



UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI TORINO

DIPARTIMENTO DI SCIENZE AGRARIE, FORESTALI E ALIMENTARI

CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN SCIENZE AGRARIE

TESI DI LAUREA

Compost da digestato: valutazioni agronomiche e con LCA

Compost from digestate: agronomic evaluations and using ad LCA approach

Relatore: Prof. Carlo Grignani

Correlatori: Dott.ssa Chiara Bertora

Dott. Stefano Gaudino

Candidato: Emilio Macario Gioanas

Anno Accademico 2016-2017

Sommario

1. Contesto scientifico di riferimento.....	1
1.1 Compostaggio	1
1.1.1 Le fasi del processo di compostaggio	2
1.1.2 Parametri e indici dell'evoluzione del processo.....	6
1.1.3 Tecniche di compostaggio.....	10
1.1.4 Il compostaggio in Italia.....	13
1.1.5 Matrici compostabili	14
1.1.6 L'integrazione fra digestione anaerobica e il compostaggio.....	20
1.1.7 Benefici agronomici e vantaggi agro-ambientali dell'utilizzo di compost	24
1.2 La gestione della sostanza organica	27
1.3 Life Cycle Assessment.....	29
1.3.1 Origini della metodologia LCA.....	32
1.3.2 Fasi della valutazione del ciclo vita	35
1.3.3 Gli effetti ambientali e gli indicatori di impatto.....	46
1.3.4 Vantaggi e limiti della metodologia.....	49
1.4 Obiettivi dello studio.....	51
2. Materiali e metodi	52
2.1 Il progetto Life+ CarbOnFarm.....	52
2.1.1 Contesto e obiettivi del progetto	52
2.1.2 Siti progettuali.....	53
2.1.3 Azioni progettuali.....	55
2.2 L'azienda produttrice di compost.....	56
2.3 Impostazione dell'attività sperimentale	57
2.4 Caratteristiche fisico-chimiche dei suoli.....	59
2.5 Andamento climatico medio e degli anni di studio.....	61
2.6 Tecnica colturale e descrizione della prova su mais (Carmagnola 2014 -2015 -2016).....	66
2.6.1 Piano di concimazione	71
2.6.2 Produzioni	75
2.7 Tecnica colturale e descrizione della prova su orticole (Grugliasco 2014 - 2015 - 2016).....	76
2.7.1 Piano di concimazione	82
2.7.2 Produzioni	85
2.8 Analisi del ciclo vita	87

2.8.1 Definizione degli obiettivi e impostazione del metodo.....	88
2.8.2 Emissioni a valle dell'analisi LCA.....	93
2.8.3 Analisi di inventario.....	100
2.8.4 Assunzioni.....	100
2.9 Analisi statistica	101
2.10 Bilanci energetici ed economici	101
3. Risultati e Discussioni.....	103
3.1 Bilancio ambientale LCA.....	103
3.1.1 Mais: sintesi del triennio.	103
3.1.2 Lattuga: sintesi del triennio.....	119
3.1.3 Coltura secondaria.....	135
3.2 Bilancio economico.....	136
3.2.1 Mais.....	136
3.2.2 Colture orticole.....	140
3.3 Bilancio energetico	148
3.3.1 Mais.....	148
3.3.2 Colture orticole.....	152
3.4 Prospettive per il completamento del lavoro.....	156
4. Conclusioni	157
5. Bibliografia	160
6. Sitografia.....	166

1. Contesto scientifico di riferimento

1.1 Compostaggio

Il compostaggio è un processo esoergonico (processo che libera energia termica e, di conseguenza, induce un aumento della temperatura) di parziale decomposizione del materiale organico fresco in presenza di ossigeno, che ha tra i suoi obiettivi quello di ottenere dei prodotti organici stabilizzati, con un contenuto adeguato di macronutrienti (azoto, fosforo, potassio) e con una buona biodiversità microbica (batteri, funghi, alghe, ecc.) (Palese *et al.*, 2015).

Con il termine compostaggio viene definito il processo di maturazione biologica controllata, in ambiente aerobico, della sostanza organica dei residui animali e vegetali, attraverso il quale si ha produzione di materiali a catena molecolare più complessa, più stabili, igienizzati, ricchi di composti umici, utili alla concimazione delle colture agrarie e al ripristino della sostanza organica dei suoli. Il processo avviene per opera di diversi microrganismi operanti in ambiente aerobico: batteri, funghi, attinomiceti, alghe e protozoi, presenti naturalmente nelle biomasse organiche, o, eventualmente appositamente inoculati.

Il processo può essere descritto in maniera sintetica con la seguente reazione:



Il compost è il materiale che deriva dal processo di compostaggio dei rifiuti organici: si tratta di un materiale inodore stabile e simile all'humus, ricco di carboidrati, proteine e altre molecole organiche. Nella legislazione nazionale, il compost appartiene alla categoria di fertilizzanti denominata "ammendanti". Per ammendanti si intendono i materiali da aggiungere al suolo, principalmente per conservare o migliorare le caratteristiche fisiche, chimiche o l'attività biologica, disgiuntamente o unicamente tra loro. I tipi e le caratteristiche degli ammendanti sono riportati nell'allegato 2 del D.lgs. 75/2010. Gli ammendanti compostati sono di tre tipi, differenziati in base al modo di preparazione e alle componenti essenziali, vale a dire: ammendante compostato verde, misto e torboso composto. L'ammendante compostato verde (ACV) è il prodotto ottenuto attraverso la biodegradazione controllata e la stabilizzazione di rifiuti organici di esclusiva origine

vegetale (ad esempio sfalci d'erba, ramaglie, potature, legno). Le matrici utilizzabili per l'ammendante compostato misto (ACM), invece, sono di vario tipo e comprendono, oltre alle matrici dell'ACV anche la frazione organica dei rifiuti solidi urbani da raccolta differenziata, rifiuti di origine animale comprese le deiezioni zootecniche, rifiuti delle attività agro-industriali e da lavorazione di legno e tessile naturale non trattati, reflui e fanghi. L'ammendante torboso compostato (ATC) è, infine, il prodotto ottenuto per miscelazione della torba con ACV e/o ACM (Centemero e Montemurro, 2016).

Diverse sono le funzioni che può svolgere l'apporto di sostanza organica del compost per gli agro-ecosistemi: contribuire all'aumento e alla stabilità della sostanza organica del suolo nel medio-lungo periodo; fungere da "serbatoio" per il lento rilascio di macro e micronutrienti (boro, manganese, ferro, ecc.) che restano in tal modo disponibili per le colture e non subiscono i processi di allontanamento per lisciviazione o per insolubilizzazione; esercitare un'attività di controllo delle forme microbiche patogene per le colture; fornire sostanze con attività fisiologiche pseudo-ormonali per le colture, in grado di svolgere un'azione di stimolo per la crescita sia verso gli apparati radicali, sia verso gli organi epigei (Palese *et al.*, 2015).

1.1.1 Le fasi del processo di compostaggio

L'insieme di strutture, macchine e attrezzature con il quale si effettua l'intero ciclo di stabilizzazione biologica aerobica di rifiuti organici può essere definito un "sistema" di compostaggio (Rossi *et al.*, 2010). Nell'impianto di compostaggio il ciclo di trattamento si articola in una serie di operazioni, tutte riconducibili a quattro fasi o sezioni d'impianto (Fig. 1):

- pre-trattamenti per la preparazione della miscela
- fase di degradazione biologica
- fase di maturazione;
- raffinazione e nobilitazione del prodotto

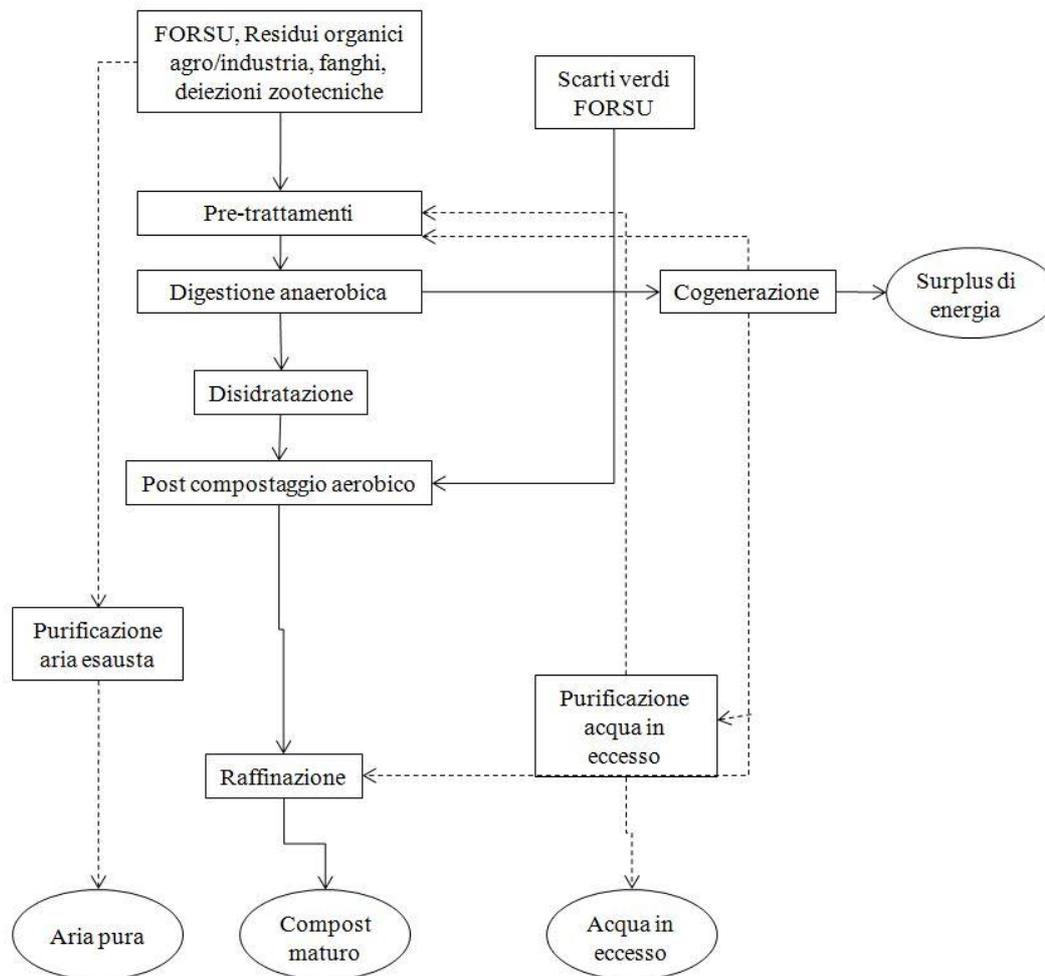


Figura1.1: Schema di flusso del ciclo di compostaggio (Fonte: Centemero, 2006)

La fase iniziale del processo di compostaggio consiste nella realizzazione di pre-trattamenti (triturazione, vagliatura, pressatura/spremitura) finalizzati alla preparazione della miscela. Spesso, questi trattamenti sono necessari per ridurre il volume del materiale da sottoporre al processo e agevolare la manipolazione dello stesso, incrementando nel contempo la superficie di attività a disposizione dei microrganismi (Pinamonti, 1997).

La scelta dei materiali per la preparazione della miscela e le modalità di miscelazione sono fondamentali al fine di ottenere una massa omogenea, che permetta la penetrazione dell'aria in modo da non favorire l'avvio di reazioni degradative di tipo anaerobico, con conseguente produzione di cattivi odori e di percolato. Un'adeguata struttura facilita, inoltre, il rilascio dell'anidride carbonica e del vapore (Pinamonti, 1997) che comporta una riduzione del volume variabile tra $\frac{1}{4}$ e metà del volume della biomassa iniziale (CIC,

2006). Nella preparazione della miscela di substrati da avviare al compostaggio, i materiali da utilizzare vengono di solito classificati in nutrizionali, strutturanti e correttivi o additivi. Tra i criteri più importanti da seguire per avere un buon compostaggio vi è il conseguimento di un valore del rapporto carbonio/azoto (C/N) della massa messa a compostare, compreso tra le 20 e le 40 unità. Il materiale nutrizionale è quello che presenta una maggiore suscettività alla degradazione e che, in generale, interviene nel processo con volumi maggiori (es. scarti di insalata). Gli strutturanti sono materiali lignino-cellulosici (residui di potatura, scarti della lavorazione del legno, paglia di cereali) con funzione di fornire porosità e struttura alla miscela sottoposta a compostaggio, in modo da permettere la circolazione dell'aria e, quindi, dell'ossigeno. Il materiale strutturante è caratterizzato da scarsa degradabilità dovuta sia alla sua composizione biochimica sia alla ridotta superficie di esposizione all'attività microbica. È sostanzialmente costituita da pezzetti di legno di taglia variabile tra 0.5 e 5 cm che attraversano quasi indenni il ciclo di compostaggio e che possono essere, pertanto, recuperati tramite vagliatura del compost prodotto ed essere riutilizzati (sovvallo) in un ciclo successivo. Molto spesso l'agente strutturante svolge anche un'importante funzione di correttivo degli eccessi idrici avendo un'elevata capacità disidratante (es. trucioli). I correttivi o additivi sono costituenti che intervengono in quantitativi minimi con la funzione di correggere il pH, di bilanciare carenze nutrizionali oppure, come nelle tecniche biodinamiche di compostaggio, di biostimolare l'attività microbica o attirare i lombrichi (Palese et al. 2015).

Le fasi di trasformazione subite dalla sostanza organica nel processo di compostaggio sono due: degradazione biologica (o fase bio-ossidativa o fase attiva) e maturazione o umificazione. La prima fase del processo di trasformazione delle matrici organiche termina con il declino delle fermentazioni termofile ed ha una durata limitata nel tempo; la seconda fase, denominata maturazione, è caratterizzata da un processo mesofilo prolungato. Al termine si ottiene un prodotto stabilizzato, che raggiunge una maturità sia biologica che agronomica e che garantisce l'assenza di agenti fitotossici patogeni (Rossi *et al.*, 2010).

Il processo di compostaggio inizia subito con la destrutturazione della frazione organica più facilmente degradabile (carboidrati ed emicellulose: zuccheri, acidi organici, amminoacidi) ad opera dei microrganismi aerobici, con consumo di ossigeno e liberazione di anidride carbonica e calore. La temperatura dei cumuli, grazie all'energia generata dalle reazioni di ossidazione catalizzate dai microrganismi, aumenta progressivamente fino al

raggiungimento del regime termofilo. Questa fase è nota come “high rate phase” e dura in genere tre settimane (i tempi possono variare a seconda delle caratteristiche del substrato e della tecnica adottata). Il più rapido incremento della temperatura, fino a 55-60 °C, si verifica nelle 24-48 ore successive all’allestimento del cumulo. Il calore deve essere adeguatamente dissipato perché un ulteriore aumento di temperatura potrebbe portare alla inattivazione della maggior parte dei microrganismi. La fase termofila ha anche grande importanza perché porta alla devitalizzazione dei semi delle piante infestanti e all’inattivazione dei patogeni eventualmente presenti nelle matrici di partenza. L’igienizzazione, risultante dalla fase termofila nella quale l’elevata temperatura determina la parziale pastorizzazione del materiale, è quindi processo attraverso il quale si riduce il numero di microrganismi fitopatogeni presenti nei residui ed eventualmente di patogeni umani veicolati attraverso i materiali di scarto, impedendo che il compost ne diventi il vettore. Perché l’attività della popolazione microbica aerobica non venga compromessa è indispensabile controllare la temperatura e mantenere costante l’apporto di ossigeno alla biomassa; a questo scopo possono essere impiegate due tecniche, singolarmente o congiuntamente: il rivoltamento dei cumuli e/o l’aerazione forzata degli stessi.

La fase di maturazione, necessaria per il completamento della fase di stabilizzazione biologica del prodotto, può essere attuata con sistemi più o meno semplici in funzione della tecnologia adottata nella fase precedente. Si tratta della fase di cura (nota come *curing phase*), caratterizzata da processi di trasformazione della sostanza organica la cui massima espressione è la formazione di sostanze umiche. Il prodotto ottenuto al termine della fase di bio-ossidazione deve quindi subire alcune trasformazioni legate a reazioni di completamento della degradazione biologica a carico di frazioni organiche putrescibili ancora presenti. Le reazioni di degradazione delle frazioni legnose proseguono seppure lente (lignina, cellulosa e emicellulose), si formano molecole umo-simili (composti umici), con miglioramento complessivo della qualità e della stabilità del prodotto. Considerata la durata solitamente limitata della fase di bio-ossidazione, occorre prestare la massima attenzione alla fase di maturazione per completare in modo adeguato il processo biologico di stabilizzazione del prodotto. La maturazione avviene di norma sistemando il materiale in cumulo su platea coperta, eventualmente aerata. I cumuli possono avere dimensioni adatte per il rivoltamento con apposita rivoltatrice quando prevista, oppure dimensioni maggiori rispetto a quelle eventualmente adottate nella fase precedente, in quanto possono essere

movimentati periodicamente con pala meccanica. Nella sostanza, pertanto, per la conduzione di tale fase del processo non occorrono attrezzature particolari. Qualora la fase attiva sia stata condotta in sistemi totalmente statici, in fase di maturazione è consigliabile assicurare una qualche movimentazione della massa, per omogeneizzare davvero il processo biologico in corso e, di conseguenza, la qualità del prodotto finale (Rossi *et al.*, 2010).

In ultimo vi è la fase di raffinazione e nobilitazione del prodotto in cui sono comprese tutte le operazioni necessarie per ottenere un prodotto finito con caratteristiche qualitative costanti nel tempo e con i requisiti commerciali richiesti dal settore di destinazione. Tra queste operazioni sicuramente la più importante è rappresentata dalla vagliatura o raffinazione, che permette di ottenere dal prodotto grezzo una frazione fine (compost raffinato e pulito) di granulometria omogenea e una o due frazioni grossolane costituite da eventuali elementi indesiderati (plastiche, inerti, sopravaglio di pezzatura maggiore) e materiali legnosi non degradati (frazione intermedia). Per l'operazione di separazione dimensionale, o, più comunemente vagliatura, possono essere utilizzati vagli di diverso genere (Rossi *et al.*, 2010):

- vagli a cilindro rotante o rotovagli;
- vagli vibranti o vibrovagli;
- vagli "a letto di stelle";
- separatori aeraulici.

1.1.2 Parametri e indici dell'evoluzione del processo

Il processo di compostaggio è condotto principalmente da diverse popolazioni di microrganismi aerobi che decompongono il materiale organico al fine di accrescersi e riprodursi. In corrispondenza delle varie fasi del compostaggio si affermano e predominano differenti popolazioni microbiche (Centemero, 2006). Il compostaggio è un processo dinamico effettuato da popolazioni microbiche in rapida successione. I gruppi principali di microrganismi coinvolti sono batteri, inclusi gli attinomiceti, ed i funghi (Golueke, 1991). Tra i microrganismi che guidano il processo di compostaggio, i batteri sono strutture unicellulari con dimensioni che vanno da 0,5 a 3,0 μm . A causa della loro piccola taglia, i batteri hanno un rapporto superficie/volume molto elevato, tale da permettere rapidi trasferimenti di substrati solubili nella cellula. Come conseguenza, i batteri sono solitamente molto più dominanti rispetto ai microrganismi più grandi come i funghi (Haug,

1993). Sebbene il numero complessivo di microrganismi non cambia in modo significativo durante il compostaggio, la diversità microbica può variare durante le diverse fasi (Atkinson *et al.*, 1996a).

I microrganismi hanno quindi un ruolo fondamentale nella decomposizione della sostanza organica e vi è una relazione diretta tra la loro attività e l'evoluzione del processo di compostaggio. L'andamento e la velocità del processo sono, cioè, strettamente dipendenti dai fattori che influenzano le condizioni ottimali per la vita dei microrganismi operanti nelle diverse fasi del processo (Palese *et al.*, 2015).

I diversi microrganismi operano a regimi termici definiti e la loro attività è influenzata dalle temperature di processo, tanto da poterli distinguere in tre classi: psicrofili, mesofili, termofili (Tab. 1).

Tabella 1.1: Classi di microrganismi (Fonte: L. Rossi *et al.*, 2010).

Categoria	Temperature (°C)
Microrganismi psicrofili	0 ÷ 30
Microrganismi mesofili	30 ÷ 45
Microrganismi termofili	45 ÷ 90

A seguito della variazione della temperatura della biomassa durante il processo di compostaggio, variano le popolazioni microbiche attive: nelle prime fasi del processo, che comportano una rapida metabolizzazione dei composti carboniosi più semplici, operano inizialmente i microrganismi psicrofili e mesofili. Successivamente, a causa dell'innalzamento della temperatura, conseguente ad una intensa attività metabolica, si ha una forte selezione tra le popolazioni microbiche a vantaggio delle specie termofile, che lavorano in condizioni ottimali ad una temperatura compresa nell'intervallo 50÷65 °C. Se la temperatura supera il limite massimo di 90°C, l'attività microbica diminuisce progressivamente, finché la maggior parte dei microrganismi che si trovano nella matrice organica muore e il processo di compostaggio si arresta (Pinamonti, 1997).

I microrganismi si distinguono in microrganismi aerobici e microrganismi anaerobici. Il compostaggio è per definizione un processo aerobico, caratterizzato dalla presenza di soli microrganismi aerobici. Talvolta invece, ed anche quando le condizioni operative di processo appaiono ottimali, nella biomassa si formano delle zone ("sacche") nelle quali la

scarsità di ossigeno conduce all'innescò di fermentazioni anaerobiche. I prodotti gassosi di queste fermentazioni, fra cui acidi organici a catena corta quali acido acetico, butirrico e propionico, formano miscele dal caratteristico odore sgradevole. È importante che questi fenomeni siano assenti o in entità controllata, affinché la qualità del prodotto non sia compromessa dal prevalere di processi anaerobici (Pinamonti, 1997).

I principali parametri che influenzano le condizioni di vita dei microrganismi e che quindi vengono normalmente controllati per verificare il corretto andamento del processo sono:

- la porosità del substrato;
- il rapporto C/N;
- l'umidità del materiale;
- il tenore di ossigeno;
- la reazione (pH)
- la temperatura.

Durante l'intero processo di compostaggio l'evoluzione della temperatura del cumulo è un importante indicatore dell'attività microbica. La sua misurazione giornaliera, realizzabile con differenti dispositivi, consente di valutare eventuali deviazioni del processo dal normale andamento. Come detto, la temperatura nella fase iniziale del processo di compostaggio (prima settimana) dovrebbe aumentare piuttosto rapidamente in relazione all'intensa attività microbica che si registra a carico del materiale più facilmente degradabile. Raggiunta la fase ad elevata temperatura (circa 60 °C), il substrato permane in tali condizioni per tempi variabili in relazione all'entità dell'arieggiamento (che può avvenire per diffusione passiva, per insufflazione o rivoltamento), alla disponibilità idrica ed all'inerzia termica della massa posta a compostare. Superata la fase termofila, il substrato presenta un decremento della temperatura che indica l'entrata del processo nell'importante fase della maturazione del compost. La fase di maturazione è caratterizzata da andamenti termici ad onda che seguono i cicli di arieggiamento e umidificazione e che si attestano su valori di circa 35-40°C (Palese *et al.*, 2015).

La temperatura è non solo il miglior indicatore del corretto avanzamento del processo di compostaggio, ma anche quello più facilmente monitorabile.

Il rapporto tra carbonio e azoto è un importante indicatore: se troppo basso, infatti, il processo rischia di evolvere verso un eccessivo rilascio di ammoniaca (per l'elevata presenza di composti azotati) e il suo rendimento peggiora; se troppo alto, invece, il processo rallenta o si arresta del tutto per carenza di nutrienti azotati necessari a sostenere la crescita della popolazione microbica. Valori ottimali del rapporto C/N sono compresi tra 25 e 35. Quando si realizza la miscela, oltre a un livello ottimale del rapporto C/N, è importante garantire sia la presenza di materiale facilmente degradabile, che costituirà il substrato energetico iniziale per la crescita dei microrganismi, sia di materiale ad alto tenore di lignina e cellulosa necessario per l'umificazione. Nella scelta dei materiali e nelle quantità si deve anche mirare a raggiungere un tasso di umidità ottimale, in modo da non dover intervenire successivamente con operazioni di innaffiatura dei materiali troppo asciutti o l'incremento dei rivoltamenti e/o dell'insufflazione d'aria nel caso di materiali troppo umidi.

L'umidità è influenzata dall'aerazione della massa e dalla temperatura, e va mantenuta a livelli idonei anche inumidendo il cumulo ricorrendo all'impianto di irrigazione, in modo da consentire un'adeguata attività microbica senza tuttavia impedire l'ossigenazione della massa. L'acqua infatti svolge un ruolo fondamentale per la sopravvivenza dei microrganismi (come mezzo per la dissoluzione dell'ossigeno atmosferico e per veicolare i principi nutritivi, e come fattore di termoregolazione del sistema) (Centemero e Montemurro, 2016).

Per quanto riguarda il pH, infine, l'andamento del processo determina all'inizio valori di pH acidi, con la formazione di compost intermedi come acidi grassi volatili a catena corta (acido acetico, propionico e butirrico) e lo sviluppo di anidride carbonica. Alla fine del processo comunque il pH tende a valori prossimi alla neutralità, per l'attività batterica predominante operante a pH neutri (Centemero e Montemurro, 2016).

In Tabella 1.2 vengono elencati i valori ottimali dei principali parametri operativi.

Tabella 1.2: Valori ottimali dei parametri operativi (Fonte: L. Rossi *et al.*, 2010).

Parametri operativi	Valori ottimali
Umidità	50-65%
aerazione concentrazione ossigeno	5-15%
rapporto C/N	25-35
Temperatura	35-60°C
pH per lo sviluppo ottimale dei batteri	6,5-8,5
dimensione delle particelle (diametro)	0,5-5,0 cm
densità apparente	550-650 kg/m ³
porosità della massa	32-36%

1.1.3 Tecniche di compostaggio

I metodi di compostaggio applicabili nell'azienda agricola possono essere diversi. La scelta del metodo più opportuno dipende da diversi fattori: entità della produzione giornaliera di substrati compostabili, qualità dei substrati, disponibilità di spazio e di attrezzature, tempi di compostaggio, investimento economico destinabile all'attività. In relazione a questi aspetti, l'imprenditore deve orientarsi verso il metodo più appropriato alle specifiche condizioni della propria azienda (Palese *et al.*, 2015). Nel panorama tecnologico, si riconoscono essenzialmente quattro tipologie generali di metodi di compostaggio, che si differenziano sostanzialmente per la soluzione adottata per sostenere la bio-ossidazione del materiale in tempi più o meno rapidi:

- A. cumulo passivo;
- B. cumulo ad aerazione passiva;
- C. cumulo statico ad aerazione attiva;
- D. sistema confinato.

Ciascuna tipologia si articola in una vasta gamma di sistemi applicativi. Di seguito sono riportati in forma schematica le caratteristiche generali, i vantaggi e gli svantaggi relativi ai differenti sistemi.

A. *Cumulo passivo*: i cumuli, che possono avere diverse forme, vengono realizzati senza prevedere alcun sistema di aerazione, per cui il rifornimento di ossigeno è affidato alla sola diffusione passiva dell'aria sulla sua superficie. Aspetti positivi di questo sistema di compostaggio sono: bassi costi di investimento; minimi costi di gestione; rivoltamenti occasionali del cumulo per ripristinare la porosità. In genere, per la gestione, sono sufficienti le macchine usualmente disponibili in azienda, come ad esempio trattrici con caricatori frontali. D'altra parte questa tecnologia presenta dei lati negativi: il processo di compostaggio è molto lento in quanto l'aerazione è passiva ed i rimescolamenti rari; non è applicabile per materiali che tendono a compattare, il tempo necessario per ottenere un compost maturo è vicino all'anno; il potenziale di sviluppo di cattivi odori è molto elevato a causa del compattamento del materiale che impedisce al cumulo di essere adeguatamente aerato; i cumuli devono avere dimensioni inferiori rispetto agli altri metodi in quanto è necessario mantenere rapporti superfici di scambio/volume elevati; se i cumuli vengono realizzati senza alcuna copertura sono sensibili alle condizioni ambientali.

B. *Cumulo ad aerazione passiva*: il metodo di compostaggio ad aerazione passiva prevede la realizzazione del cumulo su tubi forati aperti. Il cumulo non deve essere troppo grande, così da evitare la formazione di zone anaerobiche (quindi definita la dimensione della base, la sua altezza deve essere massimo pari ai $2/3$ della base) e va costruito per strati: si fa un primo strato di materiale grossolano (rametti, erbacce, ecc.) di 20 cm circa, poi uno strato di materiale strutturante miscelato al materiale nutrizionale, poi una sottile spolverata di terra o compost maturo (essenziale per avviare il processo), ancora materiale nutrizionale e infine una copertura di erbe, foglie o paglia. Il principale vantaggio è la non necessità di rivoltamento mediante specifici rivoltatori meccanici; il mantello di compost o di paglia, ritiene i cattivi odori e le forme gassose dei nutrienti; il metodo è meno costoso del cumulo ad aerazione forzata in quanto non richiede l'acquisto di ventilatore e la presenza di corrente elettrica. Per quanto riguarda gli svantaggi anche questo metodo di compostaggio è fortemente influenzato dal clima; non è applicabile per materiali che tendono a compattare e che quindi richiedono rivoltamenti per ricostituire la porosità; il miscuglio iniziale di matrici è fondamentale per mantenere una buona aerazione durante il

compostaggio; i fori dei tubi possono essere facilmente otturati dal materiale organico così da impedire l'aerazione; l'installazione e rimozione dei tubi può essere problematica con necessità di sostituzione parziale o totale degli stessi.

C. Cumulo statico ad aerazione attiva: la tecnologia prevede la realizzazione di cumuli in cui l'alimentazione di ossigeno è assicurata da soffianti (ventilatori) e tubi forati secondo una tempistica dipendente dalle fasi del processo di compostaggio. Le pompe soffianti utilizzate lavorano in compressione o in depressione in relazione alla tecnica adottata. Elementi positivi della tecnologia di compostaggio in cumulo statico aerato sono riconducibili ai seguenti aspetti: utilizzo efficiente dello spazio in quanto non necessita di ampie aree di trattamento; possibilità di realizzare grandi cumuli rispetto ad altri sistemi in quanto l'aerazione è forzata; tempi di compostaggio contenuti dovuti all'aerazione forzata; rigorosa regolazione del processo dovuta alla possibilità di azionare i ventilatori in relazione alle temperature misurate; produzione di un ammendante di qualità elevata e costante. Inoltre, la presenza di uno strato isolante sul cumulo (compost maturo, paglia, biotriturato ligno-cellulosico) contribuisce a realizzare temperature più alte così come impedisce le perdite eccessive di ammoniaca. Questo strato riduce anche lo sviluppo di cattivi odori. Gli elementi negativi sono: il possibile verificarsi di percorsi preferenziali dell'aria nel cumulo che provocano un compostaggio irregolare e un prodotto non uniforme, i fori dei tubi si possono otturare impedendo l'aerazione; richiede investimenti di capitale per l'acquisto delle pompe, dei tubi, ecc.; l'aerazione forzata tende ad essiccare il cumulo ed a impedire il processo di stabilizzazione del compost, per il ridotto tenore di umidità presente nel substrato necessario ai microrganismi. Utilizzando un compost non stabilizzato, quando la matrice si riumidifica, si possono avere gravi problemi di fitotossicità a causa della ripresa dell'attività microbica. Molti degli inconvenienti sopra riportati sono evitabili combinando la tecnica della insufflazione attiva con il rivoltamento dei cumuli (soluzioni miste).

D. Sistema confinato: sono sistemi situati generalmente all'interno o sotto una calotta di protezione, che riduce la vulnerabilità del materiale del compost all'azione degli agenti meteorologici e il potenziale sviluppo degli odori. Tra i vantaggi presenta un buon controllo degli odori, realizzato diluendo l'aria interna con l'aria esterna o dirigendo il flusso degli odori verso un sistema di abbattimento. L'esposizione ridotta agli agenti climatici consente di conseguire grande qualità e consistenza del prodotto, utilizzando in

modo efficiente lo spazio. Tranne che per il compostaggio in cassoni o bins, in cui il cumulo viene rivoltato manualmente, o in un cilindro rotante, questi sistemi richiedono meno lavoro che le andane perché spesso usano un processo di rivoltamento automatizzato o un meccanismo di auto-rimescolamento. Di contro richiede elevati capitali per l'acquisto, la manutenzione ed il funzionamento del sistema di rivoltamento automatico. Il sistema è sensibile ad eventuali rotture meccaniche. Nei bins eccessivamente alti si possono verificare fenomeni di compattazione e aerazione inadeguata. In generale, questi sistemi hanno meno flessibilità rispetto ad altri in termini di localizzazione e di attrezzature.

1.1.4 Il compostaggio in Italia

In Italia il compost potrebbe rivestire un ruolo essenziale nella conservazione della qualità dei suoli. A differenza dei Paesi centro e nordeuropei, infatti, per gran parte del territorio italiano al pari di Spagna e Grecia, le peculiarità pedo-climatiche e agronomiche che rendono estremamente importante gestire la risorsa sostanza organica al fine di limitare i fenomeni di desertificazione in atto. Il compost quale fonte di sostanza organica pulita rappresenta un elemento chiave per l'attenuazione di tali fenomeni.

La crescente domanda alimentare derivante dal rapido incremento della popolazione mondiale, può essere soddisfatta soprattutto grazie all'innovazione delle tecniche agronomiche attualmente esistenti. A tal fine, l'utilizzazione agronomica di fertilizzanti derivanti dalle biomasse di scarto è un'istanza moderna, attuale e strategica. Negli ultimi anni si è assistito, infatti, ad un incremento dei quantitativi di ammendante compostato verde e misto impiegati in pieno campo su colture estensive, segno di una maggiore fiducia da parte degli agricoltori nei confronti di questo mezzo tecnico (Centemero, 2007).

La qualità media del compost presente in Italia nel corso degli anni è migliorata, in virtù della migliorata selezione degli scarti (accurata differenziazione, selezione di matrici idonee, protocolli di accettazione di scarti presso l'impianto) e dell'abbandono dell'impiego agricolo di compost da RSU indifferenziato. Ne sono testimonianza il minor contenuto in metalli pesanti e le performance agronomiche, attestate dalle numerose prove applicative su diverse colture in pieno campo e in serra. A ciò ha contribuito la legislazione che ha definito dei limiti qualitativi particolarmente restrittivi, in coerenza con ciò che avviene in altri Paesi europei (Centemero *et al.*, 2007).

È di fondamentale importanza per gli impieghi agricoli in generale, e soprattutto per la commercializzazione in settori agricoli specializzati, garantire la costanza e l'omogeneità delle partite; tale risultato si raggiunge con un'accurata e attenta gestione dell'impianto nelle sue varie componenti operative (stoccaggio, pre-trattamenti, post-trattamenti, ecc.) e nelle diverse fasi del processo (stabilizzazione, maturazione) (Centemero *et al.*, 2000).

Secondo i dati del Consorzio Italiano Compostatori (CIC) del 2015, il riciclo della matrice organica in Italia è affidato a 308 impianti di trattamento biologico di cui 261 impianti di compostaggio, con una capacità autorizzata complessiva di circa 5,1 mln tonnellate, a cui si aggiungono 47 impianti di digestione anaerobica (e compostaggio) con una capacità di trattamento nominale di oltre 3 mln di tonnellate. Complessivamente, il sistema impiantistico di compostaggio e di digestione anaerobica (DA) ha raggiunto una capacità potenziale di 8,1 mln di tonnellate. Anche se la capacità di trattamento degli impianti è sostanzialmente immutata rispetto al 2014, si assiste ad un riproporzionamento della quantità autorizzata tra impianti di compostaggio e integrati di digestione anaerobica e compostaggio a favore di questi ultimi (+161.000 t). L'attuale capacità impiantistica nominale potrebbe essere sufficiente per garantire l'effettivo recupero di tutti i rifiuti compostabili raccolti in maniera differenziata in Italia. Purtroppo, di fatto, si riscontra una carenza impiantistica in alcune regioni del Centro e del Sud Italia, già documentata dal CIC nei rapporti annuali del 2014. In base ai dati di ISPRA relativi ai rifiuti avviati a riciclo/recupero presso gli impianti di trattamento biologico, nel 2015 la quantità trattata è stata di circa 6,5 mln di tonnellate. Secondo stime del CIC, sulla base dei rifiuti trattati negli impianti di compostaggio e digestione anaerobica, nel 2015 sono state prodotte 1,76 mln di tonnellate di ammendante compostato e 275GNm³ di Biogas. Per l'84% si tratta di ammendante compostato misto o ammendante compostato con fanghi (1.472.500 tonnellate) e per il rimanente 16% di ammendante compostato verde (290.000 tonnellate) (CIC, 2017).

1.1.5 Matrici compostabili

I materiali compostabili devono avere caratteristiche biochimiche tali da garantire una regolare attuazione del processo; in particolare devono essere facilmente degradabili dai microrganismi così da garantire un sufficiente nutrimento di questi ed un corretto svolgimento del processo degradativo (Centemero *et al.*, 2010).

Si tratta di rifiuti prodotti in quantità rilevanti, che già oggi, in molti casi, vengono raccolti separatamente e che si caratterizzano per omogeneità e continuità del flusso di produzione. Una consistente quota di questa produzione è rappresentata dall'organico delle utenze familiari, che richiede particolare attenzione nelle fasi di selezione e raccolta, in relazione alle indispensabili azioni di sensibilizzazione e incentivazione degli utenti (Cristoforetti *et al.*, 1997). Eventuali controindicazioni per l'impiego di queste matrici compostabili sono:

- contaminazione da inerti (plastiche, vetro, ecc.) o da elementi o sostanze potenzialmente pericolose quali metalli pesanti;
- elevato contenuto in sali solubili (ad esempio residui di cucina) qualora si preveda un utilizzo del compost come substrato di coltura.

Altri parametri da conoscere all'atto della valutazione dell'idoneità sono:

- reazione (pH);
- densità apparente (d.a.), per definire la struttura fisica del materiale e il rapporto ottimale nella miscelazione con altre matrici;
- salinità o conducibilità elettrica specifica (CES);
- umidità, importante per l'avvio del processo;
- contenuto di sostanza organica (S.O.);
- contenuto di nutrienti (N, P, K e microelementi);
- rapporto tra carbonio e azoto (C/N).

I materiali rientrano, in genere, in una delle cinque categorie di seguito elencate e poi analizzate in dettaglio:

- A. scarti vegetali;
- B. rifiuti a elevato contenuto di sostanza organica biodegradabile derivanti da attività produttive, commerciali e di servizio;
- C. frazioni organiche provenienti da utenze domestiche;
- D. fanghi di depurazione urbani e agroalimentari;
- E. deiezioni zootecniche.

