoccaggi, una migliore gestione delle due frazioni in fase di uso agronomico.

Negli impianti di biogas realizzati presso aziende agricole e zootecniche la separazione solido-liquido è solitamente attuata con separatori a compressione elicoidale oppure a rulli contrapposti, mentre è più rara la presenza di centrifughe o nastropresse.

Le due frazioni che si generano si presentano con le seguenti caratteristiche:

- la frazione solida o palabile rappresenta in genere non più del 10-15% circa del peso del digestato tal quale ed è caratterizzata da un contenuto di sostanza secca relativamente alto, solitamente superiore al 20% circa. In essa si concentrano la sostanza organica residua, l'azoto organico e il fosforo, seppure con efficienze di separazione variabili in funzione delle condizioni operative di riferimento (tipo di digestato, tipo e modalità d'uso del dispositivo utilizzato);

- la frazione liquida o chiarificata rappresenta in genere almeno l'85-90% del volume del digestato tal quale ed è caratterizzata da un tenore di sostanza secca mediamente compreso tra l'1,5 e l'8%. In essa si concentrano i composti solubili, tra cui l'azoto in forma ammoniacale, che può arrivare a rappresentare sino al 70-90% dell'azoto totale presente.

Premesso che ai fini dell'uso agronomico è necessario caratterizzare periodicamente il digestato e le sue frazioni per conoscerne il reale potere fertilizzante, in sintesi si può osservare che:

- le frazioni palabili hanno una maggiore dotazione di sostanza organica o solidi volatili, una dotazione di azoto sottoforma essenzialmente organica e un rapporto N/P spostato a favore del secondo elemento;

- le frazioni chiarificate hanno una minore dotazione di sostanza organica, una dotazione di azoto rappresentata per oltre il 45-50% da azoto ammoniacale e da un rapporto N/P spostato a favore del primo elemento.



*Figura 5 - Il digestato solido (fonte: salvettiegersasi.com)*

### *2.1.1 L'utilizzo agronomico del digestato*

L'impiego del digestato sui terreni ai fini fertilizzanti rappresenta la chiusura naturale di un ciclo che coinvolge organismi vegetali, allevamento animale e l'impianto di biogas, per sfruttare il più possibile il contenuto nutritivo ed energetico delle biomasse. Come ampiamente dimostrato ormai da diversi studi, il digestato, infatti, garantisce un valido effetto fertilizzante sulle principali colture agrarie. Non solo, è stato verificato che può garantire una concimazione completa, anche senza integrazione con concimi minerali.

Ai fini dell'uso agronomico delle frazioni palabile e chiarificata del digestato è importante sapere che:

- la frazione chiarificata, ben dotata di azoto sotto forma ammoniacale ha un pronto effetto nutritivo per le colture. Grazie alla più facile infiltrazione nel suolo subito dopo lo spandimento, la distribuzione della frazione chiarificata in luogo del digestato tal quale può ridurre le emissioni di ammoniaca in atmosfera; quando il tenore di solidi è abbastanza ridotto può essere possibile la distribuzione anche senza interrimento o con interrimento poco profondo. Si tratta di un materiale che si presta anche ad un uso in copertura con tecniche di fertirrigazione o nuove tecniche di distribuzione;

- la frazione solida del digestato, ben dotata di sostanza organica e di nutrienti sotto forma organica, è invece più adatta a un uso ammendante. Si tratta di un valido

sostituto del letame, che contribuisce a mantenere la dotazione di sostanza organica del suolo e rilascia i nutrienti in modo più graduale. Questa frazione può essere convenientemente utilizzata in pre-aratura su colture da rinnovo o autunno-vernine, oppure in orticoltura e frutticoltura, quando occorre fornire un fertilizzante organico capace di cedere lentamente gli elementi nutritivi. (Tambone *et al.*, 2015)

### 2.1.2 *Efficienza e distribuzione delle concimazioni con digestato*

Per ottimizzarne l'uso agronomico e massimizzarne il reale potere fertilizzante è essenziale che gli operatori del settore conoscano e valutino in modo adeguato le differenze esistenti fra le due frazioni del digestato, al fine di scegliere la corretta epoca e modalità di utilizzo agronomico dei due materiali.

In proposito assume grande importanza conoscere l'efficienza di impiego dell'azoto che si apporta con il digestato, la quale è strettamente correlata a tecnica ed epoca di distribuzione.

In linea generale, l'efficienza di una concimazione organica dipende dalla possibilità di far coincidere gli apporti con le fasi di maggiore assorbimento dell'azoto da parte delle colture e di maggiore attività della microflora del terreno. In pratica, le distribuzioni in vicinanza dell'impianto o della fase di maggiore richiesta della coltura raggiungono l'efficienza maggiore; quelle effettuate con molto anticipo sortiscono risultati generalmente inferiori. I livelli di efficienza dell'azoto sono definiti nel Decreto Ministeriale che disciplina l'uso agronomico degli effluenti zootecnici e dei digestati (DM 25/02/2016).

Dal punto di vista operativo il momento in cui la distribuzione è più agevole è in concomitanza con la preparazione del terreno, quindi in assenza di coltura; la distribuzione in post emergenza, infatti, richiede il ricorso a mezzi adeguati.

Una delle tecniche di distribuzione dei digestati sulle colture in atto, è la fertirrigazione, che può conseguire elevati livelli di efficienza dell'azoto distribuito se ben calibrata. L'utilizzo dei digestati in fertirrigazione presuppone almeno il trattamento di separazione solido-liquido, per disporre di frazioni chiarificate alleggerite del carico di solidi al fine di ridurre i rischi di occlusione delle attrezzature. (Centro Ricerche Produzioni Animali C.R.P.A. S.p.A., 2017)

### 2.1.3 *Problematiche e soluzioni*

Secondo la normativa italiana (DM 25/02/2016), il digestato può essere escluso dalla disciplina dei rifiuti e considerato quindi un sottoprodotto, solo se rispetta certe condizioni:

- è prodotto in impianti aziendali e interaziendali di digestione anaerobica autorizzati ed alimentati con effluenti di allevamento ed una serie di materie, tra cui scarti vegetali ed alcuni scarti dell'agroindustria (art 22);
- vi è certezza di impiego agronomico;
- lo si può usare direttamente, senza ulteriori trattamenti diversi dalle normali pratiche industriali quali la disidratazione, sedimentazione, chiarificazione, centrifugazione ed essiccazione, filtrazione, separazione solido-liquido, strippaggio, nitrificazione, denitrificazione e fitodepurazione;
- soddisfa le caratteristiche di qualità indicate all'Allegato IX, nonché le norme igienico sanitarie e di tutela ambientale comunque applicabili. (Peng and Pivato, 2019)

Il digestato spesso può contenere anche residui organici biodegradabili e altri contaminanti che potrebbero comportare rischi fitotossici per le colture; pertanto, il trattamento post-digestione del digestato sta diventando indispensabile per assicurare la stabilizzazione biologica. (Lu and Xu, 2021)

In particolare, il digestato proveniente dal trattamento anaerobico di liquami e/o FORSU, ha notevoli problemi di patogeni, antibiotici e metalli pesanti. (Tampio, Salo and Rintala, 2016)

Ecco per cui il Biodrying (bioessiccamento) e il compostaggio ipertermofilo (HTC) sono processi sostenibili ed economicamente fattibili per la gestione del digestato. (Lu and Xu, 2021)

Con i microrganismi aerobici e l'alta temperatura autogena, il compostaggio potrebbe rimuovere i patogeni e stabilizzare la materia organica. Inoltre, ne ridurrebbe il volume facendo evaporare l'umidità, migliorando quindi anche la fattibilità economica del trasporto e dell'utilizzo.

Diversi studi hanno analizzato gli effetti del compostaggio del digestato:

La processabilità dei residui organici mediante compostaggio si basa su caratteristiche biologiche, chimiche ma anche fisiche. Diversi indicatori possono descrivere il potenziale di biodegradabilità e quindi l'uso agricolo diretto dei digestati o la necessità di un ulteriore trattamento biologico. La respirometria, il contenuto di carbonio e azoto o la necessità di ossigeno possono indicare il potenziale residuo della materia biodegradabile e la sua capacità di essere degradata dai microrganismi. (Casini *et al.*, 2019a)

Il compostaggio del digestato con trucioli di legno ha ridotto l'emissione di ammoniaca ma ne ha stimolato l'emissione di protossido di azoto. (Zeng, De Guardia and Dabert, 2016)

Il compostaggio della frazione solida del digestato proveniente dalla digestione anaerobica dei liquami bovini con e/o senza sarmenti di vite, costituisce un trattamento fattibile non solo per il recupero di queste biomasse residuali, ma anche per la produzione di compost con adeguati gradi di stabilità, maturità, proprietà fisiche e la potenziale soppressione diretta di batteri patogeni (*F. Oxysporum*, *F.sp. Meloni*). (Bustamante *et al.*, 2012)

Il compostaggio del digestato riduce le emissioni di gas serra di oltre il 19% rispetto al compostaggio di sole biomasse vegetali. Inoltre, lo stesso studio ha dimostrato che un tempo inferiore di ritenzione del materiale nel digestore anaerobico, darà caratteristiche migliori del compost ottenuto da tale digestato. (Li *et al.*, 2018)

## **2.2 Pollina**

La pollina è un concime organico ottenuto dal riciclaggio per trattamento industriale delle deiezioni degli allevamenti avicoli. A differenza dei suini e bovini, la pollina fresca è un materiale con umidità molto più bassa, pari al 40-60% contro orientativamente al 90% nei liquami bovini e suini. Il tenore in elementi nutritivi, riferito alla sostanza secca, si colloca a metà strada fra la composizione media del liquame bovino e di quello suino. In media è presente una quantità (in percentuale sul totale) del 3% in azoto, del 2% in anidride fosforica e del 1,5% in ossido di potassio, ma tali valori possono variare in funzione delle caratteristiche dell'allevamento (tipo di animale, alimentazione, lettiera). L'aspetto differenziale di maggiore importanza è

il tipo di azoto presente nella pollina: circa il 50% dell'azoto è infatti sotto forma di sali dell'acido urico e il 10% sotto forma di sali dell'ammoniaca (azoto ammoniacale). La percentuale di azoto organico è dunque molto più bassa di quella che si riscontra nei fertilizzanti organici ordinari.

L'uso diretto della pollina in campo può avere effetti fitotossici, ma soprattutto si presenta problematico per l'incremento di salinità nel suolo subito dopo una somministrazione. L'elevato tenore in azoto di tipo minerale (ureico e ammoniacale) fa sì che questo materiale organico abbia più le prerogative di un concime che di un ammendante. Infatti, la pollina è soggetta ad una veloce mineralizzazione che, in caso di cospicue somministrazioni, incrementa la concentrazione della soluzione circolante e, di conseguenza, la salinità del terreno. L'utilizzo della pollina in campo agronomico differisce quindi marcatamente da quello degli altri fertilizzanti organici e s'inquadra nelle seguenti linee generali:

- somministrazione a basse dosi, di poco superiori a quelle adottate in genere per una concimazione di fondo con concimi chimici;
- somministrazione a breve distanza dalla semina, orientativamente in corrispondenza delle lavorazioni complementari.

La somministrazione di basse dosi è una condizione necessaria per evitare pericolosi aumenti della salinità. Per i concimi a medio rapporto carbonio/azoto, come il letame o il sovescio di leguminose, non ci sono limiti tecnici se non sotto l'aspetto economico od operativo e possono essere somministrati anche diverse tonnellate ad ettaro.

Il basso rapporto carbonio/azoto dei liquami consiglia il mantenimento delle dosi entro un massimo 5 t/ha di sostanza secca frazionata in più somministrazioni, per evitare accumuli di salinità e inquinamento delle falde. Per la pollina questi valori si riducono a 1-2 t/ha di sostanza secca, pari a 1,8-2,4 tonnellate di pollina essicata.