- A. Scarti vegetali: si tratta di sfalci, potature, foglie (ma anche ceppi e piante intere) provenienti dalla manutenzione del verde pubblico e privato, molto pregiati per il compostaggio, ma che spesso finiscono in discarica. Sono materiali generalmente asciutti (umidità < 50%), connotati da forte stagionalità di produzione, che si possono accumulare nell'area di ricevimento dell'impianto prima dell'utilizzo. La composizione chimica di questi scarti e in particolare il rapporto C/N, in genere molto elevato, ne consigliano il co-compostaggio con altri rifiuti aventi accentuate caratteristiche fito-nutritive, soprattutto ben dotati di azoto, quali, ad esempio, i fanghi di depurazione delle acque reflue, gli scarti della macellazione, i residui zootecnici. In questo modo si abbreviano i tempi di trasformazione e si ottengono prodotti più completi dal punto di vista agronomico. Nel caso di trattamento in purezza, la discreta omogeneità chimica e l'assenza di inquinanti fisici permettono notevoli semplificazioni impiantistiche e gestionali. L'unico pre-trattamento indispensabile è la triturazione o la sfibratura. L'erba di sfalcio e le foglie presentano valori di C/N decisamente più bassi e contenuti di macroelementi superiori e si possono aggiungere alle potature per meglio equilibrare la miscela di partenza. Nell'erba si rilevano modesti tenori di metalli pesanti e valori di salinità più elevati rispetto agli scarti legnosi. L'erba può essere assimilata a una frazione a elevata putrescibilità a causa dei valori di umidità, della pezzatura e di altri aspetti che ne determinano un'elevata velocità di biodegradazione.
- B. Rifiuti organici di attività produttive: i mercati all'ingrosso dell'ortofrutta, dei fiori, i mercati ittici e rionali, gli esercizi commerciali di generi alimentari, i macelli, i punti di ristoro (privati e collettivi), le industrie agroalimentari, tessili, cartarie, del legno e altre grosse utenze residuano quantità considerevoli di rifiuti organici, la cui selezione e raccolta differenziata si presenta generalmente più semplice rispetto a quella effettuata presso le utenze familiari, anche se spesso tali flussi non sono censiti e quindi risultano difficili da intercettare. Questi scarti possono contenere percentuali variabili di vetro e plastica, peraltro in quantità tali da essere separati in maniera efficace durante i processi di raffinazione. L'elevata putrescibilità e umidità (> 65%) di questi rifiuti ne richiedono l'immediata miscelazione con residui ligno-cellulosici, per garantire un corretto avvio del processo di decomposizione biologica. È opportuno, inoltre, che la prima fase della trasformazione venga eseguita in condizioni strettamente controllate, garantendo una sufficiente

ossigenazione, meglio se con dispositivi di aerazione forzata. Le arie esauste dovrebbero essere aspirate e trattate (con bio-filtro o altri sistemi) in modo da evitare il rilascio di sostanze maleodoranti. Tra gli altri parametri da considerare con attenzione vi è soprattutto la salinità, che nella frazione umida è piuttosto elevata (valori espressi come conducibilità elettrica specifica, CES, compresi tra 3.000 e 6.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$).

- C. Frazioni organiche da utenze domestiche: negli RSU prodotti dai nuclei famigliari la frazione umida è compresa in genere tra 25 e 40% in peso. La composizione media di questo rifiuto non differisce in modo sostanziale dall'organico proveniente da utenze selezionate, con presenza di piccole quantità di materiali indesiderati, soprattutto plastica. Le problematiche di questa matrice sono riconducibili soprattutto alle fasi di selezione e raccolta differenziata (RD), che coinvolgendo un elevato numero di utenze, determina una maggiore necessità di controllo. Nelle realtà dove è stata organizzata meglio la raccolta e dove è più intensa e costante l'opera di educazione e sensibilizzazione dei cittadini, si registra un grado di purezza dell'umido attorno al 95%, con punte del 97-98%, mentre dove le iniziative di RD non sono supportate da adeguate campagne di informazione, la qualità dell'organico è inferiore (10-15% di materiali estranei).
- D. Fanghi di depurazione delle acque reflue: si tratta di una matrice in genere abbastanza costante nel tempo come quantità e qualità, che non può essere compostata da sola ma che necessita della miscelazione con un materiale di struttura, di natura fibrosa e a matrice carboniosa in grado di dare sofficità (migliore circolazione di ossigeno) e di esplicare alcune importanti funzioni: ricondurre l'umidità della miscela a valori più idonei per lo sviluppo di reazioni aerobiche, favorire la porosità del cumulo, elevare il rapporto C/N e il potere umificante. I rapporti di miscelazione tra materiali di supporto e fanghi devono essere, in volume, a favore dei primi, in media di 2:1 v/v o 3:1 v/v a seconda dell'umidità del fango. In linea generale i fanghi provenienti dall'industria agroalimentare e da alcune altre categorie produttive hanno contenuti di inquinanti assai limitati e caratteristiche che non si modificano nel tempo (utile la conoscenza del processo produttivo da cui sono originati); possono essere favorevolmente impiegati per la produzione di compost di qualità, naturalmente in miscela con residui ligno-cellulosici. Un discorso analogo può essere fatto per i fanghi urbani,

purché provenienti da scarichi solamente civili e se sottoposti a periodico controllo qualitativo (in media una volta ogni 3-4 mesi) (Silvestri *et al.*, 1997).

- E. Deiezioni zootecniche: i residui zootecnici, a prescindere dall'origine (bovina, suina, avicola) possiedono caratteristiche chimico-fisiche ottimali ai fini di una loro trasformazione in compost di qualità: elevato tenore di sostanza organica, assenza di materiali indesiderati, limitato contenuto di metalli pesanti, composizione chimica piuttosto costante. L'unico aspetto problematico è rappresentato dall'elevata umidità che va ricondotta a livelli accettabili con alcuni accorgimenti tecnici, quanto meno per alcuni reflui. Il compost che si ottiene è un prodotto ricco di sostanza organica, in parte già umificata, e ha una buona dotazione di nutrienti, mediamente più elevata rispetto a prodotti ottenuti da altre matrici, ed è perciò vantaggiosamente impiegabile per il miglioramento della fertilità dei terreni. Le sue caratteristiche chimico-fisiche lo rendono idoneo per l'impiego in pieno campo, specie nell'ortofrutticoltura. L'uso per la produzione di substrati colturali deve invece essere attento, in quanto il suo potere fito-nutritivo è elevato e può essere tale da causare problemi per eccesso di salinità. Naturalmente può essere collocato anche in comparti extra-agricoli, come ad esempio nella preparazione e manutenzione delle aree destinate al verde ornamentale e nei recuperi ambientali. Il suo contenuto di acqua è $< 50\%$ e la sostanza organica è stabile dal punto di vista biologico e profuma di sottobosco (geosmina). Il materiale è di facile manipolazione, stoccabile senza problemi e trasportabile anche a distanza in maniera conveniente. Inoltre, i cali di peso e volume che si verificano durante il processo di trasformazione, pari ad almeno il 50%, contribuiscono a ridurre in modo considerevole l'entità del problema. Infine, le elevate temperature che si sviluppano nella massa in compostaggio assicurano la completa igienizzazione del prodotto (Piccinini *et al.*, 1995). Un aspetto di non secondaria importanza è che il compostaggio dei reflui zootecnici dà l'opportunità di valorizzare anche altre tipologie di scarti agricoli. Le particolari caratteristiche analitiche delle deiezioni presuppongono infatti l'aggiunta in molti casi di residui ligno-cellulosici atti a ridurre l'umidità e riequilibrare il rapporto C/N; nel contempo conferiscono la struttura necessaria per lo sviluppo del processo in condizioni aerobiche favorendo gli scambi gassosi. Allo scopo possono essere utilizzate le ramaglie di potatura dei fruttiferi opportunamente triturate,

residui colturali come stocchi di mais, paglia, pula di riso, gli scarti della manutenzione del verde ornamentale, eccetera (Cristoforetti *et al.*, 1997).

Fermo restando i presupposti di semplicità costruttiva e gestionale, il livello tecnologico dell'impianto dipende dalla tipologia di materiali organici lavorati. A questo proposito le deiezioni possono essere distinte nelle categorie esposte nel quadro seguente (Piccinini *et al.*, 1995):

- letame bovino a elevato contenuto di paglia, compostabile tal quale o addirittura con l'aggiunta periodica di liquami;
- letame bovino povero di lettiera, trattabile solo in miscela a materiali strutturali a base ligno-cellulosica;
- frazione solida dei reflui bovini ottenuta per separazione meccanica, non necessita di aggiunte di coadiuvanti strutturali; è invece indispensabile la dotazione, a livello di singola azienda o di impianto centralizzato, di idonee attrezzature per la separazione solido/liquido;
- letame suino, compostabile tal quale o integrato con materiali strutturali in limitate quantità;
- frazione solida dei reflui suinicoli ottenuta per vagliatura o, meglio, per centrifugazione, trattabile previa integrazione con una limitata quantità di coadiuvanti ligno-cellulosici (10-20% in peso);
- pollina pre-disidratata proveniente da allevamenti avicoli in gabbie (ovaiole) dotati di sistemi di ventilazione, deve essere miscelata a residui ligno-cellulosici;
- pollina ad elevato contenuto di umidità proveniente da allevamenti tradizionali; in tal caso le dosi di materiali strutturali necessari sono elevate;
- lettiera di polli da carne (broilers), compostabile tal quale o integrata con materiali strutturali in limitate quantità;
- fanghi della depurazione di liquami suinicoli o bovini (trattamento aerobico o digestione anaerobica), preventivamente disidratati mediante centrifuga, vanno miscelati con residui ligno-cellulosici;
- deiezioni ovine, caprine, equine e di coniglio, compostabili previa aggiunta di coadiuvanti in misura diversa a seconda dell'umidità che li caratterizza;
- liquami suinicoli e bovini, utilizzabili nei sistemi di compostaggio di soli scarti vegetali ad alto tenore di sostanza secca, mediante loro graduale aggiunta alle

masse in trasformazione in luogo dell'acqua usualmente impiegata per reintegrare il deficit idrico tipico di questi processi, specie nella stagione estiva (Cristoforetti *et al.*, 1997).

1.1.6 L'integrazione fra digestione anaerobica e il compostaggio

Il fatto che, a fronte del consolidamento del ruolo del compostaggio aerobico, anche la digestione anaerobica stia ottenendo sempre maggiore attenzione tra le tecnologie per il trattamento dei rifiuti solidi organici ha invogliato, in particolare in questi ultimi anni, sempre più i progettisti ad esaminare le possibili integrazioni dei due processi al fine di ottimizzare i rispettivi pregi e minimizzare gli svantaggi (Centemero, 2006).

I principali vantaggi e svantaggi dei due processi possono essere così sintetizzati (Tab. 1.3):

Tabella 1.3: Vantaggi e svantaggi digestione anaerobica e compostaggio (Centemero, 2006)

CARATTERISTICA	DIGESTIONE ANAEROBICA	COMPOSTAGGIO
ENERGIA	produzione energia rinnovabile (biogas)	consumo energia
TIPO RIFIUTO TRATTATO	tutte le tipologie di rifiuti organici indipendentemente dall'umidità	rifiuti organici con maggiore tenore in sostanza secca della matrice iniziale
EMISSIONI	no emissioni, odori	si emissioni, odori
GESTIONE ACQUE IN ECCESSO	acqua di processo in eccesso che necessita di uno specifico trattamento	acque di percolazione possono essere riciclate come agente umidificante sui cumuli in fase termofila
COSTI	investimenti iniziali elevati	costi più contenuti
USO AGRONOMICO	inferiore potere fertilizzante/ammendante digestato	maggiore potere fertilizzante/ammendante compost

È ormai assodato che l'integrazione dei sistemi comporti vantaggi per entrambe le tecnologie, che possono essere così riassunti:

- miglioramento del bilancio energetico dell'impianto con produzione di energia rinnovabile, in quanto nella fase anaerobica si ha in genere la produzione di un surplus di energia rispetto al fabbisogno dell'intero impianto;
- migliore capacità di controllo delle emissioni ed a costi minori;
- maggiore controllo sui problemi olfattivi; le fasi maggiormente odorigene sono gestite in reattore chiuso e le "scorie esauste" sono rappresentate dal biogas (utilizzato e non immesso in atmosfera). Il digestato è già un materiale semi-stabilizzato e, quindi, il controllo degli odori durante il compostaggio aerobico risulta più agevole;
- minore impegno di superficie a parità di rifiuto trattato; pur tenendo conto delle superfici per il post- compostaggio aerobico, grazie alla maggior compattezza dell'impiantistica anaerobica;
- riduzione dell'emissione di CO₂ in atmosfera (bilancio nullo o positivo);
- omogeneità di flussi (di digestato) in ingresso alla fase aerobica, con una migliore utilizzazione agronomica degli elementi fertilizzanti (organicazione dell'azoto);
- garanzia di riduzione degli organismi patogeni grazie al doppio passaggio termico;
- riduzione del fabbisogno di strutturante ligno-cellulosico rispetto al solo trattamento aerobico.

Tutti i fattori elencati non sono trascurabili, se si considerano sia le opportunità economiche della produzione di energia rinnovabile sia le criticità legate alle emissioni di odori, che di fatto è uno dei fattori limitanti l'accettabilità degli impianti per il trattamento della frazione organica da parte delle popolazioni confinanti (Centemero, 2006).

Nella figura sottostante si riporta, a titolo di esempio, un possibile schema di ciclo di trattamento integrato anaerobico/aerobico di rifiuti organici di varia provenienza, urbana, agroindustriale, zootecnica (fig. 1.2).

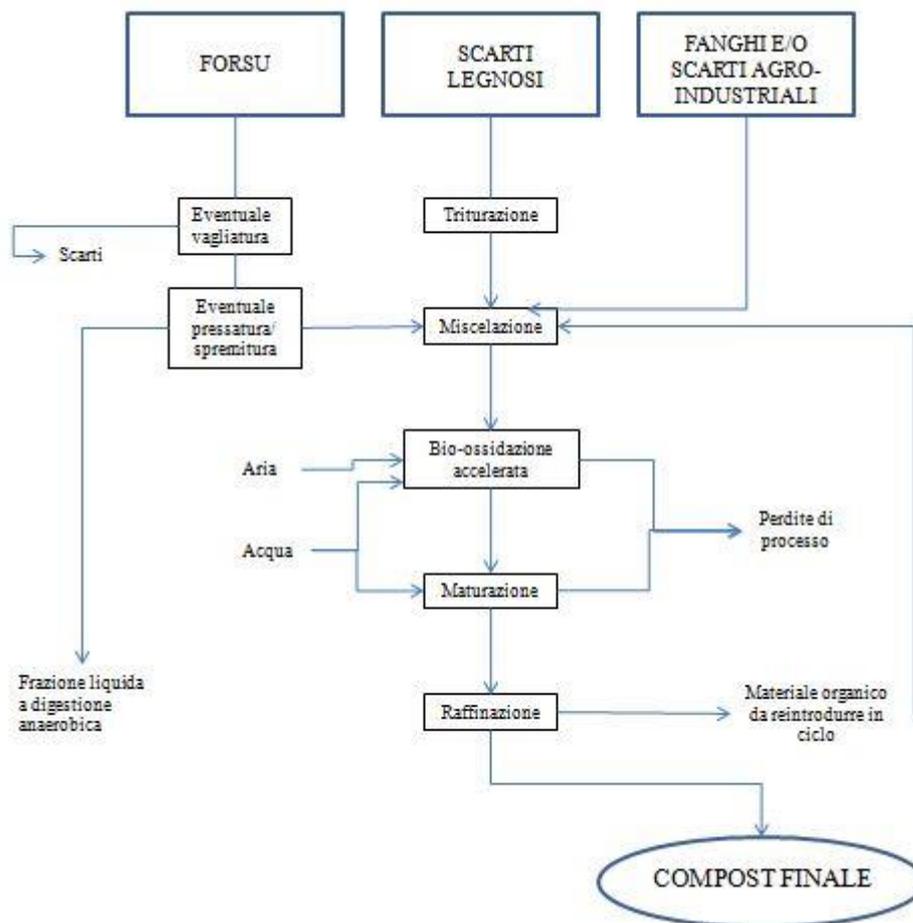


Figura 1.2: Schema di ciclo di trattamento integrato anaerobico/aerobico (fonte: *Compost di qualità 2009/2010*).

1.1.6.1 Matrici per la produzione di digestato da compostare

Possono convenientemente essere utilizzate per la produzione di biogas e per le successive fasi di compostaggio le seguenti biomasse e scarti organici:

- liquame suino: questo tipo di effluente zootecnico è caratterizzato da un contenuto di sostanza secca o solidi totali piuttosto bassa (1-6%) e di sostanza organica o solidi volatili estremamente variabile a causa delle differenti tipologie di allevamento comunemente presenti sul territorio;
- liquame bovino: le deiezioni bovine sono spesso rimosse dalle stalle utilizzando raschiatori. L'aggiunta di paglia, spesso effettuata nelle stalle, conduce a variazioni nel contenuto di solidi totali (8-15%). L'effetto di diluizione è minimo rispetto a quello che si ha con le deiezioni suine anche a causa del fatto che normalmente le zone calpestate dal bestiame vengono pulite e risciacquate con basse quantità

d'acqua. Come nel caso dei suini, anche nelle deiezioni bovine il contenuto di solidi totali dipende fortemente dal sistema di allevamento degli animali;

- pollina: tra le varie deiezioni avicole, la pollina di galline ovaiole è quella che più si presta alla digestione anaerobica, perché l'allevamento in gabbie non prevede l'uso di lettiera. Le deiezioni asportate fresche presentano un contenuto in solidi totali del 18-20% e alto contenuto di azoto. Si ricorda che, l'ammoniaca, che si libera in presenza di acqua per idrolisi enzimatica, può raggiungere alte concentrazioni e inibire il processo di digestione, oltre che dare luogo a forti emissioni nella fase di stoccaggio del digestato. Inoltre, frequentemente la pollina contiene inerti che, sedimentando, possono causare problemi operativi e ridurre il volume utile dei reattori;
- residui colturali: si tratta di residui provenienti dai raccolti agricoli quali foraggi, frutta e vegetali di scarsa qualità, percolati da silos e paglia che possono essere addizionati come substrati alle deiezioni animali;
- colture non alimentari ad uso energetico: la coltivazione di piante specifiche da avviare alla digestione anaerobica per la produzione di biogas può essere, in Europa, una soluzione per ridurre la sovrapproduzione agricola, ma anche un valida alternativa per l'utilizzo di aree incolte e a riposo (set aside) o di aree irrigate con acque recuperate dai depuratori urbani. Per sviluppare le colture energetiche, la nuova Politica Agricola Comunitaria (PAC) prevede degli specifici incentivi. L'uso delle colture energetiche come co-substrato, infatti, permette di ottimizzare la produzione di biogas e il riciclo dei nutrienti. Questo perché possono essere prodotte in azienda ed essere addizionate come co-substrati agli effluenti zootecnici direttamente o dopo insilamento e il digestato ottenuto a seguito del trattamento anaerobico può essere utilizzato per fertilizzare le aree agricole in cui le stesse vengono coltivate;
- scarti organici e acque reflue dell'agro-industria: ingenti quantità di prodotti agricoli sono lavorati nell'industria alimentare. Durante tali lavorazioni si producono reflui che spesso possono essere avviati alla digestione anaerobica. Il fango anaerobico risultante può essere utilizzato come ammendante su terreni agricoli. Tipici sottoprodotti e scarti agro-industriali sono ad esempio, il siero di latte, contenente proteine e zuccheri dall'industria casearia, e i reflui liquidi dall'industria che processa succhi di frutta o che distilla alcool. Di interesse per la

digestione anaerobica sono anche diversi scarti organici liquidi e/o semisolidi dell'industria della carne, quali grassi, sangue, contenuto stomacale, budella. Tali residui, ad esempio, possono essere addizionati come co-substrati nella digestione di liquami zootecnici e/o fanghi di depurazione;

- fanghi di depurazione: sono il residuo del processo di depurazione delle acque reflue urbane e industriali. Sono costituiti da biomassa e da sostanza inerte, organica ed inorganica. In generale gli obiettivi della digestione anaerobica dei fanghi di depurazione sono la stabilizzazione della sostanza organica, la distruzione degli eventuali microrganismi patogeni e la facilità nella distribuzione finale. Tale substrato non è consigliabile, a causa delle problematiche connesse alle attuali normative italiane di riferimento, per gli impianti di biogas aziendali per liquami zootecnici;
- frazioni organiche di rifiuti urbani: nei rifiuti urbani domestici la percentuale di frazione organica umida è compresa in genere tra il 25 e il 35 % in peso. La composizione media di questa frazione se derivante da raccolta differenziata secco-umido non differisce in modo sostanziale dall'organico raccogliabile da utenze selezionate, quali mercati all'ingrosso dell'ortofrutta e dei fiori, mercati ittici e rionali, esercizi commerciali di generi alimentari, punti di ristoro; la presenza di piccole quantità di plastica e vetro è in genere inferiore al 5 % sul totale. Queste frazioni organiche presentano un elevato grado di putrescibilità ed umidità (> 65 %) che le rendono adatte alla gestione anaerobica. (Centemero, 2006).

1.1.7 Benefici agronomici e vantaggi agro-ambientali dell'utilizzo di compost

L'impiego di compost di qualità può garantire un importante apporto di sostanza organica al terreno (in questo, per caratteristiche, è paragonabile a tutti gli effetti al letame). Il compost può prestarsi a sostituire il letame, i concimi organici e quelli chimici in tutte le loro funzioni e può assolvere pienamente al concetto di restituzione degli elementi nutritivi asportati con le produzioni. Va sottolineato come il compost presenti un discreto contenuto diazoto in forma stabile "a lenta cessione" e quindi non causi eccessi di vigoria e scadimenti qualitativi, possibili qualora il letame non sia sufficientemente stabilizzato. Il compost, rispetto al letame, contiene minori quote di elementi nutritivi (soprattutto azoto minerale) prontamente disponibili per le piante e, pertanto, ha un minore effetto concimante. Questa prerogativa del compost viene apprezzata in frutticoltura e viticoltura per i minori rischi sia di squilibri vegeto-produttivi e di scadimenti qualitativi e risulta

importante anche dal punto di vista ambientale per i minori rischi di eutrofizzazione (elementi minerali nelle acque di percolazione e di ruscellamento) (Sequi e Benedetti, 1995). In alcune esperienze l'effetto fertilizzante del compost applicato in copertura su coltivazioni arboree (vite, melo, agrumi) si è tradotto, rispetto all'esclusivo apporto di concimi chimici, in un marcato miglioramento dello stato nutrizionale delle piante con evidenti attenuazioni della sintomatologia di alcune fisiopatie dovute a temporanee condizioni edafiche sfavorevoli (disseccamento del rachide, clorosi ferrica, bitteratura amara e filloptosi anticipata). L'apporto di materiali organici pienamente stabilizzati, quali il compost, comporta non solo la copertura delle esigenze nutrizionali delle piante, ma anche il miglioramento delle condizioni fisiche e idrologiche del terreno e, conseguentemente, la minore predisposizione delle piante a squilibri nutrizionali (Pinamonti *et al.*, 1994; Pinamonti e Zorzi, 1995). L'impiego di compost arricchisce il terreno anche di altri elementi nutritivi che possono incrementare l'efficacia delle concimazioni minerali. Su colture come frumento e pomodoro, durante alcune prove sperimentali in campo, l'utilizzo di compost ha causato sia un aumento della produzione di biomassa fresca sia di sostanza secca. Il miglioramento della fertilità del suolo in seguito all'utilizzo di compost si è evidenziato con il maggiore contenuto sia di sostanza organica sia di elementi nutritivi come l'azoto totale, il fosforo e il potassio assimilabile. Va evidenziato, però, che l'impiego di compost oltre ad avere aumentato la fertilità dello strato più superficiale del suolo ha determinato anche un incremento significativo della conducibilità elettrica (Fecondo *et al.*, 2012). Al fine di garantire buone rese produttive, sulle colture erbacee il compost deve essere applicato in combinazione a fertilizzanti minerali; esso infatti non è in grado di rispondere pienamente alle loro esigenze nutrizionali. In questo senso un piano di nutrizione integrata delle colture (compost e concimi chimici) è un approccio che offre massime garanzie dal punto di vista agronomico e ambientale (Sequi e Benedetti, 1995; Moretti *et al.*, 2014). Va comunque ribadito come il compost, nonostante a livello sperimentale si tenda a confrontarlo con il letame, vada considerato come una fonte di carbonio organico e come tale il suo impiego va apprezzato soprattutto alla luce degli effetti ammendanti, indipendentemente dagli apporti di elementi nutritivi.

Il compost determina, per ogni incremento dello 0.1 % di carbonio organico, una riduzione della densità apparente del suolo e un aumento della infiltrazione di acqua, degli scambi

gassosi a livello radicale, della permeabilità del suolo e della capacità di ritenzione idrica (0.4-0.6%), in relazione alla migliore aggregazione delle particelle del suolo e alla macroporosità. I benefici sull'aggregazione delle particelle di suolo sono maggiormente evidenti in suoli a tessitura fine come quelli argillosi e, all'opposto, in suoli con tessitura grossolana come quelli sabbiosi (Centemero e Montemurro, 2016). La riduzione della formazione di crosta superficiale e dell'erosione del suolo sono altri effetti positivi riscontrabili in seguito a ripetute applicazioni di compost al suolo, in relazione all'aumento di stabilità degli aggregati del suolo (Annabi *et al.*, 2006). Il compost contribuisce al sequestro del carbonio a lento rilascio, con effetti positivi sul ripristino della fertilità dei suoli e fornendo un positivo contributo al bilancio delle emissioni di CO₂ (*carbon sink*) (Centemero, 2010). L'azione ammendante del compost si traduce in un significativo aumento del contenuto di sostanza organica dei suoli e, conseguentemente, in un miglioramento delle loro proprietà fisiche (porosità, stabilità strutturale, capacità di trattenere acqua disponibile) e delle loro proprietà chimiche (maggiore disponibilità degli elementi nutritivi). Tale azione ammendante del compost risulta in genere più prolungata nel tempo rispetto a quella del letame.

L'impiego continuo di compost, in molti casi, può determinare effetti positivi sullo stato fitosanitario delle colture ammendate, grazie alla riduzione significativa dell'incidenza e intensità di malattie causate da funghi o batteri fitopatogeni. Tale attitudine è definita, più in generale, soppressività, e si riferisce alla capacità dei compost di creare condizioni sfavorevoli all'insorgenza ed allo sviluppo di diverse malattie delle piante, in particolare per compost derivanti da un apporto consistente di matrici vegetali. I compost soppressivi, pertanto, possiedono un notevole potenziale di impiego, volto soprattutto a favorire la razionalizzazione della gestione fitosanitaria delle coltivazioni in chiave sostenibile in quanto possono consentire la diminuzione sensibile dell'uso dei mezzi chimici di lotta, oltre che migliorare la qualità delle produzioni. Le modalità d'azione dei compost soppressivi si manifestano attraverso diversi meccanismi: azione diretta sul patogeno, rafforzamento delle capacità di difesa delle piante, modifica dell'ambiente ecologico in cui ha luogo l'interazione pianta-patogeno. La componente microbiologica dei compost, ampiamente diversificata in gruppi filogenetici e funzionali), è ritenuta la principale responsabile della soppressività. I microrganismi antagonisti apportati con i compost agiscono attraverso i classici meccanismi del controllo biologico: parassitismo, antibiosi,

competizione per lo spazio e i siti di infezione, competizione per i nutrienti, fungi stasi, induzione di resistenza nelle piante. Anche la parte abiotica dei compost, cioè quella chimica presente nella complessa matrice organica umificata, ricca in molecole attive, può dare un consistente contributo alla soppressività, sia attraverso un'azione antifungina diretta, sia modificando le caratteristiche fisico-chimiche dell'ambiente, o anche migliorando lo stato nutrizionale della pianta che, così, è maggiormente in grado di difendersi. La sostanza organica del compost incorporata nel suolo, inoltre, ha anche un effetto stimolante sulla comunità microbica residente nel terreno alimentando, così, eventuali microrganismi utili per le piante (es. antagonisti e promotori della crescita delle piante) (Zaccardelli *et al.*, 2015).

Gli ammendanti compostati trovano impieghi in grado di valorizzare proprietà specifiche strettamente legate alla flora microbica in essi contenuta. La ricchezza in batteri e funghi e la conseguente elevata attività microbica li rende idonei ad alcuni usi non convenzionali legati ad operazioni di disinquinamento e bonifica ambientale identificate con il termine “*bioremediation*”.L’aggiunta di ammendante compostato in suoli contaminati, consente di convertire e degradare in forme meno tossiche moltissimi contaminanti organici, come per esempio gli agro-farmaci, gli idrocarburi policiclici aromatici, i coloranti sintetici, i conservanti del legno, i rifiuti da esplosivi e i polimeri sintetici. La popolazione microbica esplica una funzione bonificatrice in virtù della presenza di sostanza organica, trovando nell’ammendante compostato un substrato idoneo alla sua crescita e al suo sviluppo, contribuendo così alla degradazione biologica delle componenti indesiderate (Franz *et al.*, 2010).

1.2 La gestione della sostanza organica

La fertilità di un terreno è un concetto molto ampio, che coinvolge fattori agronomici e ambientali; in sintesi essa può essere definita come attitudine, che deve durare nel tempo, ad ospitare la vita delle piante coltivate, in modo da massimizzare le rese, da garantire la salubrità dei prodotti alimentari e rispettare l’ambiente. La sostanza organica, che rappresenta l’unica forma in cui un terreno può immagazzinare energia disponibile per gli organismi viventi in esso presenti, assolve a funzioni molto importanti ai fini della fertilità: fattore strutturante, agente di tesaurizzazione dell’acqua, sede per reazioni di scambio ionico, fonte di elementi nutritivi, agente chelante, agente tampone, substrato microbico, fattore di sviluppo radicale, sorgente di sostanze biostimolanti, fattore di

controllo nella patologia delle piante, fattore di depurazione da composti chimici estranei quali erbicidi e antiparassitari. In un terreno naturale, non disturbato dall'uomo, i processi vitali avvengono secondo un determinato equilibrio, che garantisce nel tempo il mantenimento di adeguati livelli di sostanza organica e di fertilità. L'attività agricola tende a rompere tale equilibrio, esponendo il terreno a gravi perdite di sostanza organica e a pericolosi rischi ambientali. Per ripristinare un certo equilibrio tra prelievo e restituzione di materiale organico dalla biosfera è importante razionalizzare alcune pratiche agronomiche: frequenza e profondità di lavorazione, tecniche irrigue, rotazioni, valorizzazione in campo dei residui colturali, fertilizzazione organica.

Negli areali agricoli mediterranei, si registra una progressiva diminuzione della reale dotazione di sostanza organica presente nel terreno, che si avvicina sempre più al valore più basso della scala qualitativa di dotazione in sostanza organica, al limite con la soglia della classe inferiore (cioè fra normale e scarsa). Tale situazione si registra in particolar nelle Marche, in Toscana, Piemonte, Basilicata, Calabria, Abruzzo. Confrontando i dati analitici fra il trentennio 1960-1991 e l'ultimo decennio si nota una progressiva diminuzione dei contenuti di sostanza organica nei suoli delle diverse regioni italiane. Tale andamento è preoccupante perché denota un progressivo depauperamento della matrice organica che a sua volta porta a un abbassamento del livello di fertilità dei terreni (Tugnoli *et al.*, 2007).

Prendendo atto della scarsa disponibilità di letame in molti comprensori agricoli e considerando come il ricorso esclusivo alla concimazione minerale consenta di mantenere elevato unicamente il livello di fertilità chimica, vanno individuate nuove fonti di materiali organici in grado di soddisfare questo tipo di esigenze.

In tale ottica, l'impiego di compost può rappresentare una valida soluzione per contrastare la progressiva perdita di fertilità che si sta osservando in molti suoli italiani (Gaiotti *et al.*, 2015).

In questa ottica il compost viene proposto al mondo agricolo come fattore produttivo, attraverso il quale realizzare un modello di agricoltura sostenibile, che consenta di coltivare i terreni evitando di asportare dall'ambiente più di quello che la natura è in grado di rigenerare (Tugnoli *et al.*, 2007).

L'elevato fabbisogno di sostanza organica da parte dei terreni italiani emerge molto chiaramente in tutti i comparti e in tutte le zone a forte vocazione agricola. Le indagini finora effettuate evidenziano come più del 50% dei terreni coltivati siano classificati come poveri di sostanza organica (Zamborlini *et al.*, 1990), con situazioni anche molto diversificate in funzione delle diverse realtà territoriali. Solo formulando adeguati bilanci delle sostanze umiche nei suoli è possibile quantificare il reale fabbisogno di sostanza organica dei terreni. Dai dati riscontrati in bibliografia (Bartolini, 1982; Ribauda *et al.*, 1994; Tellarini, 1994) emerge, a carico dei terreni a forte vocazione agricola, un deficit medio annuo di sostanza organica secca pari a 500 kg ha^{-1} , con dati molto diversi in funzione della variabilità ambientale (clima, tipologie di terreni) e delle tecniche colturali (specie coltivata, gestione del suolo, tipo di rotazioni). Per far fronte a tale deficit sono necessarie, in linea teorica, almeno 2 t ha^{-1} di compost di buona qualità. Considerando che l'agricoltura in Italia interessa una superficie di 12 milioni di ettari, ne consegue una domanda potenziale di circa 24 milioni di tonnellate di compost (Tugnoli *et al.*, 2007).

1.3 Life Cycle Assessment

Il metodo Life Cycle Assessment (LCA) è una procedura standardizzata volta a determinare il costo ambientale delle attività umane, quantificando e valutando l'impatto ambientale di un prodotto (o processo o attività) considerando tutte le diverse fasi del suo ciclo di vita (SETAC, 1993; Baldo *et al.*, 2008).

Da un punto di vista metodologico la definizione di LCA, proposta originariamente dalla SETAC (*Society of Environmental Toxicology and Chemistry*) nel 1993, successivamente ripresa dalle norme ISO 14040 e 14044 (*International Organization for Standardization*), è la seguente: un'analisi LCA è un procedimento oggettivo di valutazione dei carichi energetici ed ambientali relativi ad un processo o un'attività, effettuato attraverso l'identificazione dell'energia e dei materiali usati e dei rifiuti rilasciati nell'ambiente. La valutazione include l'intero ciclo di vita del processo o attività comprendendo l'estrazione e il trattamento delle materie prime, la fabbricazione, il trasporto, la distribuzione, l'uso, il riuso, il riciclo e lo smaltimento finale (Fig.1.3).



Figura 2.3: Schema del ciclo vita di un prodotto (Fonte: www.solidworks.it).

In questa definizione è importante sottolineare e spiegare alcuni aspetti fondamentali, come ad esempio (Vollaro, 2004):

- l'oggettività del procedimento: LCA è una metodologia che si basa su diversi step ed è volontaria. È importante che siano seguite accuratamente tutte le singole fasi del ciclo di vita e che la valutazione derivi dall'analisi di dati scientificamente verificabili e confrontabili;
- carichi energetici e ambientali: l'oggetto della valutazione sono i carichi energetici ed ambientali imputabili ai processi o attività che portano alla produzione di un prodotto o di un servizio;
- l'intero ciclo di vita: in uno studio LCA è preso in considerazione l'intero ciclo di vita del processo o attività, ovvero gli stadi consecutivi e collegati del sistema produttivo, dall'acquisizione della materia prima, al ciclo produttivo, all'uso e allo smaltimento finale.

Durante uno studio di LCA un prodotto viene esaminato in tutti i suoi stadi, “dalla culla alla tomba” (*from cradle to grave*) ossia, dall'estrazione delle materie prime fino allo smaltimento finale; tuttavia è possibile studiare il sistema fino al termine della produzione, e cioè, “dalla culla al cancello” (*from cradle to gate*) escludendo le fasi del sistema che seguono l'uscita del prodotto dal sito produttivo.

La definizione specifica riportata nella norma ISO 14040 esprime la LCA come una compilazione e valutazione attraverso tutto il ciclo vita dei flussi di entrata e in uscita, nonché i potenziali impatti ambientali, di un sistema di prodotto.

Il campo di applicazione dell'LCA è molto ampio, andando dalla gestione della singola azienda a quella dei sistemi socio-economici nazionali: interessa tanto il piccolo imprenditore quanto gli organi pubblici di controllo e programmazione (Fig. 1.4). Sul tema di politica ambientale dei prodotti a livello comunitario è importante citare la *Integrated Product Policy* (IPP) inclusa nella EU SDS (*European Union Sustainable Development Strategy*), per il riconoscimento dell'importanza delle qualità ambientali dei prodotti e dei servizi. Il concetto di “politica integrata di prodotto” si basa evidentemente sull'approccio di ciclo di vita e trova nella LCA il suo principale strumento analitico. Le politiche integrate di prodotto possono essere definite come un approccio integrato alle politiche ambientali rivolto al miglioramento continuo della prestazione ambientali dei prodotti (merce e servizi) nel contesto dell'intero ciclo di vita (Baldo *et al.*, 2008).

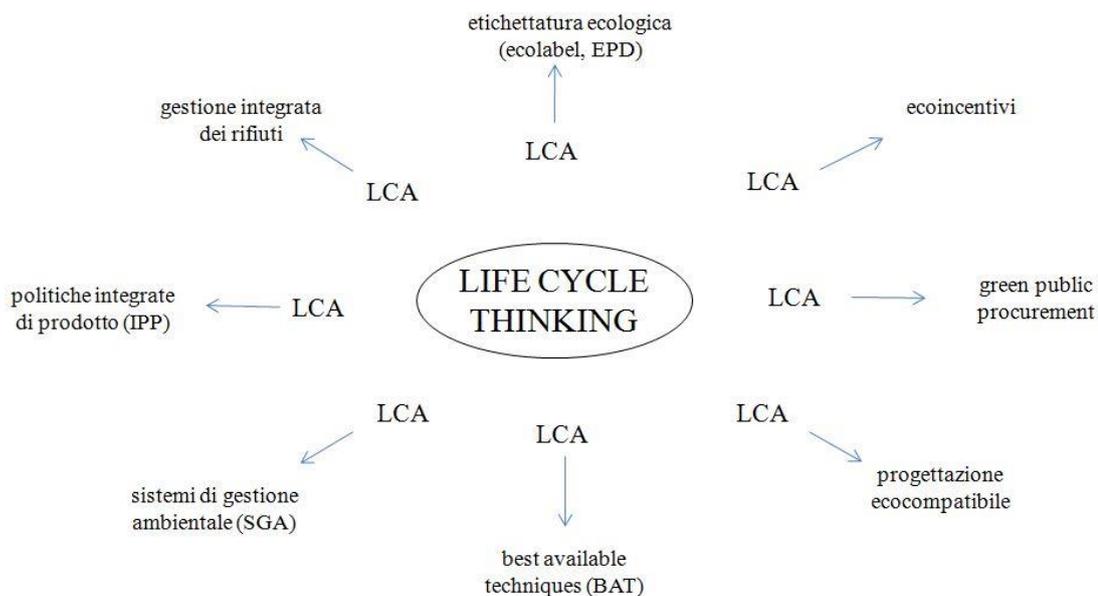


Figura 1.4: Life Cycle Thinking – LCT (Fonte: Baldo, 2008).

1.3.1 Origini della metodologia LCA

La formalizzazione della metodologia, è il risultato di un approccio definibile come *Life Cycle Thinking* (LCT) nato negli anni 60 (Baldo *et al.*, 2008). Il nuovo paradigma fu quello di valutare un sistema produttivo dal punto di vista prestazionale e ambientale, seguendo ogni passaggio lungo l'intero ciclo di vita, poiché solo attraverso questo approccio, l'analisi sarebbe risultata efficace.

Inizialmente gli studi non venivano denominati Life Cycle Assessment, ma piuttosto, *cradle to grave analysis*, *life cycle analysis*, *resource and environmental profile analysis* ed *eco balance*. La differenza nel nome rispecchia la diversità dal procedimento attuale; le prime analisi infatti, venivano svolte non con approccio sistemico, ma bensì analizzando disgiuntamente ogni passaggio o componente decontestualizzandolo dall'intera filiera produttiva; le ottimizzazioni ottenute in questo modo possono non riflettersi sull'intero sistema, dando apparenti miglioramenti o trasferendo aspetti negativi ad un'altra parte del sistema stesso, lasciando inalterato il bilancio generale.

Uno dei primi esempi della metodologia può considerarsi la relazione di Harold Smith alla *World Energy Conference* del 1963, riguardante le richieste di energia per la produzione di intermedi chimici. Verso la fine degli anni Sessanta furono pubblicati alcuni studi di modelli globali in *The Limits to Growth*, nei quali si cercava di predire quali sarebbero stati

gli effetti di un aumento della popolazione mondiale sulla richiesta di materie prime e di energia. Il continuo e rapido consumo di combustibili fossili e il verificarsi di cambiamenti climatici, spinsero a controlli meticolosi sui consumi energetici e sulle emissioni delle industrie.

Le prime applicazioni di LCA risalgono agli anni 70 in Nord America, gli studi, svolti sotto il nome di REPA (*Resource and Environmental Profile Analysis*), furono commissionati dalla *The Coca Cola Company* e dalla *Mobil Chemical Company*.

Obiettivo dello studio della *The Coca Cola Company*, fu quello di determinare quale materiale tra plastica, vetro e alluminio e impiego di fine vita del contenitore (a perdere o a rendere), fosse energeticamente ed ecologicamente migliore. I risultati non furono resi pubblici, ma in quegli anni venne presa la decisione di sostituire le bottiglie di vetro, con bottiglie di plastica. L'analisi commissionata dalla *Mobil Chemical Company* mirava a quantificare l'impatto derivante dai fogli in carta e polistirene per uso alimentare. I risultati dello studio furono pubblicati da Franklin W., Hunt R. (1972) avendo un duplice effetto positivo: smentire le voci messe in giro dai concorrenti della *Mobil Chemical Company*, che asserivano che la plastica avesse un impatto ambientale maggiore e, di conseguenza, sulla scelta dei consumatori verso il prodotto in polistirene. Questi due primi studi sono i capostipiti degli studi LCA di confronto, in quanto portano il principio fondamentale della metodologia stessa, vanno a confrontare materiali alternativi a parità di funzioni e non in modo assoluto.

Nello stesso periodo dei primi studi, ma ancor prima delle crisi petrolifere degli anni 70, la comunità scientifica e le industrie iniziarono ad affrontare tematiche riguardanti lo sfruttamento incondizionato delle risorse ed i relativi effetti sull'ambiente. Si era formata la consapevolezza che si stavano sfruttando risorse limitate a ritmi sempre maggiori.

Contemporaneamente, in Europa, venne pubblicato il manuale di Analisi Energetica di Boustead ed Hancock (Boustead I., Hancock G., 1979) che, al suo interno, riportava per la prima volta la descrizione operativa del procedimento analitico, che è ancora alla base della LCA odierna.

L'interesse per la LCA aumentò negli anni ottanta in seguito all'introduzione di due grosse novità: furono sviluppati una serie di metodi per la valutazione quantitativa degli impatti sulle differenti tematiche ambientali (impoverimento delle risorse, riscaldamento globale

ecc.) e gli studi di LCA divennero sempre più trasparenti e disponibili al pubblico. Alla fine degli anni '80 esisteva però una situazione di enorme confusione, in quanto valutazioni su LCA condotti sugli stessi prodotti contenevano spesso risultati contrastanti in quanto gli studi si basavano su dati, metodi e terminologie differenti. Per tale ragioni risultò di fondamentale importanza la nascita di una metodologia univoca e standardizzata.

Durante questi anni la consapevolezza ecologica e la definizione di sviluppo sostenibile diedero una forte spinta all'evoluzione della metodologia, fino al congresso SETAC del 1993 di Smuggler Notch (Vermont – USA), dove venne coniato il termine LCA e pubblicato il quadro di riferimento accettato in campo internazionale, per meglio caratterizzare l'obiettivo delle analisi fino ad allora svolte sotto il nome di REPA, *Resource and Environmental Profile Analysis* (ENEA, 2002).

Due anni più tardi, in Olanda, vengono pubblicate dal *Centre of Environmental Studies* (CML) dell'Università di Leiden, le linee guida (chiamate CML) che definirono lo standard per gli anni successivi (CML Method 1992).

Nel 1996 viene edita la prima rivista specializzata *Journal of Life Cycle Assessment* e, sul finire del decennio, si giunse alla standardizzazione internazionale tramite una serie di norme ISO (14040, 14041, 14042, 14043) pubblicate nel 1998 (UNI EN ISO 14040:1998) e revisionate successivamente nel 2006 (UNI EN ISO 14040:2006).

Le norme ISO della serie 14000 rappresentano, quindi, un riferimento riconosciuto per la gestione ambientale (*Environmental Management*) e per i sistemi di gestione ambientale (*Environmental Management System*) dei sistemi produttivi. Sono state messe a punto dal comitato tecnico ISO/TC 207 con lo scopo di sviluppare una guida pratica per l'attuazione o il miglioramento di un piano di gestione ambientale interno all'organizzazione e per fornire mezzi attendibili per comunicare informazioni sugli aspetti energetici e ambientali dei processi produttivi. Con il progetto ISO 14000 si intende, in particolare, porre ordine in tutte le procedure di analisi e controllo dei rendimenti ambientali dei sistemi produttivi e predisporre un unico riferimento normativo adottabile in tutti i paesi del mondo (Baldo *et al.*, 2008). In particolare, attualmente, le norme che trattano il LCA sono la ISO 14040:2006 (Gestione ambientale - Valutazione del ciclo di vita - Principi e quadro di riferimento) e la ISO 14044:2006 (Gestione ambientale - Valutazione del ciclo di vita - Requisiti e linee guida). La ISO 14040:2006 fornisce in un quadro generale le pratiche, le

applicazioni e le limitazioni dell'LCA; la ISO 140044:2006 fornisce le linee guida per la fase di valutazione dell'impatto dell'LCA, la fase di interpretazione dei risultati, la valutazione relativa alla natura e alla qualità dei dati raccolti.

Essendo implicita la volontà di migliorare questo tipo di approccio, risulta evidente che, nel tempo, norme e modelli di calcolo subiscano aggiornamenti parallelamente alle conoscenze di interazione tra sistemi industriali, ambiente e sostanze.

La considerazione che sta alla base di tutto è che non esistono processi produttivi, e quindi prodotti, a costo energetico ed ambientale nullo, quindi, la via è quella di comprendere come tali processi funzionino per poi produrre azioni di miglioramento (Baldo *et al.*, 2008).

1.3.2 Fasi della valutazione del ciclo vita

Un'analisi LCA applicata ad un sistema industriale indirizza lo studio di efficienza del sistema in oggetto verso la salvaguardia della salute dell'ambiente e dell'uomo nonché verso il risparmio delle risorse. Punto fondamentale della teoria è la definizione di "sistema industriale", che la norma ISO qualifica come "sistema di prodotti". La differenza tra questi due modi di intendere il sistema oggetto di uno studio LCA risiede principalmente nella visione sostanzialmente diversa tra coloro che intendono la LCA come analisi di processo e quelli che la intendono come analisi di prodotto. Per chiarire meglio questa differenza, sottile in apparenza, è bene ricordare che con sistema industriale si intende un insieme di procedure, la cui funzione principale è la produzione di beni utili; esso è separato dal sistema ambiente da confini fisici ben definiti ed è a esso collegato grazie allo scambio di input e di output (Fig. 1.5). In quest'ottica, l'ambiente non è quindi quello naturale definito dall'ecologia, ma è tutto ciò che sta all'esterno del sistema considerato. Secondo questa impostazione risulta chiaro come gli input del sistema siano parametri che intervengono nel dibattito sui problemi di risparmio delle risorse, mentre gli output riguardino i problemi di inquinamento. Già da questa prima descrizione si comprende come la definizione della funzione del sistema industriale e dei confini dello stesso rappresentino due tra le operazioni chiave per la buona riuscita di uno studio LCA. È allora logico affermare che, più che descrivere il prodotto, un'analisi LCA descrive il sistema che lo genera o, in altre parole, la funzione del sistema stesso. Questa distinzione è dunque importante per evitare il rischio di identificare, in qualunque caso, l'analisi di ciclo vita dei processi con un'analisi di ciclo vita dei prodotti. Le norme ISO parlano allora di *product*

system per indicare “l’insieme elementare di unità di processo connesse tra loro per quanto riguarda materia ed energia, che perseguono una o più funzioni definite” e, pertanto, per porre un forte accento sull’importanza dei prodotti all’interno di un qualunque sistema di processi o di servizi. Il modello analogico del sistema oggetto di indagine in un’analisi LCA risulta sempre essere una semplificazione della realtà, poiché, come tutti i modelli operativi non include una rappresentazione completa delle interazioni con l’ambiente ma solamente quelle ritenute più significative. L’importante è poter eseguire campagne di simulazione in maniera affidabile ed efficace in modo da progettare il miglioramento del sistema indagato. Da quanto detto appare inoltre chiaro come questo tipo di metodologia risulti particolarmente adatto anche per analizzare in termini diversi l’interazione tra azienda, consumatore e ambiente, dal momento che comprende la sfera della produzione, quella della distribuzione e quelle dell’utilizzazione.

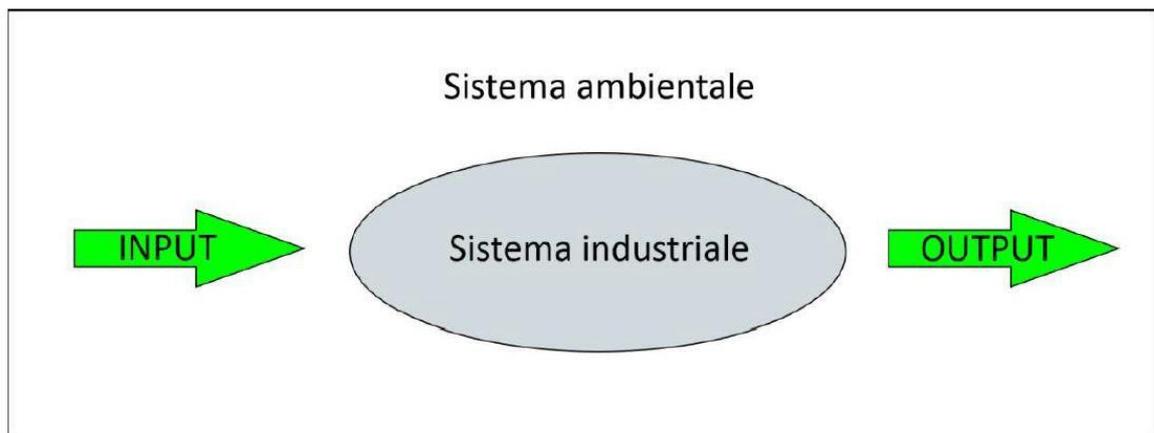


Figura 1.5: Rappresentazione schematica dell’interazione tra sistema ambientale e sistema industriale (Fonte: Baldo et al.,2008).

La struttura moderna della LCA proposta dalla norma ISO 14040 è sintetizzabile in quattro momenti principali (Baldo *et al.*, 2008):

1. Definizione degli scopi e degli obiettivi (*Goal and Scope Definition* - ISO 14041): è la fase preliminare in cui vengono definite le finalità dello studio, l’unità funzionale, i confini del sistema studiato, il fabbisogno e l’affidabilità dei dati, le assunzioni e i limiti.
2. Analisi di inventario (*Life Cycle Inventory Analysis*, LCI - ISO 14041): è la parte del lavoro dedicato allo studio del ciclo di vita del processo o attività: lo scopo principale è quello di ricostruire la via attraverso cui il fluire dell’energia e dei materiali permette il funzionamento del sistema produttivo in esame tramite tutti i

processi di trasformazione e trasporto. Redigere un inventario di ciclo vita significa pertanto costruire il modello analogico del sistema reale che si intende studiare.

3. Analisi degli impatti (*Life Cycle Impact Assessment*, LCIA- ISO 14042): è lo studio dell'impatto ambientale provocato dal processo o attività, che ha lo scopo di evidenziare l'entità delle modificazioni generate a seguito dei rilasci nell'ambiente e dei consumi di risorse calcolati nell'inventario. È questa la fase in cui si produce il passaggio dal dato oggettivo calcolato durante la fase di inventario al giudizio di pericolosità ambientale.
4. Interpretazione e miglioramento (*Life Cycle Interpretation* - ISO 14043): è la parte conclusiva di una LCA, che ha lo scopo di proporre i cambiamenti necessari a ridurre l'impatto ambientale dei processi o attività considerati, valutandoli in maniera iterativa con la stessa metodologia LCA in modo da non attuare azioni tali da peggiorare lo stato di fatto. La nomenclatura ufficiale ISO è stata qui integrata con la vecchia dizione *Improvement* ereditata dallo schema operativo redatto dalla SETAC in seguito al congresso del Vermont del 1990.

Questi diversi momenti di analisi costituiscono il punto di riferimento per gli interventi su un processo di produzione esistente o per il progetto di un nuovo prodotto. In Fig.1.6 viene riportato lo schema operativo della metodologia così come proposto dalle norme ISO utilizzando una terminologia semplificata.

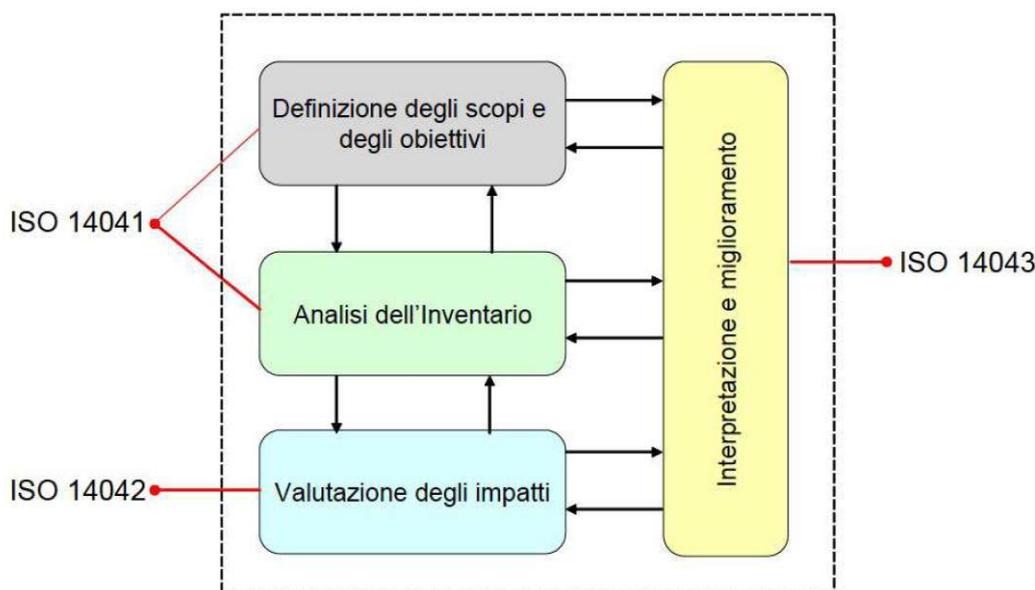


Figura 1.6: Struttura della LCA proposta dalla ISO 14040 (Fonte Baldo et al., 2008).

1.3.2.1 Definizione dell'obiettivo e del campo di applicazione

Il primo passo fondamentale dell'analisi del ciclo di vita consiste nella definizione dell'obiettivo e del campo di applicazione. La norma ISO 14040 riporta le prescrizioni circa questa fase:

“Gli obiettivi e gli scopi dello studio di una LCA devono essere definiti con chiarezza ad essere coerenti con l'applicazione prevista. L'obiettivo di una LCA deve stabilire senza ambiguità quali siano l'applicazione prevista, le motivazione che inducono a realizzare lo studio e il tipo di pubblico a cui è destinato, cioè a quali persone si intendono comunicare i risultati dello studio”.

Il campo di applicazione consente di individuare la sfera da analizzare in funzione degli obiettivi prefissati, ed essendo l'LCA una tecnica iterativa, è possibile o può rendersi necessario modificare il campo di applicazione in conseguenza di nuove informazioni raccolte.

I punti seguenti sono fondamentali per comporre il campo di applicazione:

- unità funzionale: è il termine di riferimento a cui associare consumi di risorse ed impatti ambientali, deve essere definita e misurabile. Lo scopo principale di questa unità di misura è fornire un riferimento a cui legare i flussi in ingresso ed in uscita;

- confini del sistema: circoscrivono le unità di processo che devono essere incluse nel modello che rappresenta il sistema. Questi devono essere in accordo con la configurazione necessaria alla valutazione del ciclo di vita, il sistema deve cioè essere modellizzato in modo che i flussi in ingresso e in uscita ai confini del sistema siano flussi elementari; per flusso elementare si intende materia od energia prelevati da, o scaricati, nell'ambiente senza nessuna trasformazione da parte dell'uomo. Quindi, i confini iniziali del sistema prodotto rappresentano le unità di processo che devono essere incluse nella LCA. Tali unità di processo vengono definite attraverso una accurata descrizione del sistema in esame. Per descrivere il sistema prodotto si fa uso di diagrammi di flusso che indicano le unità di processo e le loro interrelazioni. Per stabilire i confini del sistema, normalmente si prendono in considerazione le seguenti fasi: flussi in ingresso ed in uscita, acquisizione materie prime, processo di fabbricazione, produzione ed utilizzazione di combustibili, elettricità, e di calore, uso e manutenzione del prodotto, riciclo/gestione dei rifiuti (Fig. 1.7);
- unità di processo: trasforma le materie prime o i materiali intermedi in input, in un prodotto semilavorato in output, attraverso il consumo di materiali ausiliari ed energia, contribuendo al rilascio di eventuali inquinanti nell'ambiente (Fig.1.8). Prescrizioni dovute a risorse o tempo limitato, possono far decidere di escludere determinate unità di processo i cui flussi non incidono significativamente sul bilancio globale dello studio e la contraddizione in ciò, sta nel fatto che l'esclusione avviene prima di poter quantificare quanto inciderà quella determinata unità di processo, per cui dovrà essere riportata tra le assunzioni e limitazioni.
- requisiti di qualità dei dati: da questi dipende l'attendibilità dell'intero studio, i parametri da tener conto comprendono fattori temporali, geografici, le fonti dei dati e la loro rappresentatività, l'incertezza dell'informazione, la precisione, completezza e rappresentatività dei dati.

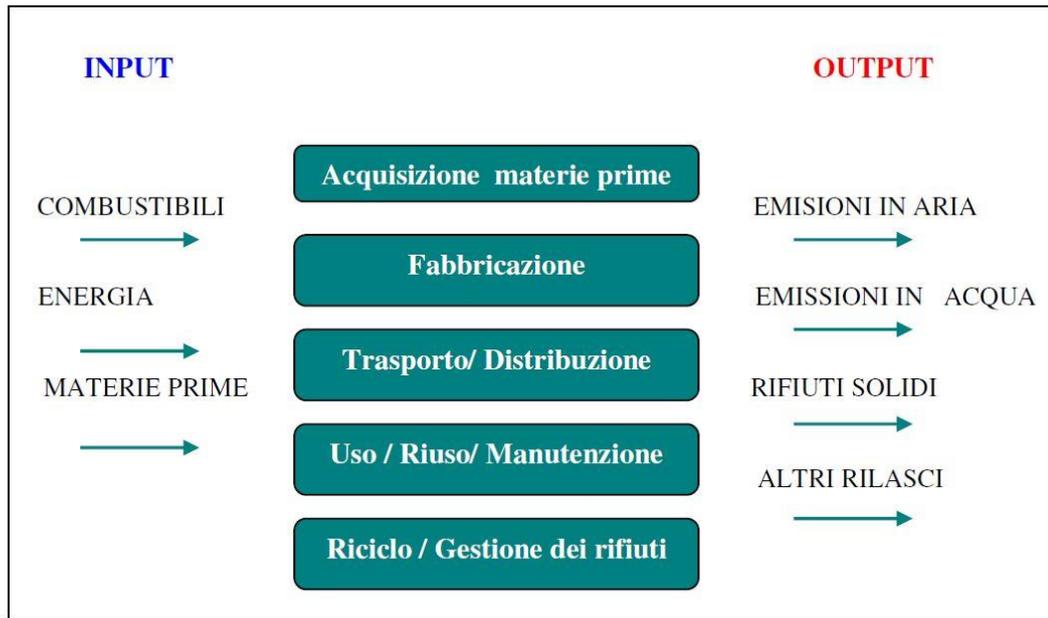


Figura 1.7: Diagramma di flusso del sistema ciclo vita (Fonte: Baldo *et al.*, 2008, Rallo, 2011)

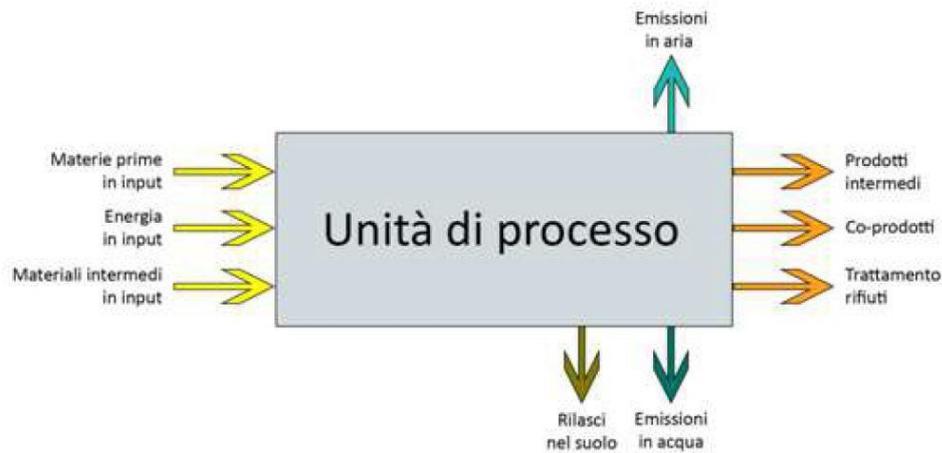


Figura 1.8: Rappresentazione grafico di una unità di processo (Fonte: Giovannone,2012).

Le scelte e le assunzioni formulate in questa prima fase possono risultare soggettive o caso-specifiche, dunque modificano il metodo stesso. Non è assolutamente vietato fare questo tipo di semplificazioni ma ciò che è essenziale, per il rispetto della normativa, è che tutto ciò sia documentato, motivato e trasparente.

1.3.2.2 Analisi di inventario

L'analisi di inventario è la fase durante la quale vengono raccolti i dati e creato il modello rappresentativo della realtà, che non è altro che la sequenza di operazioni unitarie che compongono il sistema in esame (Fig. 1.9). I dati servono per caratterizzare le singole

operazioni della catena produttiva e da questi, attraverso opportuni calcoli, è possibile rappresentare tutti gli scambi che avvengono tra queste operazioni appartenenti alla catena produttiva o distruttiva. La costruzione del modello è fondamentale, in quanto, tramite questo, è rappresentata la realtà ed è possibile simulare immediatamente i tentativi di miglioramento, per diminuire l'impatto ambientale e per controllare che non si verifichino effetti inattesi.

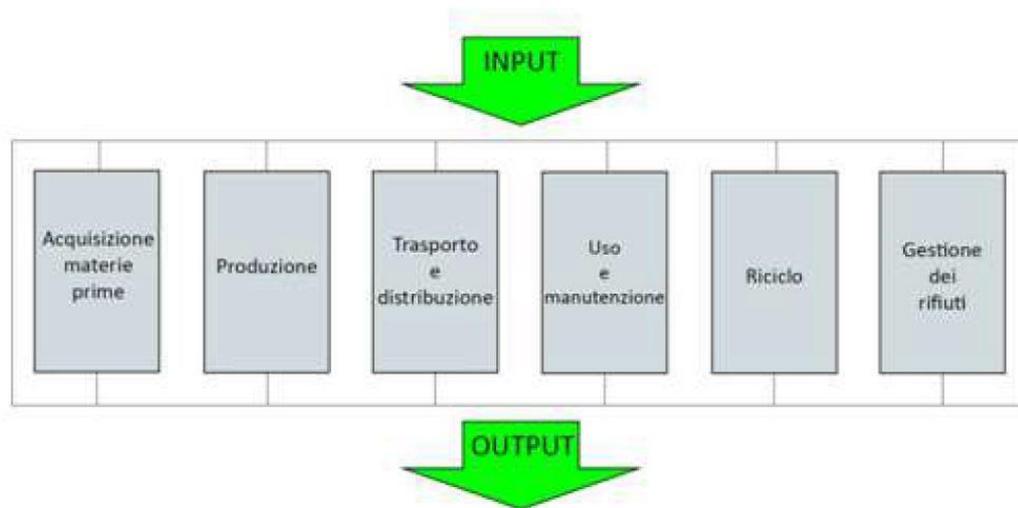


Figura 1.9: Rappresentazione schematica dell'analisi di inventario (Fonte:Giovannone, 2012)

Come tutta la LCA, anche l'analisi di inventario è un procedimento iterativo: proseguendo con la raccolta dei dati, si conosce in modo più approfondito il sistema; queste conoscenze acquisite possono portare alla necessità di formulare nuovi requisiti o limitazioni riguardanti i dati stessi, e quindi, alla modifica della raccolta dei dati o del metodo di indagine. Difficoltà nel reperimento o mancanza di dati, possono dover rendere necessaria una revisione degli obiettivi o del campo di applicazione, in questo caso, la forza della iteratività delle fasi della LCA, permette che l'analisi non termini senza risultato, ma si modifichi la procedura per riuscire ad indagare il sistema. In questa fase non viene effettuata alcun tipo di analisi o riflessione circa i dati raccolti o i flussi in input e output e, conseguentemente, nemmeno sugli impatti ambientali che questi possono avere.

La prima operazione è l'organizzazione delle fasi che formano il sistema, in un diagramma di flusso, questo non deve necessariamente riportare ogni fase che compone il sistema,

bensì tutte quelle concretamente rilevanti, al fine di risultare corretto. Per ogni operazione unitaria si individuano gli ingressi, sotto forma di massa ed energia, e le uscite, cioè i rilasci in acqua, aria, suolo e i rifiuti; il trasporto può essere incluso o meno a seconda dei confini del sistema decisi o a seconda delle assunzioni fatte. Attraverso il bilancio di massa è possibile verificare che sia rispettato il principio di conservazione, deve esserci una corrispondenza tra gli ingressi e le uscite del sistema, non calcolare un processo potrebbe portare ad errori gravi. Durante questo bilancio è possibile imbattersi in unità di processo con uno o più flussi in ingresso od in uscita, in questo caso tramite il principio di allocazione si riesce a gestire correttamente anche questa fase.

Questo principio definisce il metodo di ripartizione dei flussi e si applica quando da una operazione unitaria escono più coprodotti, si ripartiscono consumi ed emissioni tra tutti i coprodotti risultanti, allocando a ciascuno di essi una quota di risorse consumate ed emissioni. Una corretta allocazione avviene tramite un rigoroso bilancio di massa ed energia seguendo le prescrizioni normative qui sotto riportate:

1. se possibile evitare l'allocazione, rivedendo i confini del sistema ed includendo le fasi relative ai coprodotti;
2. quando non è possibile evitare l'allocazione, discriminare i flussi dei vari coprodotti su base fisica (es. massa, volume, energia o exergia) (SETAC, 1994);
3. quando le caratteristiche fisiche non permettono l'allocazione, questa va effettuata sul valore economico di ciascun coprodotto, questa procedura è generalmente accettata come non correttamente scientifica (Boustead et al., 1999)

La qualità e la rappresentatività dei dati raccolti durante la fase di inventario si ripercuotono sulla qualità finale dell'intero studio, dividendosi in due tipologie: dati secondari (background data) e dati primari (foreground data). I primi, sono dati generici che possono derivare da database o da letteratura o solitamente usati per materiali generici (es. plastiche, metalli), energia e trasporti. Uno studio dovrebbe, per quanto possibile, utilizzare dati primari, ossia dati raccolti direttamente sul campo e quindi specifici per il caso di studio, caratterizzando tramite questi, lo specifico sistema studiato. La raccolta dei dati primari avviene con la collaborazione degli operatori dell'impianto attraverso la somministrazione di questionari da compilare, con richieste specifiche. Quando il dato non è reperibile direttamente si usano i dati secondari; questi devono essere controllati, per esempio confrontandoli con altre pubblicazioni, si deve citare la fonte e la data di

pubblicazione e devono, in ogni caso, rispettare l'ideale di trasparenza prescritto dalla norma.

1.3.2.3 Valutazione degli impatti

La valutazione degli impatti, si basa sulle informazioni raccolte durante la fase precedente di inventario; questa analisi ha lo scopo di evidenziare l'entità delle modificazioni ambientali che si generano in seguito a rilasci nell'ambiente (emissioni o reflui) e del consumo di risorse provocati dall'attività produttiva (Baldo *et. al.*, 2008).

Per valutare in modo adeguato l'inquinamento su diverse scale spaziali, è necessario tener conto di tre fattori: l'emissione delle sostanze nocive (che tipo di emissione -in aria, in acqua, nel suolo- e di che sostanze), la diffusione e l'eventuale trasformazione che le sostanze subiscono nell'ambiente e la concentrazione nel luogo di azione. La trasformazione dei dati di inventario in impatti avviene secondo il metodo di calcolo prescelto, la scelta di questo deve essere in accordo con gli obiettivi dello studio.

La valutazione degli impatti vuole evidenziare l'entità delle modificazioni ambientali che si verificano in seguito alle emissioni nell'ambiente e al consumo di risorse provocati dall'attività produttiva.

La valutazione degli impatti si suddivide in cinque fasi:

1. definizione delle categorie di impatto;
2. definizione dei risultati di LCI (classificazione);
3. calcolo degli indicatori di categoria (caratterizzazione);
4. confronto con un valore di riferimento (normalizzazione);
5. valutazione.

Nella prima fase del LCIA vengono identificate le categorie d'impatto su cui agisce il sistema in esame. Per la definizione delle categorie d'impatto occorre tenere conto di tre criteri:

- completezza (considerare tutte le categorie a breve e a lungo termine su cui il sistema potrebbe agire);
- indipendenza (evitare intersezioni tra le categorie, conteggi multipli);
- praticità (la lista formulata non dovrà comunque contenere un numero eccessivo di categorie).

Per la scelta delle categorie d’impatto ci si può affidare ad un elenco proposto dal *Working Group on LCIA* della SETAC (Tab. 1.4).

Tabella 4.4: Categorie d’impatto e indicatori di categoria (Fonte: SETAC).

CATEGORIE D’IMPATTO	INDICATORI
Consumo di risorse	Consumo di risorse naturali
	Consumo di energia primaria
Potenziali impatti ambientali	Cambiamenti climatici
	Riduzione della fascia di ozono stratosferico
	Acidificazione
	Eutrofizzazione
	Smog fotochimico
	Tossicità (aria, acqua, suolo)
	Ecotossicità
	Degrado del territorio ed altri tipi di effetti
	Effetto serra
Rifiuti prodotti	Produzione di rifiuti pericolosi

La selezione delle categorie di impatto deve avvenire in base a: 1) scopo e confini dell’analisi LCA; 2) problematiche ambientali connesse al prodotto studiato. Generalmente sono utilizzate categorie ambientali già esistenti, ma in taluni casi potrebbe essere necessario introdurre nuove categorie di impatto. Una volta selezionate le categorie d’impatto è necessario individuare i bersagli (*Endpoints*), attributo o aspetto dell’ambiente, della salute o delle risorse che identifica un tipo di problematica ambientale. Inoltre, è essenziale definire anche l’indicatore di categoria (*Category Indicator*) che è la rappresentazione quantitativa di una categoria d’impatto. Importante è anche il fattore di caratterizzazione, ossia un fattore di calcolo usato per convertire i risultati dell’inventario

del ciclo di vita ad una unità di misura comune per ciascun indicatore di categoria e misurare l'intensità dell'effetto della sostanza sul problema ambientale considerato.

La seconda fase della LCIA riguarda la classificazione, la fase qualitativa di assegnazione di una o più categorie d'impatto ai dati raccolti nell'inventario. La caratterizzazione è la terza fase della LCIA in cui si quantifica l'impatto attraverso dei fattori di caratterizzazione (EF) e si aggregano gli effetti ambientali all'interno delle categorie prescelte. La fase finale della caratterizzazione è il "Profilo Ambientale" che è costituito da una serie di punteggi d'impatto per ogni categoria, generalmente rappresentato con un istogramma a barre. La quarta fase della LCIA è la normalizzazione che elabora i risultati ottenuti dalla caratterizzazione in modo tale da ottenere degli indici con cui valutare il sistema oggetto dello studio. L'ultima fase della LCIA è la valutazione che consiste nell'assegnazione di un peso relativo alle varie categorie d'impatto e nella stima finale dei risultati. Questi fattori di peso infine vanno moltiplicati per i punteggi ottenuti e sommati per avere un indice ambientale finale. È importante notare che quarta e quinta fase dell'LCA, secondo la norma ISO 14040, non sono fasi obbligatorie.

1.3.2.4 Interpretazione dei risultati e miglioramento

Il lavoro eseguito nelle fasi precedenti, porta alla compilazione di un riepilogo sulla base dei risultati ottenuti e alla formulazione di conclusioni e raccomandazioni in relazione all'obiettivo e al campo di applicazione per il quale l'analisi del ciclo di vita si è svolta.

La norma ISO 14040 definisce questa quarta fase come il momento in cui realizzare una valida correlazione tra i risultati dell'analisi di inventario e di quella degli impatti, per proporre utili raccomandazioni in conformità con gli scopi e gli obiettivi dello studio (Baldo *et al.*, 2008).

Conclusioni e raccomandazioni possono essere utilizzate per nuovi standard di produzione sostenibile, per migliorare i processi in atto e per lo sviluppo di strategie di politica ambientale. L'ideale che si concentra in questa ultima fase potrebbe essere riassunto con la ricerca della massima eco-efficienza, correggendo il sistema prodotto o riprogettandolo da capo. La rappresentazione dei risultati deve essere trasparente, chiara e disponibile per coloro i quali devono prendere decisioni in base allo studio o per coloro ai quali lo studio è destinato.

1.3.3 Gli effetti ambientali e gli indicatori di impatto

La differenza sostanziale tra i diversi effetti ambientali che un sistema può indurre sull'ambiente sta nella scala di riferimento: gli effetti possono essere, infatti, globali, regionali o locali.

Durante la fase di classificazione gli effetti vengono caratterizzati e suddivisi in categorie di impatto. Di seguito viene riportato l'elenco degli indicatori di impatto più diffusi ed una sintetica descrizione degli stessi (Baldo *et al.*, 2008).

- Effetto serra (GWP – *Global Warming Potential, including biogenic carbon*);
- Riduzione della fascia di ozono stratosferico (ODP – *Ozone Depletion Potential*);
- Acidificazione (AP – *Acidification Potential*);
- Eutrofizzazione (EP – *Eutrophication Potential*) suddivisa in Freshwater Eutrophication e Terrestrial Eutrophication;
- Materiale particolato (PM - *Particulate matter/Respiratory inorganics*);
- Esaurimento delle risorse (RD - *Resource Depletion, fossil and mineral*);
- Consumo di acque dolci (TFC - *Total Freshwater Consumption, including rainwater*).

Effetto serra: capacità di taluni gas presenti in atmosfera di trattenere la radiazione infrarossa proveniente dalla terra; conseguenza di questo è l'innalzamento della temperatura media terrestre, con conseguenze per il clima. I gas serra oggetto dell'analisi, vengono espressi in kg CO₂-equivalenti (indicatore di categoria) sulla base del potenziale di riscaldamento globale dell'IPCC (*International Panel on Climate Change*), calcolati sulla capacità di ciascun gas serra di assorbire la radiazione e sul tempo di permanenza in atmosfera. Esistono diversi intervalli temporali per i quali il GWP viene valutato, 100, 200, 500 anni, il più usato risulta il GWP₁₀₀ in quanto, al crescere del periodo di riferimento, cresce anche l'incertezza della stima associata (Baldo *et al.*, 2008).

Il GWP di una sostanza che abbia le caratteristiche di gas serra è misurato dal rapporto tra il contributo che all'assorbimento della radiazione calda fornisce il rilascio istantaneo di 1 kg di tale sostanza e quello fornito dall'emissione di 1 kg di CO₂, essendo entrambi i contributi valutati per un periodo di tempo di T anni di permanenza dei gas nell'atmosfera (Houghton J.T. *et al.*, 1991).

Riduzione della fascia di ozono stratosferico: questo fenomeno riguarda la stratosfera, una zona compresa tra i 15 e 50 km sopra la superficie terrestre ricca in ozono (O_3); questo gas protegge la terra dalla radiazione ultravioletta del sole. In particolare, i raggi UV-B (315-280 nm) provocano danni alla pelle, agli occhi e causano una parziale inibizione della fotosintesi minando, così, la produzione primaria della terra (derrate alimentari) e degli oceani (fitoplancton, alla base della catena alimentare).

Come per il GWP, anche in questo caso, i gas ritenuti responsabili di questo fenomeno vengono convertiti in kg CFC-11-equivalenti (clorofluorocarburi convertiti in kg di CFC-11 corrispondenti al triclorofluorometano). Il potenziale di riduzione dell'ozono di una singola sostanza viene definito come il rapporto esistente tra il numero di reazioni di rottura di una molecola di ozono in uno stato di equilibrio conseguente all'emissione in atmosfera di una data quantità di sostanza durante un anno di tempo ($kg\ anno^{-1}$) e il corrispondente numero di reazioni di rottura provocato, nelle stesse condizioni, da un'eguale quantità di CFC-11 (WMO - *World Meteorological Organization*, 1989).

Acidificazione: il fenomeno della deposizione acida, consiste nella ricaduta dall'atmosfera al suolo di particelle acide; la deposizione può essere umida, se veicolata da piogge, neve, rugiada, nebbie, oppure secca se avviene per effetto della sola gravità. Le piogge acide sono causate essenzialmente dagli ossidi di zolfo (SO_x) e, in parte minore, dagli ossidi d'azoto (NO_x), presenti in atmosfera sia per cause naturali che per effetto delle attività umane.