La somministrazione a breve distanza dalla semina si fonda sul fatto che la pollina ha dinamiche, nel terreno, abbastanza vicine a quelle dell'urea: è infatti mineralizzata in tempi relativamente brevi, perciò la somministrazione in epoche precedenti predispone una considerevole parte dell'azoto alle perdite per lisciviazione. Va tuttavia precisato che eventuali distribuzioni non uniformi accentuano il rischio della salinità, perciò in condizioni di difficile controllo si può ricorrere alla distribuzione in corrispondenza dell'aratura. (Giardini, 1986)

Il compostaggio è un metodo ampiamente utilizzato per la valorizzazione dei rifiuti organici. L'applicazione di rifiuti non decomposti o compost non stabilizzato al suolo può portare all'immobilizzazione dei nutrienti delle piante e causare fitotossicità. I problemi ambientali associati alla distribuzione di pollina tal quale, come il rilascio di gas inquinanti o la diffusione di agenti patogeni e geni di resistenza potrebbe essere mitigata stabilizzando il contenuto di sostanze nutritive e di materia organica mediante compostaggio. (Chen *et al.*, 2020) (Riaz *et al.*, 2020)

### **2.3 Farine di cereali, scarti di biscottificio**

Da sempre ciascun processo della filiera agroalimentare per la produzione di cibo, comporta degli scarti. La tendenza generale negli ultimi è quella del riutilizzo di questi sottoprodotti al fine di creare un'economia circolare. Gli scarti di cereali e farine sono da sempre riutilizzati nel settore zootecnico come mangimi, ma nel caso di prodotti da forno lavorati, come la produzione di biscotti, quindi con aggiunta di zuccheri, non è consigliabile l'utilizzazione zootecnica. In alcuni specifici casi tali sottoprodotti potrebbero non essere ammessi per legge come alimento zootecnico poiché derivanti da attività di ristorazione o cucine (REGOLAMENTO (CE) n. 1069/2009 DEL PARLAMENTO EUROPEO E DEL CONSIGLIO del 21 ottobre 2009). Ecco allora che vi è la possibilità di utilizzare questo genere di sottoprodotto in aggiunta ad altri materiali organici in un processo di compostaggio, la parte di carboidrati e zuccheri permette di velocizzare il processo in quanto è carbonio più facilmente assimilabile dai microrganismi.

### **2.4 Biochar**

Col termine biochar si intende un materiale carbonioso ottenuto per degradazione termica (pirolisi di biomassa sia di origine animale che vegetale). Il biochar deve essere considerato come un materiale eterogeneo ricco di sistemi aromatici e minerali.

Esso si deve ottenere per pirolisi di biomassa prodotta in modo sostenibile in condizioni controllate e con tecnologia pulita; deve avere proprietà per cui esso può essere usato per tutti gli scopi che non prevedano una rapida mineralizzazione in

anidride carbonica e deve conservare delle caratteristiche che rendano possibile anche il suo uso come ammendante dei suoli. (European Biochar Foundation - European Biochar Certificate (EBC), 2012)

Questa definizione rende conto del fatto che il biochar non è usato solo come ammendante dei suoli, ma può essere usato anche per molti altri scopi. Per esempio, alcuni usi sono legati alla veterinaria (il biochar viene usato come additivo negli alimenti per animali), all'edilizia (come materiale per l'isolamento) e alla decontaminazione ambientale (filtro per la purificazione delle acque e dei suoli oppure materiale per assorbire sostanze organiche volatili maleodoranti) oppure per utilizzi più tecnologici come la produzione di pseudocondensatori (ossidoriduzione) per l'accumulo di energia elettrica. (Schmidt, 2012)

Quando usato come ammendante dei suoli, il biochar ne migliora la qualità agendo sulla sua struttura, il pH, la capacità di scambio cationico e la densità; anche la biomassa microbica presente nei suoli viene influenzata dalla presenza del biochar.

C'è miglioramento della fissazione dell'azoto, delle proprietà fisiche e chimiche del suolo, la diminuzione della lisciviazione dei nitrati ( $\text{NO}_3^-$ ) e dell'emissione di protossido di azoto ( $\text{N}_2\text{O}$ ). (Lone *et al.*, 2015)

Nonostante il ruolo positivo che il biochar sembra avere sulla fertilità dei suoli, bisogna fare attenzione nel suo utilizzo perché in alcuni casi sono stati riportati effetti negativi sulla produttività agricola. In realtà, prima dell'utilizzo di un qualsiasi tipo di biochar, bisogna effettuare studi dettagliati in merito alle sue caratteristiche chimico fisiche in modo tale da poterne indirizzare l'uso nel modo migliore, impedendone gli effetti negativi. Infatti, uno studio cinese ha testato l'utilizzo dello stesso biochar su 5 differenti tipologie di terreni e ha riscontrato che solo su uno di questi, il biochar ha apportato effetti benefici in termini di assimilazione di N, mentre negli altri 4 ha avuto effetti nulla o addirittura limitanti, riducendo la disponibilità di N. (Zhu, Peng and Huang, 2015)



**Figura 6 – Biochar**

#### 2.4.1 I benefici del Biochar:

- Ammendante dei terreni

Considerando la possibilità di utilizzo del biochar come ammendante si può genericamente affermare che ha effetti positivi sulla fertilità del terreno in cui viene distribuito, andando a migliorarne le caratteristiche fisiche, chimiche, biologiche e meccaniche grazie alla sua elevata porosità. Inoltre, conferisce struttura al terreno, il che rende il biochar di grande potenziale per migliorare i terreni sabbiosi. (Ding *et al.*, 2016)

- Sequestra la CO<sub>2</sub>

Una maggior fertilità si traduce inoltre in una maggior efficienza fotosintetica, in un maggior sviluppo della biomassa e quindi in un maggior sequestro di carbonio. L'anidride carbonica viene accumulata nel terreno invece che essere liberata nell'atmosfera e questo rende il biochar una risorsa molto utile per la mitigazione delle emissioni di CO<sub>2</sub> in atmosfera derivanti dall'attività umana. (Chen *et al.*, 2011)

- Risparmio d'acqua

La sua alta porosità aumenta la ritenzione idrica e quella degli elementi nutritivi, che in questo modo rimangono più a lungo disponibili per le piante. Ovviamente un aumento della capacità idrica del terreno comporterà una minore necessità di irrigare le colture. Inoltre, la sua presenza nel terreno impedisce la lisciviazione dovuta alle piogge di nitrati e fosfati, andando a preservare le falde acquifere e la fertilità stessa del terreno. (Baiamonte *et al.*, 2015)

- Disinquinante dei terreni

Il biochar ha la capacità di adsorbire e trattenere inquinanti persistenti e cancerogeni, rendendolo potenzialmente utile negli interventi di bonifica ambientale, sia per i terreni contaminati da metalli, che per il trattamento delle acque. Ovviamente non è efficace a priori, come si evince da una ricerca condotta su diversi tipi di inquinanti e diverse dosi di biochar. Ciascun suolo e ciascun inquinante ha bisogno di una determinata quantità di biochar. (Kołtowski and Oleszczuk, 2015)

- Additivo per la produzione di compost

L'interramento di Biochar nel suolo coltivato non è l'unico metodo di impiego in agricoltura, esso infatti può essere utilizzato anche per la produzione di compost. Dalle ultime ricerche, l'aggiunta di biochar al processo di compostaggio riduce i tempi, le emissioni di gas serra (metano e ossido di diazoto), le perdite di ammoniaca e gli odori sgradevoli, oltre che a fungere da materiale di riempimento per il compost. D'altra parte, il processo di compostaggio arricchisce il biochar di nutrienti senza intaccarne la struttura. (Schmidt, 2012)

Altri studi hanno utilizzato il biochar come matrice co-compostante e hanno dato risultati interessanti. Infatti, l'aggiunta di Biochar al 3% ha favorito una rapida degradazione della sostanza organica, ha ridotto al minimo la formazione di grossi grumi e accelerato la stabilizzazione e la maturazione del compost. Il biochar ha anche favorito la mineralizzazione dell'azoto. Dati i risultati, è stato stimato che il biochar potrebbe ridurre la durata della fase attiva del compostaggio riducendo quindi i costi di produzione. (Sánchez-García *et al.*, 2015)

Una sperimentazione di co-compostaggio di Biochar con digestato ha dato risultati qualitativi soddisfacenti sia dal punto di vista del processo (sono stati velocizzati i tempi) che del prodotto ottenuto. È da evidenziare la riduzione della polvere nel biochar: dopo aver mescolato le andane, non è stato possibile osservare visivamente la tipica polvere nera che normalmente si sviluppa durante la manipolazione del biochar. Ciò rappresenta un enorme vantaggio in termini di logistica, movimentazione, salute e sicurezza del biochar, quando viene trasportato, immagazzinato e applicato nei campi. (Casini *et al.*, 2019b)

## **SCOPO DELLA TESI**

Lo scopo della tesi è identificare il metodo migliore per valorizzare le biomasse residuali di processi agricoli o dell'industria agroalimentare in ottica di una ottimizzazione dell'economia circolare.

Il metodo preso in esame è il compostaggio di coformulazioni di digestato (matrice organica principale) e altre biomasse di scarto, al fine di incrementare il valore economico e agronomico dell'ammendante ottenuto.

La valutazione avverrà sulla buona riuscita del processo di compostaggio e attraverso l'analisi di prove sperimentali di coltivazione e concimazione su girasole.

# Capitolo 3

## CASO DI STUDIO

Il progetto ha il duplice scopo di valutare quali biomasse residuali derivanti da processi agro-industriali possono dare risultati migliori in un processo di co-compostaggio con digestato separato solido e verificare l'efficienza ammendante e nutrizionale del compost prodotto, somministrandolo su girasole e quindi misurarne le rese.

Le prove di compostaggio sono state condotte su quattro differenti tipi di biomasse miscelate fra loro secondo proporzioni prestabilite:

- Digestato
- Biochar
- Pollina
- Farine e scarti di biscottificio

Questi due obiettivi sono stati già condotti da un dottorando nella stagione 2019/2020 producendo compost maturo dalle stesse matrici per poi distribuirlo su un campo sperimentale di Girasole gestito dal Crea di Osimo, suddiviso in parcelle in triplice prova di coltivazione. Le varie tesi sono state messe a confronto anche con parcelle di controllo e parcelle concimate con Urea.

Il progetto è stato ripreso a febbraio 2021 ed è consistito nella nuova produzione di compost dallo stesso tipo di biomasse utilizzate nel 2020, così da monitorare e valutare l'efficienza nel processo di compostaggio. Il compost ottenuto verrà distribuito nella campagna di coltivazione 2022 del girasole, sullo stesso appezzamento del CREA dopo la rotazione con frumento.

Saranno valutate le rese di girasole e il contenuto in olio per ogni prova di concimazione effettuata e analizzate attraverso il calcolo statistico Anova, al fine di valutare la significatività delle prove.

# Capitolo 4

## MATERIALI E METODI

### 4.1 Biomasse utilizzate

#### 4.1.1 *Digestato*

Il digestato che è stato utilizzato come substrato principale nelle varie prove deriva dall'impianto di biogas della Covalm biogas scarl di Osimo. Questa tipologia di digestato proviene dalla digestione anaerobica di insilato di mais e residui orticoli dell'industria agroalimentare, trattenuti per 90 giorni circa all'interno del biodigestore al fine di poter produrre la massima quantità possibile di metano.

L'impianto di biogas della Covalm è di tipo termofilo; come già spiegato nella parte introduttiva, questo modello impiantistico dovrebbe avere un tempo di permanenza medio della biomassa di circa 30 giorni. Il motivo di trattenere la biomassa per ben tre volte il tempo necessario, è una scelta dell'azienda in quanto le permette di estrarre un maggior quantitativo di biogas e gestire i reflui e il digestato con tempistiche più congrue alla loro realtà.