L'anidride solforica (SO_3) reagisce in acqua dando acido solforico mentre gli ossidi di azoto (NO, NO_2) in acqua danno acido nitrico (Pavoni B., 2012): le deposizioni secche di SO_x e NO_x conducono rapidamente alla formazione dei relativi acidi al suolo. Per la quantificazione di questo tipo di impatto si impiegano fattori di standardizzazione che riportano ai kg di SO_2 -equivalenti (indicatore di categoria) attraverso il "potenziale di acidificazione" (AP) (Vermeire T.G. *et al.*, 1992).

La standardizzazione avviene attraverso l'aggregazione delle sostanze potenzialmente acide sulla base della loro tendenza a formare ioni H^+ . Come per gli effetti precedenti, anche in questo caso si rapporta il numero potenziale di H^+ -equivalenti per unità di massa della sostanza considerata, al numero di ioni H^+ -equivalenti per unità di massa di SO_2 ,

ottenendo il potenziale di acidificazione di una sostanza, espresso in moli di H^+ equivalenti.

Eutrofizzazione: la crescita delle piante acquatiche è limitata dalla disponibilità dei nutrienti azoto e fosforo. Il fenomeno dell'eutrofizzazione è la conseguenza del rilascio di queste sostanze che, arrivando nei corpi d'acqua (acque superficiali) e non risultando più limitanti, spingono la crescita oltre livelli sostenibili con la conseguenza di consumare molto più ossigeno. Ciò provoca la morte dei pesci ed instaura condizioni ridotte e la conseguente produzione di metano, ammoniaca ed acido solfidrico. La standardizzazione dell'eutrofizzazione avviene riportando i quantitativi delle sostanze inventariate ai kg di NO_3^- -equivalenti (indicatore di categoria) oppure ai kg di PO_4^{3-} -equivalenti, in base ad un potenziale di eutrofizzazione (Baldo *et. al.*, 2008).

Questo potenziale di eutrofizzazione (NP, *Nutrication Potential*) è ricavato con la stessa metodologia degli altri indicatori, e, nello specifico azoto e fosforo vengono aggregati in un unico potenziale di contributo alla formazione delle biomasse algali.

Per quanto riguarda l'eutrofizzazione delle acque tale indicatore viene espresso in kg P equivalenti.

Per quanto riguarda l'eutrofizzazione terrestre, il fenomeno è legato alla deposizione sui suoli di N (e viene pertanto espresso in moli di N equivalenti) ed è principalmente dovuto alle emissioni di NO_x e NH_3 .

Materiale particolato: il modello impiegato per il calcolo di tale indicatore considera sia il particolato primario che quello secondario. Il destino e l'esposizione di PM e CO primari si basano sul metodo USEtox; per quanto riguarda il PM secondario da SO_2 , NO_x e NH_3 su pubblicazione della Commissione Europea del 2008. Il modello consente di integrare varie densità di popolazione, parametri del paesaggio e di differenziare l'entità dell'impatto. Gli *endpoints* considerati sono principalmente la mortalità cronica, la morbilità acuta, la morbilità cardiovascolare acuta e la bronchite cronica. La categoria di impatto è espressa in kg $PM_{2,5}$ equivalenti (JRC, 2013);

Esaurimento delle risorse: la valutazione della presente categoria di impatto può essere basata su diversi modelli alternativi, che descrivono la distribuzione, il destino e gli effetti

delle emissioni e/o delle estrazioni di risorse. Anche per la valutazione dell'esaurimento delle risorse abiotiche sono disponibili e operativi diversi metodi. Il metodo di caratterizzazione di base è il metodo raccomandato nelle linee guida olandesi sulla LCA come l'attuale migliore pratica disponibile per la categoria di impatto in questione. In questo metodo la diminuzione della risorsa stessa è considerata la chiave dell'impatto, quindi l'area di tutela riguarda le risorse naturali. Il modello di caratterizzazione si basa sulle riserve naturali di risorse combinate con i loro tassi di estrazione. Il metodo è reso operativo per molti tipi di sostanze, considerando molti elementi chimici e combustibili fossili impiegati. Le riserve naturali di queste risorse si basano su "riserve fondamentali", cioè su concentrazioni di elementi e carbonio fossile presenti nella crosta terrestre. Il fattore di caratterizzazione è il potenziale di esaurimento abiotico (ADP - *Abiotic Depletion Potential*) (Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 2002). Il fattore è derivato per ciascuna estrazione degli elementi e dei combustibili fossili ed è misurato relativamente all'esaurimento dell'elemento antimonio come riferimento, quindi espresso in kg di Sb equivalenti.

Consumo di acque dolci: tale indicatore viene calcolato applicando il metodo di scarsità ecologica (ECS - *Ecological Scarcity Method*) che consente di valutare l'impatto degli inquinanti emissioni e attività di estrazione della risorsa "acqua" sull'ambiente (valutazione dell'impatto) come parte di una valutazione del ciclo di vita. Le metriche chiave di questo metodo sono eco-fattori, che misurano l'impatto ambientale delle emissioni inquinanti o delle attività di estrazione della risorsa in Eco-Point (EP = UBP) per unità di quantità (Swiss Eco-Factors - FOEN, 2013).

1.3.4 Vantaggi e limiti della metodologia

Tra i vantaggi della valutazione del ciclo di vita si possono elencare:

1. quantificare completamente gli impatti ambientali associati al prodotto e scorporarli in relazione a ciascuna fase del ciclo di vita; individuare i cambiamenti nei rilasci tra le fasi del ciclo di vita;
2. analizzare l'impatto ambientale delle scelte associate ad uno o più specifici prodotti o processi per aiutare i soggetti pubblici (stato, comunità, ecc.) nell'accettazione di azioni pianificate;
3. confrontare le prestazioni di due o più prodotti o processi concorrenti;

4. valutare gli effetti del consumo di risorse e di emissioni in ambiente (aria, acqua, suolo) a livello locale, regionale e globale e anche per specifico settore di interesse ambientale.

Gli svantaggi possono pesare molto, quindi ogni scelta va adattata al caso specifico:

1. le assunzioni decise durante lo studio (es. confini del sistema) sono soggettive e vincolano la confrontabilità o meno con altri studi;
2. l'accuratezza può essere limitata dalla disponibilità e/o dalla qualità dei dati;
3. i modelli di calcolo possono non essere adatti a qualsiasi tipo di impatto o applicazione;
4. la valutazione del ciclo di vita può risultare molto impegnativa dal punto di vista delle risorse e del tempo impiegato;
5. i risultati di studi LCA su questioni regionali o globali possono non essere adatti ad applicazioni locali.

Nonostante le sue numerose applicazioni e la sua capacità nell'identificazione di impatto ambientale in riferimento al processo produttivo di un bene un servizio o un prodotto, la metodologia LCA presenta dei limiti che riguardano soprattutto la disponibilità di dati completi e precisi, la complessità dello studio e le considerevoli risorse richieste in termini di costo e tempo. Si incontrano, difficoltà soprattutto quando si analizzano prodotti nuovi, poiché i dati necessari devono essere necessariamente ipotizzati ma la maggior parte di questi ostacoli può essere superata ad esempio effettuando ipotesi coerenti ed utilizzando dati provenienti da database ritenuti affidabili. È importante la natura delle scelte e delle assunzioni (es. stabilire i confini di un sistema o scegliere le categorie di impatto) che nella maggior parte dei casi può essere soggettiva. I modelli utilizzati per l'analisi d'inventario o per la valutazione degli impatti non sono adatti a qualunque applicazione e non sono in grado di descrivere in modo completo qualsiasi impatto ambientale. La disponibilità e qualità dei dati possono limitare l'affidabilità dei risultati e pertanto sussiste la necessità di lavorare con un set di dati consistenti e documentato. L'analisi LCA è, inoltre, maggiormente applicabile ad indicatori d'impatto su scala globale (ad esempio, cambiamenti climatici) e meno agli impatti locali come lo smog, dove i fattori temporali e spaziali delle emissioni hanno più rilevanza. Da questo punto di vista, la procedura di LCA (*site-independent*), si contrappone a quella di VIA (*site-specific*), avente un approccio espressamente locale. Infine, diversamente da altre procedure di valutazione, l'analisi

LCA non comprende gli impatti economici e sociali di un sistema di prodotti. Questi, ad esempio, sono oggetto di studio delle valutazioni d'impatto ambientale (Vollaro, 2004).

1.4 Obiettivi dello studio

Obiettivo di questo studio è stato calcolare mediante metodologia LCA gli impatti generati dall'impiego di compost e separato solido in orticoltura e maiscoltura, confrontando i risultati ottenuti con gli impatti riferiti alla gestione colturale con pratiche convenzionali per le medesime colture e negli stessi siti oggetto d'indagine. La sperimentazione ha avuto luogo per più annate agrarie, mantenendo invariate le operazioni colturali principali di anno in anno cosicché le eventuali differenze significative rilevate avessero origine soltanto dalle diverse gestioni colturali adottate in termini di fertilizzazione. Per quanto riguarda il mais, gli apporti di azoto al campo attraverso il compost sono stati uniformati agli apporti forniti con urea nella gestione tradizionale al fine di valutare più facilmente il potere fertilizzante del compost in confronto ai concimi minerali. Nel caso delle colture orticole, invece, il trattamento con concime minerale è stato definito sulla base della pratica usuale dell'agricoltore e l'apporto di macronutrienti non è stato uniformato.

L'analisi dei diversi scenari ha reso, inoltre, necessaria la valutazione delle diverse pratiche a confronto in termini agronomici, energetici ed economici per meglio comprendere i vantaggi e gli svantaggi dell'impiego di ammendanti in agricoltura; a tal fine sono state misurate le produzioni e redatti bilanci economici ed energetici integrativi del bilancio ambientale derivante dall'analisi LCA.

2. Materiali e metodi

2.1 Il progetto Life+ CarbOnFarm

Il progetto LIFE CarbOnFarm(LIFE12 ENV/IT/000719), nell'ambito del quale è stata svolta la presente tesi di laurea, si inserisce nell'ambito del programma di finanziamenti europei LIFE+ *Politica e governance ambientali*, ed in particolare sulla tematica degli interventi prioritari per la protezione e la salvaguardia della risorsa suolo.

L'aspetto ambientale centrale è rappresentato dalla perdita di sostanza organica dei suoli ad uso agrario dei paesi europei, principalmente dell'areale Mediterraneo. La diminuzione di sostanza organica ha come effetto immediato la riduzione della fertilità dei suoli, comportando nel medio periodo una maggiore richiesta di fabbisogni energetici ed economici (fertilizzanti, irrigazioni, controllo delle avversità) e una progressiva riduzione della produttività. Nel lungo periodo il declino della qualità del suolo porta alla irreversibilità del processo, evidenziata dall'aumento dell'incidenza dei fenomeni di erosione e desertificazione.

2.1.1 Contesto e obiettivi del progetto

L'obiettivo prioritario del progetto CarbOnFarm è quello di migliorare il contenuto e la stabilità (sequestro) della sostanza organica dei suoli agrari, attraverso l'adozione di pratiche sostenibili sotto l'aspetto ambientale ed economico. L'incremento di sostanza organica è basato sull'apporto di compost di alta qualità, ottenuti dalla riutilizzazione degli scarti e dei sottoprodotti derivanti dalle attività agricole presenti sul territorio.

Il progetto coinvolge cinque aziende agrarie non zootecniche localizzate in Campania (province di Caserta e Salerno) ed in Piemonte (provincia di Torino). Per le aziende localizzate in Campania è stato utilizzato il compost ottenuto da impianti di compostaggio aziendali che utilizzano i residui colturali ottenuti in azienda e le biomasse agrarie di scarto prodotte nel territorio. Le aziende piemontesi hanno utilizzato il compost ottenuto dalla frazione organica solida (digestato), derivante da un impianto di produzione di biogas da reflui degli allevamenti.

In aggiunta all'apporto di compost, il progetto CarbOnFarm prevede l'applicazione di una tecnologia per incrementare la stabilità e ridurre le perdite della sostanza organica, basata sull'impiego di prodotti della chimica verde eco-compatibili (metallo-porfirine), che

svolgono un'azione simile a quella di sistemi enzimatici naturali, rispetto ai quali hanno una maggiore versatilità e persistenza.

Le azioni progettuali sono state applicate sui differenti sistemi produttivi: coltivazioni erbacee da pieno campo (mais da insilato e mais da granella); colture ortive da pieno campo (cavolo, broccolo, e lattuga) e colture frutticole (pesco e kiwi). I risultati attesi sono sintetizzabili nei seguenti punti:

- incremento quantitativo e miglioramento qualitativo (maggiore stabilità alla decomposizione) della sostanza organica del suolo;
- ripristino della fertilità chimica, fisica e biologica dei suoli: disponibilità di macronutrienti, minore compattazione, minore erosione, maggiore ritenzione idrica, aumento della biodiversità microbica (micorrize);
- miglioramento della produttività: stabilizzazione delle quantità e della qualità delle rese con riduzione dei fabbisogni;
- riduzione delle emissioni di gas-serra (GHG) dai suoli agrari;
- diffusione del riutilizzo degli scarti produttivi per la produzione di compost ad uso agrario.

L'efficacia delle tecniche adottate, come richiesto dal programma LIFE+, è valutata durante il progetto e dopo il suo termine per una durata di oltre cinque anni. Le valutazioni riguardano sia i risultati ambientali, produttivi ed economici (azioni di monitoraggio), sia le possibilità di trasferimento e acquisizione delle strategie progettuali nel territorio (azioni di divulgazione e comunicazione).

Al fine di corrispondere all'impegnativo approccio multitasking del progetto LIFE+ CarbOnFarm, il consorzio di beneficiari (DISAFA, CERMANU, CREAORT, UNIBAS, REGIONE CAMPANIA, ALSIA, PRIMALUCE) ha dovuto combinare diverse competenze ed esperienze, sfruttando così l'effetto sinergico prodotto dall'integrazione dei progressi scientifici delle attività di ricerca legate al progetto stesso.

2.1.2 Siti progettuali

L'impostazione dei siti aziendali è prevista dal secondo al quinto anno di progetto (2014-2017). Sia in Campania che in Piemonte, sono stati istituiti rispettivamente siti progettuali: in aziende commerciali (due in Campania, una in Piemonte) e uno presso le aziende pubbliche degli atenei coinvolti nel progetto (Università di Napoli e Università di Torino).

Le strategie di gestione della sostanza organica intese come dimostrative, basate sulla somministrazione di compost, sono state applicate ad entrambe le realtà aziendali, mentre le strategie innovative (basate su prodotti chimici ecocompatibili, le porfirine) sono state adottate soltanto per le aziende agricole sperimentali.

Le attività relative alla presente tesi si sono concentrate sui siti sperimentali gestiti dall'Università di Torino.

L'Azienda Sperimentale Tetto Frati dell'Università di Torino si trova nel comune di Carmagnola. La superficie totale è di 11 ettari. È composta da numerosi campi sperimentali, serre, tunnel, laboratori, macchinari, magazzini, etc. Tetto Frati è regolarmente frequentata da studenti universitari e ricercatori, inoltre, a partire da dicembre del 2010 il centro sperimentale di Tetto Frati è una delle piattaforme sperimentali per la ricerca degli ecosistemi a lungo termine del progetto internazionale "Expeer". Per queste ragioni risulta un sito eccellente per ospitare attività sia di ricerca scientifica sia di trasferimento e divulgazione.

L'azienda agricola commerciale Grandi si trova nel comune di Grugliasco. È un'azienda ad indirizzo produttivo orticolo specializzato, con 11 ettari di colture di pieno campo e lettario dedicato a colture protette. I terreni aziendali non ricadono in zona ZVN (Zona Vulnerabile ai Nitrati). Le colture di pieno campo vengono irrigate con sistemi di irrigazione localizzata a goccia, sistemi per aspersione e per scorrimento. Le colture protette vengono irrigate mediante l'utilizzo di un impianto di irrigazione a goccia. L'acqua proviene da acque sotterranee (35-55 m di profondità) e dal fiume Dora (acqua ricca di sedimenti). Le colture coltivate in campo aperto risulano le seguenti:

- lattuga (3ha);
- cicoria pan di zucchero (1 ha);
- trifoglio primaverile (1ha);
- Brassicaceae (3,5 ha);
- zucchine (1 ha);
- melanzane (0,5 ha).

Per quanto riguarda le colture protette si annoverano:

- pomodoro fresco da mercato (0,5 ha);
- zucchine (0,2 ha);
- cetrioli (0,1 ha);
- melanzane (0,1 ha);
- sedano (0,1 ha).

I campi ricevono direttamente i residui colturali e indirettamente residui delle colture protette dopo un breve processo di compostaggio.

Le principali rotazioni su campi aperti sono:

- Brassicaceae - cicoria,
- Brassicaceae - sovescio con leguminose (*Trifolium pratense* o *Trifolium alexandrinum*) - lattuga,
- lattuga - melanzane - zucchine.

Le colture protette come pomodoro e melanzane vengono ruotate con cetrioli, zucchine e lattuga.

2.1.3 Azioni progettuali

Le azioni progettuali del progetto CarbOnFarm si suddividono in azioni di implementazione, azioni di monitoraggio e azioni di divulgazione e comunicazione. Relativamente alle azioni di implementazione, un obiettivo importante del progetto è quello di promuovere la valorizzazione produttiva ed economica delle biomasse residuali dalle attività agricole ai fini dell'ottenimento di compost di alta qualità, realizzato con l'adozione di impianti di compostaggio in azienda. Come obiettivo concomitante, si evidenzia l'applicazione di prodotti eco-sostenibili della chimica verde al fine di rafforzare il sequestro *in-situ* di carbonio organico con una ulteriore stabilizzazione della sostanza organica. Queste attività convergono nell'obiettivo centrale del progetto, rappresentato dal miglioramento della quantità e della qualità della sostanza organica dei terreni agricoli, ottenuta attraverso l'applicazione di metodi sostenibili di gestione dei sistemi agricoli locali. L'adozione di tali pratiche ha l'obiettivo di incrementare il sequestro del carbonio organico e di ripristinare la funzionalità dei suoli ad uso agricolo, con la concomitante riduzione di gas serra (principalmente N₂O e CO₂), e il mantenimento quanti-qualitativo dei livelli produttivi con minori consumi energetici. Per quanto riguarda le azioni di

monitoraggio, la loro adozione intende promuovere l'applicazione di approcci adeguati per l'acquisizione di una serie ampia di dati che evidenzino la relazione tra uso dei suoli e i parametri ambientali quali: quantità e qualità del pool di carbonio organico del suolo, emissioni di gas serra dai suoli coltivati, stabilità del suolo, produttività delle colture, nonché sulla sostenibilità ambientale, energetica ed economica delle metodologie applicate. Questi indicatori possono rappresentare un importante strumento a supporto dei processi decisionali, sia a livello regionale ed europeo e rappresentano un obiettivo centrale individuato dalla *Soil Thematic Strategy*, in particolare per i suoli ad uso agricolo del bacino del Mediterraneo. La diffusione delle attività e dei risultati progettuali si propone, infine, di dimostrare che l'applicazione di pratiche sostenibili di gestione della sostanza organica dei suoli, possono efficacemente coniugare la tutela dell'ambiente con la produttività delle colture, promuovendo un trasferimento di tecnologie sul territorio ed evidenziando in tal modo il potenziale economico ed ambientale del riciclo di biomasse agrarie, come importanti risorse biologiche locali in termini di sequestro di carbonio, mantenimento delle funzioni del suolo e per la prevenzione dello smaltimento in discarica.

2.2 L'azienda produttrice di compost

Tra le materie organiche di varia origine che possono essere sottoposte al processo di compostaggio è possibile annoverare il prodotto derivante dalla digestione anaerobica degli effluenti zootecnici. È quanto proposto da un'azienda cuneese operante in campo ambientale, con un elevato numero di brevetti e di processi produttivi, per la valorizzazione industriale "sostenibile e attiva" degli scarti e dei sottoprodotti e la produzione di energia verde (elettrica e termica) da fonti rinnovabili. Difatti l'azienda indirizza a compostaggio la frazione solida del materiale, noto come digestato, risultante dalla digestione anaerobica di letame e liquame bovino e di pollina; queste deiezioni animali vengono ritirate presso gli allevatori locali che ne producono in surplus, secondo quanto previsto dalla Normativa Nitrati, evitando così problemi di gestione aziendale per gli agricoltori e problematiche ambientali per quanto concerne l'inquinamento atmosferico e terrestre. Le deiezioni zootecniche, specie quelle solide, potrebbero essere di per sé indirizzate direttamente a compostaggio e stabilizzazione. Tuttavia, a seguito della diffusione dei biodigestori, è cresciuto l'interesse intorno a questa filiera che introduce un anello intermedio di sfruttamento energetico degli effluenti, così presentando possibili vantaggi economici.

Nei tre impianti della azienda le matrici di partenza vengono miscelate tra loro ed inviate alla fase di digestione anaerobica durante la quale la biomassa subisce una bassa pastorizzazione mesofila per circa 60 giorni; grazie al processo di metanogenesi, durante questa fase di digestione anaerobica, si ottiene produzione di biogas, che è il vero core-business aziendale.

Il materiale digerito anaerobicamente viene in seguito sottoposto a separazione solido-liquido. La frazione liquida è in fase di sperimentazione per diventare un fertilizzante liquido, e attualmente impiegato come effluente zootecnico previa elaborazione di Piani di Utilizzazione Agronomica (PUA). La frazione solida viene, invece, indirizzata al processo di compostaggio su lettiera. Il separato solido, se non fosse sottoposto a compostaggio, è un prodotto che potrebbe essere indirizzato allo spandimento in campo attraverso un PUA, al pari di quanto descritto per la frazione liquida.

Tale processo inizia con una fase in cui la biomassa viene sottoposta a un trattamento naturale aerobico termofilo della durata di 15-30 giorni, in cui raggiunge temperature controllate comprese tra i 55 °C e i 60 °C, grazie alla quale, unitamente alla digestione, avviene una sanitizzazione della biomassa e l'inattivazione dei semi della maggior parte delle erbe infestati presenti negli effluenti zootecnici. Successivamente il materiale viene sottoposto ad un processo di trasformazione di 6-8 mesi da parte di vermi, insetti e lombrichi e depositato in cumuli per altri 4-6 mesi. Segue la fase di finissaggio dalla durata di 10-12 mesi, con diversi rivoltamenti meccanici per favorire l'aerazione del prodotto disposto in trincee, che garantisce la stabilizzazione biologica e la maturità del prodotto, che, una volta finito, viene sottoposto a vagliatura ed insacchettato in diversi formati.

2.3 Impostazione dell'attività sperimentale

La prova in campo è stata condotta nell'arco di tre annate agrarie consecutive (2014-2015-2016) in due località collocate in provincia di Torino, facenti parte dei siti progettuali del progetto Life+ CarbOnFarm. Per il mais si è scelto di impostare la prova all'interno dell'azienda sperimentale dell'Università di Torino presso il comune di Carmagnola (TO) Strada Statale 20, n°14 (Tetto Frati) N 44°53'02.4" E 7°41'10.5", altezza 232 m s.l.m. (Fig. 2.3.1). Il secondo sito si trova presso il comune di Grugliasco (TO) in Via Unità d'Italia n°154 N 45°02'45.7" E 7°36'26.3", altezza 260 m s.l.m., presso l'azienda Luigi Grandi e ospita la prova sulle colture orticole (Fig. 2.3.2).

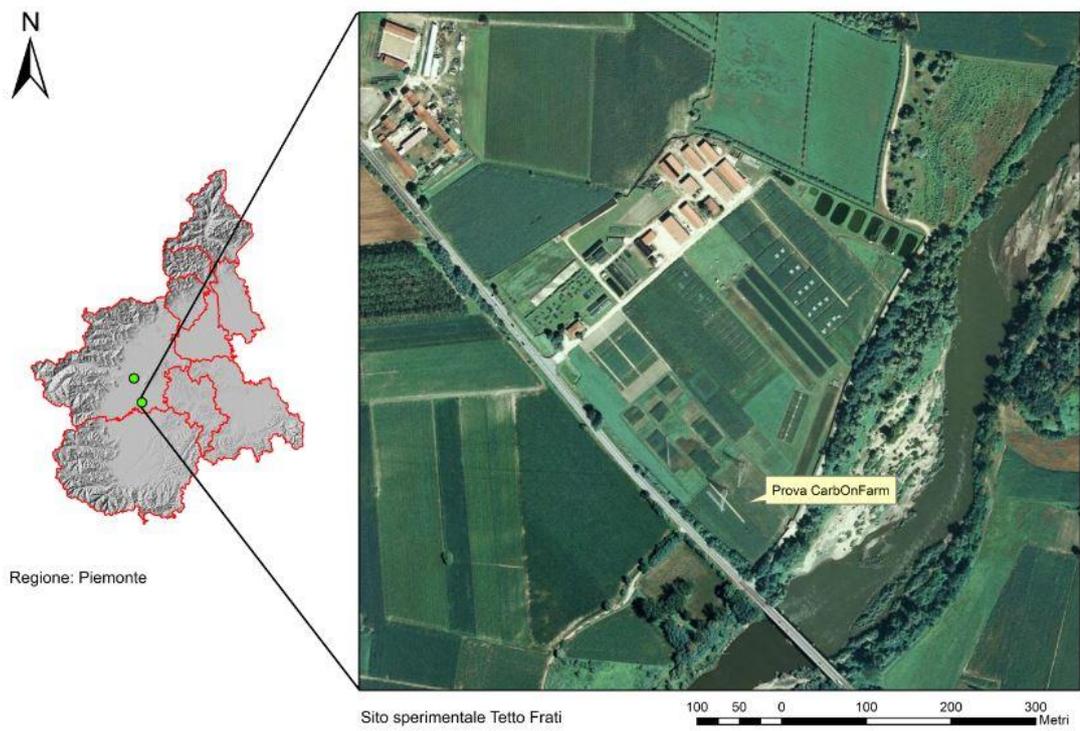


Figura 2.3.1: Inquadramento geografica prova CarbOnFarm nel sito sperimentale del DISAFA Tetto Frati (Carmagnola).

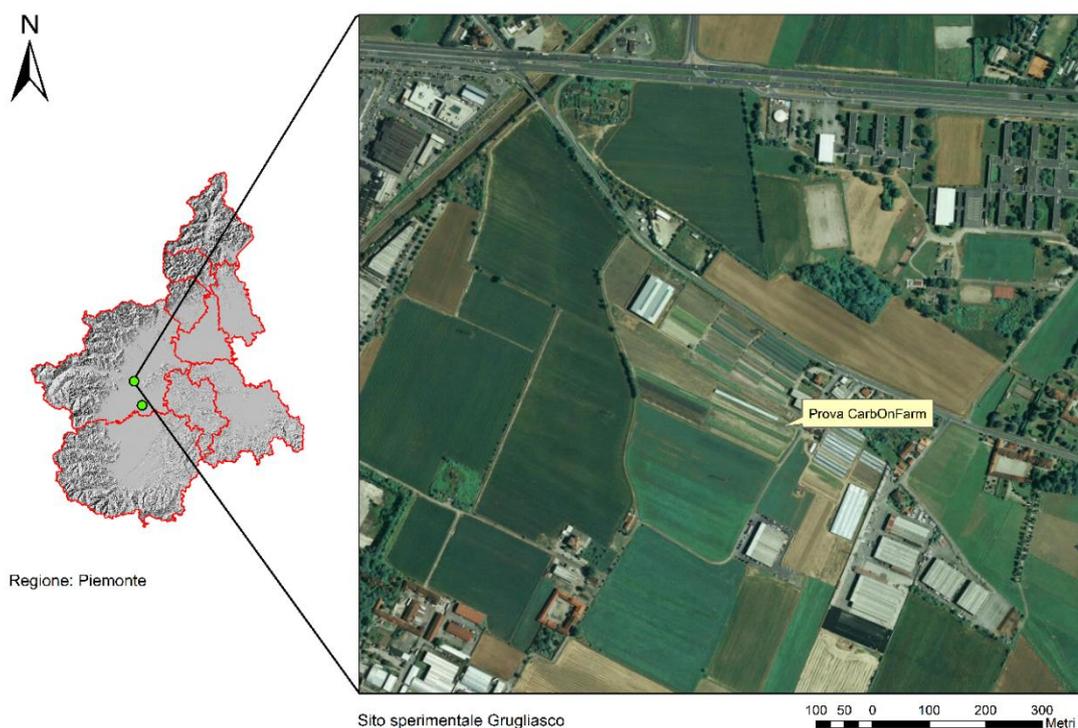


Figura 2.3.2: Inquadramento geografica prova CarbOnFarm nel sito di Grugliasco (azienda Grandi).

2.4 Caratteristiche fisico-chimiche dei suoli

Secondo la carta dei suoli della Regione Piemonte entrambi i siti presentano suoli che rientrano nell'ordine degli entisuoli di pianura non idromorfi e non ghiaiosi, suoli molto giovani e molto diffusi nelle pianure alluvionali presenti in Piemonte. La presenza di scheletro risulta in percentuali comprese tra 16 e 35%. La capacità d'uso di questo suolo non presenta grosse limitazioni, mentre il drenaggio è buono. L'acqua è rimossa dal suolo prontamente ed è disponibile per le piante per la maggior parte della stagione di crescita senza che si verifichino eccessi di umidità limitanti per lo sviluppo vegetale (Regione Piemonte, 2016).

Nella tabella 2.4.1 sono riportati i risultati dell'analisi del suolo effettuata nei primi 30 cm interessati dalle lavorazioni nel terreno dell'azienda Tetto Frati. Il terreno in esame è franco limoso, sub-alcalino. La dotazione di sostanza organica è scarsa, mentre quella di fosforo assimilabile è elevata. La dotazione di potassio scambiabile è scarsa. Il rapporto C/N risulta equilibrato e ci si può quindi aspettare una normale mineralizzazione nel terreno.

Tabella 2.4.1: Risultati analisi del suolo presso il centro sperimentale di Tetto Frati (Carmagnola)

Parametro	Unità di misura (su s.s.)	Valore
Sabbia	%	36.0
Limo	%	56.5
Argilla	%	7.5
pH		8.1
Sostanza Organica	%	1.75
Carbonio organico	%	1.02
Azoto totale	%	1.0
Rapporto C/N		10.2
K scambiabile	p.p.m.	58.65
Fosforo assimilabile	p.p.m.	16.0

Nella tabella 2.4.2 sono riportati i risultati dell'analisi del suolo effettuata nei primi 30 cm interessati dalle lavorazioni nel terreno dell'azienda di Grugliasco. Il terreno in esame risulta anch'esso franco limoso, con valori di pH sub-alcino. La dotazione di sostanza organica è elevata, mentre quella di fosforo assimilabile presenta valori ottimali. La dotazione di potassio scambiabile è buona. Il rapporto C/N risulta equilibrato e ci si può quindi aspettare una normale mineralizzazione nel terreno.

Tabella 2.4.2: Risultati analisi del suolo presso l'azienda Grandi (Grugliasco)

Parametro	Unità di misura (su s.s.)	Valore
Sabbia	%	29.4
Limo	%	58.9
Argilla	%	11.7
pH		7.9
Sostanza Organica	%	3.04
Carbonio organico	%	1.76
Azoto totale	%	0.188
Rapporto C/N		9.4
K scambiabile	p.p.m.	173
Fosforo assimilabile	p.p.m.	38

2.5 Andamento climatico medio e degli anni di studio

La Regione Piemonte si colloca geograficamente all'interno della Pianura Padana ed è limitata su tre lati dalle catene montuose, che occupano circa metà della superficie complessiva. La maggior influenza sul clima risulta dunque essere di natura orografica. I valori di temperatura media annua delle località pianeggianti sono in linea con quelli rilevati altrove nella Pianura Padana e inferiori alla media italiana, che è pari a 13.9°C (Perosino e Zaccara, 2006). Quelli più elevati si riscontrano nella parte orientale della Regione. Le stazioni poste in quota evidenziano invece valori inferiori, per motivi altitudinali. La latitudine influisce in misura minore sugli elementi climatici, data la limitata estensione nord – sud del territorio. Le precipitazioni medie annue sono, in gran parte della Regione, prossime al valore di 760 mm, rappresentativo della Pianura Padana. Risultano inoltre spesso inferiori alla media italiana, considerata pari a 970 mm (Perosino e Zaccara, 2006). Le indagini effettuate da ARPA Piemonte evidenziano negli anni un aumento significativo della temperatura media della Regione, particolarmente accentuato a partire dal 1980. Non si evincono invece trend significativi per quanto riguarda le precipitazioni. Emerge tuttavia l'incremento della lunghezza media dei periodi secchi. Ciò comporta un progressivo aumento delle condizioni di aridità nell'area in esame, rilevato soprattutto nella parte più meridionale della Regione.

Considerata l'influenza del clima sulle performance delle colture e sulla gestione degli interventi di irrigazione, è stata effettuata l'analisi dei dati meteorologici delle località oggetto delle prove. Si sono dunque esaminati i dati delle stazioni di Grugliasco (dati provenienti dalla capannina meteorologica del Servizio Agrometeorologico della Regione Piemonte) e Tetto Frati (dati provenienti dalla capannina meteorologica del DISAFA) nel periodo compreso tra gennaio 2005 e dicembre 2013. I valori medi ottenuti dalla serie storica sono stati poi confrontati con quelli registrati negli anni della sperimentazione (2014 - 2015 - 2016).

I valori medi mensili di temperatura e precipitazione calcolati nel periodo 2005 - 2013 sono riportati in tabella 3. La temperatura media annua risulta pari a 12.1°C a Tetto Frati e a 13.6°C a Grugliasco. In entrambe le località si è potuto riscontrare che il mese più freddo è gennaio, mentre quello più caldo è luglio. In accordo con quanto affermato da Perosino e Zaccara (2006) il clima è definibile come continentale. L'escursione media annua, ossia la differenza tra le temperature medie mensili di luglio e gennaio, è infatti superiore ai 20°C

in entrambi i luoghi. Si evidenziano due stagioni umide (primavera e autunno) e due più asciutte (estate e inverno). Per quanto riguarda l'entità delle precipitazioni i valori rilevati a Grugliasco sono risultati superiori a quelli di Tetto Frati del 25,9%.

Tabella 2.5.1: Valori medi mensili (media 2005 – 2013) di temperatura e precipitazione delle stazioni di Tetto Frati e Grugliasco.

Mese	Temperature medie mensili (C°)		Precipitazioni medie mensili (mm)	
	Tetto Frati	Grugliasco	Tetto Frati	Grugliasco
Gennaio	0,71	2,67	26,20	37,18
Febbraio	2,10	4,33	19,82	29,69
Marzo	8,06	9,53	52,41	75,27
Aprile	12,92	13,81	99,80	116,04
Maggio	17,40	18,13	89,07	111,73
Giugno	21,25	22,10	80,88	107,98
Luglio	23,21	24,63	66,33	54,36
Agosto	21,92	23,58	64,18	73,18
Settembre	17,86	19,52	74,87	92,16
Ottobre	12,24	13,79	52,29	52,51
Novembre	6,61	8,10	82,67	110,51
Dicembre	1,03	3,08	22,00	59,11

Le sperimentazioni sono state effettuate negli anni 2014, 2015 e 2016, che hanno mostrato andamenti meteorologici differenti tra loro (Fig. 2.5.1 e 2.5.2).

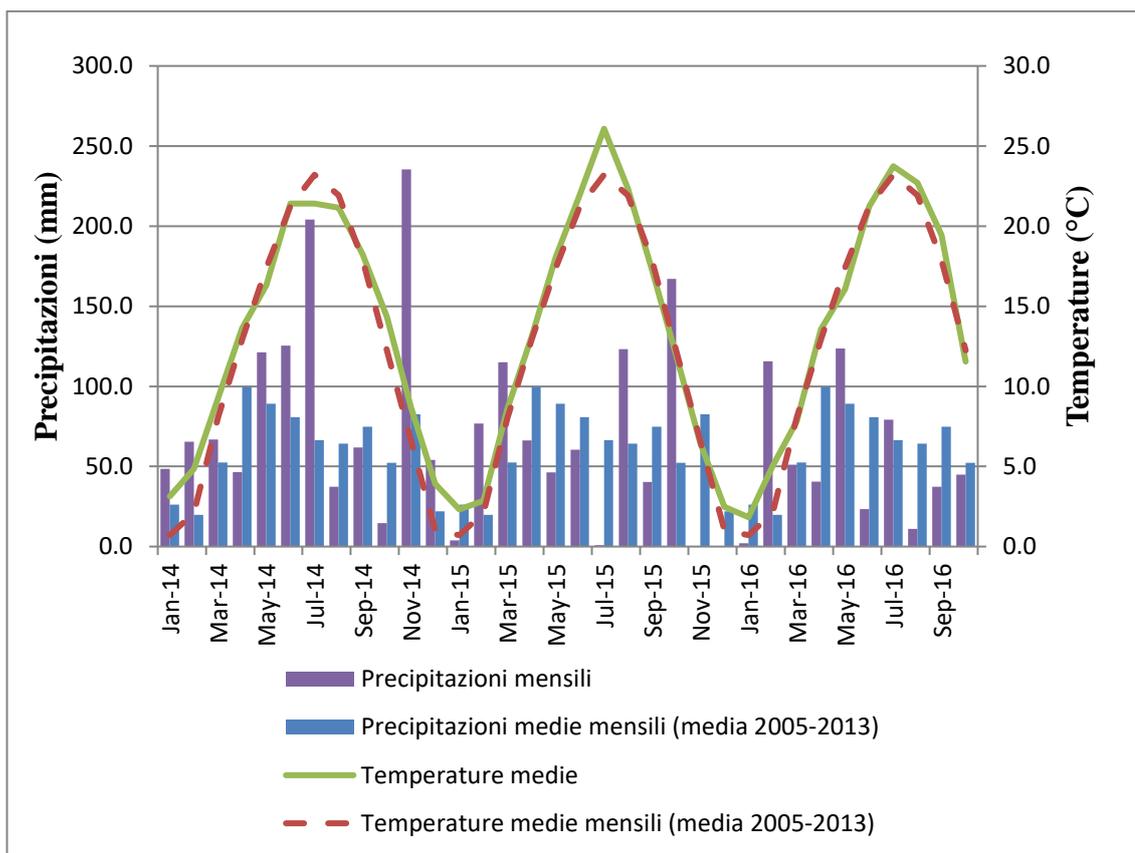


Figura 2.5.1: Andamento termo-pluviometrico nel periodo gennaio 2014 - ottobre 2016 registrato a Tetto Frati.