Questa decisione comporta l'ottenimento di un digestato ben sterilizzato e in particolar modo sarà un substrato organico molto più sfruttato dai microrganismi anaerobici e quindi stabilizzato.



***Figura 7 - Digestato***

#### 4.1.2 *Biochar*

Il biochar utilizzato non è altro che della comune carbonella da barbecue, in quanto non è stato possibile reperire il biochar dall'azienda fornitrice. Comunque, il risultato non dovrebbe cambiare, dato che il procedimento di produzione della carbonella è la stessa pirolisi con cui si ottiene il biochar. Di conseguenza anche le proprietà chimico/fisiche che dovrebbe apportare al compost saranno le stesse.

Il prodotto è stato ottenuto da legno vergine di quercia, ha dimensioni grossolane di circa 10 cm quindi ne sono state ridotte le dimensioni, dimezzandole, così da ottenere una maggior omogeneità di distribuzione nella massa e aumentare la superficie biodisponibile di attacco ai microrganismi.

#### 4.1.3 *Pollina*

La pollina reperita per le prove è una pollina da lettiera in paglia, meno adatta per un processo di digestione anaerobico in quanto la paglia ha tempi di degradazione molto più lunghi, ma risulta ottimale nel migliorare il rapporto C/N nel processo di compostaggio

#### 4.1.4 *Scarti di farine di cereali*

La quarta biomassa residuale è stata gli scarti di macinazione di cereali, non solamente crusca, in quanto avrebbe avuto un rapporto C/N non ottimale, spostato troppo verso il carbonio, ma prevalentemente la parta più o meno fine della macinazione dei cereali, ovvero quella con più carboidrati e zuccheri facilmente assimilabili dai microrganismi.

### 4.2 **Produzione del compost**

Il compostaggio delle matrici organiche è avvenuto all'interno delle cisterne IBC da 1000 L, alle quali è stato tagliato il coperchio superiore così da poter agevolare i processi di rimescolamento del materiale e sono stati praticati dei fori laterali per permettere al substrato di essere ossigenato più agevolmente. Infine, il rubinetto sul fondo è stato lasciato aperto per far defluire l'eventuale percolato che si formerà durante il processo.



**Figura 8 - Cisterna IBC (fonte: packservices.it)**

Sono state disposte quindi otto cisterne per svolgere le tesi riportate nella tabella seguente. Ciascuna prevede la miscelazione delle varie biomasse residuali secondo delle proporzioni prestabilite, replicando quelle di un progetto sperimentale eseguito da uno studente di dottorato.

**Tabella 1 - Composizione tesi**

<b>TESI</b>	<b>COMPOSIZIONE</b>	<b>RAPPORTO</b>
<b>DCT</b>	DIGESTATO	1:1
<b>DPM</b>	POLLINA + DIGESTATO	1:4
<b>DSL</b>	INSILATO DI MAIS + DIGESTATO	1:4
<b>DMS</b>	POLLINA + INSILATO DI MAIS + DIGESTATO	1:1:8
<b>DFBy</b>	SCARTI DI BISCOTTIFICIO + DIGESTATO	1:4
<b>D12C</b>	BIOCHAR 12% + DIGESTATO	1:8
<b>D8C</b>	BIOCHAR 8% + DIGESTATO	1:12,5
<b>D4C</b>	BIOCHAR 4% + DIGESTATO	1:25

Le prove da compostare devono essere di 200 kg complessivi. Purtroppo, dopo avere reperito le varie biomasse necessarie, pesate e valutati i quantitativi di prodotto disponibili, non tutti erano sufficienti per raggiungere il giusto quantitativo.

In particolare, le prove con pollina e insalato, per via dell'esigua quantità di prodotto disponibile, la massa complessiva è stata ridotta in proporzione.

Le biomasse al momento della suddivisione, erano già sufficientemente umide, quindi non è stato necessario aggiungere ulteriore acqua.



**Figura 9 - Compostaggio delle 8 tesi**

#### 4.2.1 *Analisi CHN*

Una volta formulate le varie tesi e mescolate omogeneamente, sono stati raccolti dei campioni di ciascuna prova per misurare la composizione CHN.

Dato che le quantità finali di ogni elemento vengono generalmente espresse in percentuale del peso del campione, è fondamentale che sia pesato accuratamente con una bilancia di precisione.

Sono stati prelevati 2 campioni per ogni tesi, misurato il peso fresco, essiccati a 105° per due giorni e nuovamente misurato il peso secco.

**Tabella 2 - Misurazione umidità campioni per CHN**

<b>TESI</b>	<b>PESO FRESCO NETTO (g)</b>	<b>PESO SECCO NETTO (g)</b>	<b>UMIDITA' (%)</b>
<b>DMS</b>	289,85	106,75	63,17%
<b>D4C</b>	299,5	86,15	71,24%
<b>DPM</b>	296,65	107,35	63,81%
<b>DFBy</b>	291,9	113,2	61,22%
<b>DCT</b>	311,35	77,25	75,19%
<b>DSL</b>	312,75	91,4	70,78%
<b>D8C</b>	307,95	106,7	65,35%
<b>D12C</b>	324,95	139,3	57,13%

I vari campioni sono stati sottoposti a macinazione tramite mulino a martelli, per omogeneizzare il campione e renderlo fine, così da poter procedere all'analisi del CHN in laboratorio.

L'analisi elementare CHN(O), nota anche come 'analisi elementare organica' o 'microanalisi elementare', determina le quantità di carbonio (C), idrogeno (H), azoto (N) e ossigeno (O) presenti in un campione. Si tratta di una tecnica affidabile ed economicamente conveniente per valutare la purezza e la composizione chimica dei composti. Conoscere la composizione delle sostanze organiche ci aiuta a determinare la struttura della sostanza che costituisce il campione.

La tecnica di analisi elementare CHN(O) più comune è basata sulla combustione del campione. Questa può essere effettuata in un apposito strumento denominato analizzatore elementare. Durante la combustione, il campione produce composti gassosi uniformi costituiti dagli elementi C, H, N. Questi prodotti di combustione (CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, NO<sub>2</sub>, ecc.) vengono determinati utilizzando la gascromatografia e il rapporto tra gli elementi presenti nel campione originale viene determinato di conseguenza. Le quantità di C, H, N possono essere determinate simultaneamente, mentre la presenza di O può essere calcolata considerando i bilanci di massa del processo analitico.

#### *4.2.2 Misurazione temperatura*

Il processo di compostaggio è stato costantemente monitorato, misurando temperature e umidità della massa, indispensabili per analizzare l'avanzamento del processo ed individuarne le fasi, quindi il raggiungimento delle temperature massime (fase termofila), la fase lentamente decrescente delle temperature (fase mesofila) e la fase finale di maturazione del compost.

Le misurazioni sulle tesi sono state eseguite a intervalli variabili, inizialmente a cadenza giornaliera e a mano a mano è diminuita la frequenza fino ad intervalli settimanali. Le temperature sono state rilevate con un termometro a sonda ed è stato seguito uno schema di misurazione a “W” rispetto alla superficie del materiale. Sono state misurate due serie di temperature a diverse profondità della massa, la prima “a tutta sonda” che prevede la misurazione indicativamente sul fondo del recipiente, a 40 cm dalla superficie. Mentre la misurazione “a metà sonda” localizza la temperatura al

centro della massa, a 20 cm dalla superficie, rilevando temperature più veritiere perché meno condizionate dalle temperature esterne.

Per ogni giornata di misurazione è stata rilevata anche la temperatura ambientale, così da avere una correlazione dell'influenza delle condizioni ambientali.

#### *4.2.3 Gli interventi durante il compostaggio*

Il compostaggio ha bisogno di controlli e operazioni frequenti, anche se è un processo che in natura avviene più o meno naturalmente, a livello industriale non riesce ad autoregolarsi.

Inizialmente, sulla maggior parte delle prove, le temperature non si sono alzate, il processo microbico non si era innescato, quindi sono stati adottati degli accorgimenti utili per migliorare le condizioni della biomassa microbica presente generalmente nelle matrici organiche. Il primo tentativo è stato insufflare aria compressa dai fori laterali praticati nelle cisterne, al fine di dare ossigeno ai microrganismi aerobi ed evitare anossia degli strati profondi. Procedimento obbligato per evitare di dover rivoltare la massa e quindi impedire l'abbassamento ulteriore delle temperature, visto il clima rigido dei mesi di febbraio.

Un secondo tentativo è stato quello di aggiungere acqua zuccherata per dare energia prontamente assimilabile dai microrganismi e metterli nelle condizioni ottimali per attivarsi.

Una volta che le temperature ambientali si sono alzate, hanno favorito l'attività microbica, permettendo di velocizzare il processo di compostaggio. Quando le temperature del compost si sono alzate, si è provveduto a rimescolare l'intera massa, rivoltando gli strati, ossigenandoli, diminuendo temporaneamente le temperature e rendere maggiormente disponibile nuova biomassa non ancora attaccata dai microrganismi.

### 4.3 Distribuzione in campo

La distribuzione dei vari ammendanti è avvenuta in quantità definite, considerando la quantità di azoto contenuto su peso secco, così da distribuire l'esatta quantità di Azoto totale contenuto in ogni campione. Per ogni parcella è stato deciso di distribuire 50 kg N/ettaro. L'ammendante è stato somministrato manualmente in presemina del girasole e interrato superficialmente con un rastrello.

Oltre alle prove con i vari ammendanti compostati, sono state effettuate prove di controllo con distribuzione di digestato tal quale, digestato liquido, senza distribuzione di fertilizzanti e con distribuzione di fertilizzante minerale (Urea 46%) in post-emergenza.

*Tabella 3 - Peso ammendante distribuito*

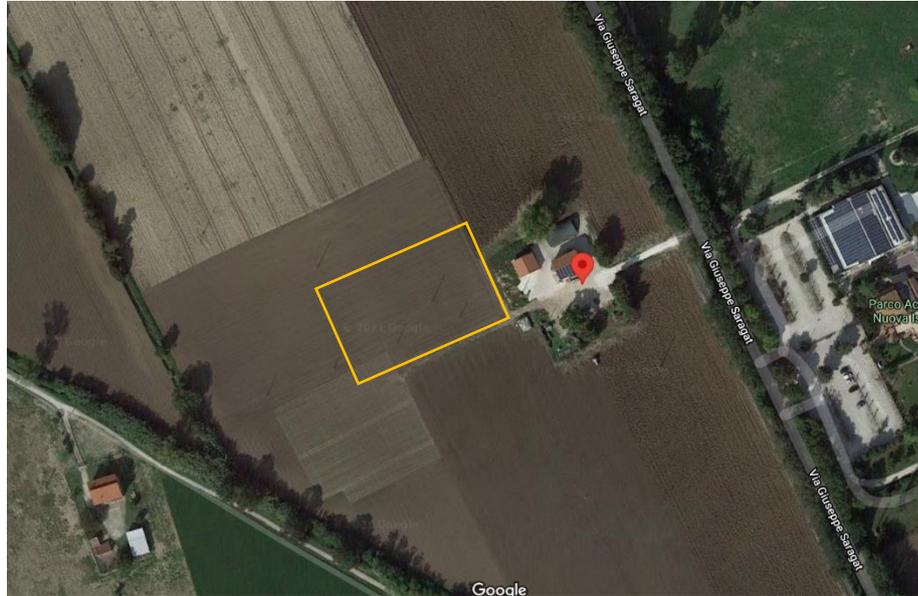
<b>Tesi</b>	<b>% N AV</b>	<b>Umidità</b>	<b>Kg peso fresco per parcella</b>
<b>DPM</b>	3,00	66%	7,35
<b>DCT</b>	2,14	69%	11,29
<b>DFBy</b>	3,34	55%	5,00
<b>DSL</b>	3,25	59%	5,63
<b>D12C</b>	1,96	65%	10,93
<b>DMS</b>	3,04	64%	6,86
<b>D04C</b>	2,06	46%	6,75
<b>D08C</b>	2,02	63%	10,02
<b>Urea</b>	46,00	0%	0,16

#### 4.3.1 Campo sperimentale Crea

Il Crea di Osimo ha una superficie di 16 ettari destinata principalmente alle seguenti attività:

- Sperimentazione agraria per progetti di ricerca finanziati su colture industriali da rinnovo;
- Prove agronomiche per l'iscrizione delle varietà al registro su girasole, colza, cartamo, barbabietola da zucchero, sorgo da biomassa;
- Sperimentazione in conto terzi, su commissione di ditte sementiere internazionali. Ha il coordinamento di due reti di valutazione nazionale su girasole e colza;

- Mantenimento in purezza del costituente e la moltiplicazione delle varietà conservate in purezza, piccoli programmi di breeding, prove di confronto per linee in selezione.



***Figura 10 - Campo sperimentale Crea Osimo***

Il campo sperimentale di girasole, varietà MAS86 altoleico, eseguito e gestito dal CREA di Osimo è stato diviso in parcelle di 15 m<sup>2</sup> ciascuna e le prove sono state randomizzate lungo l'appezzamento. La zona non presenta gradienti che possano influire sulla prova.

Ogni tesi è stata condotta in triplice prova ed ogni parcella ha subito le stesse tecniche agronomiche e trattamenti erbicidi.

Come descritto nel layout del campo sperimentale in figura 10, le parcelle catalogate "B", ai bordi, sono prove di controllo, non soggette a concimazioni ma gestite con stesse tecniche agronomiche. Queste non sono state considerate in quanto condizionate dagli effetti di margine, in quanto posizionate a livello delle capezzagne, quindi non potrebbero dare risultati attendibili. Infatti, la semina è avvenuta in direzione ortogonale rispetto al layout dell'immagine del campo sperimentale.

Mentre le parcelle "B" situate lungo le file numerate, sono considerate sempre come parcella di controllo, non soggette a concimazione ma comunque coltivata in

previsione di applicazioni di emergenza se dovessero insorgere problemi con altre prove o se si volesse testare un'ulteriore prova.

Le parcelle effettivamente considerate per la sperimentazione sono quindi quelle catalogate da numeri e codici corrispondenti al trattamento ammendante somministrato.

Le parcelle vuote, prive di codici, sono invece sempre coltivate ma non concimate e non vengono considerate. La necessità di inserire una parcella neutrale tra due prove è per evitare l'interferenza delle concimazioni somministrate e per permettere agli operatori di utilizzarle come vie di transito, senza dover calpestare le prove.

B	11 DPM		12 controllo		36 DSL	B
B	10 dig liquid		13 D08C		35 dig liquid	B
B	9 DFBY		14 digestato		34 DCT	B
B	8 D12C		15 UREA		33 DPM	B
B	7 D08C		16 UREA		32 DMS	B
B	6 digestato		17 D04C		31 DSL	B
B	5 controllo		18 DCT		30 DFBY	B
B	B		19 D12C		29 DCT	B
B	4 DSL		20 controllo		28 digestato	B
B	3 DMS		21 D04C		27 DFBY	B
B	2 D08C		22 D04C		26 dig liquid	B
B	1 D12C		23 UREA		25 DPM	B
B	B		B		24 DMS	B

*Figura 11 - Disegno campo sperimentale*

## 4.4 Campionamenti raccolta Girasole

La raccolta delle parcelle sottoposte alle varie prove di concimazione ha dato risultati diversi. Per ogni parcella sono stati misurati:

- Peso totale acheni per parcella di 7.26 m<sup>2</sup>
- Umidità (%)
- Peso di 250 semi
- Contenuto in olio % sulla sostanza secca

Di conseguenza sono stati calcolati:

- Resa seme ad ettaro al 9% di umidità
- Produzione di olio ad ettaro
- Peso di 1000 semi al 9% di umidità

## 4.5 Analisi statistica

L'Analisi della varianza ANOVA (dall'inglese Analysis of Variance) è una tecnica facente parte della statistica inferenziale; questa analisi permette di confrontare due o più gruppi di dati, riuscendo a confrontare le due varianze per determinare se le differenze rilevate tra le medie dei gruppi sono significative.

Nel nostro caso in particolare è stato analizzato un disegno sperimentale completamente randomizzato (assenza di gradienti). Per il calcolo della significatività è stato considerato un intervallo di confidenza P di 0,05.

L'analisi statistica è stata condotta su tutti i parametri misurati e calcolati, riportati nel paragrafo precedente.

# Capitolo 5

## RISULTATI

### 5.1 CHN

L'analisi di laboratorio del CHN sui campioni delle otto tesi ha dato i risultati riportati in tabella. Si può subito notare la netta differenza che hanno le tesi con Biochar rispetto alle altre.

Le tesi con biochar al 4 – 8 – 12 % (D4C, D8C, D12C) hanno un contenuto di carbonio molto alto e una ridotta disponibilità di azoto rispetto alle altre tesi. Ciò comporta un netto sbilanciamento del rapporto C/N con possibili ripercussioni per l'attività microbica durante il processo di compostaggio.

Invece, è interessante ma anche prevedibile il risultato del contenuto di azoto delle tesi con digestato e pollina (DPM) e quella con digestato, pollina e insilato (DMS). La pollina, nonostante composta da lettiera in paglia, ha un contenuto di azoto molto alto rispetto agli altri materiali.

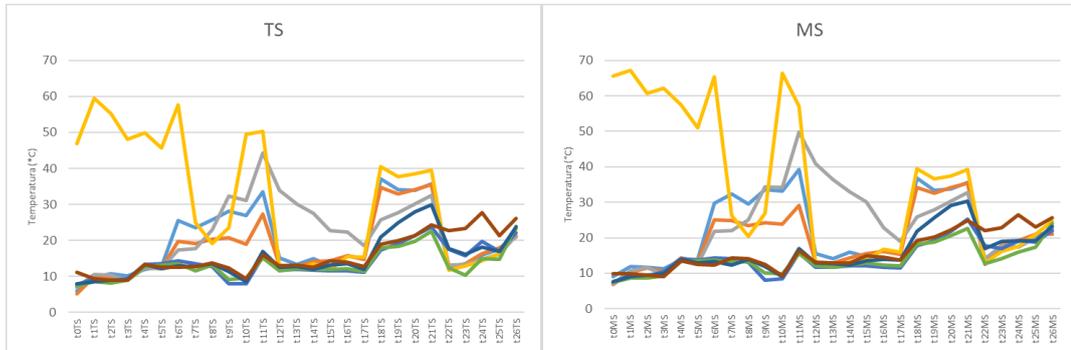
Vedendo già i risultati dell'analisi CHN all'inizio, sarebbe stato il caso di avvicinarsi con il C/N il più possibile al valore di 30, al fine di ottimizzare il processo, ma il progetto prevede la replica delle stesse tesi e stesse percentuali del lavoro condotto l'anno precedente da uno studente di dottorato.

**Tabella 4 - Risultati analisi CHN**

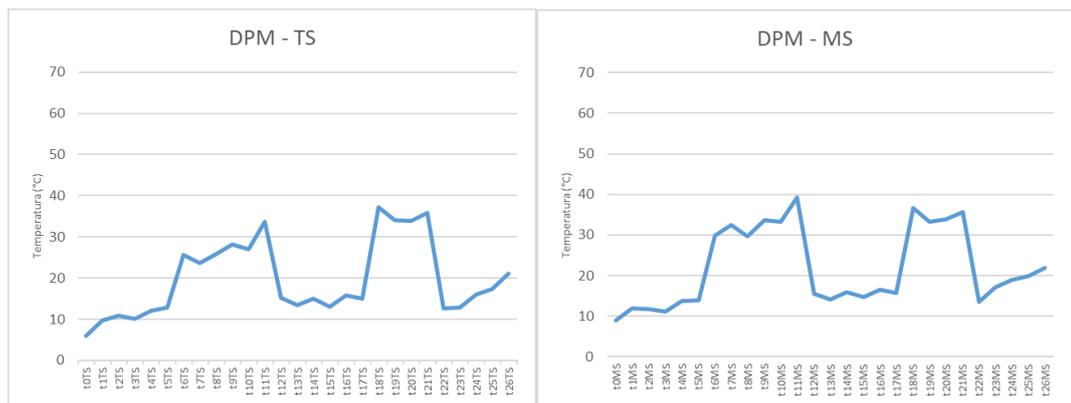
<b>Tesi</b>	<b>C</b>	<b>H</b>	<b>N</b>	<b>C/N</b>
<b>DMS</b>	40,8	5,3	2,2	19
<b>D4C</b>	55,6	4,1	1,4	40
<b>DPM</b>	40,4	5,0	2,5	16
<b>DFBy</b>	45,2	5,7	1,9	24
<b>DCT</b>	42,8	5,3	1,9	23
<b>DSL</b>	41,8	5,3	1,9	22
<b>D8C</b>	66,2	3,5	1,1	60
<b>D12C</b>	69,2	3,4	1,0	69

## 5.2 Temperature di compostaggio

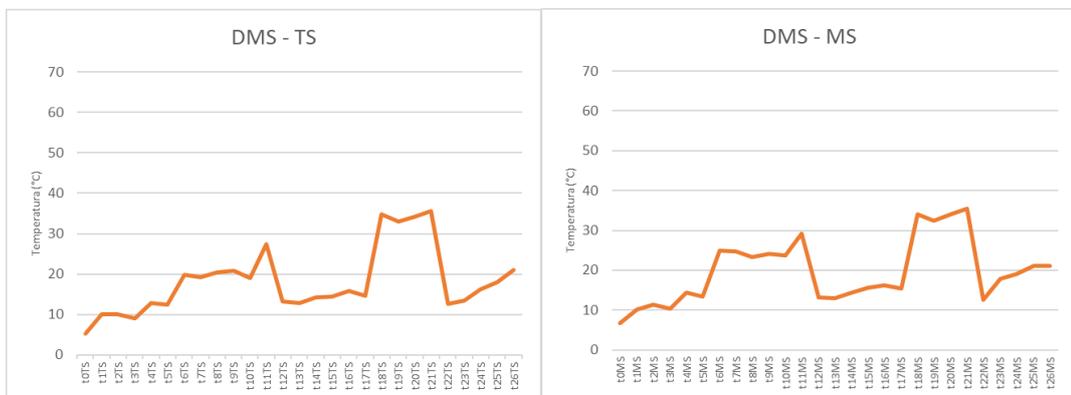
Di seguito vengono riportati i grafici dell'andamento delle temperature durante il processo di compostaggio di ogni prova.