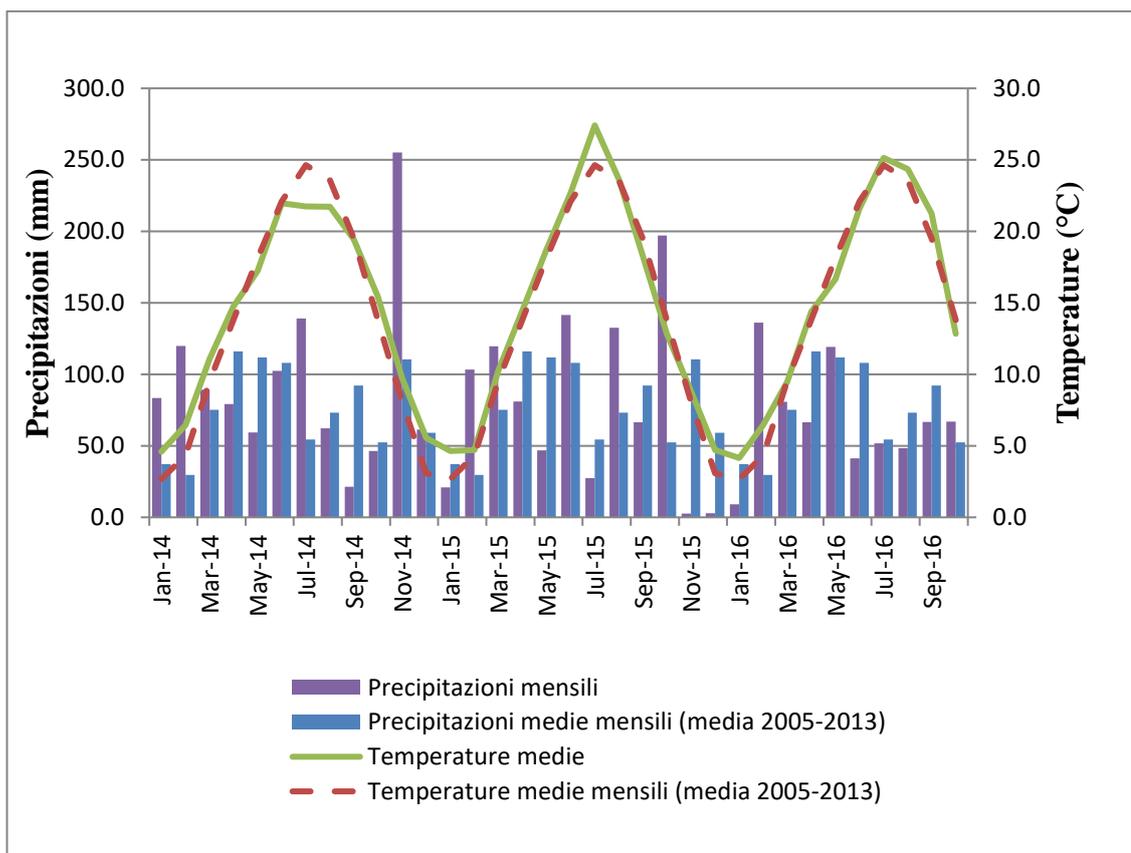


Figura 2.5.2: Andamento termo-pluviometrico nel periodo gennaio 2014 - ottobre 2016 registrato a Grugliasco.

La temperatura media nel 2014 ha riportato un aumento di 0.9°C a Tetto Frati e di 0.5°C a Grugliasco rispetto alla serie storica. Si evince come questo aumento sia legato ad una primavera complessivamente più calda rispetto alla media degli anni 2005 - 2013, in particolare nei mesi di marzo e aprile, e ad un inverno più mite. L'estate 2014 è stata, invece, fresca e piovosa. Entrambe le stazioni meteorologiche hanno riportato valori delle temperature dei mesi estivi inferiori rispetto alla media del periodo relativo alla serie storica presa in esame. Le piogge sono state abbondanti soprattutto nel mese di luglio, riportando incrementi del 207,8 % a Tetto Frati e del 155,7 % a Grugliasco rispetto ai valori medi. Si sono infatti verificati frequenti fenomeni piovosi e temporaleschi, con un numero di giorni di pioggia sensibilmente superiore alla media climatica. Le precipitazioni del mese di agosto a Grugliasco sono invece risultate in linea con i valori medi, mentre per quanto riguarda Tetto Frati si riscontrano valori in lieve diminuzione (-41,7 %). Il mese di settembre ha invece mostrato, solamente a Grugliasco, precipitazioni nettamente inferiori alla media del periodo. Si sono infatti registrati decrementi del 76,8 %. Nel mese di novembre si riscontrano valori pluviometrici molto elevati rispetto alla media del periodo

2005 - 2013 con incrementi del 184,8 % a Tetto Frati e del 130,9 % a Grugliasco. Le temperature di novembre, maggiori rispetto alla media del periodo, non hanno permesso che gli abbondanti fenomeni meteorici verificatisi si traducessero in un accumulo di neve al suolo.

La temperatura media nel 2015 ha riportato un aumento di 0,7°C in entrambe le località rispetto alla serie storica. Nel mese di gennaio 2015 si è riscontrata una diminuzione per quanto concernono i valori di precipitazioni del 43,5 % a Grugliasco e del 85,5 % a Tetto Frati rispetto ai valori medi della serie storica. Inoltre, nel mese di febbraio sono state registrate abbondanti piogge con incrementi del 287,4 % a Tetto Frati e del 248,3 % a Grugliasco rispetto all'andamento climatico medio. La temperatura media della primavera 2015 ha evidenziato, in entrambe le località, valori in linea con l'andamento climatico medio. Il mese di giugno ha fatto registrare, nelle due stazioni, valori di temperatura e precipitazioni in linea con la media del periodo. A luglio le temperature medie sono risultate piuttosto elevate. Si evidenzia un aumento di 2,9 °C a Tetto Frati e di 2,8 °C a Grugliasco rispetto alla media del periodo 2005 - 2013. Il deficit di precipitazioni è stato inoltre molto marcato a Grugliasco nel mese di luglio con una riduzione del -49,6 % a Grugliasco, mentre a Tetto Frati sono stati registrati unicamente 0,8 mm di pioggia durante l'intero mese. Le temperature del mese di agosto sono risultate in linea con i valori medi. In entrambe le località le precipitazioni sono invece risultate più abbondanti. Si è infatti registrato un incremento del 81,2 % a Grugliasco e del 92,0 % a Tetto Frati rispetto alla media climatologica. Il mese di ottobre, con temperature in linea con la media del periodo, è stato interessato da frequenti eventi meteorici registrando un aumento dell'accumulo termo-pluviometrico rispetto agli anni 2005 - 2013 del 275,2 % a Grugliasco e del 219,4 % a Tetto Frati. Inoltre i mesi di novembre e dicembre sono risultati molto siccitosi con decrementi di precipitazioni del -96,5 % a Grugliasco e del -99,5 % a Tetto Frati rispetto all'analogo periodo relativo ai valori medi della serie storica.

La temperatura media nel 2016 ha riportato un aumento di 0,5°C in entrambe le località rispetto alla serie storica. Per quanto riguardale temperature, il loro andamento nel 2016 risulta in linea con quello relativo al periodo 2005 - 2013 tranne nei mesi invernali dove si è registrato un incremento del 52,3 % a Grugliasco e del 148,6 % a Tetto Frati. Nel mese di gennaio a Grugliasco le precipitazioni sono diminuite del 75,8 % rispetto all'analogo periodo dell'anno precedente. A Tetto Frati il calo è stato del 92,4 %. La primavera 2016 è

stata, in entrambe le località, poco piovosa tranne per il mese di maggio che risulta in linea con l'andamento pluviometrico del periodo 2005 - 2013. Il periodo estivo è risultato siccitoso. Il mese di giugno ha evidenziato precipitazioni inferiori alla climatologia degli anni 2005 - 2013 del 71,1 % a Tetto Frati e del 61,8 % a Grugliasco.

Le performance delle colture avrebbero risentito dell'andamento termo-pluviometrico delle stagioni meno piovose come le primavere 2014 e 2015 e l'estate 2016, ma grazie ad una corretta ed attenta gestione delle prove sperimentali in entrambe le località si è evitato l'insorgere di problematiche dovute a carenza idrica del suolo effettuando interventi di irrigazione mirati.

2.6 Tecnica colturale e descrizione della prova su mais (Carmagnola 2014 -2015 – 2016)

Per l'attività sperimentale è stato scelto di dedicarsi alla coltura che più è stata oggetto d'indagine e di studio nelle prove svolte presso la stazione sperimentale di Tetto Frati e che rappresenta una delle più grandi produzioni agricole italiane, il mais. Difatti, il suo contributo al valore della produzione agricola nazionale è attualmente pari a circa 2000 milioni di euro che corrispondono al 4% del totale del valore agricolo. La dinamica delle superfici e delle produzioni del mais da granella in Italia mostra che nell'ultimo quindicennio vi è stata una crescente affermazione di questa coltura.

Grazie all'esperienza scientifica maturata nel centro di Tetto Frati, fortemente incentrata su questa coltura negli anni passati, è stato maggiormente comprensibile valutare l'impatto legato all'impiego di compost sulle sue prestazioni e confrontarlo con gli altri tipi di fertilizzante adottabili.

In figura 2.6.1 viene riportato lo schema di campo sperimentale adottato presso la stazione sperimentale Tetto Frati (blocchi randomizzati). Sono state determinate ventotto parcelle da 60 m² ciascuna (corrispondenti a 8 file di mais con interfila 0.75 m e lunghezza 10 m) disposte in blocchi ospitanti sette trattamenti fertilizzanti (Tab. 2.6.1) per quattro repliche, una per ogni blocco:

- Compost a basso dosaggio di carbonio (1000 kg ha⁻¹ di C)
- Compost ad alto dosaggio di carbonio (2000 kg ha⁻¹ di C),
- Separato solido a basso dosaggio di carbonio (1000 kg ha⁻¹ di C),

- Separato solido ad alto dosaggio di carbonio (2000 kg ha⁻¹ di C),
- Convenzionale gestione agronomica aziendale (urea),
- Testimone non fertilizzato (0 azoto - 0N),
- Compost ad alto dosaggio di carbonio (2000 kg ha⁻¹ di C) con l'aggiunta di metallo-porfirine biocompatibili (catalizzatore biomimetico).

Il trattamento in cui vengono impiegati catalizzatori biomimetici idrosolubili, al fine di ottenere una maggiore stabilizzazione *in-situ* della sostanza organica dei suoli rafforzando il potenziale di sequestro a lungo termine del carbonio organico, non è stato oggetto d'indagine per l'analisi del ciclo di vita. Pertanto il suddetto trattamento viene soltanto menzionato e non verrà considerato nel seguente studio, così come i trattamenti a basso dosaggio e il trattamento non fertilizzato.

Tabella 2.6.1: Legenda trattamenti impiegati nel centro sperimentale Tetto frati

Trattamenti fertilizzanti	Codice parcella
Compost MarcoPolo Basso (1000 kg ha ⁻¹)	CMPB
Compost MarcoPolo Alto (2000 kg ha ⁻¹)	CPMA
Separato Solido tal quale MarcoPolo Basso (1000 kg ha ⁻¹)	SSMPB
Separato Solido tal quale MarcoPolo Alto (2000 kg ha ⁻¹)	SSMPA
Urea (tradizionale)	TRAD
Testimone non fertilizzato	0N
Gestione Fe-porfirine	PORF

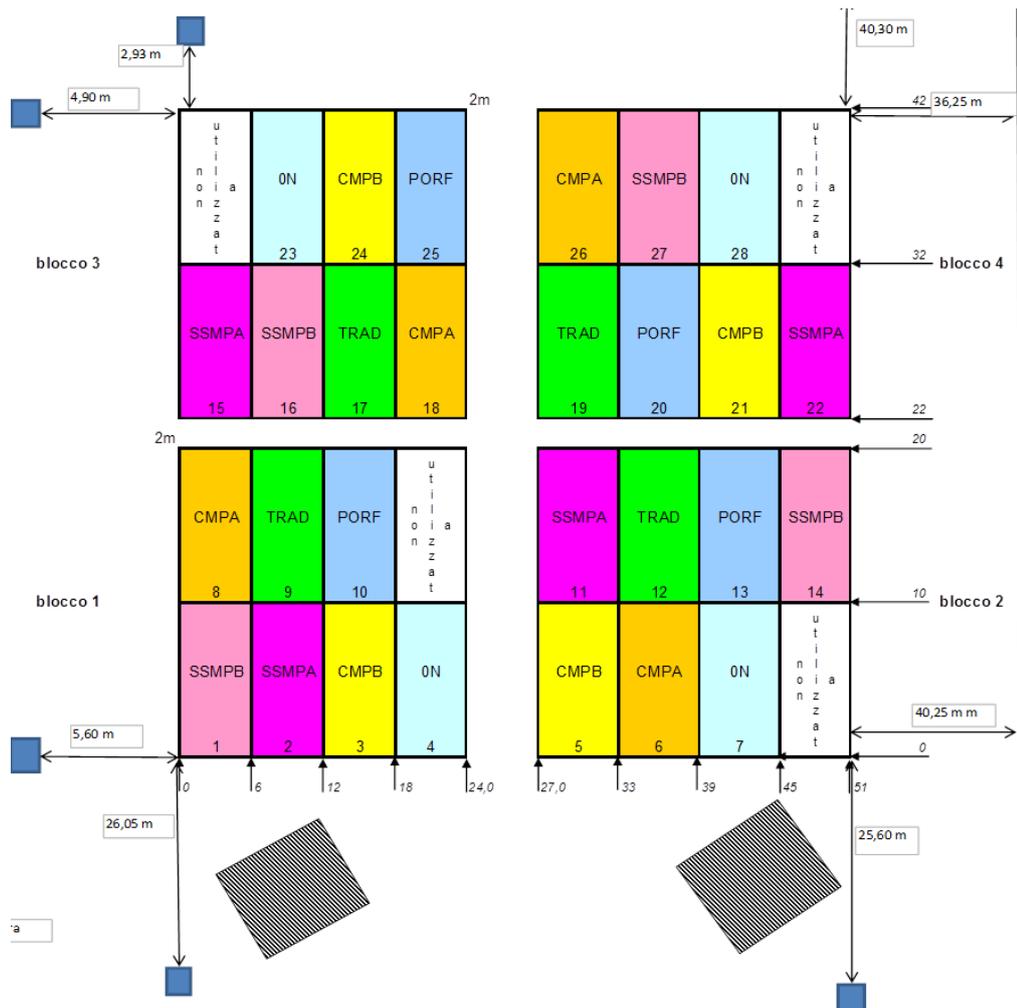


Figura 2.6.1: Schema di campo della stazione sperimentale di Tetto frati.

Nell'ambito dell'analisi LCA oggetto di questa tesi si è concentrata l'attività sui trattamenti: TRAD (che d'ora in poi sarà chiamato MIN), CMPA (che d'ora in poi sarà chiamato COMPOST), SSMPA (che d'ora in poi sarà chiamato SEPARATO SOLIDO).

Le operazioni colturali sono state riportate nelle tabelle sottostanti suddivise per annata agraria. La distribuzione del fertilizzante organico è stata eseguita una volta all'anno durante la primavera, prima delle lavorazioni del suolo.

Tabella 2.6.2: Operazioni colturali annata agraria 2014

Data	Operazione
03-apr-14	distribuzione fertilizzanti organici
03-apr-14	aratura
04-apr-14	discatura e passaggio con erpice rotante
07-apr-14	semina
08-apr-14	diserbo pre-emergenza
30-mag-14	concimazione di copertura
30-mag-14	sarchiatura
24-lug-14	intervento contro piralide
16-ott-14	raccolta

L'ibrido impiegato durante l'annata agraria 2014 è il DK6677 della ditta sementiera Dekalb, classe FAO 600 (130 giorni). Tale ibrido presenta buoni livelli qualitativi sia per la granella che per il trinciato ed è caratterizzato da buone rese produttive anche in condizioni di bassi input. Adatto all'industria molitoria, con granella molto colorata, compatta ed ad elevato peso ettolitrico. La taglia medio-alta e l'aspetto rigoglioso rendono tale ibrido ideale anche per l'alimentazione zootecnica.

Per quanto riguarda le operazioni colturali, l'aratura è stata eseguita a 30 cm di profondità. La semina è stata realizzata con una seminatrice parcellare operando in modo da ottenere una densità di semina di circa 7 piante m² (75 cm interfila * 18 cm sulla fila). È stato effettuato un diserbo di pre-emergenza impiegando 4 l ha⁻¹ di Lumax e 0.44 kg ha⁻¹ di Principal Mais. È stato eseguito un intervento contro la piralide utilizzando 0.3 l ha⁻¹ di Ampligo. Nella annata agraria 2014 non è stato necessario intervenire con le irrigazioni, poiché, come si evince dal grafico in figura 2.5.1, l'estate 2014 è risultata fresca e piovosa.

Tabella 2.6.3: Operazioni colturali annata agraria 2015

Data	Operazione
04-mag-15	aratura
04-mag-15	distribuzione fertilizzanti organici
04-mag-15	discatura e passaggio con erpice rotante
06-mag-15	distribuzione concime minerale
06-mag-15	passaggio con erpice rotante per interrimento concimi
07-mag-15	semina
07-mag-15	diserbo pre-emergenza
01-giu-15	diserbo post-emergenza
10-giu-15	concimazione di copertura
10-giu-15	sarchiatura
07-lug-15	irrigazione
20-lug-15	irrigazione
05-ago-15	irrigazione
07-ott-15	raccolta

Per l'annata agraria 2015 l'ibrido impiegato è stato il PR1547 della Pioneer, classe FAO 600 (130 giorni). Tale ibrido presenta ottimi livelli produttivi anche in condizioni di stress e la granella risulta di elevata qualità, con ottima tessitura e colorazione. La resistenza alle fusariosi della spiga massimizza la sanità del prodotto, che si presta anche a produrre pastoni di qualità. È adatto anche per trinciato di secondo raccolto.

Nel 2015 sono state eseguite le medesime operazioni colturali dell'anno precedente, concernenti la preparazione del terreno e la semina. È stato attuato un diserbo di pre-emergenza impiegando 4 l ha⁻¹ di Sulkotrec. È stato necessario effettuare un ulteriore intervento di diserbo di post-emergenza con 0.44 kg ha⁻¹ di Principal Mais. Nell'annata agraria 2015 si è dovuti ricorrere a tre interventi irrigui, date le forti condizioni di siccità in cui si è venuta a trovare l'area oggetto di studio nel periodo estivo, come riportato in figura. Durante ogni irrigazione, effettuata per aspersione con rotolone, sono stati distribuiti 40 mm d'acqua.

Durante l'annata agraria 2016 è stato utilizzato il medesimo ibrido impiegato nell'anno precedente. Anche nel 2016 sono state eseguite le medesime operazioni colturali degli anni precedenti per quanto riguarda la preparazione del terreno e la semina. È stato attuato un diserbo di pre-emergenza impiegando 4 l ha⁻¹ di Lumax e un intervento in post-emergenza con 0.44 kg ha⁻¹ di Principal Mais. È stato eseguito un intervento contro la piralide e uno contro la diabrotica utilizzando 0.3 l ha⁻¹ di Ampligo. È stato effettuato un unico intervento irriguo (40 mm, aspersione con rotolone) per evitare stress alla coltura in relazione alle scarse precipitazioni verificatesi nel periodo estivo (Fig. 2.5.1).

Tabella 2.6.4: Operazioni colturali annata agraria 2016

Data	Operazione
21-mar-16	campionamento suolo
18-apr-16	aratura
18-apr-16	discatura e passaggio con erpice rotante
20-apr-16	distribuzione fertilizzanti organici e minerali
21-apr-16	erpicoltura per interrimento concimi
21-apr-16	semina
22-apr-16	diserbo pre-emergenza
27-mag-16	diserbo post-emergenza
07-giu-16	concimazione di copertura
07-giu-16	sarchiatura
11-lug-16	irrigazione
25-lug-16	intervento contro piralide e diabrotica
26-set-16	raccolta

2.6.1 Piano di concimazione

I tre trattamenti COMPOST, SEPARATO SOLIDO e MIN (tradizionale) verranno descritti, in merito alla fertilizzazione, nel presente paragrafo. La fertilizzazione organica ha previsto la distribuzione di compost e separato solido in pre-aratura. Il quantitativo di compost e separato apportato è stato stabilito in base alla quantità di carbonio che doveva essere fornito alla coltura nei diversi trattamenti. Ogni anno sono state effettuate analisi chimiche al fine di determinare con precisione la composizione delle matrici organiche. In questo modo è risultato possibile calcolare con esattezza anche la quantità di macroelementi (N, P e K) che è stata contestualmente apportata con tali matrici. Le tesi in cui è stata effettuata la fertilizzazione organica hanno successivamente ricevuto un'integrazione con concimi minerali fosfatici e potassici in pre-semina, se necessario a coprire i fabbisogni, e con concimi azotati in copertura. Il trattamento MIN ha invece ricevuto soltanto concime minerale, fornito in pre-semina (NPK) e in copertura (N). La dose applicata in pre-semina su MIN è stata uniformata ai valori massimi di azoto distribuito nei trattamenti organici.

Nelle tabelle sottostanti, suddivise per annata agraria, vengono riportate le analisi di composizione del compost e del separato solido, le quantità di prodotto e di elementi fertilizzanti distribuiti per i tre trattamenti oggetto di analisi e il piano di concimazione adottato.

Tabella 2.6.5: Composizione del compost e separato solido 2014

Matrice organica	C	N	P	K	s.s.	C/N
	%	%	%	%	%	
SEPARATO SOLIDO	41,28	1,81	1,10	2,30	24,20	23
COMPOST	33,56	1,81	1,29	1,51	54,83	19

Tabella 2.6.6: Dosi target 2014 in funzione del tipo di trattamento (Tetto Frati)

Trattamento	dose obiettivo C	quantità prodotto		N	P	K
	kg ha^{-1}	kg $ssha^{-1}$	kg $tqha^{-1}$	kg ha^{-1}	kg ha^{-1}	kg ha^{-1}
SEPARATO SOLIDO	2000	4845	20021	88	53	111
COMPOST	2000	5959	10870	108	77	90
MIN	\	\	\	108	77	111

Tabella 2.6.7: Piano di concimazione 2014 (Tetto Frati)

Epoca di distribuzione	Trattamento	Elementi nutritivi	Pre-aratura (organici)	Pre-semina (minerale)		Copertura (minerale)	
			kg ha^{-1}	kg ha^{-1}	kg $fertha^{-1}$	kg ha^{-1}	kg $fertha^{-1}$
SEPARATO SOLIDO		N	88	0	0	92	200
		P	53	0	0	0	0
		K	111	0	0	0	0
		P	27	30	65	0	0
		K	56	60	100	0	0
COMPOST		N	108	0	0	92	200
		P	77	0	0	0	0
		K	90	0	0	0	0
		P	38	30	65	0	0
		K	45	60	100	0	0
MIN		N	0	108	234	92	200
		P	0	77	167	0	0
		K	0	111	186	0	0

Per l'anno 2014 non sono state eseguite integrazioni minerali di fosforo e potassio in pre-semina sui trattamenti organici ad alto dosaggio oggetto di questa analisi. In copertura è stato distribuito uniformemente su tutte le tesi un quantitativo di N pari a 92 kg ha^{-1} utilizzando urea (titolo 46%). Tale valore è stato scelto in quanto rappresenta la dose di fertilizzante necessaria per apportare al trattamento che presenta il livello di azoto più alto

(CMPA) un quantitativo totale di 200 kg ha⁻¹, il quale è stato fissato a priori secondo le pratiche convenzionali di gestione della fertilizzazione.

Tabella 2.6.8: Composizione del compost e separato solido 2015

Matrice organica	C	N	P	K	s.s.	C/N
	%	%	%	%	%	
SEPARATO SOLIDO	43,80	1,91	0,40	1,23	25,21	23
COMPOST	35,14	1,96	1,03	1,53	41,58	18

Tabella 2.6.9: Dosi target 2015 in funzione del tipo di trattamento (Tetto Frati)

Trattamento	dose obiettivo C	quantità prodotto		N	P	K
	kg ha ⁻¹	kg ssha ⁻¹	kg tqha ⁻¹	kg ha ⁻¹	kg ha ⁻¹	kg ha ⁻¹
SEPARATO SOLIDO	2000	4566	18113	87	18	56
COMPOST	2000	5692	13688	111	59	87
MIN	\	\	\	111	52	223

Tabella 2.6.10: Piano di concimazione 2015 (Tetto Frati)

Epoca di distribuzione	Trattamento	Elementi nutritivi	Pre-aratura (organici)	Pre-semina (minerale)		Copertura (minerale)	
			kg ha ⁻¹	kg ha ⁻¹	kg fertha ⁻¹	kg ha ⁻¹	kg fertha ⁻¹
SEPARATO SOLIDO	N	87	0	0	89	192	
	P	18	30	150	0	0	
	K	56	150	301	0	0	
	P	9	30	150	0	0	
	K	28	150	301	0	0	
COMPOST	N	111	0	0	89	192	
	P	59	30	150	0	0	
	K	87	150	301	0	0	
	P	29	30	150	0	0	
	K	44	150	301	0	0	
MIN	N	0	111	242	89	192	
	P	0	30	150	0	0	
	K	0	150	301	0	0	

Nel 2015 i valori di P e K da apportare nel trattamento MIN, rispettivamente pari a 52 kg ha⁻¹ e 223 kg ha⁻¹, sono stati stimati a partire dalle produzioni dell'anno precedente (pianta

intera t ss ha⁻¹) al fine di pareggiare le asportazioni della coltura. Per quanto riguarda la dose di azoto su MIN, analogamente a quanto effettuato nell'anno precedente sono stati apportati 111 kg ha⁻¹ pari al massimo apporto fornito ai trattamenti organici (corrispondente al COMPOST).

Nel piano di concimazione 2015 si evidenzia che, per quanto riguarda la fertilizzazione di fosforo e potassio, è stato somministrato in pre-semina un concime minerale starter uguale per tutti i trattamenti apportando 30 kg ha⁻¹ di P (con perfosfato triplo) e 150 kg ha⁻¹ di K (con cloruro di potassio), al fine di garantire un quantitativo adeguato su tutti i trattamenti, per annullare effetti eventualmente imputabili a carenze di P e K.

In copertura, come l'anno precedente, si è distribuito un quantitativo di concime azotato minerale tale da far raggiungere al trattamento con il livello di N più alto i 200 kg ha⁻¹ prestabiliti, apportando dunque 89 kg ha⁻¹ (urea), su tutti i trattamenti.

Tabella 02.6.11: Composizione del compost e separato solido 2016

Matrice organica	C	N	P	K	s.s.	C/N
	%	%	%	%	%	
SEPARATO SOLIDO	47,89	2,49	1,43	1,65	19,28	19
COMPOST	38,93	2,33	2,57	1,58	39,92	17

Tabella 2.6.12: Dosi target 2016 in funzione del tipo di trattamento (Tetto Frati)

Trattamento	dose obiettivo C	quantità prodotto		N	P	K
	kg ha ⁻¹	kg s s ha ⁻¹	kg t q ha ⁻¹	kg ha ⁻¹	kg ha ⁻¹	kg ha ⁻¹
SEPARATO SOLIDO	2000	4176	21661	104	60	69
COMPOST	2000	5137	12869	120	132	81
MIN	\	\	\	120	52	223

Tabella 2.6.13: Piano di concimazione 2016 (Tetto Frati)

Epoca di distribuzione		Pre-aratura (organici)	Pre-semina (minerale)		Copertura (minerale)	
Trattamento	Elementi nutritivi	kg ha^{-1}	kg ha^{-1}	kgfertha $^{-1}$	kg ha^{-1}	kgfertha $^{-1}$
SEPARATO SOLIDO	N	104	0	0	80	175
	P	0	30	150	0	0
	K	0	150	301	0	0
	P	0	30	150	0	0
	K	0	150	301	0	0
COMPOST	N	120	0	0	80	175
	P	132	30	150	0	0
	K	81	150	301	0	0
	P	66	30	150	0	0
	K	41	150	301	0	0
MIN	N	0	120	260	80	175
	P	0	30	150	0	0
	K	0	150	301	0	0

Analogamente all'anno precedente, nel 2016 è stato somministrato in pre-semina un concime minerale starter uguale per tutti i trattamenti apportando 30 kg ha^{-1} di P (con perfosfato triplo) e 150 kg ha^{-1} di K (con cloruro di potassio), al fine di garantire un quantitativo adeguato su tutti i trattamenti, per annullare effetti eventualmente imputabili a carenze di P e K.

In copertura, come l'anno precedente, si è distribuito un quantitativo di concime azotato minerale tale da far raggiungere al trattamento con il livello di N più alto i 200 kg ha^{-1} prestabiliti, apportando dunque 80 kg ha^{-1} (urea), su tutti i trattamenti.

2.6.2 Produzioni

A fine ciclo colturale, raggiunta la fase di piena maturazione, è stata effettuata la raccolta del mais con mietitrebbiatrice parcellare. Successivamente è stato opportuno misurare in termini di peso la granella raccolta (riposta in stufa a 105°C per circa 24 h per ottenere una stima della sostanza secca) al fine di valutare le rese ottenute da ogni parcella, le quali sono poi state riferite all'ettaro. Nel grafico in fig. 2.6.2 vengono riportate le produzioni ottenute nei tre anni consecutivi di sperimentazione in funzione del tipo di trattamento.

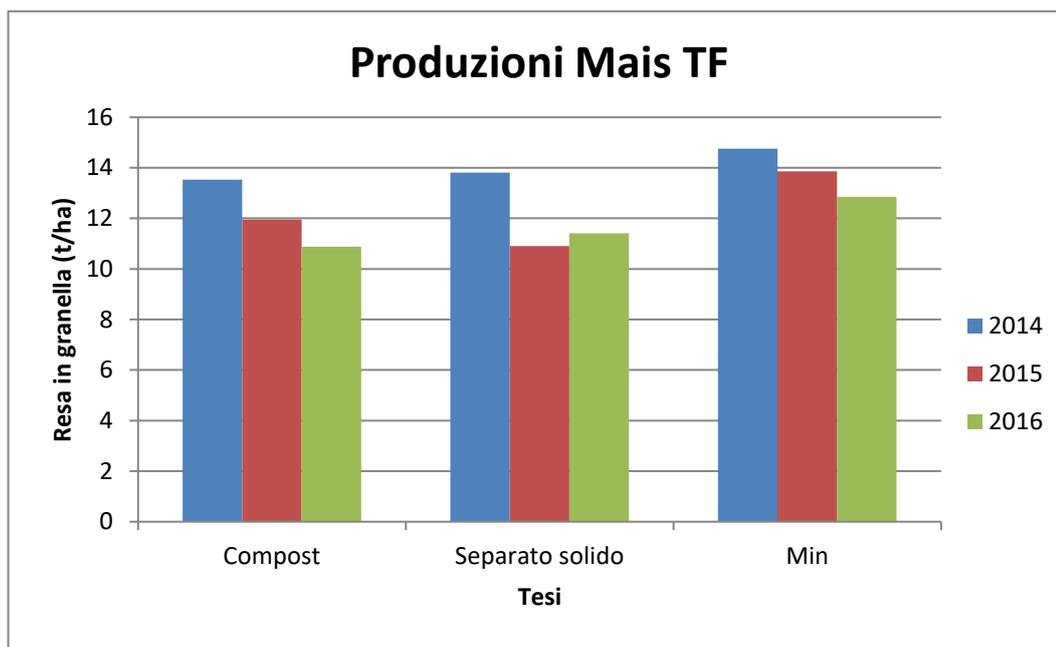


Figura 2.6.2: Effetto del trattamento di fertilizzazione sulla resa in granella (valori espressi sul secco) nei tre anni di sperimentazione

Come si evince dal grafico le produzioni negli anni sono diminuite; questo è probabilmente dovuto all'andamento climatico diversificato nelle diverse annate. Sono comunque riscontrabili valori più elevati per quanto riguarda il sistema di gestione tradizionale (MIN) per tutti gli anni oggetto d'indagine, mentre le produzioni negli altri due tipi di trattamento sono inferiori mediamente del 12.32 % per il trattamento con il compost ad alto dosaggio e del 12.90 % per le tesi a dosaggio elevato con separato solido. Nel 2015, per quanto riguarda la tesi con separato solido, si è ottenuta una produzione relativamente inferiore rispetto alle altre tesi (-21.32 % rispetto al MIN), ma comunque soddisfacente superando le 10 tonnellate ad ettaro.

2.7 Tecnica colturale e descrizione della prova su orticole (Grugliasco 2014 - 2015 - 2016)

È stato scelto di impostare parte dell'attività sperimentale in un'azienda orticola considerato che il compost risulta essere adatto alle produzioni vegetali. Le colture individuate per la conduzione della prova sono state tre tra le più rappresentative coltivate nell'areale di produzione in cui è sita l'azienda: lattuga come coltura principale e cavolo verza o broccolo come coltura secondaria.

Lo schema sperimentale adottato presso l'azienda Grandi è a blocchi randomizzati (Fig. 2.7.1), caratterizzato da 24 parcelle di 28 m² circa; la larghezza di quest'ultime pari a 3.75 m è stata stabilita a priori per poter ottenere, nel caso della lattuga, due airole in ogni parcella e successivamente due file di cavolo) distinte in sei trattamenti fertilizzanti (Tab. 2.7.1) per quattro repliche, una per ogni blocco:

- Compost a basso dosaggio di carbonio (1000 kg ha⁻¹ di C),
- Compost ad alto dosaggio di carbonio (2000 kg ha⁻¹ di C),
- Separato solido a basso dosaggio di carbonio (1000 kg ha⁻¹ di C),
- Separato solido ad alto dosaggio di carbonio (2000 kg ha⁻¹ di C),
- Convenzionale gestione agronomica aziendale (urea),
- Testimone non fertilizzato (0 azoto - 0N).

I fertilizzanti organici sono stati distribuiti soltanto sulla coltura principale, mentre la coltura secondaria è stata gestita dall'agricoltore secondo le normali pratiche aziendali.

Tabella 2.7.1: Legenda trattamenti impiegati nella prova sperimentale dell'azienda Grandi

Trattamenti fertilizzanti	Codice parcella
Compost MarcoPolo Basso (1000 kg ha ⁻¹)	CMPB
Compost MarcoPolo Alto (2000 kg ha ⁻¹)	CPMA
Separato Solido tal quale MarcoPolo Basso (1000 kg ha ⁻¹)	SSMPB
Separato Solido tal quale MarcoPolo Alto (2000 kg ha ⁻¹)	SSMPA
Urea (tradizionale)	TRAD
Testimone non fertilizzato	0N

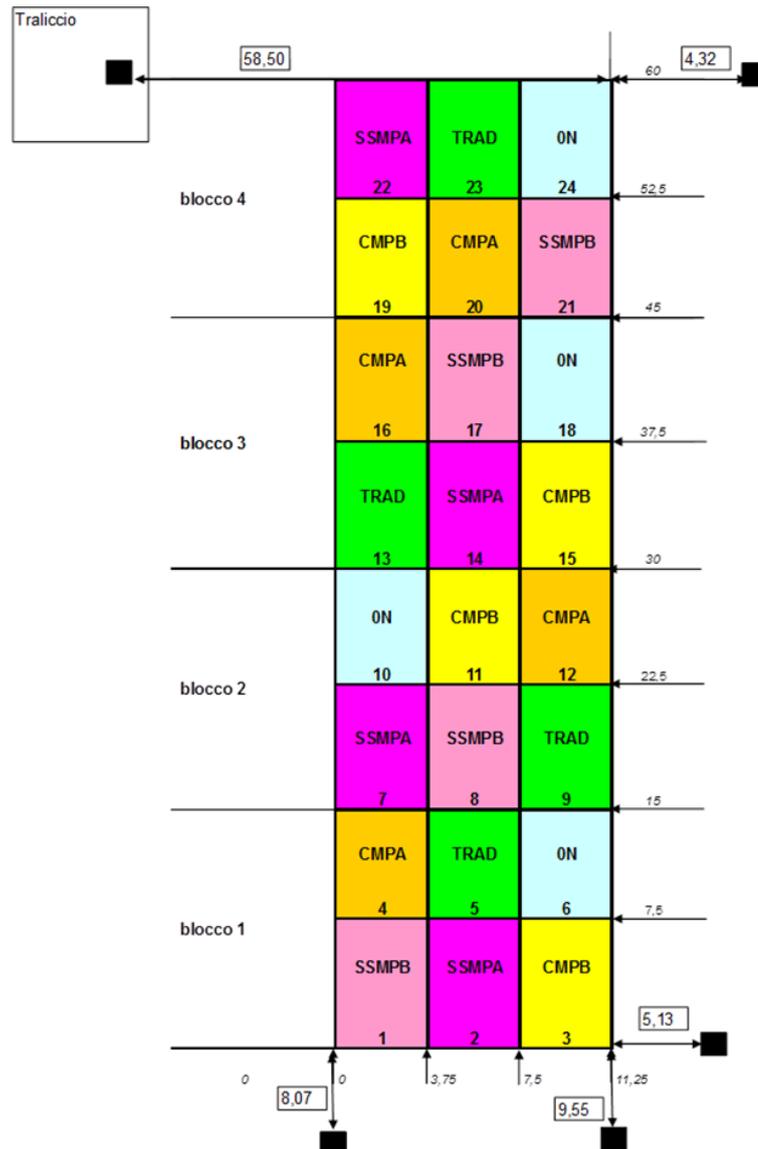


Figura 2.7.1: Schema di campo dell'azienda Grandi

Nell'ambito dell'analisi LCA oggetto di questa tesi si è concentrata l'attività sui trattamenti: TRAD (che d'ora in poi sarà chiamato MIN), CMPA (che d'ora in poi sarà chiamato COMPOST), SSMPA (che d'ora in poi sarà chiamato SEPARATO SOLIDO).

Le operazioni colturali sono state riportate nelle tabelle sottostanti suddivise per annata agraria. La distribuzione del fertilizzante organico è stata eseguita una volta all'anno durante la primavera, prima delle lavorazioni del suolo.

Tabella 2.7.2: Operazioni colturali annata agraria 2014

Data	Operazione	Coltura
19-mag-14	distribuzione fertilizzanti organici	lattuga
19-mag-14	aratura	lattuga
28-mag-14	erpicoltura	lattuga
30-mag-14	aiuolatura	lattuga
30-mag-14	trapianto	lattuga
15-giu-14	intervento di difesa	lattuga
07-lug-14	raccolta	lattuga
03-ago-14	passaggio di erpice estirpatore	cavolo verza
07-ago-14	erpicoltura	cavolo verza
07-ago-14	fertilizzazione pre-trapianto	cavolo verza
07-ago-14	diserbo pre-trapianto	cavolo verza
10-ago-14	trapianto	cavolo verza
22-ago-14	intervento di difesa	cavolo verza
01-set-14	fertilizzazione	cavolo verza
01-set-14	sarchiatura	cavolo verza
21-set-14	fertilizzazione	cavolo verza
01-set-14	rincalzatura	cavolo verza
02-set-14	intervento di difesa	cavolo verza
03-set-14	raccolta	cavolo verza

Durante l'annata agraria 2014 è stata trapiantata la varietà "a cappuccio estiva" di lattuga, adatta per il ciclo primaverile-estivo. Per quanto riguarda le operazioni colturali l'aratura è stata eseguita a circa 25 cm di profondità. Il trapianto è stato eseguito, previa aiuolatura e impiego di telo pacciamante scuro, operando in modo da ottenere una densità di trapianto di circa 9.5 piante m² (30 cm interfila * 28 cm sulla fila). È stato effettuato un intervento di difesa impiegando 0.5 kg ha⁻¹ di Contest e 0.5 kg ha⁻¹ di Cymoxan per contenere attacchi da nottue e afidi. Gli interventi irrigui, effettuati per aspersione tramite sprinkler system, sono stati 7 in totale, distribuendo durante il ciclo colturale al fine di coprire il fabbisogno idrico della coltura 135 mm di acqua. Nella prima settimana dopo il trapianto la lattuga è stata irrigata 2 volte con 25 mm per ogni intervento irriguo, mentre nelle successive fasi di sviluppo sono stati impiegati circa 17 mm di acqua a settimana per un totale di 5 interventi.