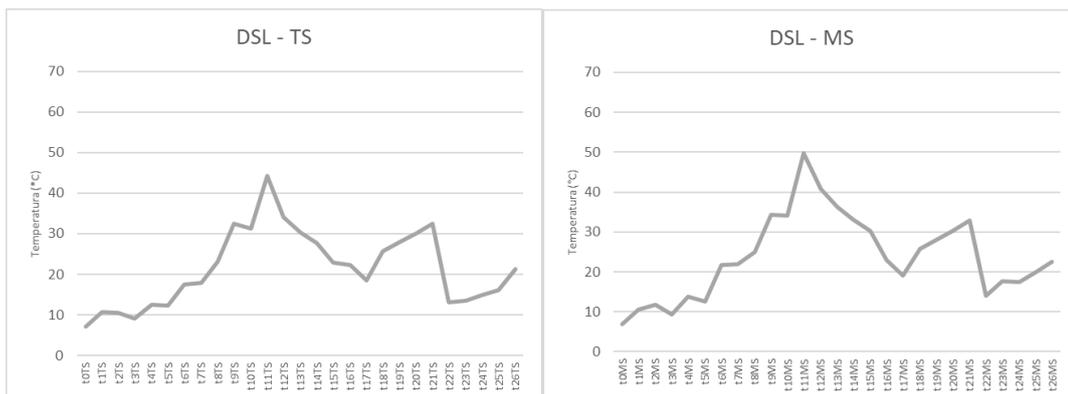
**Grafico 1 - Tutte le prove**



**Grafico 2 - DPM (Digestato + Pollina)**



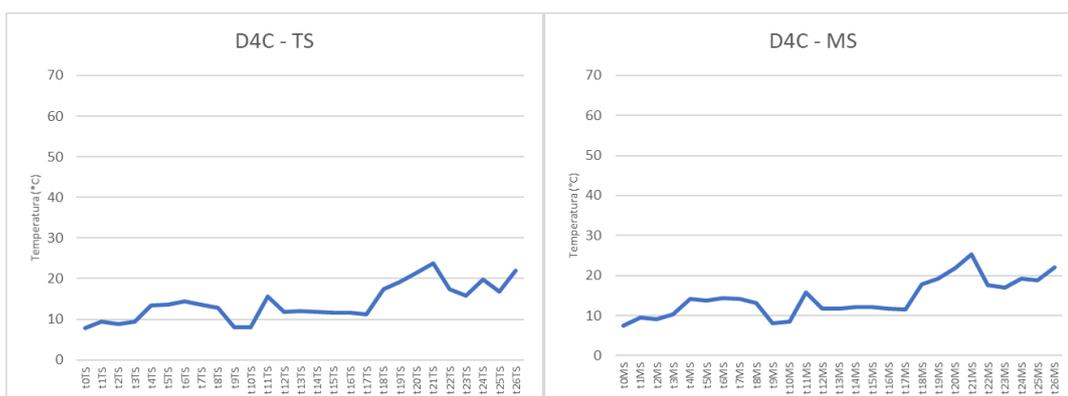
**Grafico 3 - DMS (Digestato + Pollina + Insilato)**



**Grafico 4 - DSL (Digestato + Insilato)**



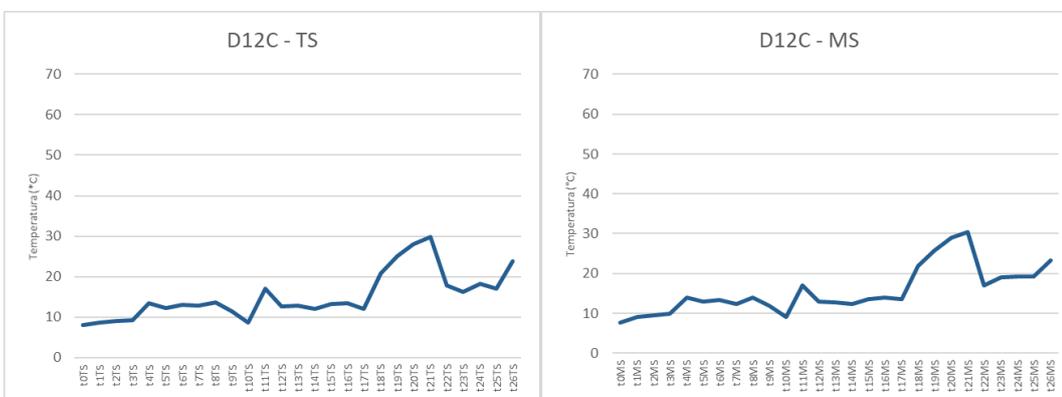
**Grafico 5 - DFBy (Digestato + scarti di molitura)**



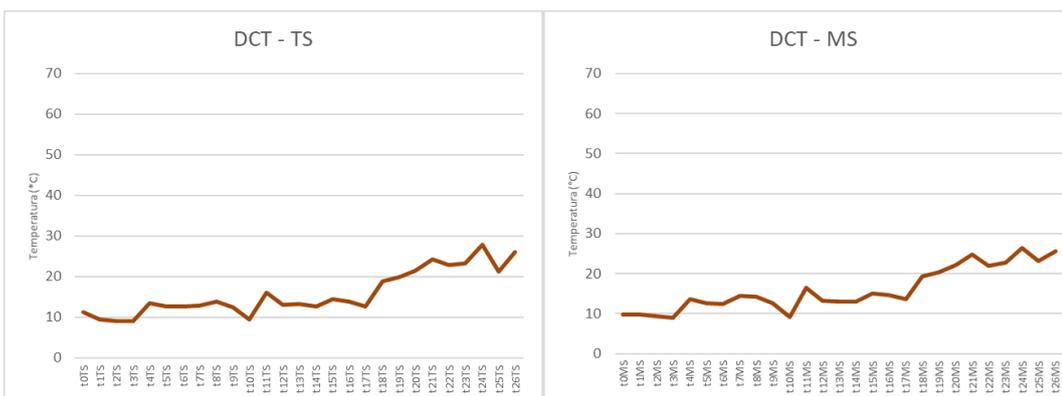
**Grafico 6 - D4C (Digestato + Biochar 4%)**



**Grafico 7 - D8C (Digestato + Biochar 8%)**



**Grafico 8 - D12C (Digestato + Biochar 12%)**



**Grafico 9 - DCT (Digestato)**

## 5.3 Raccolto Girasole

Le misurazioni del raccolto del campo sperimentale hanno dato i seguenti risultati.

*Tabella 5 - Rese raccolto girasole*

Trattamento	Replica	Peso campione 6,93 mq (g)	Umidità GAC (%)	Peso 100 semi (g)	Contenuto olio s.s. (%)	Prod. acheni 9% di um. (t/ha)	Prod. olio s.s. (t/ha)	Peso 1000 al 9% di um. (g)
DPM	1	2287	5,3	5,2	48,010	3,43	1,50	54,1
DPM	2	2261	5,5	5,7	47,483	3,39	1,46	59,2
DPM	3	2108	5,3	4,8	48,586	3,17	1,40	50,0
DCT	1	2088	5,4	5,2	46,650	3,13	1,33	54,1
DCT	2	1879	5,2	5,3	48,123	2,82	1,24	55,2
DCT	3	2025	5,1	4,6	47,274	3,05	1,31	48,0
DFBy	1	1949	5,2	4,5	48,627	2,93	1,30	46,9
DFBy	2	1916	5,0	4,7	48,630	2,89	1,28	49,1
DFBy	3	2147	5,2	4,9	47,304	3,23	1,39	51,0
DSL	1	1828	6,0	6,1	46,647	2,72	1,16	63,0
DSL	2	2038	5,1	5,9	47,416	3,07	1,32	61,5
DSL	3	1574	5,3	5,5	44,938	2,36	0,97	57,2
D12C	1	2108	5,5	4,5	45,420	3,16	1,31	46,7
D12C	2	1719	5,4	4,7	47,532	2,58	1,12	48,9
D12C	3	2111	5,2	5,3	46,969	3,17	1,36	55,2
DMS	1	2269	5,5	5,6	48,686	3,40	1,51	58,2
DMS	2	2120	5,6	5,3	46,673	3,17	1,35	55,0
DMS	3	2484	5,1	4,9	48,103	3,74	1,64	51,1
D04C	1	1779	5,6	5,9	46,813	2,66	1,13	61,2
D04C	2	1596	5,2	5,7	49,464	2,40	1,08	59,4
D04C	3	1409	5,7	5,5	48,789	2,11	0,94	57,0
D08C	1	1427	5,8	5,1	46,424	2,13	0,90	52,8
D08C	2	1339	5,5	5,7	49,336	2,01	0,90	59,2
D08C	3	1197	5,4	5,2	47,590	1,80	0,78	54,1
Digestato	1	1739	5,4	5,4	46,931	2,61	1,11	56,1
Digestato	2	1868	5,3	5,4	45,901	2,81	1,17	56,2
Digestato	3	2036	5,3	5,5	46,699	3,06	1,30	57,2
Urea	1	1732	5,0	4,8	44,647	2,61	1,06	50,1
Urea	2	1914	5,2	5,3	47,604	2,88	1,25	55,2
Urea	3	1703	5,6	4,8	45,738	2,55	1,06	49,8
Controllo	1	2391	5,3	5,5	49,405	3,59	1,61	57,2
Controllo	2	2564	5,5	5,7	47,850	3,84	1,67	59,2
Controllo	3	2201	5,3	5,1	48,401	3,31	1,46	53,1
Controllo	1	1511	5,8	5,6	46,367	2,26	0,95	58,0
Controllo	2	1990	5,6	5,3	48,490	2,98	1,31	55,0
Controllo	3	1524	5,3	5,9	46,353	2,29	0,97	61,4

## 5.4 Analisi statistica significatività

- **Produzione acheni ad ettaro (t/ha)**

L'analisi statistica della produzione di girasole ad ettaro ha dato risultato di significatività, ci sono differenze sostanziali fra le diverse prove.

<b>FC</b>	296,33					
<b>P</b>	0,05					
<b>FV</b>	<b>SQ</b>	<b>g.l.</b>	<b>MS</b>	<b>Fc</b>	<b>Ft</b>	<b>significatività</b>
<b>TOTALE</b>	8,56	35	0,24			
<b>TRATTAMENTO</b>	6,91	11	0,63	9,13	2,22	*
<b>ERRORE</b>	1,65	24	0,07			

- **Peso 100 semi (g)**

L'analisi statistica del peso di cento semi ha dato risultato di significatività, ci sono differenze sostanziali fra le diverse prove.

<b>FC</b>	1003,83					
<b>P</b>	0,05					
<b>FV</b>	<b>SQ</b>	<b>g.l.</b>	<b>MS</b>	<b>Fc</b>	<b>Ft</b>	<b>significatività</b>
<b>TOTALE</b>	6,38	35	0,18			
<b>TRATTAMENTO</b>	4,00	11	0,36	3,66	2,22	*
<b>ERRORE</b>	2,38	24	0,10			

- **Peso campione su 6,93 m<sup>2</sup> (g)**

L'analisi statistica del peso del campione raccolto su una parcella di 6.93 m<sup>2</sup> ha dato risultato di significatività, ci sono differenze sostanziali fra le diverse prove.

<b>FC</b>	131602960,03					
<b>P</b>	0,05					
<b>FV</b>	<b>SQ</b>	<b>g.l.</b>	<b>MS</b>	<b>Fc</b>	<b>Ft</b>	<b>significatività</b>
<b>TOTALE</b>	3776778,97	35	107907,97			
<b>TRATTAMENTO</b>	3046490,97	11	276953,72	9,10	2,22	*
<b>ERRORE</b>	730288,00	24	30428,67			

- **Somma del peso di 1000 semi al 9% di umidità**

L'analisi statistica della somma del peso di 1000 semi al 9% di umidità dei campioni raccolti ha dato risultato di significatività, ci sono differenze sostanziali fra le diverse prove.

<b>FC</b>	108511,12					
<b>P</b>	0,05					
<b>FV</b>	<b>SQ</b>	<b>g.l.</b>	<b>MS</b>	<b>Fc</b>	<b>Ft</b>	<b>significatività</b>
<b>TOTALE</b>	673,55	35	19,24			
<b>TRATTAMENTO</b>	418,53	11	38,05	3,58	2,22	*
<b>ERRORE</b>	255,02	24	10,63			

- **Produzione di olio su sostanza secca (t/ha)**

L'analisi statistica della produzione di olio su s.s. ad ettaro dei campioni raccolti ha dato risultato di significatività, ci sono differenze sostanziali fra le diverse prove.

<b>FC</b>	55,19					
<b>P</b>	0,05					
<b>FV</b>	<b>SQ</b>	<b>g.l.</b>	<b>MS</b>	<b>Fc</b>	<b>Ft</b>	<b>significatività</b>
<b>TOTALE</b>	1,74	35	0,05			
<b>TRATTAMENTO</b>	1,41	11	0,13	9,12	2,22	*
<b>ERRORE</b>	0,34	24	0,01			

- **Umidità**

L'analisi statistica dell'umidità dei campioni raccolti ha dato risultato di non significatività, non ci sono differenze sostanziali fra le diverse prove.

<b>FC</b>	1042,21					
<b>P</b>	0,05					
<b>FV</b>	<b>SQ</b>	<b>g.l.</b>	<b>MS</b>	<b>Fc</b>	<b>Ft</b>	<b>significatività</b>
<b>TOTALE</b>	1,88	35	0,05			
<b>TRATTAMENTO</b>	0,57	11	0,05	0,95	2,22	n.s.
<b>ERRORE</b>	1,31	24	0,05			

- **Contenuto olio s.s. (%)**

L'analisi statistica della produzione di olio percentuale su sostanza secca ha dato risultato di non significatività, non ci sono differenze sostanziali fra le diverse prove.

<b>FC</b>	80833,41					
<b>P</b>	0,05					
<b>FV</b>	<b>SQ</b>	<b>g.l.</b>	<b>MS</b>	<b>Fc</b>	<b>Ft</b>	<b>significatività</b>
<b>TOTALE</b>	52,52	35	1,50			
<b>TRATTAMENTO</b>	24,48	11	2,23	1,90	2,22	n.s.
<b>ERRORE</b>	28,04	24	1,17			

# Capitolo 6

## ANALISI E DISCUSSIONE DEI DATI

Il processo di compostaggio ha avuto una serie di problematiche; come è evidente dai grafici dell'andamento delle temperature, nella maggior parte delle prove, il processo è stato molto lento e non ha raggiunto picchi di temperatura elevati necessari per avere una sterilizzazione dei patogeni e l'inattivazione di eventuali semi di infestanti.

Possono esserci varie spiegazioni per giustificare tali problematiche:

- **Le temperature esterne;** Il compostaggio è stato iniziato a febbraio, mese particolarmente freddo che non ha aiutato sicuramente l'avvio del processo. Infatti, come già detto, i microrganismi termofili hanno bisogno di temperature adeguate alla loro vitalità. Il problema delle temperature è comunque continuato anche fino ad aprile, in quanto ci sono stati continui ritorni di freddo nei mesi primaverili.
- **La quantità di biomassa;** Ogni tesi doveva essere complessivamente composta da 200 kg di biomassa, purtroppo è stato possibile realizzarlo solamente nella tesi con scarti di molitura (DFBy) e nella tesi di controllo con solo digestato (DCT). Le altre tesi con pollina e/o insilato (DPM, DSL, DMS) hanno avuto masse di circa la metà del quantitativo necessario. Questo ha comportato un volume ridotto, condizionato maggiormente dalle temperature esterne che hanno influito sui processi microbici.

Ciò non giustifica totalmente la problematica, in quanto anche le prove con Biochar (D4C, D8C, D12C) che avevano una massa complessiva di 170 kg e il controllo (DCT) con massa complessiva di 200 kg sono state le uniche a non avere, affatto, l'attivazione del processo microbico e quindi l'innalzamento delle temperature, necessari per il completo compostaggio della biomassa.

- **Il luogo di compostaggio;** Le cisterne IBC dove è stata contenuta la biomassa non sono coibentate e quindi ancora più condizionabili dalle temperature esterne. L'ulteriore deficit per le prove è stato anche il luogo dove erano posizionate le cisterne, queste erano per la maggior parte della giornata in ombra e quindi ancora più soggette alle basse temperature. È evidente quindi che le prove condotte non sono paragonabili ad un normale processo di compostaggio industriale. Quest'ultimo sarà sicuramente facilitato dai grossi volumi e quantitativi di biomasse compostati, meno soggetti quindi alle temperature esterne e spesso anche riscaldati per agevolare il processo.
  
- **Il digestato;** Probabilmente la qualità del digestato è stata la causa principale del rallentamento del processo di compostaggio. Infatti, il digestato utilizzato per le prove deriva da un impianto termofilo, il quale invece di trattenere il materiale in digestione anaerobica per 20-30 giorni circa, lo ha processato per 90 giorni. Di conseguenza sarà un materiale organico di gran lunga più stabilizzato e quindi con carbonio organico difficilmente assimilabile dai microrganismi aerobi, nel breve periodo. Risultato riscontrato anche da un altro studio scientifico riportato nell'introduzione.  
 In ogni caso, il nostro compost verrà processato per più di un anno, in attesa della campagna del girasole 2022, quindi si riuscirà comunque ad ottenere un compost maturo e stabilizzato.
  
- **Rapporto C/N;** Come già spiegato nella parte introduttiva, in genere vengono utilizzati trenta atomi di carbonio per ogni atomo di azoto, si deduce che il rapporto ottimale C/N all'inizio del compostaggio dovrebbe attestarsi su un valore di 30. In condizioni di eccesso di carbonio ( $C/N > 30$ ), come nel caso specifico delle tesi con Biochar (D4C, D8C, D12C) si ha un rallentamento della decomposizione, con conseguente allungamento della durata del processo. Le altre tesi hanno invece  $C/N < 30$ , sufficiente per una discreta attività microbica.  
 Dato che si conosceva il C/N al momento della miscelazione, sarebbe stato corretto aggiustare le quantità di Carbonio e Azoto aggiungendo o sottraendo

le opportune quantità di biomassa carboniosa o azotata. Però, il progetto si è basato sulla replicazione di uno studio già portato avanti da un altro studente e quindi si sono dovute mantenere le proporzioni già definite

## 6.1 D4C - D8C - D12C

Le prove di compostaggio condotte con **Biochar** al 4 - 8 - 12 % non hanno dato risultati soddisfacenti. L'attività microbica non ha mai innescato la fase termofila del compostaggio; come si può notare dalle temperature rilevate durante i 4 mesi di osservazione, non hanno avuto mai andamenti particolari o riconducibili ad una attività microbica. Le temperature sono state indicativamente le stesse di quelle ambientali, spesso anche più basse per via dell'umidità della biomassa, che ne comportava un riscaldamento più lento.

Sono stati effettuati dei tentativi di innesco dell'attività microbica attraverso l'aggiunta di acqua zuccherata, per fornirle energia prontamente disponibile, ma senza successo. È stata insufflata aria per evitare l'insorgenza di anossia negli strati, ma anche questa senza effetti benefici, anche perché lo stesso biochar forniva una miglior struttura e areazione alla biomassa compostante, quindi era già prevedibile che il problema non derivasse dalla scarsa areazione.

Uno dei problemi principali è stato sicuramente l'elevata stabilità del digestato utilizzato e il Biochar che non avendo fondamentalmente carbonio e azoto prontamente disponibile per i batteri, con un rapporto C/N troppo elevato (>30) non ha aiutato l'avvio del processo microbico. Infatti, come visto nell'introduzione, il ruolo principale del biochar è quello di apportare migliori caratteristiche fisiche alla biomassa da compostare e quindi al terreno dove verrà applicato, ma non è un'ottima matrice compostante.

Vista quindi l'esperienza avuta, sarebbe giusto provare una miscela tra digestato, una delle biomasse residuali testate, molto interessante sarebbe la pollina (per il suo alto contenuto di N) e Biochar, così da ottenere il C/N ottimale e verificare se l'attività microbica si troverebbe nelle condizioni vitali per espletare il processo completo di compostaggio. Il ruolo del Biochar in questo caso sarebbe l'assorbimento dei gas e delle sostanze che vengono emessi in un processo di ossidazione aerobico.

Un'ulteriore ipotesi di utilizzo del biochar sarebbe quella della distribuzione diretta in campo, che da letteratura conosciamo ormai i benefici, evitando quindi la lavorazione di un prodotto che in un processo di compostaggio non apporterebbe dei benefici interessanti.

## **6.2 DPM – DSL - DMS**

Risultati discreti ma non ottimali sono stati rilevati sulle miscele con pollina ed insilato, l'attività microbica ha impiegato più tempo a partire, ma successivamente ha raggiunto picchi di temperatura più elevati rispetto alle prove con biochar e controllo. I risultati dell'analisi CHN sono stati ottimali dal punto di vista dell'azoto contenuto, il C/N era più basso rispetto al valore di 30, necessario per il corretto sostentamento dell'attività microbica. In ottica futura sarebbe preferibile aumentare la parte carboniosa, integrando materiali legnosi o biochar alla coformulazione compostata. In queste tre prove, il problema principale è stato l'esigua quantità di massa compostata, a causa di problemi di reperibilità della stessa. Infatti, i cumuli creati erano di gran lunga di volume ridotto rispetto agli altri, quindi molto più soggetti alle basse temperature esterne. Al fine di ovviare parzialmente al problema, la biomassa in compostaggio è stata accumulata il più possibile in un unico punto della cisterna, così da ridurre la superficie esposta alle temperature ambientali.

## **6.3 DFBy**

La prova con le farine di cereali e digestato è quella che ha dato risultati ottimali per quello che dovrebbe essere un normale processo di compostaggio.

Infatti, le temperature hanno iniziato a crescere velocemente, sinonimo di una buona attività microbica. In 10 giorni dall'inizio del processo, le temperature hanno raggiunto i 60/70 °C, l'optimum della fase termofila di compostaggio. Durante l'innalzamento delle temperature la massa è stata continuamente rivoltata per permettere ai microrganismi di raggiungere tutta la biomassa disponibile.

La temperatura ha oscillato tra i 50 e i 70 °C per 15 giorni fino ad avere una brusca diminuzione, e raggiungere i 30 °C. Il problema è stato subito individuato e risolto, la

massa in compostaggio aveva perso tutta l'acqua per evaporazione dovuta alle alte temperature, non appena è stata integrata acqua e riportata l'umidità ottimale al 65% circa, l'attività microbica è ripartita, raggiungendo nuovamente i 60°C.

Terminata la fase termofila dopo circa 25 giorni, le temperature hanno iniziato a decrescere fino ad arrivare a 12 °C, probabilmente dovuto in parte allo sbalzo termico esterno che ha creato una situazione di stress per la biomassa microbica.

Con l'aumentare delle temperature ambientali, i microrganismi hanno ripreso l'attività, continuando il processo degradativo ma con temperature intorno ai 30°C. Queste diverse temperature stanno ad indicare il cambiamento di fase del compostaggio, si è entrati nella fase di maturazione che prevede l'azione di altri tipi di microrganismi mesofili.

La buona riuscita del compostaggio di questa tesi è sicuramente dovuta al fatto che gli scarti di farine di cereali avranno maggiori quantitativi di zuccheri, quindi un carbonio prontamente utilizzabile dai microrganismi e una buona dotazione di N.

Infatti, il C/N = 24 è quello che più si è avvicinato al valore di 30, ottimale per un buon compostaggio. Quindi, è fondamentale creare una giusta miscela di biomasse che più si avvicini all'esatto rapporto di C/N.

Ogni biomassa testata ha determinati pregi e difetti e solo combinandole potranno dare buoni risultati.

## 6.4 DCT

La prova di compostaggio del controllo (DCT), contenente solamente digestato, ha avuto un andamento delle temperature molto lento, paragonabile alle prove con biochar, dato che in entrambi casi la biomassa compostante era solo il digestato.

Quindi anche in questa prova si è avuto un forte condizionamento delle temperature esterne e la bassa fermentescibilità della massa che non ha permesso ai microrganismi di attivarsi. Si è notato un graduale aumento delle temperature da marzo in poi, anche dovuto alle temperature esterne, ma la temperatura della massa superava quest'ultime di qualche grado. Ciò significa che una sufficiente attività microbica era presente, ma non eccessivamente attiva per via della carenza di zuccheri, carbonio e azoto biodisponibile.