Come coltura secondaria è stata trapiantata la varietà "extrema" di cavolo verza, previo un intervento di diserbo con 1.37 kg ha⁻¹ di Sultan. La densità di trapianto desiderata è pari a

1.5 m² (75 cm interfila * 50 cm sulla fila). Per quanto riguarda la difesa da agenti patogeni (cavolaia e peronospora del cavolo) sono stati impiegati prodotti diversi in due interventi: sono stati somministrati 0.3 kg ha⁻¹ di Decis e successivamente sono stati miscelati e distribuiti 0.15 kg ha⁻¹ di Affirm e 0.5 kg ha⁻¹ di Kocide 2000. Per sostenere al meglio lo sviluppo della coltura sono stati distribuiti, mediante irrigazione per scorrimento, 53 mm di acqua suddivisi in 4 interventi al fine di coprire i fabbisogni idrici della coltura.

Tabella 2.7.3: Operazioni colturali annata agraria 2015

Data	Coltura	Operazione
09-mag-15	distribuzione fertilizzanti organici	lattuga
09-mag-15	aratura	lattuga
13-mag-15	erpicoltura	lattuga
13-mag-15	aiuolatura	lattuga
13-mag-15	trapianto	lattuga
30-mag-15	intervento di difesa	lattuga
04-giu-15	intervento di difesa	lattuga
22-giu-15	raccolta	lattuga
02-set-15	passaggio di erpice estirpatore	broccolo
11-set-15	erpicoltura	broccolo
12-set-15	fertilizzazione pre-trapianto	broccolo
12-set-15	diserbo pre-trapianto	broccolo
14-set-15	trapianto	broccolo
30-set-15	fertilizzazione	broccolo
30-set-15	sarchiatura	broccolo
30-set-15	intervento di difesa	broccolo
18-ott-15	fertilizzazione	broccolo
18-ott-15	rincalzatura	broccolo
18-ott-15	intervento di difesa	broccolo
29-dic-15	raccolta	broccolo

Nel 2015, come coltura principale è stata impiegata un'altra varietà di lattuga a ciclo estivo, la varietà "trocadero". Per quanto riguarda le operazioni colturali non è stato necessario eseguire l'aratura ma si è altresì eseguito una ripuntatura seguita da erpicatura-estirpatura. La densità di trapianto è stata mantenuta invariata rispetto all'anno precedente, al fine di rendere statisticamente confrontabili i risultati dell'analisi ambientale, economica ed energetica fra le diverse annate. Altresì, sono stati necessari maggiori interventi di difesa per limitare le problematiche fito-patologiche insorte durante il ciclo colturale (attacchi di nottue, peronospora e afide bruno); si sono quindi impiegati più formulati: dapprima con 0.1 kg ha⁻¹ di Altacor, 0.3 kg ha⁻¹ di Contest, 2 kg ha⁻¹ di Curzate e 0.5 kg ha⁻¹ di Trebon Up e successivamente sono stati impiegati 1 kg ha⁻¹ di Alverde, 1 kg ha⁻¹ di

Karate e 0.5 kg ha⁻¹ di Trebon Up. Gli interventi irrigui, effettuati per aspersione tramite sprinkler system, sono stati 7 in totale, distribuiti come nell'annata precedente.

Come coltura secondaria l'agricoltore ha utilizzato la varietà "naxos" di broccolo, previo un intervento di diserbo con 1.37 kg ha⁻¹ di Sultan. La densità di trapianto desiderata è pari a 1.5 m² (75 cm interfila * 50 cm sulla fila), scelta al fine di un confronto statistico interannuale verosimile. Per quanto riguarda la difesa da agenti patogeni (cavolaia e peronospora del cavolo) sono stati impiegati due prodotti diversi in due interventi: in data 30 settembre sono stati somministrati 0.3 kg ha⁻¹ di Decis e in data 18 ottobre sono stati distribuiti 0.15 kg ha⁻¹ di Affirm. Per sostenere al meglio lo sviluppo della coltura sono stati distribuiti come nell'anno precedente, mediante irrigazione per scorrimento, 53 mm di acqua suddivisi in 4 interventi al fine di coprire i fabbisogni idrici della coltura.

Tabella 2.7.4: Operazioni colturali annata agraria 2016

Data	Coltura	Operazione
17-mag-16	distribuzione fertilizzanti organici	lattuga
17-mag-16	ripuntatura	lattuga
17-mag-16	erpicoltura	lattuga
15-giu-16	aiuolatura	lattuga
15-giu-16	trapianto	lattuga
05-lug-16	intervento di difesa	lattuga
27-lug-16	intervento di difesa	lattuga
01-ago-16	raccolta	lattuga
05-ago-16	passaggio di erpice estirpatore	cavolo verza
05-ago-16	erpicoltura	cavolo verza
17-ago-16	fertilizzazione pre-trapianto	cavolo verza
19-ago-16	trapianto	cavolo verza
22-ago-16	diserbo post-trapianto	cavolo verza
14-set-15	intervento di difesa	cavolo verza
29-set-16	fertilizzazione	cavolo verza
29-set-16	sarchiatura	cavolo verza
15-ott-16	intervento di difesa	cavolo verza
01-feb-17	raccolta	cavolo verza

Durante l'annata agraria 2016 è stata trapiantata la varietà di lattuga "sandalina", adatta per il ciclo primaverile-estivo. Per quanto riguarda le operazioni colturali, compresa l'irrigazione e la difesa con agro-farmaci, si rimanda a quanto descritto per l'annata 2014 poiché l'andamento delle due annate, sia per quanto riguarda l'aspetto sanitario che climatico sono state simili. Anche per il 2016 il trapianto è stato eseguito per ottenere una densità di trapianto di circa 9.5 piante m² (30 cm interfila * 28 cm sulla fila). I trattamenti

di difesa sono stati necessari in data 5 luglio e 27 luglio, rispettivamente a 3 e 6 settimane dal trapianto.

Come coltura secondaria è stata impiegata nuovamente il cavolo verza con la varietà “extrema”; successivamente al trapianto è stato eseguito un intervento di diserbo con 1.37 kg ha⁻¹ di Sultan. La densità di trapianto desiderata è rimasta invariata (1.5 piante m², 75 cm interfila * 50 cm sulla fila). Per quanto riguarda la difesa da agenti patogeni (cavolaia e peronospora del cavolo) sono stati impiegati le stesse dosi e prodotti utilizzati nel 2014 con due interventi. Anche nel caso del cavolo sono state eseguite le medesime operazioni colturali riconducibili alla prima annata agraria oggetto di sperimentazione.

2.7.1 Piano di concimazione

Analogamente alla prova condotta su mais, la fertilizzazione organica su orticole ha previsto la distribuzione di compost e separato solido in pre-aratura. Il quantitativo di compost e separato apportato è stato stabilito in base alla quantità di carbonio che doveva essere fornito alla coltura nei diversi trattamenti. La quantità di C apportato è uguale a quella impiegata sul mais, pari cioè a 2000 kg ha⁻¹. Il compost e il separato solido impiegati per la fertilizzazione delle orticole sono i medesimi utilizzati su mais, pertanto la loro composizione chimica è desunta dalle analisi, in merito al contenuto in macronutrienti, effettuate dal laboratorio del Centro Interdipartimentale Ceramini dell’Università di Napoli Federico II. Le tesi in cui è stata effettuata la fertilizzazione organica hanno ricevuto un quantitativo di azoto maggiore rispetto alle tesi TRAD, in cui viene rispettata la convenzionale gestione aziendale.

Sulla coltura principale l’azienda ha somministrato, nel 2014 e nel 2015, 60 kg ha⁻¹ di azoto, 9 kg ha⁻¹ di fosforo e 66 kg ha⁻¹ di potassio utilizzando 400 kg ha⁻¹ di concime minerale ternario (titolo 15 - 5 -20). Nel 2016 l’agricoltore ha distribuito il medesimo quantitativo di fertilizzante impiegando tuttavia un concime minerale ternario di titolo differente (titolo 15 - 15 - 15). Il quantitativo di macroelementi apportato è dunque risultato pari a 60 kg ha⁻¹ di N, 26 kg ha⁻¹ di P e 50 kg ha⁻¹ di K. In funzione dello sviluppo della coltura, l’agricoltore ha eventualmente distribuito del concime fogliare, in abbinamento ad un trattamento antiparassitario, con 100 g 100l⁻¹ di nitrato potassico e 100 g 100 l⁻¹ di nitrato di magnesio somministrando 250 l ha⁻¹ di acqua.

Relativamente alla coltura secondaria, per tutti gli anni di attività sperimentale, l'azienda ha effettuato quattro interventi di fertilizzazione annuali distribuendo rispettivamente 60 kg ha^{-1} di urea in pre-aratura, 400 kg ha^{-1} di concime minerale ternario (titolo 15 - 5 - 20) in pre-trapianto, 250 kg ha^{-1} di concime minerale ternario (titolo 15 - 15 - 15) alla sarchiatura e 200 kg ha^{-1} di concime minerale binario (titolo 13-0-46) alla rincalzatura.

Nelle tabelle sottostanti, suddivise per annata agraria, vengono riportate le quantità di prodotto e di elementi fertilizzanti distribuiti per ogni trattamento e il piano di concimazione adottato.

Tabella 2.7.5: Dosi target 2014 in funzione del tipo di trattamento (Grandi)

Trattamento	dose obiettivo C	quantità prodotto		N	P	K
	kg ha^{-1}	kgss ha^{-1}	kg $tqha^{-1}$	kg ha^{-1}	kg ha^{-1}	kg ha^{-1}
Separato Solido	2000	4845	20021	88	53	111
Compost	2000	5959	10870	108	77	90
MIN	21		286	60	9	66

Tabella 2.7.6: Piano di concimazione 2014 (Grandi)

Epoca di distribuzione		Pre-aratura (organici)	Pre-trapianto (minerale)	
Trattamento	Elementi nutritivi	kg ha^{-1}	kg ha^{-1}	kgfer ha^{-1}
Separato Solido	N	88	0	0
	P	53	33	71
	K	111	50	84
	P	27	33	71
	K	56	50	84
Compost	N	108	0	0
	P	77	33	71
	K	90	50	84
	P	38	33	71
	K	45	50	84
MIN	N	0	60	400
	P	0	33	71
	K	0	50	84

Tabella 2.7.7: Dosi target 2015 in funzione del tipo di trattamento (Grandi)

Trattamento	dose obiettivo C	quantità prodotto		N	P	K
	kg ha^{-1}	kgss ha^{-1}	kg $tqha^{-1}$	kg ha^{-1}	kg ha^{-1}	kg ha^{-1}
Separato Solido	2000	4566	18113	87	18	56
Compost	2000	5692	13688	111	59	87
MIN				60	9	66

Nel piano di concimazione 2015 si evidenzia che, per quanto riguarda la fertilizzazione di fosforo e potassio, è stato somministrato in pre-aratura una dose di concime starter uguale per tutti i trattamenti, corrispondenti alla tradizionale gestione aziendale. Si sono quindi apportati 9 kg ha^{-1} di P (con perfosfato triplo) e 66 kg ha^{-1} di K (con cloruro di potassio), al fine di garantire un quantitativo adeguato su tutti i trattamenti, per annullare effetti eventualmente imputabili a carenze di P e K.

Tabella 2.7.8: Piano di concimazione 2015 (Grandi)

Epoca di distribuzione	Trattamento	Elementi nutritivi	Pre-aratura (organici)	Pre-trapianto (minerale)	
			kg ha^{-1}	kg ha^{-1}	kg $fertha^{-1}$
Separato Solido	N		87	0	0
	P		18	9	43
	K		56	66	133
	P		9	9	43
	K		28	66	133
Compost	N		111	0	0
	P		59	9	43
	K		87	66	133
	P		29	9	43
	K		44	66	133
MIN	N		0	60	400
	P		0	9	43
	K		0	66	133

Tabella 2.7.9: Dosi target 2016 in funzione del tipo di trattamento (Grandi)

Trattamento	dose obiettivo C	quantità prodotto		N	P	K
	kg ha^{-1}	kgss ha^{-1}	kg $tqha^{-1}$	kg ha^{-1}	kg ha^{-1}	kg ha^{-1}
Separato Solido	2000	4176	21661	104	0	0
Compost	2000	5137	12869	120	132	81
MIN				60	26	50

Tabella 2.7.10: Piano di concimazione 2016 (Grandi)

Epoca di distribuzione		Pre-aratura (organici)	Pre-trapianto (minerale)	
Trattamento	Elementi nutritivi	kg ha^{-1}	kg ha^{-1}	kgfertha $^{-1}$
Separato Solido	N	104	0	0
	P	0	9	43
	K	0	66	133
	P	0	9	43
	K	0	66	133
Compost	N	120	0	0
	P	132	9	43
	K	81	66	133
	P	66	9	43
	K	41	66	133
MIN	N	0	60	400
	P	0	26	130
	K	0	50	100

Analogamente all'anno precedente, nel 2016 è stato somministrato in pre-aratura un concime starter uguale per tutti i trattamenti organici con dose pari a quella che l'azienda utilizzerebbe convenzionalmente, apportando gli stessi quantitativi di fosforo e potassio distribuiti nel 2015. Alle tesi MIN sono stati apportati 26 kg ha^{-1} di P (con perfosfato triplo) e 50 kg ha^{-1} di K (con cloruro di potassio) poiché è cambiato il concime ternario a disposizione dell'agricoltore, come precedentemente descritto.

2.7.2 Produzioni

Per tutte le colture orticole, sia per la coltura principale che per quella secondaria, si è ricorsi alla raccolta manuale e successivamente si è determinato il peso fresco eliminando le parti considerate come scarti, al fine di valutare le rese, in termini di parte edule e quindi commerciabile, ottenute da ogni parcella successivamente riferite all'ettaro. Nel grafico in Fig. 2.7.2 vengono riportate le produzioni ottenute nei tre anni consecutivi di sperimentazione in funzione del tipo di gestione colturale e del tipo di coltura (coltura principale e secondaria).

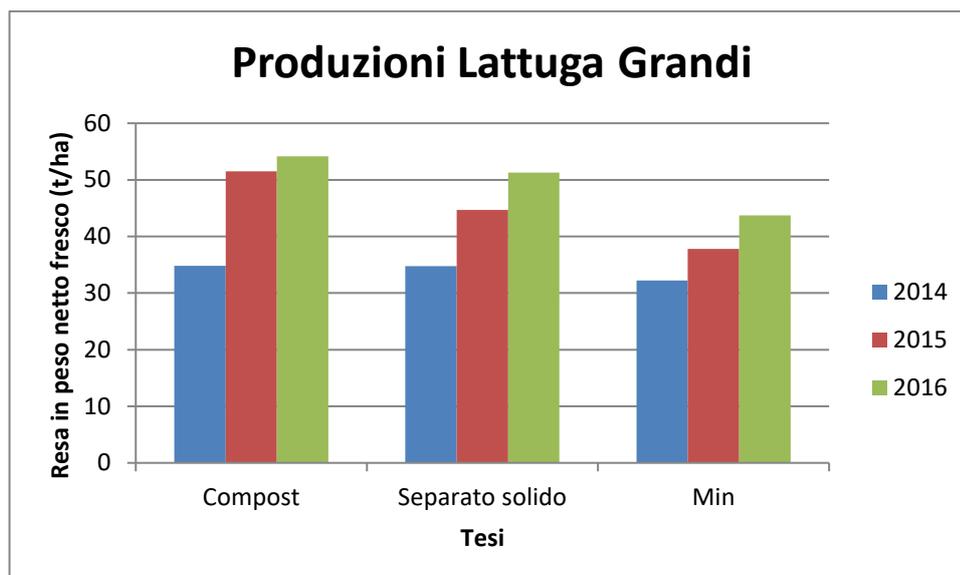


Figura 2.7.2: Resa della lattuga (prodotto fresco al netto degli scarti).

L'effetto del sistema colturale adottato, espresso nel grafico in Fig. 2.7.2, denota un progressivo incremento di produzione nei tre anni consecutivi, soprattutto per quanto riguarda con compost e con separato solido. Tale andamento può trovare spiegazione, come possibili cause, nella diversa lunghezza dei cicli colturali a seconda delle differenti epoche di semina e delle varietà e in relazione dell'andamento climatico diverso fra le annate agrarie. L'elevato contenuto di sostanza organica nei primi strati del terreno, comportando un miglioramento delle caratteristiche fisico-chimiche del suolo e un habitat ideale per lo sviluppo della coltura, e le elevate densità di trapianto permettono comunque all'azienda di ottenere buone rese. Analizzando accuratamente i dati, si evince che fra il 2014 e il 2016 per le tesi con COMPOST e SEPARATO SOLIDO si ha rispettivamente un incremento delle rese di circa 56 e 48%. Inoltre per le tesi a gestione tradizionale (MIN) si riscontra un aumento delle produzioni più modesto e pari a circa il 36 %.

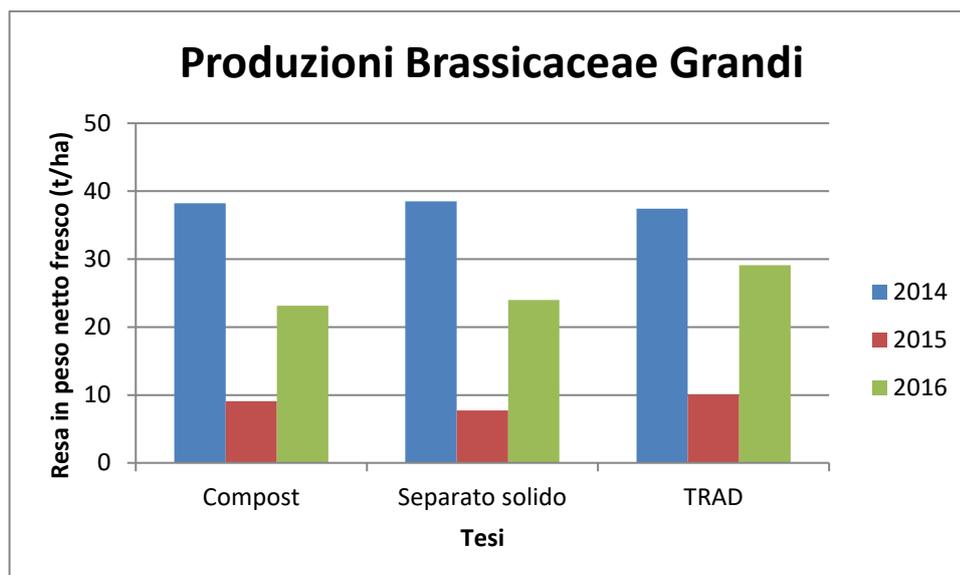


Figura 2.7.3: Resa della coltura secondaria (prodotto fresco al netto degli scarti).

Per quanto riguarda le colture secondarie la situazione descritta dal grafico in Fig. 2.7.3 sulle produzioni risulta poco rappresentativa, poiché nel 2015 è stato trapiantato broccolo al posto del cavolo verza e il trapianto è stato eseguito tardivamente; ciò ha determinato per tutte le tesi l'ottenimento di valori molto bassi in termini di rese. Se il confronto viene fatto per ogni singola annata agraria è riscontrabile come il sistema di fertilizzazione adottato non influenzi significativamente le produzioni non comportando grandi differenze fra i rispettivi trattamenti. Si ricorda che per la gestione della coltura secondaria l'agrotecnica è rimasta invariata fra le tesi e le colture hanno potuto utilizzare solo un effetto residuo della fertilizzazione organica effettuata per la coltura principale.

2.8 Analisi del ciclo vita

Al fine di valutare la sostenibilità ambientale ed economica è stato utilizzato il software GaBi 6. GaBi è un programma di nuova generazione con un potente calcolatore LCA per supportare le seguenti applicazioni aziendali (www.gabi-software.com):

- progettazione in campo ambientale: sviluppo di prodotti che rispondono alle normative ambientali;
- eco-efficienza: ridurre i materiali ed utilizzare l'energia e le risorse nel modo più economico;
- eco-design: sviluppo di prodotti poco impattanti, con minori emissioni di gas serra, riduzione del consumo di acqua e dei rifiuti;

- catene di produzione efficienti: aumentare l'efficienza delle catene di produzione, ad es. progettazione, produzione, fornitura e distribuzione;
- produzione responsabile: sviluppo del processo produttivo che affronta le responsabilità sociali.

Al fine di perseguire gli obiettivi posti a inizio sperimentazione si è utilizzato principalmente il database standard “GaBi Professional” regolarmente aggiornato, il quale è derivato da fonti del settore, da conoscenze scientifiche, letteratura tecnica, e informazioni sui brevetti, creando una solida base per valutare i materiali, i prodotti, i servizi e i processi.

È stato altresì impiegato un secondo database orientato su di un focus maggiormente inerente le pratiche agricole: il database "*Renewable raw materials*". Il database sulle risorse rinnovabili contiene 140 processi relativi a: fertilizzanti, pesticidi, trattori, macchine agricole, prodotti intermedi industriali, e diverse colture (mais, frumento, canapa, lino, soia, etc.).

2.8.1 Definizione degli obiettivi e impostazione del metodo

L'obiettivo di questa analisi è valutare l'impatto ambientale del ciclo di vita derivante dalla differente gestione delle colture coltivate nelle prove di Tetto Frati e Grugliasco sia per stabilirne la sostenibilità dal punto di vista ambientale, sia per poter individuare e proporre eventuali modifiche ai processi di produzione e alle fasi successive che presentano un impatto ambientale rilevante.

Lo studio fa riferimento a tre diverse annate agrarie: 2014-2015-2016, e per tale ragione è stata effettuata anche un'analisi di impatto ambientale utilizzando gli anni come ripetizioni statistiche. L'analisi è stata effettuata secondo gli standard della serie ISO 14040.

È stato necessario suddividere il sistema CarbOnFarm in piani. Ogni piano è caratterizzato da due fattori principali: coltura e tipo di trattamento effettuato in campo. Si sono così ottenuti 9 piani per ogni anno di sperimentazione per un totale di 27 piani (Fig. 2.8.1).

Grandi_cavolo_compost_2014	Grandi_lattuga_Compost_2014	Mais_compost_2014
Grandi_cavolo_compost_2015	Grandi_lattuga_Compost_2015	Mais_compost_2015
Grandi_cavolo_compost_2016	Grandi_lattuga_Compost_2016	Mais_compost_2016
Grandi_cavolo_separato_solido_2014	Grandi_lattuga_separatoS_2014	Mais_separato_2014
Grandi_cavolo_separato_solido_2015	Grandi_lattuga_separatoS_2015	Mais_separato_2015
Grandi_cavolo_separato_solido_2016	Grandi_lattuga_separatoS_2016	Mais_separato_2016
Grandi_cavolo_tradizionale_2014	Grandi_lattuga_Tradizionale_2014	Mais_trad_2014
Grandi_cavolo_tradizionale_2015	Grandi_lattuga_Tradizionale_2015	Mais_trad_2015
Grandi_cavolo_tradizionale_2016	Grandi_lattuga_Tradizionale_2016	Mais_trad_2016

Figura 2.8.1: Rappresentazione schematica dei 27 piani oggetto d'indagine

I confini del sistema sono limiti fisici che delimitano i processi, gli input e gli output di materia ed energia, considerati per l'analisi. Tramite un diagramma di flusso viene descritto il sistema oggetto di studio, rendendo chiaro il campo di azione ed i dati necessari.

All'interno del sistema sono state inserite come input tutte le operazioni colturali; congiuntamente è stato valutato l'impatto generato dalla produzione di tutti i fattori produttivi impiegati: fertilizzanti minerali (azotati, fosfatici e potassici), fertilizzanti organici, agrofarmaci, carburanti e lubrificanti, teli in bioplastica, l'utilizzo e il consumo delle macchine operatrici e il consumo di acqua irrigua. Ogni fattore produttivo è stato considerato e collegato in modo tale di creare un processo unico che termini con la valutazione delle rese delle colture, che rappresentano l'unico output del sistema. A titolo di esempio vengono di seguito riportati in forma schematica alcuni piani e i relativi processi impiegati per l'analisi (Fig. 2.8.2, 2.8.3, 2.8.4, 2.8.5).

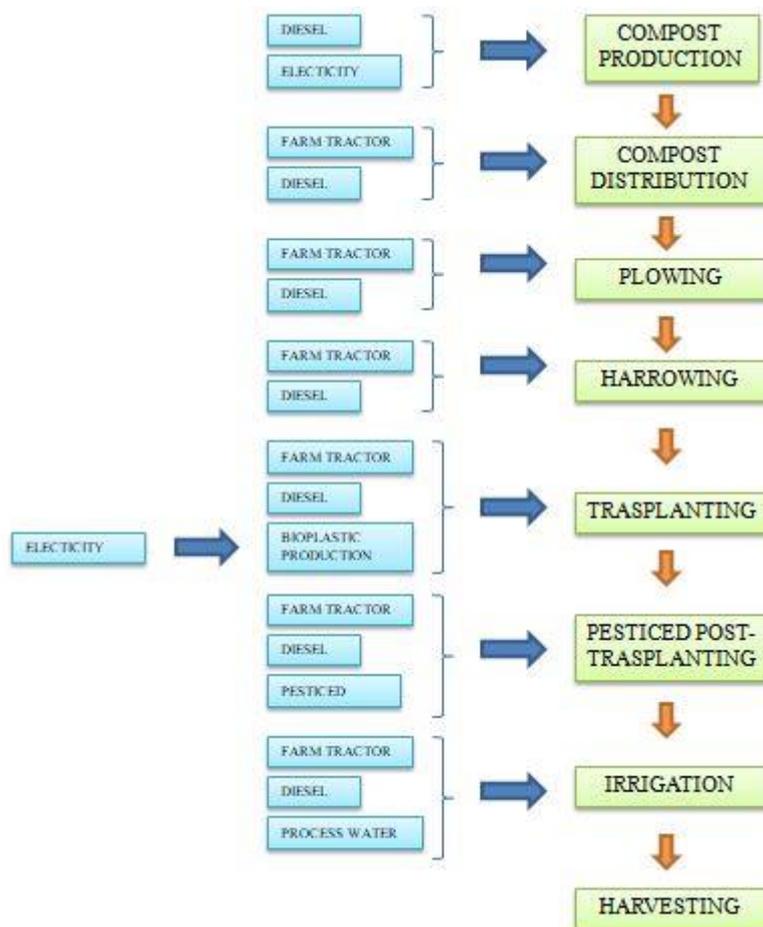


Figura 2.8.2: Schema in dettaglio dei processi che compongono il piano Grandi_Lattuga_Compost_2014

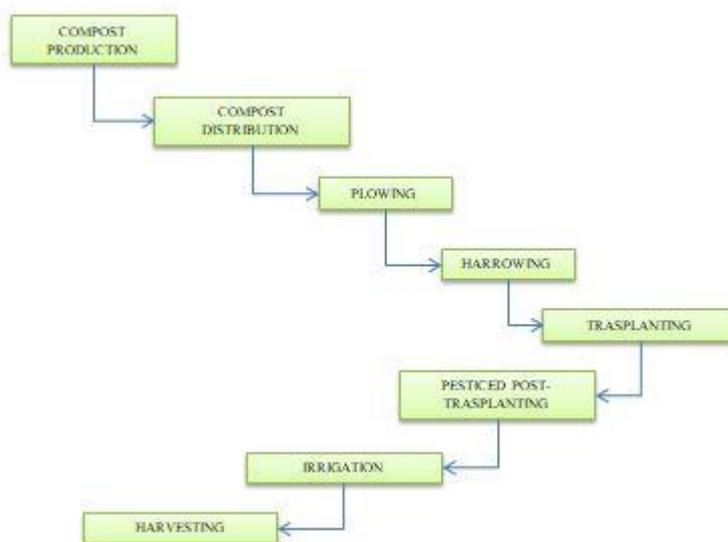


Figura 2.8.3: Schema riassuntivo piano Grandi_Lattuga_Compost_2014

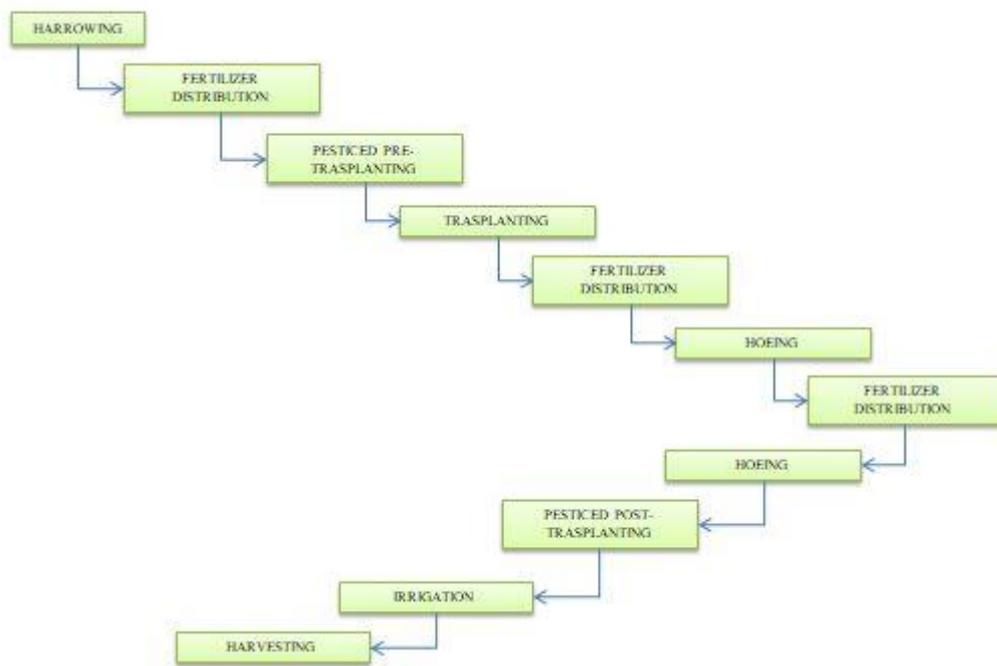


Figura 2.8.4: Schema riassuntivo piano Grandi_Cavolo_Tradizionale_2014

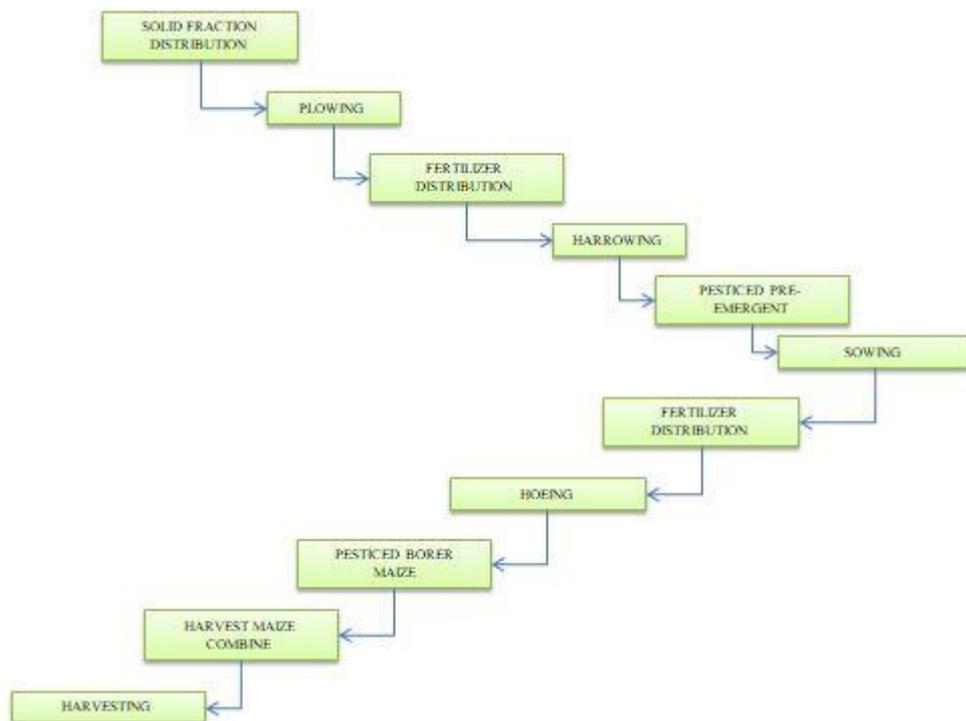


Figura 2.8.5: Schema riassuntivo piano Mais_Separato_2014

Nella seguente tabella (Tab. 2.8.1) vengono elencate le principali componenti calcolate in funzione del tipo di processo, evidenziando quali dati sono stati stimati e desunti dall'agrotecnica, le interviste aziendali e dalle banche dati disponibili e quali sono stati calcolati; a titolo di esempio è stato utilizzato lo schema progettuale del piano Mais_compost_2014.

Tabella 2.8.1: Fonti per il calcolo degli input e degli output

Process	Inventory input	Misurato	Agrotecnica Interviste aziendali	Banche dati
Compost production	Electricity composting	X		X
	Diesel		X	X
Compost use	Farm Tractor		X	X
	Diesel		X	X
	Nutrient dispersion	X	X	X
Plowing	Farm Tractor		X	X
	Diesel		X	X
Fertilizer distribution	Farm Tractor		X	X
	Diesel		X	X
	NPK mixer		X	X
Harrowing	Farm Tractor		X	X
	Diesel		X	X
Pesticides pre-emergent	Farm Tractor		X	X
	Diesel		X	X
	Pesticides		X	X
Sowing	Farm Tractor		X	X
	Diesel		X	X
Fertilizer distribution	Farm Tractor		X	X
	Diesel		X	X
	Urea		X	X
	Nutrient dispersion	X	X	X
Hoeing	Farm Tractor		X	X
	Diesel		X	X
Pesticides borer maize	Farm Tractor		X	X
	Diesel		X	X
	Pesticides		X	X
Harvest machine combine	Farm Tractor		X	X
Harvesting	Grain yield	X		

Gli scenari e le valutazioni d'impatto sono state modellizzati e calcolati mediante il software utilizzando il metodo ILCD (*International Reference Life Cycle Data System*) il

quale rappresenta una raccolta dei migliori metodi di valutazione di impatto ambientale secondo le raccomandazioni della Commissione Europea - Joint Reserach (Notarnicola *et al.*, 2015).

Ciascun piano ha dato origine a degli impatti. Le categorie d'impatto selezionate per il presente lavoro sono:

- Global Warming Potential, including biogenic carbon (secondo il metodo IPCC) (unità di misura: kg CO₂-eq.);
- Acidification, accumulated exceedance (secondo il metodo EDIP) (unità di misura Mole of H⁺ eq.);
- Freshwater Eutrophication Potential (secondo il metodo RECIPE) (unità di misura kg P eq.);
- Terrestrial Eutrophication Potential (secondo il metodo RECIPE) (unità di misura Mole of N eq.)
- Particulate matter/Respiratory inorganics (secondo il metodo RISKPOLL) (kg PM_{2,5}-eq.);
- Total freshwater consumption, including rainwater, (secondo il metodo SWISS ECOSCARCITY) (unità di misura UBP);
- Resource Depletion, fossil and mineral, reserve Based (secondo il metodo CML2002) (unità di misura kg Sb-eq.).

Al fine di confrontare l'impatto delle diverse coltivazioni sullo stesso terreno, durante lo stesso anno, si è scelto di quantificare gli indicatori in funzione della produzione raccolta (kg) e della superficie coltivata (ha).

L'inventario dei dati, associato ai sistemi studiati, è stato raccolto *in situ* presso l'impianto di compostaggio e presso le aziende sperimentali. Utilizzando un foglio di raccolta dati sono state raccolte informazioni sulle quantità di macchinari, carburante, elettricità e altri elementi utilizzati.

2.8.2 Emissioni a valle dell'analisi LCA

L'emissione diretta di NH₃ e N₂O dal campo in seguito alle diverse fertilizzazioni non viene calcolata all'interno dell'LCA, ma è stata inclusa a valle per completare la valutazione. Tale emissione non è stata misurata tramite un metodo analitico sperimentale, ma i valori sono stimati sulla base di fattori di emissione desunti dalla letteratura basate su ricerche analoghe allo studio attuale, sia per i materiali compostati che per le tecnologie

utilizzate per il processo. Anche per quanto riguarda gli eventuali surplus di nutrienti (N, P e K) si è seguito il medesimo approccio.

È stato, quindi, necessario stimare i dati concernenti gli impatti generati dall'apporto di fertilizzanti a valle dei risultati del bilancio LCA ottenuto con GaBi 6. I valori stimati, sono stati aggiunti come contributi delle emissioni calcolate nelle categorie d'impatto derivanti dall'analisi LCA. Per ottenere i dati relativi ai surplus e alle emissioni ammoniacali e di protossido di azoto è stato redatto un bilancio dei nutritivi impiegando la formula di calcolo esplicitata nel PUA regionale presente nell'allego V del DM 7 aprile 2006:

$$(\pm S + An_{atm} \pm Mc + Bfx + Mf + Fo + Fc) - Yb \leq A$$

Con la lettera A si indica il surplus ottenuto dalla differenza fra apporti ($\pm S + An \pm Mc + Bfx + Mf + Fo + Fc$) – asporti Yb. In merito agli apporti si è deciso di non considerare, per mancanza di dati, le voci relative alla mineralizzazione/organizzazione (Mc, S) e all'effetto residuo di apporti di effluenti zootecnici, compost o ammendanti (Mf). L'azotofissazione (Bfx) risulta nulla poiché le colture oggetto di stima non appartengono alla famiglia delle leguminose (fabaceae). Vengono altresì impiegate le voci di apporto relative agli apporti da concimi minerali, organo-minerali o organici (Fc) e agli apporti da effluenti zootecnici, compost o altri ammendanti (Fo) e alle deposizioni atmosferiche secche o umide (An_{atm}). Per la stima degli asporti vengono moltiplicate le produzioni misurate (Y) per i contenuti in elementi nutritivi della coltura (b), misurati nel caso del mais e ricavati da letteratura scientifica nel caso delle orticole (Turchi *et al.*, 1997).

Nelle tabelle seguenti (Tab. 2.8.2, 2.8.3, 2.8.4, 2.8.5, 2.8.6, 2.8.7, 2.8.8, 2.8.9, 2.8.10) vengono riportati, per le tre annate agrarie sopracitate, i valori di surplus/deficit e i relativi indici di efficienza (B) calcolati dal rapporto fra asporti ed apporti in funzione del tipo di gestione colturale in termini di fertilizzazione.