Questa prova è la dimostrazione del fatto che le problematiche riscontrate nei processi di compostaggio, buona parte dipendono dalla biomassa predominante utilizzata. Non è fattibile eseguire il compostaggio del solo digestato, ma è indispensabile aggiungere biomasse con caratteristiche migliori, al fine di ottimizzare la produzione di compost e riuscire a compostare matrici che prese singolarmente non avrebbero potuto sostenere un processo di compostaggio ottimale.

## **6.5 Effetti delle concimazioni**

Premesso che il compost è pur sempre una sostanza organica e per quanto durante il processo di compostaggio abbia subito una parziale mineralizzazione della sostanza organica e una rielaborazione dei nutrienti generando forme di azoto più stabili, essa non sarà mai totalmente e prontamente disponibile alla coltura. Ci aspettiamo sicuramente dei benefici immediati, ma parziali. I benefici sostanziali di questa concimazione si possono prevedere nel lungo periodo, attraverso una concimazione organica regolare e costante, si avrà un aumento della percentuale di sostanza organica nell'appezzamento, che ne comporterà una serie di benefici già conosciuti per le colture. Ecco perché è stata programmata l'analisi dell'effetto fertilizzante residuo anche sulla coltura di frumento coltivata nello stesso appezzamento l'anno successivo (i dati saranno disponibili da luglio). Il frumento sarà coltivato e analizzato secondo lo stesso disegno sperimentale applicato precedentemente su girasole, così da avere riferimento del tipo di fertilizzazione effettuata in precedenza. Inoltre, ogni parcella di riferimento sarà splittata in tre differenti concimazioni azotate, tesi 1 per 60 kg/ha di azoto, tesi 2 per 120 kg/ha di azoto, tesi 3 per 180 kg/ha di azoto. Quella più interessante da osservare sarà la tesi 1, per la quale l'effetto residuo della concimazione organica dell'anno precedente apporterà o meno benefici.

Il motivo della scelta del frumento dopo girasole è dovuto alla consueta rotazione che si applica ormai da decenni nelle Marche, per cui è un'analisi più interessante per un eventuale applicazione in larga scala degli ammendanti.

4	11	2	1	6	4	3	2	9	3	11	1	6		
36	35	34	33	32	31	30	29	28	27	26	25	24		
12	8	9	10	10	7	2	5	12	7	7	10	B		
12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23			
1	11	3	5	8	9	12	B	4	6	8	5	B	5,0 m	
11	10	9	8	7	6	5		4	3	2	1			
													3,0 m	

**Figura 12 - Disegno campo sperimentale Girasole 2020**

4	11	2	1	6	4	3	2	9	3	11	1	6		
2	1	2	1	3	1	3	2	2	3	3	1	2		
108	107	106	105	104	103	102	101	100	99	98	97	96		
3	2	1	3	2	3	2	3	1	2	1	2	3		
83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95		
1	3	3	2	1	2	1	1	3	1	2	3	1		
82	81	80	79	78	77	76	75	74	73	72	71	70		
12	8	9	10	10	7	2	5	12	7	7	10			
2	3	2	1	1	1	3	2	2	3	3	1	B		
58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69			
3	1	1	2	3	2	2	1	3	1	2	3	B		
57	56	55	54	53	52	51	50	49	48	47	46			
1	2	3	3	2	3	1	3	1	2	1	2	B		
34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45			
1	11	3	5	8	9	12		4	6	8	5			
2	1	2	1	3	2	3	B	3	1	3	1	B		
33	32	31	30	29	28	27		26	25	24	23			
3	3	1	3	2	1	2	B	2	3	1	2	B		
12	13	14	15	16	17	18		19	20	21	22			
1	2	3	2	1	3	1	B	1	2	2	3	B	1,65 m	
11	10	9	8	7	6	5		4	3	2	1			
													3,0 m	

**Figura 13 - Disegno campo sperimentale Frumento 2021**

Per quanto riguarda le parcelle di controllo, quindi non fertilizzate, contrassegnate come “B” nel campo sperimentale di Girasole, hanno dato rese abbastanza simili a quelle trattate.

Questo inconveniente, purtroppo, è giustificabile dal fatto che il campo sperimentale dove sono state condotte le prove, è un appezzamento dedicato a prove varietali per aziende sementiere, che volendo valutare esclusivamente la massimizzazione della produttività, prevede l'utilizzo in eccesso di fertilizzanti chimici. Quindi potrebbe esserci la possibilità di un effetto nutrizionale residuo. Sarebbe stato il caso di confermare tale ipotesi attraverso un'analisi del terreno prima di effettuare le distribuzioni.

Un'analisi del terreno iniziale e analisi successive negli anni, dopo la distribuzione continua di ammendante compostato organico, sarebbero interessanti per valutare l'effetto che avrebbe sull'incremento percentuale della sostanza organica e i benefici che ne derivano.

Analizzando nel dettaglio le medie dei risultati ottenuti per ciascuna prova è possibile identificare il trattamento con pollina (DPM) come l'ammendante che ha dato risultati migliori nelle prove di campo. Se si riuscisse a ingegnerizzare tale produzione di compost e pellettizzarlo, si otterrebbe un eccellente fertilizzante a basso costo e ottimale in ottica di un'economia circolare.

Buoni risultati sono stati ottenuti anche dalla prova con scarti di farine (DFBy) e solo digestato (DCT).

Confrontando le tesi con Biochar, invece, si è notato un effetto deprimente all'aumentare della % di Biochar per il peso di cento semi e il contenuto di olio su sostanza secca. Quindi per cui, si potrebbe evitare di eccedere nella somministrazione di Biochar nel compost o scegliere il trattamento in base all'eventuale destinazione del prodotto finale, se prediligere la produzione di olio o la produzione di seme.

<b>Trattamento</b>	<b>Peso campione 6,93 mq (g)</b>	<b>Umidità GAC (%)</b>	<b>Peso 100 semi (g)</b>	<b>Contenuto olio s.s. (%)</b>	<b>Prod. acheni 9% di um. (t/ha)</b>	<b>Prod. olio s.s. (t/ha)</b>	<b>Peso 1000 al 9% di um. (g)</b>
<b>DPM</b>	2219	5,4	5,2	48,026	3,33	1,45	54,4
<b>DCT</b>	1997	5,2	5,0	47,349	3,00	1,29	52,4
<b>DFBy</b>	2004	5,1	4,7	48,187	3,01	1,32	49,0
<b>DSL</b>	1813	5,5	5,8	46,334	2,72	1,15	60,6
<b>DMS</b>	2291	5,4	5,3	47,821	3,44	1,50	54,7
<b>D4C</b>	1595	5,5	5,7	48,355	2,39	1,05	59,2
<b>D8C</b>	1321	5,6	5,3	47,783	1,98	0,86	55,3
<b>D12C</b>	1979	5,4	4,8	46,640	2,97	1,26	50,3
<b>DIGESTATO</b>	1881	5,3	5,4	46,510	2,82	1,20	56,5
<b>UREA</b>	1783	5,3	5,0	45,996	2,68	1,12	51,7
<b>B 1</b>	2385	5,4	5,4	48,552	3,58	1,58	56,5
<b>B 2</b>	1675	5,6	5,6	47,070	2,51	1,08	58,1

*Tabella 6 - Medie delle 3 repliche*

## 6.6 Risultati analisi statistica

Il calcolo statistico ha dato sulla maggior parte delle prove significatività, c'è differenza statistica e quindi l'applicazione di ammendante compostato rispetto a quello minerale e/o altri trattamenti, ha dato risultati statisticamente diversi.

Questo dimostra che la differenza delle coformulazioni potrebbe agevolare il compostaggio e allo stesso tempo avere un effetto fertilizzante diverso. Le differenze a livello agronomico non saranno notevoli ma in buona parte la scelta dipenderà dalla disponibilità aziendale di biomasse e dalla convenienza economica delle stesse.

In ottica di un'economia circolare, il riutilizzo di biomasse che sarebbero andate in discarica e in previsione di un utilizzo eventuale in agricoltura biologica, il maggior costo dell'ammendante ottenuto potrebbe essere giustificato. Il costo unitario di azoto nei concimi minerali, e la facilità nella reperibilità e la distribuzione, come nel caso dell'urea, è sicuramente più conveniente rispetto a quello degli ammendanti prodotti. Ma se valutassimo tutti gli aspetti, come ad esempio il fatto che la concimazione minerale con urea apporta solo nutrimento alla pianta in un periodo molto limitato, senza migliorare le caratteristiche chimico-fisiche-biologiche del terreno e che la produzione dell'urea deriva da processi non sostenibili, allora si potrebbe accettare di spendere di più, ma beneficiarne sotto molti altri aspetti.

Inoltre, dalle prove effettuate e dai risultati ottenuti, si è visto che la resa di acheni e il contenuto di olio ad ettaro delle parcelle trattate con urea, hanno dato risultati minori rispetto ad alcuni trattamenti con ammendanti compostati. Effetto dovuto probabilmente all'efficacia delle concimazioni organiche, che permette l'interazione tra suolo, pianta, microrganismi e ambiente, ottenendo condizioni ottimali per tutto il ciclo colturale della pianta.

Se prendessimo singolarmente le biomasse utilizzate, valutandone un possibile utilizzo alternativo al compostaggio, si potrebbero avere diverse soluzioni.

Il **Digestato**, matrice principale del caso di studio, potrebbe avere varie problematiche se usato tal quale, per via della possibile presenza di antibiotici e patogeni provenienti dai reflui zootecnici se utilizzati nel processo di biodigestione anaerobica e dalla presenza di semi di infestanti che per quanto possano aver subito dei processi termofili, negli impianti di biogas non si raggiungono temperature e condizioni sufficienti alla disattivazione degli stessi. Perciò il processo di compostaggio può ovviare alle problematiche riportate, giustificando il maggior costo necessario per il processo.

Nel caso di studio specifico si è analizzato solo il potenziale fertilizzante del digestato ma non quello della possibile presenza di infestanti, in quanto il campo sperimentale è gestito totalmente in convenzionale e ha previsto l'utilizzo di diserbanti. Sarebbe interessante valutare gli effetti di applicazione di digestato tal quale e digestato compostato in coltivazione biologica per vedere gli effetti sui semi di infestanti.

I **residui di molitura e gli scarti di biscottificio** hanno dato ottimi risultati come coformulati nel processo di compostaggio e risultati soddisfacenti anche nell'applicazione sulla coltura. Dobbiamo però considerare che crusche, farine e semole sono ottimi mangimi per il comparto zootecnico e sono anche quotati sulla borsa merci dei prodotti agricoli, quindi ne conosciamo già il valore e come prodotto di scarto hanno già un utilizzo valorizzato.

Sarebbe logico l'utilizzo in compostaggio di scarti di cereali e farine se queste presentassero muffe e tossine, quindi non impiegabili per l'utilizzo zootecnico.

La **Pollina** ha dato buoni risultati sia in termini di processo che come ammendante. Considerando che la pollina utilizzata nel caso di studio in particolare, era costituita da lettiera in paglia, non si presterebbe ad un processo di digestione anaerobica, in quanto la presenza di paglia rallenterebbe il processo e non sarebbe comunque utilizzata da quel tipo di flora microbica anaerobica.

Quindi, dato che la pollina deve sempre subire un processo di stabilizzazione prima della distribuzione in campo, al fine di ridurre l'emissione di ammoniaca e la carica patogena, il compostaggio di questa biomassa residuale è il processo più indicato per la sua valorizzazione.