Tabella 02.8.2: Bilancio dei nutrienti TF Mais 2014 (surplus espresso in kg ha⁻¹)

Trattamento	Elementi nutritivi	Surplus
SEPARATO SOLIDO	N	29,06
	P	19,68
	K	-14,23
COMPOST	N	35,19
	P	43,56
	K	-33,16
MIN	N	17,91
	P	38,63
	K	-22,87

Tabella 2.8.3: Bilancio dei nutrienti GRANDI Lattuga 2014 (surplus espresso in kg ha⁻¹)

Trattamento	Elementi nutritivi	Surplus
SEPARATO SOLIDO	N	44,23
	P	63,18
	K	17,63
COMPOST	N	64,25
	P	86,72
	K	-4,13
MIN	N	21,49
	P	11,64
	K	-83,43

Tabella 2.8.4: Bilancio dei nutrienti GRANDI Cavolo 2014 (surplus espresso in kg ha⁻¹)

Trattamento	Elementi nutritivi	Surplus
SEPARATO SOLIDO	N	-53,95
	P	30,53
	K	-14,26
COMPOST	N	-31,75
	P	33,28
	K	7,24
MIN	N	-16,30
	P	35,19
	K	22,21

Tabella 2.8.5: Bilancio dei nutrienti TF Mais 2015 (surplus espresso in kg ha⁻¹)

Trattamento	Elementi nutritivi	Surplus
SEPARATO SOLIDO	N	52,49
	P	19,25
	K	106,88
COMPOST	N	63,34
	P	56,28
	K	128,24
MIN	N	26,33
	P	17,48
	K	97,04

Tabella 2.8.6: Bilancio dei nutrienti GRANDI Lattuga 2015 (surplus espresso in kg ha⁻¹)

Trattamento	Elementi nutritivi	Surplus
SEPARATO SOLIDO	N	24,08
	P	-2,63
	K	-62,84
COMPOST	N	34,48
	P	32,97
	K	-60,24
MIN	N	10,42
	P	-16,09
	K	-90,46

Tabella 2.8.7: Bilancio dei nutrienti GRANDI Broccolo 2015 (surplus espresso in kg ha⁻¹)

Trattamento	Elementi nutritivi	Surplus
SEPARATO SOLIDO	N	-81,99
	P	0,62
	K	-87,14
COMPOST	N	-121,56
	P	-8,32
	K	-132,46
MIN	N	-42,09
	P	9,62
	K	-41,47

Tabella 2.8.8: Bilancio dei nutrienti TF Mais 2016 (surplus espressi in kg ha⁻¹)

Trattamento	Elementi nutritivi	Surplus
SEPARATO SOLIDO	N	16,29
	P	61,72
	K	143,68
COMPOST	N	41,04
	P	135,14
	K	159,36
MIN	N	7,43
	P	19,45
	K	138,36

Tabella 2.8.9: Bilancio dei nutrienti GRANDI Lattuga 2016 (surplus espresso in kg ha⁻¹)

Trattamento	Elementi nutritivi	Surplus
SEPARATO SOLIDO	N	27,37
	P	34,48
	K	-77,52
COMPOST	N	37,35
	P	104,51
	K	-77,25
MIN	N	-1,46
	P	-2,79
	K	-131,69

Tabella 2.8.10: Bilancio dei nutrienti GRANDI Cavolo 2016 (surplus espresso in kg ha⁻¹)

Trattamento	Elementi nutritivi	Surplus
SEPARATO SOLIDO	N	172,45
	P	58,53
	K	205,00
COMPOST	N	171,65
	P	58,43
	K	204,22
MIN	N	171,06
	P	58,35
	K	203,66

Per il calcolo delle emissioni di ammoniaca e protossido di azoto sono state applicate le linee guida EMEP/EEA. Le linee guida differenziano tra il calcolo per i fertilizzanti e quelli minerali. Per quanto riguarda i fertilizzanti organici la metodologia Tier 1 prevede l'applicazione di un fattore di emissione moltiplicato per il quantitativo di azoto effettivamente apportato al campo.

Calcolo delle emissioni di ammoniaca:

$$E = \sum m_N * EF$$

E= emissione di NH₃ (kg NH₃ ha⁻¹ a⁻¹)

mN = quantitativo di N apportato per tipo di fertilizzante (kg NH₃ (kg N)⁻¹)

Calcolo delle emissioni di ammoniaca:

$$E = \sum m_N * EF$$

E= emissione di NH₃ (kg N₂O ha⁻¹ a⁻¹)

mN = quantitativo di N apportato per tipo di fertilizzante (kg N₂O (kg N)⁻¹)

Per stimare le emissioni sono stati moltiplicati gli apporti organici e minerali per i corrispettivi fattori emissivi, qui di seguito riportati:

- per le emissioni di NH₃:
 - fattore emissione fertilizzanti organici: 0,084
 - fattore emissione urea: 0,1067+0,0035
 - fattore emissione fertilizzante minerale ternario: 0,0080+0,0001
- per le emissioni di N₂O:
 - fattore emissione fertilizzanti organici e minerali: 0.01

Si ricorda che i valori espressi in kg di protossido di azoto sono stati calcolati secondo la seguente formula: kg di N * 0.01 * 44/28, dove il rapporto 44/28 permette il passaggio da N atomico a N₂O.

Per essere utilizzato ai fini del bilancio ambientale le emissioni di N₂O sono state convertite in CO₂ equivalenti mediante il relativo valore GWP calcolato per un intervallo di tempo di 100 anni pari a 298 (IPCC Fifth Assessment Report, 2014 - AR5).

Nelle successive tabelle vengono riportati i valori riferiti alle emissioni dirette di ammoniaca e protossido di azoto (espressi in kg ha⁻¹ di NH₃ e kg ha⁻¹ di CO₂-eq.).

Tabella 1.8.11: Emissioni di NH₃, espresse in kg ha⁻¹, stimate per il sito di Tetto Frati

Trattamento	2014		2015		2016	
	Organici	Minerali	Organici	Minerali	Organici	Minerali
SEPARATO SOLIDO	7,37	10,15	7,34	9,81	8,73	8,82
COMPOST	9,06	10,15	9,36	9,81	10,05	8,82
MIN	0,00	22,04	0,00	22,04	0,00	22,04

Tabella 2.8.12: Emissioni di NH₃, espresse in kg ha⁻¹, stimate per il sito di Grugliasco

Trattamento	2014		2015		2016	
	Organici	Minerali	Organici	Minerali	Organici	Minerali
SEPARATO SOLIDO	7,37	0,00	7,34	0,00	8,73	0,00
COMPOST	9,06	0,00	9,36	0,00	10,05	0,00
MIN	0,00	6,61	0,00	6,61	0,00	6,61

Tabella 2.8.13: Emissioni di N₂O, espresse in CO₂-equivalenti, stimate per il sito di Tetto Frati

Trattamento	2014		2015		2016	
	Organici	Minerali	Organici	Minerali	Organici	Minerali
SEPARATO SOLIDO	410,66	431,45	409,40	416,77	486,89	374,63
COMPOST	505,12	431,45	521,98	416,77	560,47	374,63
MIN	0,00	936,57	0,00	936,57	0,00	936,57

Tabella 2.8.14: Emissioni di N₂O, espresse in CO₂-equivalenti, stimate per il sito di Grugliasco

Trattamento	2014		2015		2016	
	Organici	Minerali	Organici	Minerali	Organici	Minerali
SEPARATO SOLIDO	410,66	0,00	409,40	0,00	486,89	0,00
COMPOST	505,12	0,00	521,98	0,00	560,47	0,00
MIN	0,00	280,97	0,00	280,97	0,00	280,97

Per quanto riguarda la coltura orticola secondaria, i valori calcolati non differiscono fra i diversi trattamenti e le tre annate agrarie poiché gli input in termini di fertilizzazione, esclusivamente minerali, sono i medesimi. I valori di emissione ammoniacale sono a pari a 4,04 kg ha⁻¹ di NH₃ e le emissioni di protossido di azoto equivalgono a 707,58 kg ha⁻¹ di CO₂-eq.

I dati ottenuti dal calcolo dei bilanci nutritivi e i valori di emissioni sono stati utilizzati in tutti i piani dell'analisi LCA ed inseriti come voci di output (valori di emissione) nei processi riferiti all'impiego di fertilizzanti organici e minerali, ricordando che i surplus non sono scorparabili dei contributi relativi le due differenti fertilizzazioni e sono stati inseriti in un unico processo per piano. Il contributo dei presenti dati è andato ad integrarsi con le altre emissioni derivanti dai processi, contribuendo agli effettivi impatti in termini di categorie d'impatto quali Particulate matter/Respiratory inorganics, Global Warming Potential e Terrestrial Eutrophication Potential.

2.8.3 Analisi di inventario

Nella fase di inventario vengono contabilizzati i flussi di materia e di energia in entrata e in uscita, le emissioni in aria, acqua e nel terreno che interessano la fase di produzione dei fertilizzanti utilizzati e la loro distribuzione.

Nell'analisi di inventario un passo fondamentale è stato quello della raccolta dei dati. I dati relativi ad input e output dei vari processi sono stati reperiti principalmente dall'Azienda Grandi per quanto riguarda il sito di Grugliasco e dal DISAFA per il sito di Tetto Frati (dati primari) e sono stati elaborati con riferimento all'unità funzionale. Tutte le informazioni ottenute durante la raccolta dati sono state implementate nel software GaBi6. Sulla base dei risultati di inventario è stata effettuata l'analisi degli impatti, con lo scopo di evidenziare l'entità delle modificazioni ambientali che si generano a seguito dei rilasci nell'ambiente e del consumo di risorse associate alla produzione delle varie materie prime nonché al ciclo di vita relativo alle differenti gestioni colturali nelle diverse annate agrarie.

2.8.4 Assunzioni

Nella fase di progettazione dei piani all'interno del programma, sono state operate alcune scelte, che, in dettaglio, hanno comportato: l'eliminazione di alcuni processi, quali l'impatto generato dalla produzione di sementi e la fase di produzione del digestato, mantenendo i confini del sistema a valle della produzione di digestato. Il contributo alle emissioni e quindi agli impatti generato dalla produzione delle sementi risulta tanto basso quanto ininfluenza per un confronto, poiché il dato si equivale in tutti i piani. Per quanto riguarda la produzione di digestato è stato scelto di valutare gli impatti ambientali a partire da quanto "prodotto" nel biodigestore considerando il separato solido ricavato come impatto neutralizzato dalla produzione di energia verde derivante da biogas. Tuttavia è risultato interessante differenziare la produzione di compost dalla distribuzione del

separato solido, inserendo il processo “compost production” che considera l’energia e il carburante necessari per le diverse fasi di compostaggio (rivoltamenti, vagliatura e insufflazione di aria).

2.9 Analisi statistica

I risultati del bilancio ambientale relativo alla valutazione LCA sono stati analizzati con il metodo ANOVA (analisi della varianza) esaminando separatamente mais e lattuga e considerando nel modello gli effetti principali del trattamento fertilizzante e dell’anno. Per gli effetti significativi ($P(F)$ inferiore a 0.05) è stato applicato il test post-hoc SNK.

Le analisi statistiche sono state condotte mediante l’applicazione del software statistico SPSS 24.

2.10 Bilanci energetici ed economici

Oltre al bilancio ambientale, per ogni trattamento, coltura e annata agraria sono stati redatti un bilancio energetico ed uno economico. Prima della fase di progettazione si sono ricercati tutti i dati utili relativi all’agrotecnica e ai fattori e mezzi produttivi (biologici e non) impiegati. I bilanci sono stati realizzati inserendo in tabella, per ogni piano, le differenti quantità (in kg o convertite in kg) riferite ai mezzi produttivi utilizzati e alle quantità raccolte. Nel bilancio economico i valori inseriti sono stati moltiplicati per il relativo fattore energetico riconducibile al tipo di materiale, espresso in MJ kg^{-1} , e successivamente sono state calcolate mediante somma algebrica le voci in passivo e in attivo ed è stato conseguentemente ottenuto per differenza il surplus o il deficit energetico. Sono stati utilizzati, per quanto riguarda i fattori energetici, i dati presenti nella pubblicazione di Gaudino *et al.* (2014). In quanto alle voci riferite alla bioplastica utilizzata per i teli pacciamanti sono stati utilizzati i dati presenti nell’articolo di Razza e Cerutti (2017). Si ricorda che non è stata conteggiata l’energia umana, poiché si tratta di un dato che non influisce sul confronto tra diversi trattamenti. Inoltre, il valore energetico di surplus o deficit risulta molto interessante poiché raffrontabile fra i diversi sistemi di nutrizione oggetto di sperimentazione. Anche per il bilancio economico le quantità inserite, espresse in kg o tonnellate, sono state moltiplicate, ma in questo caso, per il valore monetario riferito al tipo di materiale/prodotto ricavando le voci di spesa e di ricavo. I prezzi utilizzati sono stati reperiti direttamente dall’agricoltore, dalle banche dati della Camera di Commercio di Torino e dal sito dell’Istituto di servizi per il mercato agricolo

alimentare - ISMEA. È stata infine calcolata la voce di profitto o di perdita utile alla valutazione economica e quindi al confronto delle diverse tipologie di gestione colturale nei diversi anni.

3. Risultati e Discussioni

3.1 Bilancio ambientale LCA

3.1.1 Mais: sintesi del triennio.

I principali valori di impatto generati dai trattamenti nel triennio di sperimentazione considerato sono ripostati in Tab.3.1.

Tabella 3.1: Principali impatti dei trattamenti a confronto nel triennio, sulla coltura del mais, nel sito di Tetto Frati.

Anno	Trattamento	Acidification, accumulated exceedance [Mole of H ⁺ eq.]	Freshwater eutrophication [kg P eq]	Global warming, incl biogenic carbon [kg CO ₂ -Equiv.]	Particulate matter/Respiratory inorganics [kg PM2,5-Equiv.]	Resource Depletion, fossil and mineral [kg Sb-Equiv.]	Terrestrial eutrophication, accumulated exceedance [Mole of N eq.]	Total freshwater consumption, including rainwater [UBP]
2014	COMPOST	66.54	43.57	814.39	1.73	0.0038	302.06	2 453.26
	SEPARATO SOLIDO	60.74	19.68	775.76	1.59	0.0037	276.69	1 703.82
	MIN	73.69	38.63	876.25	1.81	0.0041	333.02	1 433.66
2015	COMPOST	66.80	56.29	839.33	1.76	0.0039	303.34	119 222.84
	SEPARATO SOLIDO	59.99	19.25	812.62	1.60	0.0039	273.36	118 479.07
	MIN	74.13	17.48	915.07	1.84	0.0042	335.10	118 209.57
2016	COMPOST	65.83	135.15	854.87	1.74	0.0040	298.78	41 707.32
	SEPARATO SOLIDO	61.20	61.73	816.24	1.63	0.0040	278.69	40 957.88
	MIN	74.02	19.45	904.97	1.84	0.0044	334.39	40 681.78
Media per trattamento	COMPOST	66.39 b	78.34	836.19 b	1.74 b	0.0039 b	301.40 b	54 461.14 a
	SEPARATO SOLIDO	60.65 c	33.55	801.54 c	1.61 c	0.0039 b	276.25 c	53 713.59 b
	MIN	73.94 a	25.19	898.76 a	1.83 a	0.0042 a	334.17 a	53 441.67 c
Media per anno	2014	66.99	33.96	822.13 b	1.71	0.0038 c	303.92	1 863.58 c
	2015	66.65	57.30	860.85 a	1.73	0.0040 b	302.41	92 798.66 a
	2016	67.02	72.11	858.69 a	1.74	0.0041 a	303.95	41 115.66 b
<i>P(F) trattamento</i>		0.000	ns	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
<i>P(F) anno</i>		ns	ns	0.005	ns	0.000	ns	0.000

Analizzando i dati medi del triennio di prova, il trattamento MIN ha registrato i valori più elevati per cinque indicatori (acidification, GWP, particulate matter, resource depletion e terrestrial eutrophication) risultando più impattante rispetto ai sistemi di gestione con

COMPOST e SEPARATO SOLIDO; quest'ultimo si attesta come il trattamento meno inquinante. Per quanto riguarda gli indicatori freshwater eutrophication e total freshwater consumption, la fertilizzazione con urea ha riportato valori più bassi rispetto agli altri trattamenti e i valori più elevati sono quelli stimati per il trattamento COMPOST.

Analizzando più in dettaglio i valori riportati e quindi considerando singolarmente ogni categoria di impatto, si riscontra che sono state registrate differenze significative per gli indicatori: acidificazione, riscaldamento globale, particolato, esaurimento delle risorse, eutrofizzazione terrestre e consumo totale delle acque dolci. I test post-hoc descrivono il SEPARATO SOLIDO come meno impattante rispetto al COMPOST e il MIN come il più inquinante per le categorie di impatto acidificazione, riscaldamento globale, particolato, esaurimento delle risorse ed eutrofizzazione delle acque; nel solo caso del consumo idrico si inverte la tendenza con valori più elevati nel COMPOST e più bassi nel trattamento MIN. L'analisi della varianza non ha individuato differenze significative per quanto riguarda l'eutrofizzazione delle acque dolci, per via della grande variabilità dei dati, legata ad alcuni processi che verranno successivamente evidenziati.

L'anno ha causato effetti significativi soltanto per le categorie di impatto di riscaldamento globale (per via di alcuni processi che saranno descritti nel paragrafo 3.1.1.3), consumo delle risorse (come evidenziato nel paragrafo 3.1.1.5) e consumo delle acque dolci, a causa del differente numero di interventi irrigui durante i tre anni in funzione delle condizioni climatiche stagionali (come rappresentato nei grafici e tabelle del paragrafo 3.1.1.7).

Nei paragrafi che seguono verranno descritte e commentate singolarmente le categorie di impatto ambientale, anche distinguendo i contributi relativi ai diversi input.

3.1.1.1 Acidification/acidificazione

Nel presente paragrafo verrà descritto, per ognuno degli input relativi ai processi che costituiscono il sistema progettuale alla base dell'analisi LCA, il contributo in termini quantitativi e percentuali alla generazione dell'impatto acidificazione.

Tabella 3.2: Impatto di Acidificazione (Mole of H+ eq.) dei diversi trattamenti negli anni, scorporato nei diversi input, sulla coltura mais nel sito di Tetto Frati.

	Input	2014	2015	2016
COMPOST	Diesel	0,60	0,62	0,65
	Compost Use	29,87	30,81	32,99
	Farm Tractor	0,14	0,27	0,28
	Fertiliser Use	32,21	31,11	28,02
	Pesticides Production	0,13	0,12	0,13
	NPK Production	0,71	0,68	0,70
	Cultivation Operations	2,45	2,21	2,45
	Electricity Composting	0,43	0,43	0,43
	IrrigationPump		0,55	0,18
SEPARATO SOLIDO	Diesel	0,58	0,59	0,62
	Farm Tractor	0,14	0,27	0,28
	Fertiliser Use	32,21	31,11	28,02
	Pesticides Production	0,13	0,12	0,13
	Separato Solido Use	24,53	24,43	28,82
	NPK Production	0,71	0,71	0,70
	Cultivation Operations	2,45	2,21	2,45
	IrrigationPump		0,55	0,18
MIN	Diesel	0,43	0,45	0,48
	Farm Tractor	0,11	0,24	0,25
	Fertiliser Use	69,36	69,36	69,36
	Pesticides Production	0,13	0,12	0,13
	NPK Production	1,20	1,20	1,17
	Cultivation Operations	2,45	2,21	2,45
	IrrigationPump		0,55	0,18

L'indicatore acidificazione ha registrato valori elevati nel trattamento MIN, a cui segue il COMPOST e infine il SEPARATO SOLIDO.

In tabella 3.2 si nota che la ragione principale per cui la gestione con concime minerale risulta la più impattante corrisponde alla voce di input "fertiliser use". In particolare, la somministrazione di azoto genera volatilizzazione dell'ammoniaca e successive deposizioni atmosferiche, che contribuiscono all'acidificazione dei suoli, attraverso il processo di nitrificazione. A parità di input azotati, il MIN ha un impatto maggiore del COMPOST per via dei fattori di emissione suggeriti dall'EMEP/EEA che sono 8.4% per i fertilizzanti organici e 11.02% per l'urea. Il COMPOST risulta più inquinante rispetto all'utilizzo del separato, per via dell'incidenza della fase di compostaggio, che comprende i rivoltamenti -con consumo di diesel per il funzionamento delle macchine rivoltatrici- e le operazioni di vagliatura e insufflaggio di aria nel cumulo -con consumo di elettricità. I

processi di produzione di energia elettrica e estrazione/produzione di carburanti generano, infatti, tra gli output, molti elementi acidificanti, tra i quali il solfato e l'anidride carbonica. La combustione stessa del diesel produce ossidi di azoto, che sono agenti acidificanti.

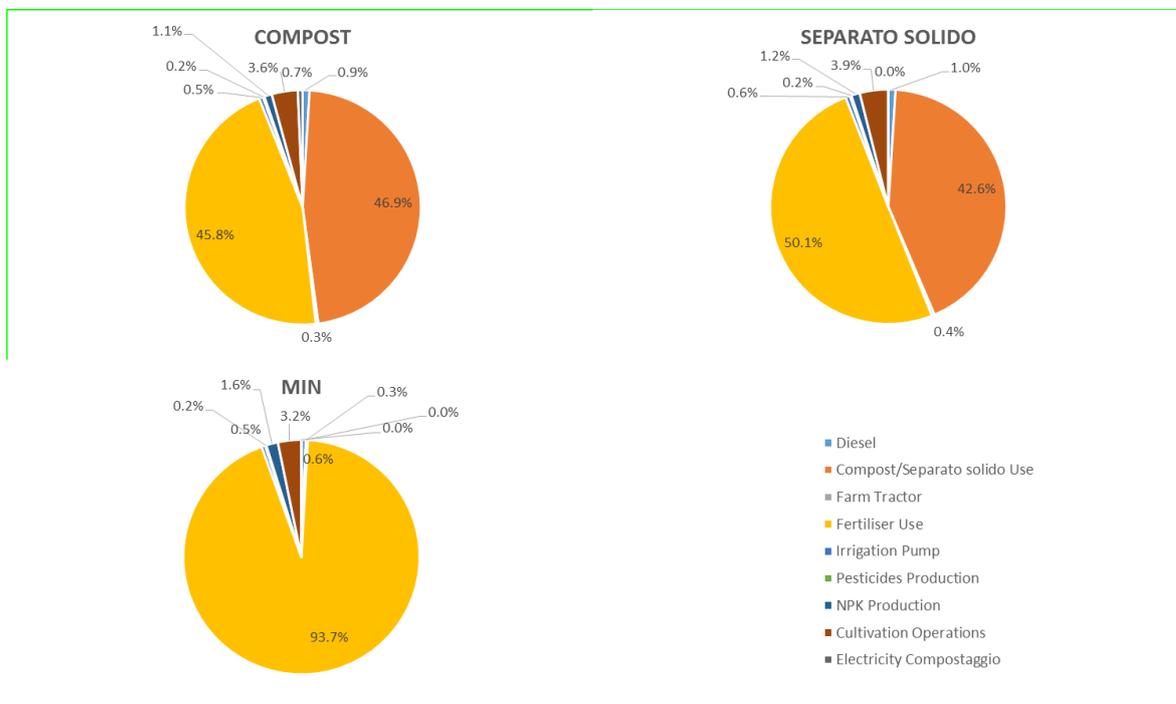


Figura 3.1: Contributo percentuale dei diversi input all’impatto di acidificazione per i diversi trattamenti negli anni di sperimentazione, sulla coltura mais, nel sito di Tetto Frati.

Per tutti e tre i trattamenti, le voci di input del bilancio maggiormente impattanti sono le operazioni di fertilizzazione, sia minerale sia organica. Nel caso del trattamento MIN, a gestione interamente minerale, tale voce costituisce la quasi totalità dell’impatto (circa il 94%), mentre per i trattamenti organici si distinguono le due tipologie di apporto, con un’incidenza relativa leggermente diversa: nel trattamento COMPOST, l’uso dell’organico incide per circa il 47% e l’uso del minerale per circa il 46%; nel caso del SEPARATO SOLIDO, l’organico incide per il 43% e il minerale per il 50%. La maggiore incidenza dell’uso del compost è, come detto precedentemente, legato all’uso di elettricità e compost durante le operazioni di compostaggio.

Seguono le altre operazioni colturali e mentre tutte le altre componenti hanno un’incidenza minima.

3.1.1.2 Freshwater eutrophication/Eutrofizzazione delle acque

L'eutrofizzazione delle acque dolci presenta valori elevati per la gestione con COMPOST, segue il SEPARATO SOLIDO e il MIN, anche se le differenze tra i trattamenti non sono statisticamente significative.

Nelle seguenti tabella e grafici verrà descritto per ogni input, facenti parte dei processi LCA, il contributo in termini quantitativi e percentuali alla generazione dell'impatto eutrofizzazione delle acque dolci.

Tabella 2.3: Impatto di Eutrofizzazione delle acque di falda (kg P eq.) dei diversi trattamenti negli anni, scorporato nei diversi input, sulla coltura mais, nel sito di Tetto Frati.

	Input	2014	2015	2016
COMPOST	Diesel	0,003172	0,003269	0,003419
	Compost Use	43,56	56,28	135,14
	Farm Tractor	0,000586	0,001127	0,001159
	Fertiliser Use	0	0	0
	Pesticides Production	0,0002	0,000188	0,0002
	NPK Production	0,000446	0,000433	0,00045
	Cultivation Operations	0	0	0
	Electricity Composting	0,003637	0,003637	0,003637
	IrrigationPump		0	0
SEPARATO SOLIDO	Diesel	0,0030	0,0031	0,0033
	Farm Tractor	0,0006	0,0011	0,0012
	Fertiliser Use	0,00	0,00	0,00
	Pesticides Production	0,0002	0,0002	0,0002
	Separato Solido Use	19,68	19,25	61,72
	NPK Production	0,0004	0,0005	0,0004
	Cultivation Operations	0,00	0,00	0,00
	IrrigationPump	0,00	0,00	0,00
MIN	Diesel	0,0023	0,0024	0,0025
	Farm Tractor	0,0005	0,0010	0,0010
	Fertiliser Use	38,63	17,48	19,45
	Pesticides Production	0,0002	0,0002	0,0002
	NPK Production	0,0008	0,0008	0,0007
	Cultivation Operations	0,00	0,00	0,00
	IrrigationPump		0,00	0,00

L'impatto è costituito sostanzialmente dalla dispersione nelle acque profonde e superficiali di N e P (oltre che delle deposizioni secche legate alla volatilizzazione di NH₃) ed è pertanto generato primariamente dalle pratiche di fertilizzazione, che forniscono questi due elementi al sistema. Il meccanismo di calcolo di questo impatto si basa sui surplus di questi

due elementi. Il trattamento COMPOST risulta maggiormente impattante rispetto agli altri trattamenti, a causa del surplus (corrispondente alla quota di N e P non utilizzata dalle piante e considerata come parzialmente dispersa nell'ambiente) più elevato, dettato dalle produzioni minori (paragrafo 2.6.2). È importante osservare che non è stato possibile scorporre l'impatto legato ai surplus nei diversi interventi di fertilizzazione (organica e minerale) e che quanto appare concentrato nelle voci "compost use" (per il trattamento COMPOST) e "separato solido use" (per il trattamento SEPARATO SOLIDO) è responsabilità dell'intero piano di concimazione, che include anche le somministrazioni di P minerale in presemina e di N minerale in copertura.

In Fig. 3.2 vengono riportati contributi percentuali dei diversi input nella determinazione dell'eutrofizzazione delle acque per i tre trattamenti. Si conferma che l'uso dei fertilizzanti costituisce la quasi totalità dell'impatto.

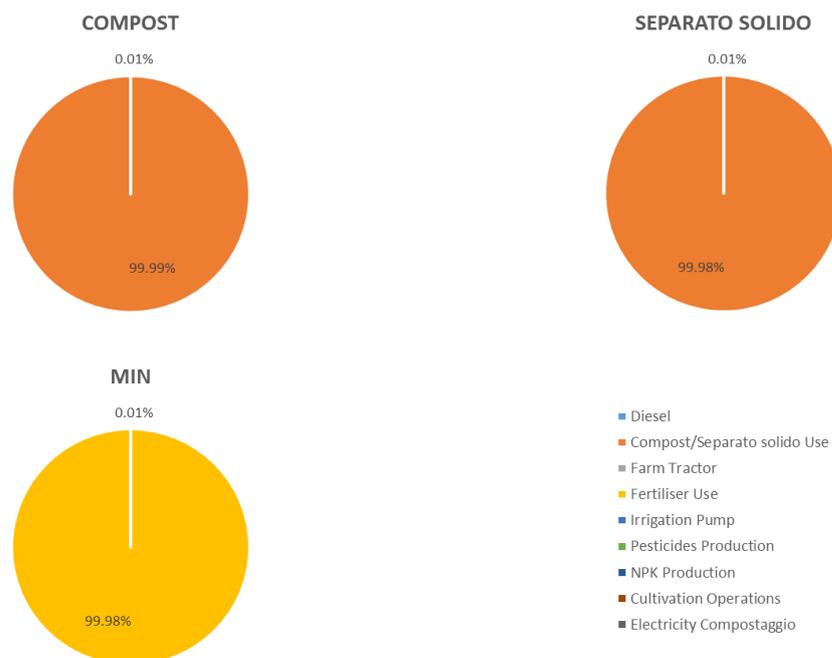


Figura 3.2: Contributo dei diversi input all'impatto di eutrofizzazione delle acque dolci (espresso in percentuale) per i diversi trattamenti negli anni di sperimentazione, sulla coltura mais, nel sito di Tetto Frati.

3.1.1.3 Global Warming Potential/Riscaldamento globale

La categoria Global Warming Potential ha registrato i valori di CO₂ equivalente più bassi per il SEPARATO SOLIDO, segue subito dopo il COMPOST e infine il MIN.

In Tab.3.4 si riporta per ogni input, relativo all'analisi LCA, il contributo alla generazione dell'impatto potenziale di riscaldamento globale.

Tabella 3.4: Impatto di Global Warming Potential (kg CO₂-eq.) dei diversi trattamenti negli anni, scorporato nei diversi input, sulla coltura mais, nel sito di Tetto Frati.

	Input	2014	2015	2016
COMPOST	Diesel	46,63	48,06	50,26
	Compost Use	103,56	103,56	103,56
	Farm Tractor	25,75	49,54	50,94
	Fertiliser Use	39,83	39,83	39,83
	Pesticides Production	41,94	39,28	41,94
	NPK Production	316,91	305,90	317,47
	Cultivation Operations	203,13	183,22	203,13
	Electricity Composting	36,64	36,64	36,64
	IrrigationPump		33,30	11,10
SEPARATO SOLIDO	Diesel	44,64	46,07	48,28
	Farm Tractor	25,75	49,54	50,94
	Fertiliser Use	39,83	39,83	39,83
	Pesticides Production	41,94	39,28	41,94
	Separato Solido Use	103,56	103,56	103,56
	NPK Production	316,91	317,82	317,47
	Cultivation Operations	203,13	183,22	203,13
	IrrigationPump		33,30	11,10
MIN	Diesel	33,19	34,62	36,82
	Farm Tractor	20,15	43,94	45,34
	Fertiliser Use	39,83	39,83	39,83
	Pesticides Production	41,94	39,28	41,94
	NPK Production	538,01	540,88	526,81
	Cultivation Operations	203,13	183,22	203,13
	IrrigationPump		33,30	11,10

Si osserva un'elevata incidenza delle voci riferite alla produzione di concimi minerali, con un alto contributo dell'urea. Incidono anche alcune lavorazioni come l'aratura e l'erpicoltura. La fertilizzazione minerale ha comportato minori emissioni, legate ad un uso minore di diesel durante le fasi (più brevi) di distribuzione rispetto ai trattamenti con fertilizzanti organici. Questi vantaggi non hanno controbilanciato l'impatto legato alla

produzione di urea. Il COMPOST; inoltre, ha rispetto agli altri trattamenti un impatto legato al consumo di diesel e energia elettrica durante le fase di compostaggio.

Si riscontra un'elevata variabilità fra gli anni nei vari input. Questo è dovuto alla variabilità climatica interannuale che ha portato a non irrigare nel 2014 (valori inferiori di “farm tractor”, “diesel” e “irrigation pump”).

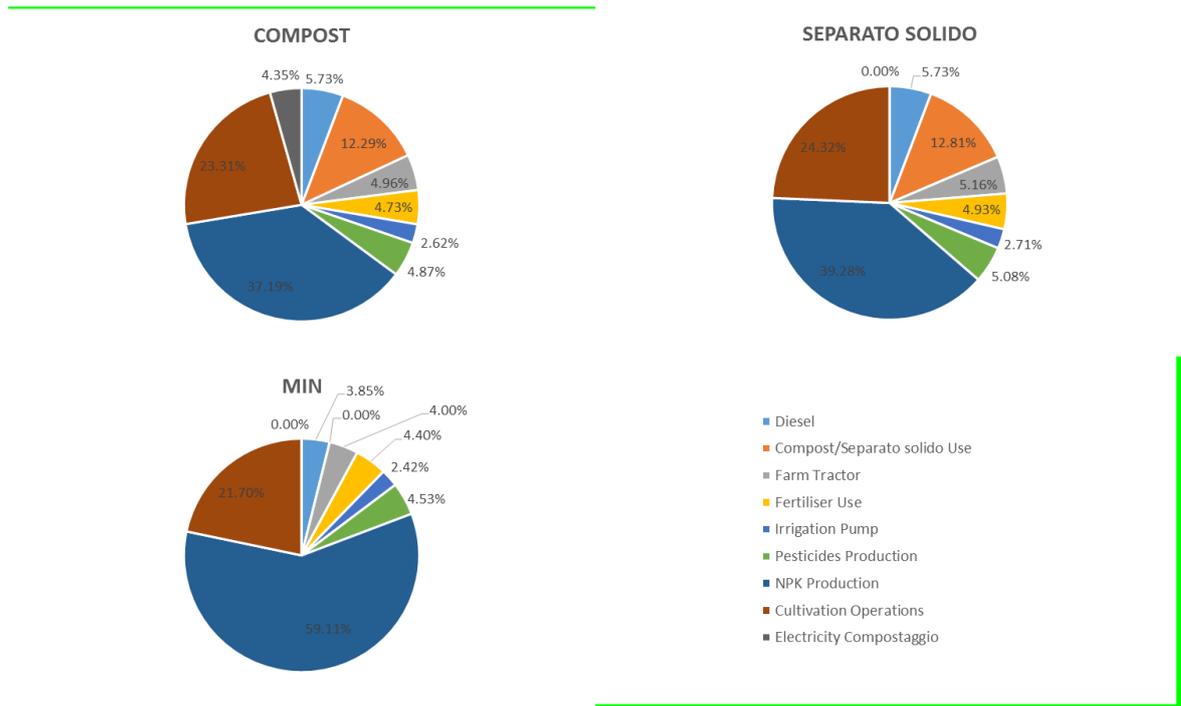


Figura 3.3: Contributo dei diversi input all’impatto di potenziale di riscaldamento globale (espresso in percentuale) per i diversi trattamenti negli anni di sperimentazione, sulla coltura mais, nel sito di Tetto Frati.

Per il trattamento COMPOST, i contributi maggiori sono connessi alla produzione dei concimi minerali con dei valori pari a 37,19%, alle operazioni colturali che incidono per il 23,31% (principalmente aratura ed erpicatura), alla distribuzione di compost con un valore di 12,29% e all'elettricità impiegata nella fase di compostaggio pari a 4,35% (Fig.3.3).

I contributi maggiori per il trattamento SEPARATO SOLIDO sono legati alla produzione dei concimi minerali con dei valori pari a 39,28%, alle operazioni colturali che incidono per il 24,32% (principalmente aratura ed erpicatura) e all'impiego di separato solido pari a 12,81%, comprendente la fase di distribuzione e le emissioni connesse.

I contributi maggiori descritti per la gestione MIN sono prevalentemente riferiti alla produzione dei concimi minerali con dei valori pari a 59,11%, alle operazioni colturali che

incidono per il 21,70% (principalmente aratura ed erpicatura); seguono la produzione di agrofarmaci e le altre componenti con valori di minor entità.

3.1.1.4 Particulate matter/Particolato fine

L'indicatore particolato riprende la situazione che si verifica per il GWP con il trattamento MIN che risulta più impattante rispetto a COMPOST e SEPARATO SOLIDO.

In Tab. 3.5 si riporta per ogni input, relativo ai processi che costituiscono il sistema progettuali alla base dell'analisi LCA, il contributo alla generazione dell'impatto emissioni di particolato.

Tabella 3.5: Impatto di Materia particolata(kg PM_{2,5}-eq.) dei diversi trattamenti negli anni, scorporato nei diversi input, sulla coltura mais, nel sito di Tetto Frati.

	Input	2014	2015	2016
COMPOST	Diesel	0,02	0,02	0,02
	Compost Use	0,71	0,73	0,78
	Farm Tractor	0,02	0,05	0,05
	Fertiliser Use	0,72	0,70	0,63
	Pesticides Production	0,01	0,01	0,01
	NPK Production	0,02	0,02	0,02
	Cultivation Operations	0,19	0,17	0,19
	Electricity Composting	0,02	0,02	0,02
	IrrigationPump		0,03	0,01
SEPARATO SOLIDO	Diesel	0,02	0,02	0,02
	Farm Tractor	0,02	0,05	0,05
	Fertiliser Use	0,72	0,70	0,63
	Pesticides Production	0,01	0,01	0,01
	Separato Solido Use	0,60	0,60	0,69
	NPK Production	0,02	0,02	0,02
	Cultivation Operations	0,19	0,17	0,19
	IrrigationPump		0,03	0,01
MIN	Diesel	0,02	0,02	0,02
	Farm Tractor	0,02	0,04	0,04
	Fertiliser Use	1,53	1,53	1,53
	Pesticides Production	0,01	0,01	0,01
	NPK Production	0,04	0,04	0,04
	Cultivation Operations	0,19	0,17	0,19
	IrrigationPump		0,03	0,01

Per ragioni diverse, l'indicatore particolato riprende la situazione che si verifica per il GWP con il trattamento MIN che risulta più impattante rispetto a COMPOST ed il SEPARATO SOLIDO principalmente per via dell'elevato contributo da parte della voce

relativa all'impiego di concimi minerali che, a parità di apporti, comporta una volatilizzazione più elevata dell'ammoniaca (precursore dei PM), a causa di un superiore fattore emissivo. I due trattamenti organici si differenziano prevalentemente a causa dei processi legati alle fasi di compostaggio come si può anche osservare in Fig. 3.4.