L'**Insilato** è stato utilizzato nelle prove ma non sarebbe giusto considerarlo come biomassa residuale, poiché rappresenta una biomassa dedicata, coltivata appositamente per scopi zootecnici ed energetici nel caso di utilizzo negli impianti di digestione anaerobica. Ha dato buoni risultati nella sperimentazione ma non sarebbe comunque conveniente la produzione di mais da insilato per essere compostato e reimpresso nel ciclo della sostanza organica dei terreni. Inoltre, anch'esso come le farine hanno già un valore di mercato definito e sicuramente più redditizio e logico.

Il **Biochar** non ha dato buoni risultati nel processo di compostaggio a causa della sua natura e della stabilità del digestato.

È da considerare il fatto che il biochar darà benefici nel lungo periodo, migliorando la struttura e qualità del terreno, quindi il suo utilizzo anche nel compostaggio potrebbe avere senso, a patto che la qualità della biomassa principale sia buona e nell'eventualità utilizzarlo in formulazione con altre biomasse che possano fungere da starter per l'attività microbica.

Un altro aspetto fondamentale sta nell'origine della biomassa che sarà utilizzata per produrre il biochar, sarebbe preferibile utilizzare biomasse residuali, potature e ramaglie evitando l'utilizzo di materiale di produzione dedicata da attività forestale. Per quanto l'attività forestale possa essere gestita in modo sostenibile, si perderebbe il senso della produzione di biochar, che ha come requisito l'esclusivo utilizzo di scarti vegetali.

# Capitolo 7

## CONCLUSIONI

Il progetto ha permesso di ottenere diverse valutazioni dalle prove di valorizzazione di biomasse residuali in co-compostaggio con digestato.

Il compostaggio ottimale è avvenuto per la tesi con residui di molitura (DFBy) mentre le tesi con insilato e/o pollina (DMS, DPM e DSL) hanno avuto un buon andamento, ma con le dovute migliorie, come quantità compostata e un isolamento parziale dalle basse temperature esterne si potrebbe ottimizzare il processo.

Le tre tesi con Biochar (D4C, D8C, D12C) e quella con solo digestato (DCT) non hanno avuto un compostaggio sufficiente della biomassa nel periodo osservato, dovuto principalmente al rapporto C/N troppo elevato e quindi la mancanza di una biomassa che potesse fungere da starter per i microrganismi aerobici.

Le prove di fertilizzazione condotte in campo su girasole hanno dato buoni risultati produttivi, ogni trattamento ha dato risultati diversi con tanto di significatività nell'analisi statistica.

Il progetto avrà seguito con le analisi dei risultati del raccolto di frumento ottenuti dalle varie parcelle del campo sperimentale in esame. Si valuterà quindi l'effetto residuo della fertilizzazione con le varie tesi distribuite l'anno precedente su girasole.

In ottica di una continuazione del progetto, si potrebbe implementare con analisi annuali del terreno, al fine di stimare l'aumento di sostanza organica e di nutrienti dovuta alla fertilizzazione con ammendanti compostati.

Inoltre, data l'esperienza con le biomasse prese in esame, la realtà aziendale della Covalm che ha a disposizione anche altre biomasse residuali (orticole e digestato liquido), si potrebbe valutare il co-compostaggio anche con queste biomasse e integrarle insieme. Infatti, sarebbe molto interessante il triplice compostaggio tra digestato solido, residui di orticole e biochar, questa miscela permetterebbe di

abbassare il C/N, avere uno starter azotato per i microrganismi e contemporaneamente il biochar assorbirebbe le emissioni azotate che potrebbero essere emesse.

Altra prova potrebbe essere eseguita sul digestato liquido, utilizzabile come regolatore di umidità durante il processo e integratore di elementi fertilizzanti o come già testato nel campo sperimentale del progetto utilizzandolo tal quale per una concimazione a maggior pronto effetto.

## BIBLIOGRAFIA

Amlinger, F. *et al.* (2007) 'Beneficial Effects of Compost Application on Fertility and Productivity of Soils', *Federal Ministry for Agriculture and Forestry, Environment and water Management, Austria.*, p. 225.

Baiamonte, G. *et al.* (2015) 'Structure alteration of a sandy-clay soil by biochar amendments', *Journal of Soils and Sediments*, 15(4), pp. 816–824. doi: 10.1007/s11368-014-0960-y.

Bień, J. B. *et al.* (2007) 'Amendment of the UE legislation on biowaste management', *Environment Protection Engineering*, 33(2), pp. 71–78.

Bordoni A. (2010) 'La filiera del biogas', pp. 1–49.

Bustamante, M. A. *et al.* (2012) 'Co-composting of the solid fraction of anaerobic digestates, to obtain added-value materials for use in agriculture', *Biomass and Bioenergy*, 43, pp. 26–35. doi: 10.1016/j.biombioe.2012.04.010.

Casini, D. *et al.* (2019a) 'Production and characterization of co-composted biochar and digestate from biomass anaerobic digestion', *Biomass Conversion and Biorefinery*. doi: 10.1007/s13399-019-00482-6.

Casini, D. *et al.* (2019b) 'Production and characterization of co-composted biochar and digestate from biomass anaerobic digestion'. doi: 10.1007/s13399-019-00482-6.

Centemero, M. (2002) 'Il ruolo del compost nei piani di fertilizzazione', *Informatore agrario*, 58(40), pp. 57–62.

Centro Ricerche Produzioni Animali C.R.P.A. S.p.A. (2017) *valutazione delle tecnologie e bilancio*, Centro Ricerche Produzioni Animali C.R.P.A. S.p.A.

Chen, H. *et al.* (2020) 'Effects of microbial culture and chicken manure biochar on compost maturity and greenhouse gas emissions during chicken manure composting', *Journal of Hazardous Materials*, 389, p. 121908. doi: 10.1016/j.jhazmat.2019.121908.

Chen, H. X. *et al.* (2011) 'Effects of biochar amendment on cropland soil bulk density, cation exchange capacity, and particulate organic matter content in the North

China Plain', *Chinese Journal of Applied Ecology*, 22(11), pp. 2930–2934. Available at: <https://europepmc.org/article/med/22303671> (Accessed: 3 June 2021).

Di, D. and In, R. (2010) 'Influenza dell ' apporto di compost sulle caratteristiche del suolo e sull ' attività vegetativa e produttiva della vite in vigneti dei Colli Euganei', *Arianna Bozzolo*, (Arianna Bozzolo).

Ding, Y. *et al.* (2016) 'Biochar to improve soil fertility. A review', *Agronomy for Sustainable Development*. doi: 10.1007/s13593-016-0372-z.

European Biochar Foundation - European Biochar Certificate (EBC) (2012) 'Guidelines for a Sustainable Production of Biochar', *European Biochar Foundation (EBC)*, (September), pp. 1–22. doi: 10.13140/RG.2.1.4658.7043.

Ge, H., Jensen, P. D. and Batstone, D. J. (2011) 'Relative kinetics of anaerobic digestion under thermophilic and mesophilic conditions'. doi: 10.2166/wst.2011.571.

Giardini, L. (1986) 'No Title', *Agronomia generale*, 3° ed.

Kołtowski, M. and Oleszczuk, P. (2015) 'Remediation and Restoration EFFECT OF ACTIVATED CARBON OR BIOCHARS ON TOXICITY OF DIFFERENT SOILS CONTAMINATED BY MIXTURE OF NATIVE POLYCYCLIC AROMATIC HYDROCARBONS AND HEAVY METALS'. doi: 10.1002/etc.3246.

Li, Y. *et al.* (2018) 'Effects of digestion time in anaerobic digestion on subsequent digestate composting'. doi: 10.1016/j.biortech.2018.04.098.

Lone, A. H. *et al.* (2015) 'Biochar for Sustainable Soil Health: A Review of Prospects and Concerns', *Pedosphere*, 25(5), pp. 639–653. doi: 10.1016/S1002-0160(15)30045-X.

Lu, J. and Xu, S. (2021) 'Post-treatment of food waste digestate towards land application: A review', *Journal of Cleaner Production*. Elsevier Ltd, p. 127033. doi: 10.1016/j.jclepro.2021.127033.

Marconi M., F. G. (1998) 'Il compostaggio hobbistico', *Edagricole*.

Maynard, A. (2000) 'Compost: the process and research', *The Connecticut Agricultural Experiment Station*.

Merci, B. and Italiana, T. (2012) 'Le\_Biomasse\_lr.pdf'.

P. Sequi (1996) 'Il ruolo del compostaggio nell'agricoltura sostenibile', *Springer, Dordrecht*.

Peng, W. and Pivato, A. (2019) 'Sustainable Management of Digestate from the

Organic Fraction of Municipal Solid Waste and Food Waste Under the Concepts of Back to Earth Alternatives and Circular Economy’, *Waste and Biomass Valorization*, 10(2), pp. 465–481. doi: 10.1007/s12649-017-0071-2.

Riaz, L. *et al.* (2020) ‘Potential of industrial composting and anaerobic digestion for the removal of antibiotics, antibiotic resistance genes and heavy metals from chicken manure’, *Science of the Total Environment*, 718, p. 137414. doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.137414.

Roberto Chiumenti, A. C. (2001) ‘La tecnologia del compostaggio’, *Agenzia Regionale per la Prevenzione e Protezione Ambientale del Veneto*, pp. 11–15.

Sánchez-García, M. *et al.* (2015) ‘Biochar accelerates organic matter degradation and enhances N mineralisation during composting of poultry manure without a relevant impact on gas emissions’, *Bioresource Technology*, 192, pp. 272–279. doi: 10.1016/j.biortech.2015.05.003.

Schmidt, H.-P. (2012) ‘55 Uses of Biochar’, *Ithaka Journal*, 25(1/2012), pp. 13–25.

Tambone, F. *et al.* (2015) ‘Composting of the solid fraction of digestate derived from pig slurry: Biological processes and compost properties’, *Waste Management*, 35, pp. 55–61. doi: 10.1016/j.wasman.2014.10.014.

Tampio, E., Salo, T. and Rintala, J. (2016) ‘Agronomic characteristics of five different urban waste digestates’, *Journal of Environmental Management*, 169, pp. 293–302. doi: 10.1016/j.jenvman.2016.01.001.

Veneto Agricoltura (2009) ‘Il Compostaggio: Generalità E Normativa Di Riferimento’, *Compost – Una nuova fonte di fertilità*, pp. 7–18.

Vincenzo Tabaglio, Lorella Rossi, Elena Bortolazzo, M. L. (2008) ‘Effetti dell’applicazione di ammendanti compostati sulle caratteristiche fisico-chimiche del terreno agrario’, *Centro Ricerche Produzioni Animali (CRPA)*.

Zábranská, J. *et al.* (2000) ‘The activity of anaerobic biomass in thermophilic and mesophilic digesters at different loading rates’, *Water Science and Technology*, 42(9), pp. 49–56. doi: 10.2166/wst.2000.0168.

Zeng, Y., De Guardia, A. and Dabert, P. (2016) ‘Improving composting as a post-treatment of anaerobic digestate’, *Bioresource Technology*, 201, pp. 293–303. doi: 10.1016/j.biortech.2015.11.013.

Zhu, Q., Peng, X. and Huang, T. (2015) 'Contrasted effects of biochar on maize growth and N use efficiency depending on soil conditions', *International Agrophysics*, 29(2), pp. 257–266. doi: 10.1515/intag-2015-0023.

# SITOGRAFIA

- [www.compost.it](http://www.compost.it) (consultazione: aprile 2021)
- [www.ichar.org](http://www.ichar.org)
- [www.usda.gov](http://www.usda.gov)
- [www.istat.it](http://www.istat.it)
- [www.venetoagricoltura.org](http://www.venetoagricoltura.org)
- [www.consorziobiogas.it](http://www.consorziobiogas.it)
- [www.istat.it](http://www.istat.it)
- [www.autosufficienza.it](http://www.autosufficienza.it)
- [www.biofactoryspa.it](http://www.biofactoryspa.it)