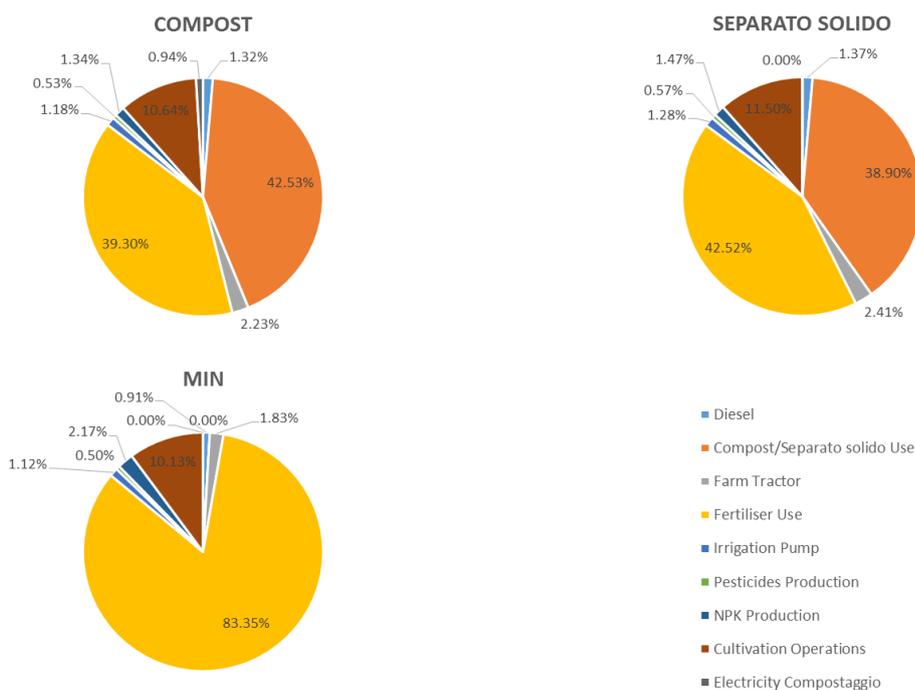


Figura 3.4: Contributo dei diversi input all'impatto di materiale particolato (espresso in percentuale) per i diversi trattamenti negli anni di sperimentazione, sulla coltura mais, nel sito di Tetto Frati.

Le distribuzioni di fertilizzanti e le emissioni dirette e indirette connesse all'impiego di concimi minerali, compost e separato solido incidono prevalentemente sul totale dell'impatto considerato, dal momento che l'impatto è prevalentemente legato alla volatilizzazione di ammoniaca, che contribuisce alla formazione del particolato. Seguono le operazioni colturali dove i contributi maggiori sono riconducibili alle operazioni di aratura. Tutte le operazioni che prevedono la combustione del diesel producono precursori del particolato, come il CO e gli NO_x.

3.1.1.5 Resource Depletion/Esaurimento delle risorse

L'esaurimento delle risorse, come si evince in Tab. 3.1, presenta valori che si differenziano di poco fra i tre diversi trattamenti; tuttavia anche in questo caso la gestione tradizionale risulta statisticamente la più inquinante, segue il compost e il separato (statisticamente

equivalenti). In Tab. 3.6 per ogni input, si riporta il contributo in termini quantitativi e percentuali alla generazione dell'impatto esaurimento di risorse.

Tabella 3.6: Impatto di Esaurimento delle risorse (kg Sb-eq.) dei diversi trattamenti negli anni, scorporato nei diversi input, sulla coltura mais, nel sito di Tetto Frati.

	Input	2014	2015	2016
COMPOST	Diesel	0,00013	0,00013	0,00014
	Compost Use	0,00000	0,00000	0,00000
	Farm Tractor	0,00068	0,00131	0,00134
	Fertiliser Use	0,00000	0,00000	0,00000
	Pesticides Production	0,00171	0,00160	0,00171
	NPK Production	0,00121	0,00081	0,00080
	Cultivation Operations	0,00000	0,00000	0,00000
	Electricity Composting	0,00003	0,00003	0,00003
	IrrigationPump		0,00000	0,00000
SEPARATO SOLIDO	Diesel	0,00013	0,00013	0,00014
	Farm Tractor	0,00068	0,00131	0,00134
	Fertiliser Use	0,00000	0,00000	0,00000
	Pesticides Production	0,00171	0,00160	0,00171
	Separato Solido Use	0,00000	0,00000	0,00000
	NPK Production	0,00121	0,00082	0,00080
	Cultivation Operations	0,00000	0,00000	0,00000
	IrrigationPump		0,00000	0,00000
MIN	Diesel	0,00009	0,00010	0,00010
	Farm Tractor	0,00053	0,00116	0,00120
	Fertiliser Use	0,00000	0,00000	0,00000
	Pesticides Production	0,00171	0,00160	0,00171
	NPK Production	0,00172	0,00138	0,00140
	Cultivation Operations	0,00000	0,00000	0,00000
	IrrigationPump		0,00000	0,00000

Si riscontra che negli anni alcuni valori sono maggiori nel 2014 e nel 2016 rispetto al 2015; ciò è principalmente legato al mancato intervento nel 2015 contro la piralide e la diabrotica (non necessario), che ha determinato valori minori nelle voci di consumo delle macchine operatrici e il consumo di pesticidi.

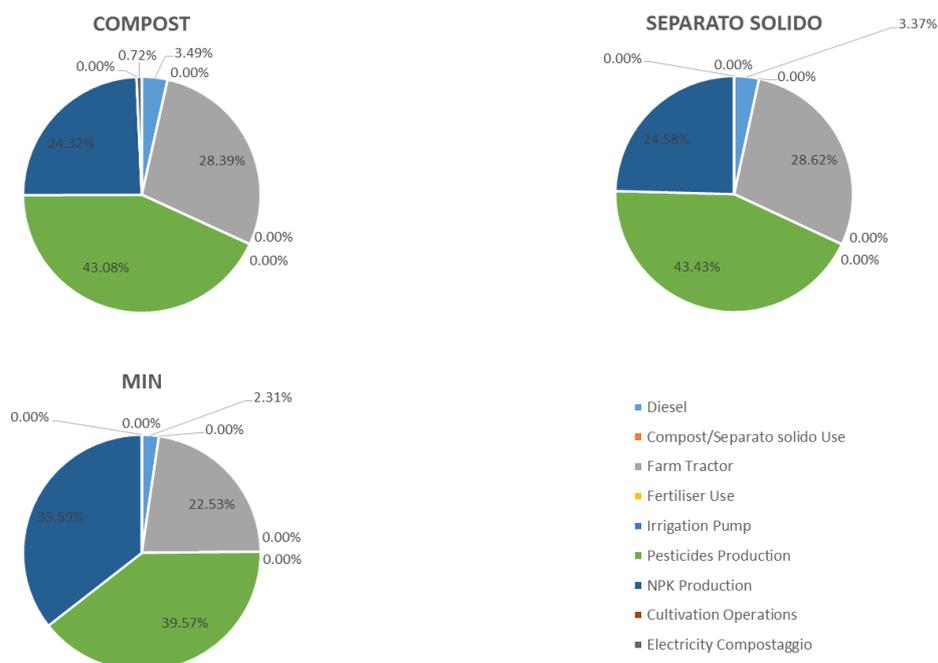


Figura 3.5: Contributo dei diversi input all’impatto di esaurimento delle risorse (espresso in percentuale) per i diversi trattamenti negli anni di sperimentazione, sulla coltura mais, nel sito di Tetto Frati.

Per il COMPOST e il SEPARATO SOLIDO i contributi maggiori sono dovuti alla produzione di prodotti fitosanitari, a cui seguono l’utilizzo ed il consumo del trattore secondo le ore di lavoro prevista durante le operazioni colturali e la produzione di concimi minerali, principalmente i concimi a base di P e K

Anche per quanto riguarda il trattamento MIN i contributi maggiori sono riconducibili alla produzione di prodotti fitosanitari; seguono la produzione di concimi minerali con un contributo superiore a quello osservato per i fertilizzanti organici (e legato alla fissazione industriale dell’N, per la quale è necessario usare combustibili fossili) ed il consumo del trattore secondo le ore di lavoro prevista durante le operazioni colturali.

Dal grafico e dalla tabella precedentemente descritti si comprende come la voce relativa alla produzione di agro farmaci incida prevalentemente sul totale dell’impatto relativo al consumo di risorse: in particolare al diserbo in pre-emergenza è riconducibile il maggior contributo alla voce pesticides. Si ricorda che i concimi minerali, e quindi la loro produzione, incidono maggiormente nella gestione tradizionale dove vi è un utilizzo maggiore in termini di quantitativi distribuiti di fertilizzanti di origine chimico-industriale (principalmente urea).

3.1.1.6 Terrestrial eutrophication/Eutrofizzazione terrestre

Per quanto riguarda la categoria di impatto dell'eutrofizzazione terrestre, il MIN è il trattamento con i valori maggiori, seguito dal COMPOST e infine dal SEPARATO SOLIDO (Tab. 3.1).

In Tab 3.7 per ogni input, facenti parte dei processi LCA, si presentano i contributi in termini quantitativi alla generazione dell'impatto eutrofizzazione terrestre.

Tabella 3.7: Impatto di Eutrofizzazione terrestre (Mole of N eq.) dei diversi trattamenti negli anni, scorporato nei diversi input, sulla coltura mais, nel sito di Tetto Frati.

	Input	2014	2015	2016
COMPOST	Diesel	1,59	1,64	1,71
	Compost Use	136,46	140,71	150,56
	Farm Tractor	0,28	0,54	0,56
	Fertiliser Use	145,66	140,73	126,84
	Pesticides Production	0,26	0,24	0,26
	NPK Production	2,55	2,46	2,55
	Cultivation Operations	14,08	12,70	14,08
	Electricity Compostaggio	1,18	1,18	1,18
	IrrigationPump		3,14	1,05
SEPARATO SOLIDO	Diesel	1,52	1,57	1,65
	Farm Tractor	0,28	0,54	0,56
	Fertiliser Use	145,66	140,73	126,84
	Pesticides Production	0,26	0,24	0,26
	Separato Solido Use	112,33	111,89	131,72
	NPK Production	2,55	2,55	2,55
	Cultivation Operations	14,08	12,70	14,08
	IrrigationPump		3,14	1,05
MIN	Diesel	1,13	1,18	1,26
	Farm Tractor	0,22	0,48	0,49
	Fertiliser Use	313,02	313,02	313,02
	Pesticides Production	0,26	0,24	0,26
	NPK Production	4,31	4,34	4,23
	Cultivation Operations	14,08	12,70	14,08
	IrrigationPump		3,14	1,05

Le pratiche di fertilizzazione sono quelle per le quali i trattamenti si differenziano: il MIN genera un impatto maggiore (a parità di N somministrato rispetto a COMPOST) per via dei diversi fattori di emissione per il calcolo della volatilizzazione di NH₃ (vedi paragrafo 3.1.1.1), mentre il SEPARATO SOLIDO (che ha lo stesso fattore di emissione del COMPOST) genera un impatto minore perché riceve meno N.

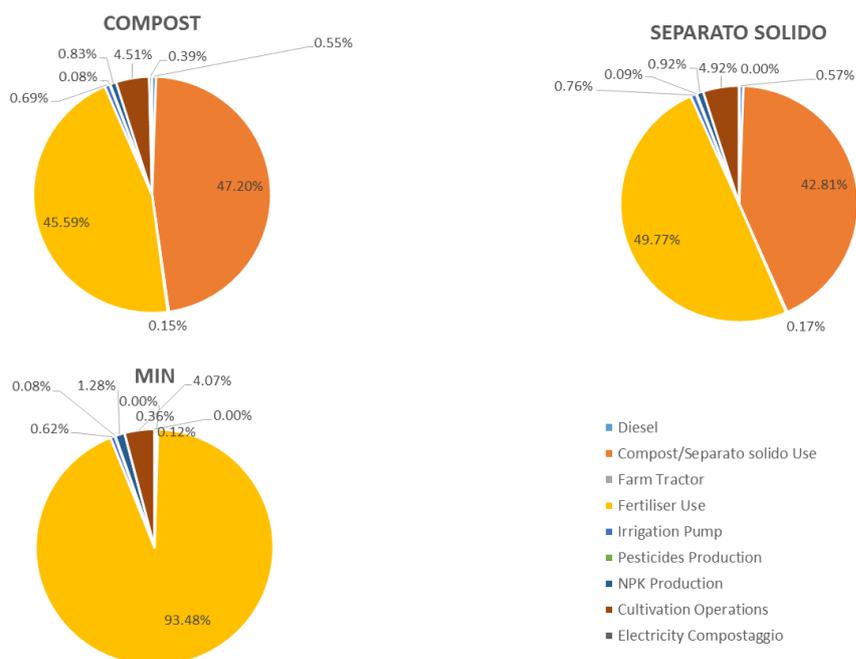


Figura 3.6: Contributo dei diversi input all'impatto di eutrofizzazione terrestre (espresso in percentuale) per i diversi trattamenti negli anni di sperimentazione, sulla coltura mais, nel sito di Tetto Frati.

I valori percentuali confermano la centralità della fertilizzazione nella generazione di questo impatto e raccontano, con oltre il 90% di contributo. Seguono le operazioni colturali, con emissioni di NO_x legate alla combustione.

3.1.1.7 Total freshwater consumption/Consumo d'acqua

La categoria di impatto consumo delle acque di falda presenta una situazione diversa dalle precedenti; il COMPOST risulta il trattamento con consumo maggiore di acque dolci, segue il SEPARATO SOLIDO e infine la gestione tradizionale con urea (MIN) (Tab.3.1).

In Tab.3.8 vengono riportati per ogni input, relativo ai processi che costituiscono il sistema progettuali alla base dell'analisi LCA, i contributi in termini quantitativi alla generazione dell'impatto consumo totale delle acque dolci.

Tabella 3.8: Impatto di Consumo totale delle acque di falda (UBP) dei diversi trattamenti negli anni, scorporato nei diversi input, sulla coltura mais, nel sito di Tetto Frati.

	Input	2014	2015	2016
COMPOST	Diesel	1202,14	1238,98	1295,75
	Compost Use	0,00	0,00	0,00
	Farm Tractor	368,21	708,40	728,41
	Fertiliser Use	0,00	0,00	0,00
	Pesticides Production	34,48	32,29	34,48
	NPK Production	150,24	144,96	150,48
	Cultivation Operations	0,00	0,00	0,00
	Electricity Composting	698,21	698,21	698,21
	IrrigationPump		116400,00	38800,00
SEPARATO SOLIDO	Diesel	1150,90	1187,74	1244,51
	Farm Tractor	368,21	708,40	728,41
	Fertiliser Use	0,00	0,00	0,00
	Pesticides Production	34,48	32,29	34,48
	Separato Solido Use	0,00	0,00	0,00
	NPK Production	150,24	150,64	150,48
	Cultivation Operations	0,00	0,00	0,00
	IrrigationPump		116400,00	38800,00
MIN	Diesel	855,71	892,56	949,32
	Farm Tractor	288,16	628,35	648,36
	Fertiliser Use	0,00	0,00	0,00
	Pesticides Production	34,48	32,29	34,48
	NPK Production	255,31	256,37	249,62
	Cultivation Operations	0,00	0,00	0,00
	IrrigationPump		116400,00	38800,00

Il trattamento MIN è il meno impattante: ciò è dovuto al fatto che le gestioni con COMPOST e SEPARATO SOLIDO presentano operazioni di distribuzione del separato/compost che incidono maggiormente con i valori più elevati di consumo di carburante e utilizzo consumo orario delle macchine operatrici rispetto ad altre operazioni colturali convenzionali. Per estrarre e raffinare il diesel è, infatti, necessario il consumo d'acqua. Inoltre, il COMPOST risulta meno vantaggioso per l'indicatore di consumo delle acque per via dei processi connessi alla fase di compostaggio in cui è necessaria energia

elettrica per le operazioni vagliatura e insufflaggio aria e di diesel per il funzionamento delle macchine rivoltatrici.

Infine è importante tener presente come l'irrigazione sia la voce che indice maggiormente e che determina le differenze di maggiore interesse fra le diverse annate agrarie con differenti condizioni climatiche: nel 2014 i valori sono significativamente più basse a causa dell'andamento climatico che non ha reso necessario nessun intervento irriguo.

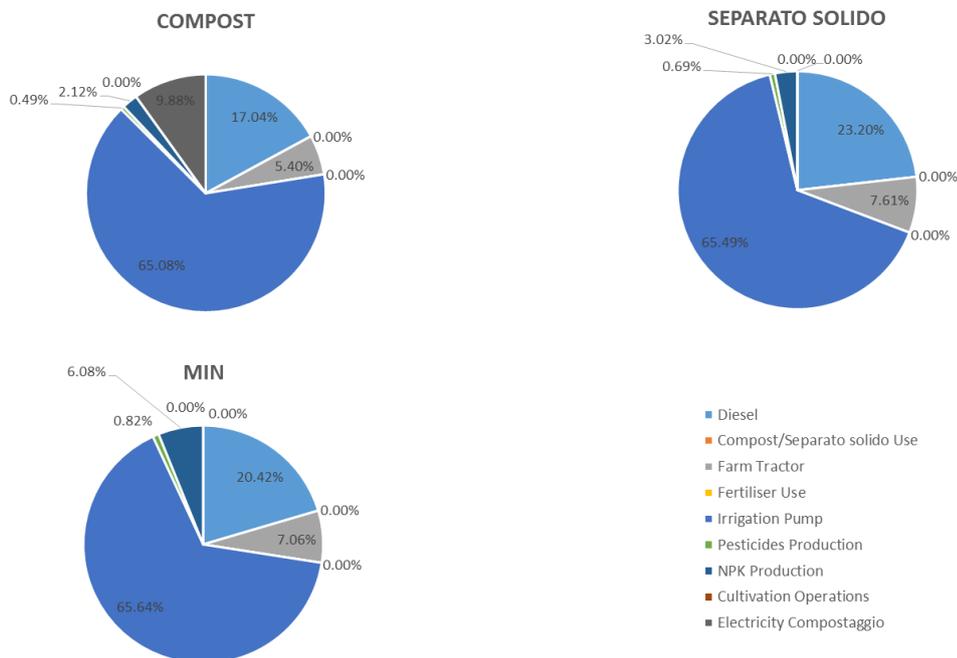


Figura 3.73: Contributo dei diversi input all'impatto di consumo totale delle acque dolci (espresso in percentuale) per i diversi trattamenti negli anni di sperimentazione, sulla coltura mais, nel sito di Tetto Frati.

Nel grafico in figura 3.7 si denota come il contributo principale sul totale degli impatti sia riferito alle irrigazioni effettuate durante i cicli colturali, seguono il consumo di gasolio e l'impiego delle macchine operatrici relativamente il loro utilizzo e consumo.

Solo nel caso del COMPOST c'è un contributo significativo legato alla fase di compostaggio, dovuto al consumo di carburante, l'energia elettrica (voce più rilevante) e il consumo orario delle macchine operatrici.

3.1.2 Lattuga: sintesi del triennio.

I principali valori di impatto generati dai trattamenti nel triennio di sperimentazione considerato per la coltura orticola principale nel sito sperimentale di Grugliasco (azienda Grandi) sono riportati in Tab. 3.9.

Tabella 3.9: Principali impatti dei trattamenti a confronto nel triennio, sulla lattuga, nel sito di Grugliasco.

Anno	Trattamento	Acidification, accumulated exceedance [Mole of H ⁺ eq.]	Freshwater eutrophication [kg P eq]	Global warming, incl biogenic carbon [kg CO ₂ -Equiv.]	Particulate matter/Respiratory inorganics [kg PM _{2,5} -Equiv.]	Resource Depletion, fossil and mineral [kg Sb-Equiv.]	Terrestrial eutrophication, accumulated exceedance [Mole of N eq.]	Total freshwater consumption, including rainwater [UBP]
2014	COMPOST	36.27	86.84	1614.09	1.10	0.0038	150.53	134 542.83
	SEPARATO SOLIDO	31.33	63.30	1646.24	1.03	0.0038	129.81	133 975.04
	MIN	27.81	11.76	1698.63	0.90	0.0058	112.30	133 726.07
2015	COMPOST	38.59	33.09	1757.32	1.22	0.0055	161.48	135 027.55
	SEPARATO SOLIDO	31.63	0.00	1708.68	1.06	0.0054	131.08	134 083.82
	MIN	28.19	0.00	1760.70	0.93	0.0065	113.98	133 834.70
2016	COMPOST	41.09	104.63	1754.10	1.29	0.0039	173.60	135 026.38
	SEPARATO SOLIDO	35.62	34.60	1646.24	1.12	0.0038	149.20	133 975.04
	MIN	27.79	0.00	1698.25	0.90	0.0049	112.27	133 725.92
Media per trattamento	COMPOST	38.65 a	74.86 a	1708.50	1.20 a	0.0044 b	161.87 a	134 865.59 a
	SEPARATO SOLIDO	32.86 b	32.63 ab	1667.05	1.07 b	0.0044 b	136.70 b	134 011.30 b
	MIN	27.93 c	3.92 b	1719.19	0.91 c	0.0057 a	112.85 c	133 762.23 b
Media per anno	2014	31.80	53.97	1652.99	1.01	0.0045 b	130.88	134 081.31
	2015	33.63	34.88	1741.16	1.09	0.0053 a	139.55	134 314.97
	2016	34.83	46.41	1699.53	1.10	0.0042 b	145.02	134 242.45
<i>P(F) trattamento</i>		0.002	0.034	ns	0.005	0.010	0.003	0.002
<i>P(F) anno</i>		ns	ns	ns	ns	0.007	ns	ns

Il trattamento MIN ha registrato i valori più bassi per cinque indicatori (acidification, freshwater eutrophication, particulate matter, terrestrial eutrophication e total freshwater consumption) risultando meno impattante rispetto ai sistemi di gestione con SEPARATO SOLIDO e COMPOST; il SEPARATO SOLIDO si attesta come meno inquinante rispetto agli altri trattamenti. Per quanto riguarda gli indicatori di global warming potential e resource depletion, la gestione tradizionale con soli concimi minerali ha riportato valori più

alti rispetto agli altri trattamenti e i valori più bassi sono stati registrati per il trattamento con il separato solido.

Analizzando più in dettaglio i valori riportati in Tab. 3.9 e quindi considerando singolarmente ogni categoria di impatto si riscontra che sono state registrate differenze significative per gli indicatori acidificazione, eutrofizzazione delle acque dolci, materiale particolato, eutrofizzazione terrestre e consumo totale delle acque dolci. I test post-hoc individuano un ranking tra i trattamenti COMPOST>SEPARATO SOLIDO>MIN per le categorie di impatto precedentemente elencate tranne per l'eutrofizzazione delle acque, per la quale il compost è superiore al minerale e il separato solido ha un comportamento intermedio, non diverso da nessuno dei due. L'analisi della varianza non ha riscontrato differenze significative per quanto riguarda il GWP, mentre per quanto riguarda l'indicatore di esaurimento delle risorse MIN>COMPOST, SEPARATO SOLIDO. Infine, per l'indicatore di consumo idrico il post-hoc rivela che COMPOST>MIN, SEPARATO SOLIDO.

L'anno ha causato effetti significativi soltanto per la categoria di esaurimento delle risorse per via di alcuni processi che saranno descritti nel paragrafo 3.1.2.5.

Nei paragrafi successivi verranno descritte e commentate singolarmente le categorie di impatto ambientale in relazione dei diversi input con i relativi contributi all'impatto stesso.

3.1.2.1 Acidification/acidificazione

L'indicatore acidificazione ha registrato valori elevati nel trattamento compost, segue il separato solido e infine il minerale.

In Tab.3.10 sono riportati per ogni input, relativi ai processi che costituiscono il sistema progettuale alla base dell'analisi LCA, il contributo in termini quantitativi alla generazione dell'impatto acidificazione.

Tabella 3.10: Impatto di Acidificazione (Mole of H+ eq.) dei diversi trattamenti negli anni, incorporato nei diversi input, sulla coltura mais, nel sito di Grugliasco.

	Input	2014	2015	2016
COMPOST	Electricity Bioplastic	2,16	2,16	2,16
	Bioplastic Production	1,83	1,83	1,83
	Diesel	0,32	0,45	0,50
	Compost Use	29,10	30,81	32,99
	Farm Tractor	0,53	0,53	0,53
	Pesticides Production	0,03	0,15	0,03
	Cultivation Operations	1,68	1,92	2,35
	Electricity Composting	0,43	0,55	0,51
	IrrigationPump	0,18	0,18	0,18
SEPARATO SOLIDO	Electricity Bioplastic	2,16	2,16	2,16
	Bioplastic Production	1,83	1,83	1,83
	Diesel	0,39	0,42	0,39
	Farm Tractor	0,53	0,53	0,53
	Pesticides Production	0,03	0,15	0,03
	Separato Solido Use	24,53	24,43	28,82
	Cultivation Operations	1,68	1,92	1,68
	IrrigationPump	0,18	0,18	0,18
MIN	Electricity Bioplastic	2,16	2,16	2,16
	Bioplastic Production	1,83	1,83	1,83
	Diesel	0,27	0,30	0,27
	Farm Tractor	0,50	0,51	0,50
	Fertiliser Use	20,90	20,90	20,90
	Pesticides Production	0,03	0,15	0,03
	NPK Production	0,25	0,23	0,23
	Cultivation Operations	1,68	1,92	1,68
	IrrigationPump	0,18	0,18	0,18

I contributi maggiori sono legati alla distribuzione di fertilizzanti e le emissioni connesse al loro utilizzo in campo. L'entità dell'acidificazione legata al "fertiliser use" è proporzionale alle dosi di N impiegate, che infatti sono state superiori per il COMPOST, a seguire il SEPARATO SOLIDO e infine il MIN, che hanno generato una volatilizzazione proporzionale di NH₃ (agente di acidificazione). Inoltre, i fertilizzanti organici presentano valori di consumo di gasolio (la cui produzione induce emissioni di SO₂) e di impiego delle macchine operatrici volte alla distribuzione in campo superiori alle altre operazioni colturali (che comportano emissioni di NO_x in seguito alla combustione), comprese la distribuzione dei fertilizzanti minerali. Infine, il COMPOST risulta più inquinante rispetto all'utilizzo del SEPARATO SOLIDO per via dell'incidenza del processo stesso di

compostaggio, comprendente i rivoltamenti con consumo di diesel per il funzionamento delle macchine rivoltatrici, e soprattutto, la vagliatura e l'insufflaggio di aria nel cumulo con consumo di elettricità.

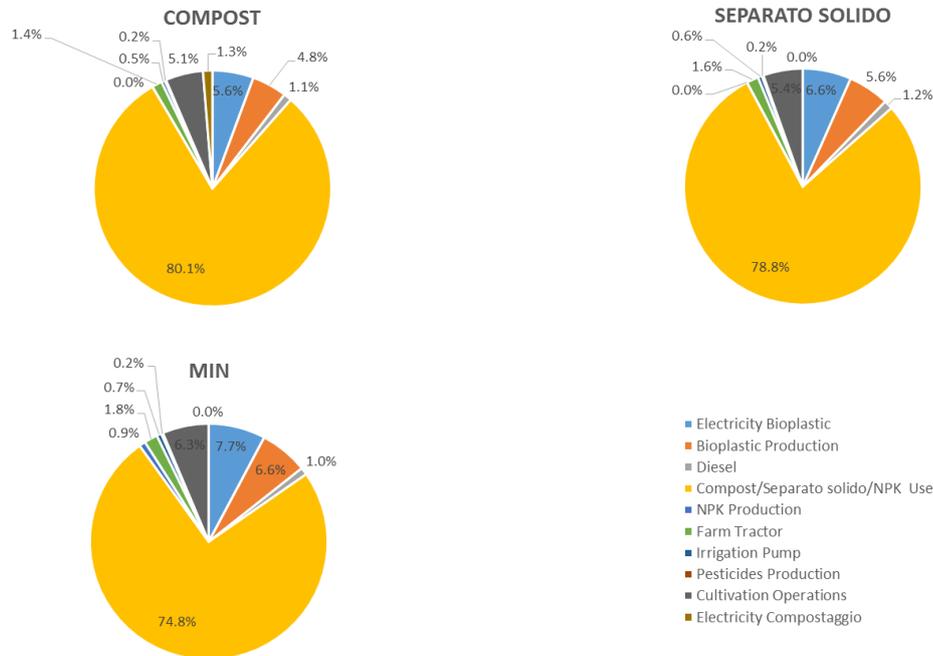


Figura 3.8: Contributo dei diversi input all'impatto di acidificazione (espresso in percentuale) per i diversi trattamenti negli anni di sperimentazione, sulla coltura lattuga, nel sito di Grugliasco.

Per tutti e tre i trattamenti, le voci di input del bilancio maggiormente impattanti per il compost sono quelle legate alla fertilizzazione comprendenti gli impatti diretti e indiretti legati alla distribuzione in campo dei fertilizzanti. Seguono la produzione dei teli pacciamanti in bioplastica (con emissione di CO₂, SO₂, fosfato e etilene), le operazioni colturali e le altre componenti (Fig. 3.8).

3.1.2.2 Freshwater eutrophication/Eutrofizzazione delle acque

L'eutrofizzazione delle acque dolci presenta valori superiori per la gestione con compost rispetto alla gestione minerale, mentre il separato solido ha un comportamento intermedio.

In Tab.3.11 è riportato per ogni input, facenti parte dei processi LCA, il contributo in termini quantitativi alla generazione dell'impatto eutrofizzazione delle acque dolci.

Tabella 3.11: Impatto di Eutrofizzazione delle acque di falda (kg P eq.) dei diversi trattamenti negli anni, scorporato nei diversi input, sulla coltura mais, nel sito di Grugliasco.

	Input	2014	2015	2016
COMPOST	Electricity Bioplastic	0,00	0,00	0,00
	Bioplastic Production	0,11	0,11	0,11
	Diesel	0,00	0,00	0,00
	Compost Use	86,72	32,97	104,51
	Farm Tractor	0,00	0,00	0,00
	Pesticides Production	0,00	0,00	0,00
	Cultivation Operations	0,00	0,00	0,00
	Electricity Composting	0,00	0,00	0,00
	IrrigationPump	0,00	0,00	0,00
SEPARATO SOLIDO	Electricity Bioplastic	0,00	0,00	0,00
	Bioplastic Production	0,11	0,11	0,11
	Diesel	0,00	0,00	0,00
	Farm Tractor	0,00	0,00	0,00
	Pesticides Production	0,00	0,00	0,00
	Separato Solido Use	63,18	-2,63	34,48
	Cultivation Operations	0,00	0,00	0,00
	IrrigationPump	0,00	0,00	0,00
MIN	Electricity Bioplastic	0,00	0,00	0,00
	Bioplastic Production	0,11	0,11	0,11
	Diesel	0,00	0,00	0,00
	Farm Tractor	0,00	0,00	0,00
	Fertiliser Use	11,64	-16,09	-2,79
	Pesticides Production	0,00	0,00	0,00
	NPK Production	0,00	0,00	0,00
	Cultivation Operations	0,00	0,00	0,00
	IrrigationPump	0,00	0,00	0,00

Il COMPOST e il SEPARATO SOLIDO risultano maggiormente inquinanti poiché la voce di gestione della fertilizzazione, la più incidente, è costituita da valori di surplus maggiori (parzialmente considerate dal sistema di calcolo come perdite di N e P) riconducibili ad apporti superiori forniti nei trattamenti organici (per raggiungere la dose obiettivo di C, prevista nello schema sperimentale) rispetto al MIN, il quale segue il piano di concimazione abitualmente utilizzato dall'agricoltore. I valori numericamente superiori per il COMPOST rispetto al SEPARATO SOLIDO sono dovuti agli apporti superiori in relazione del maggiore contenuto di azoto presente nel compost rispetto al separato.

In Fig.3.9 sono riportati i contributi percentuali delle diverse componenti di input del bilancio ambientale.

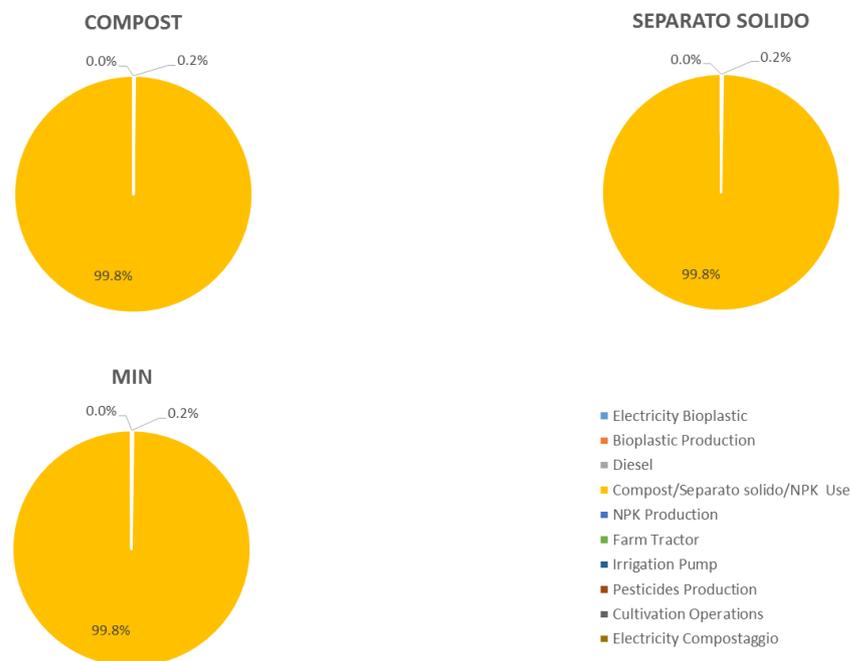


Figura 3.9: Contributo dei diversi input all'impatto di eutrofizzazione delle acque dolci (espresso in percentuale) per i diversi trattamenti negli anni di sperimentazione, sulla coltura lattuga, nel sito di Grugliasco.

Le voci di input che incidono quasi totalmente per la suddetta categoria di impatto sono quelle relative alla distribuzione dei fertilizzanti, in particolare le perdite di P e N e NH₃ (legate ad apporti e surplus).

3.1.2.3 Global Warming Potential/Riscaldamento globale

Per quanto riguarda l'indicatore di riscaldamento globale il trattamento MIN è il più impattante, segue il COMPOST ed infine il SEPARATO SOLIDO, ma nessuna differenza è statisticamente significativa, come si evince dalla tabella 3.9.

In Tab.3.12 sono riportati per ogni input, relativo all'analisi LCA, i contributi in termini quantitativi alla generazione dell'impatto potenziale di riscaldamento globale.

Tabella 3.12: Impatto di Global Warming Potential (kg CO₂-eq.) dei diversi trattamenti negli anni, scorporato nei diversi input, sulla coltura mais, nel sito di Grugliasco.

	Input	2014	2015	2016
COMPOST	Electricity Bioplastic	854,15	854,15	854,15
	Bioplastic Production	402,00	402,00	402,00
	Diesel	25,01	34,77	38,78
	Compost Use	39,83	103,56	103,56
	Farm Tractor	97,12	98,52	97,12
	Pesticides Production	8,85	47,78	8,85
	Cultivation Operations	139,40	159,32	195,16
	Electricity Composting	36,64	46,14	43,38
	IrrigationPump	11,10	11,10	11,10
SEPARATO SOLIDO	Electricity Bioplastic	854,15	854,15	854,15
	Bioplastic Production	402,00	402,00	402,00
	Diesel	30,06	32,27	30,06
	Farm Tractor	97,12	98,52	97,12
	Pesticides Production	8,85	47,78	8,85
	Separato Solido Use	103,56	103,56	103,56
	Cultivation Operations	139,40	159,32	139,40
	IrrigationPump	11,10	11,10	11,10
MIN	Electricity Bioplastic	854,15	854,15	854,15
	Bioplastic Production	402,00	402,00	402,00
	Diesel	20,82	23,02	20,82
	Farm Tractor	92,92	94,32	92,92
	Fertiliser Use	19,91	19,91	19,91
	Pesticides Production	8,85	47,78	8,85
	NPK Production	149,48	149,10	149,10
	Cultivation Operations	139,40	159,32	139,40
	IrrigationPump	11,10	11,10	11,10

Il trattamento MIN risulta più impattante rispetto ai trattamenti con matrici organiche per via dell'elevata incidenza della voce NPK production riferita soltanto alla produzione di concimi minerali nella gestione MIN (che determina emissioni superiori rispetto a quelle riconducibili alla produzioni di compost e separato). Come si vede in Tab. 3.12 incidono molto le voci riferite alla produzione di teli pacciamanti in bioplastica (che generano in particolare emissioni di CO₂), a cui seguono le operazioni colturali, l'utilizzo delle macchine operatrici e l'impiego di carburanti: si riscontra un discreto contributo delle

operazioni di distribuzione delle matrici organiche che presentano valori elevati rispetto alle altre operazioni colturali, dati i maggiori volumi da distribuire. Il COMPOST risulta, anche per questo indicatore, più inquinante rispetto al SEPARATO SOLIDO per via dell'incidenza della fase di compostaggio.

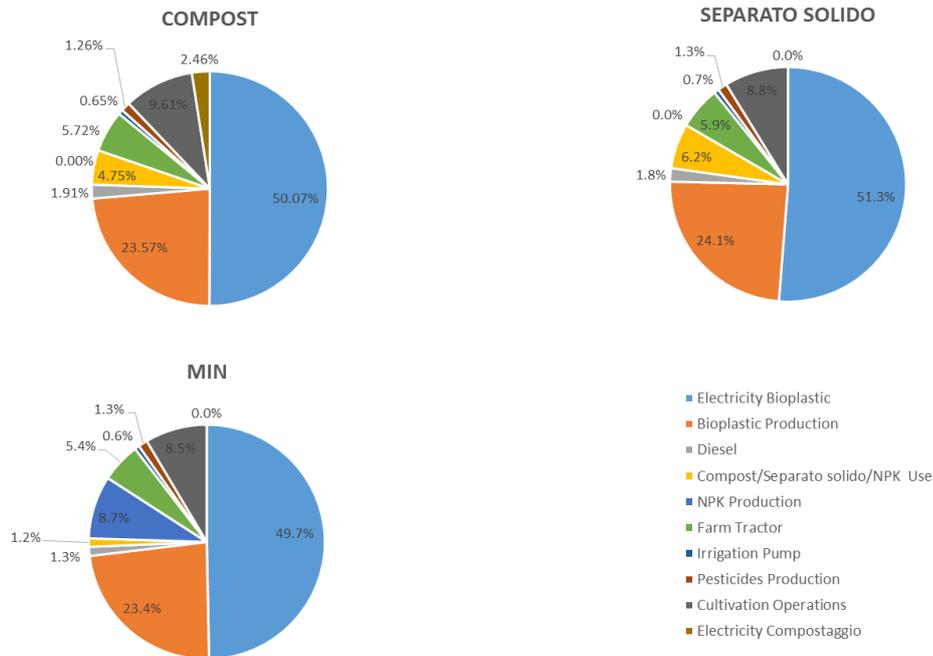


Figura 3.10: Contributo dei diversi input all'impatto di potenziale di riscaldamento globale (espresso in percentuale) per i diversi trattamenti negli anni di sperimentazione, sulla coltura lattuga, nel sito di Grugliasco

I contributi maggiori per tutti i trattamenti, come si deduce da Fig. 3.10, sono connessi alla produzione di bioplastica per i teli utilizzati nell'operazione di pacciamatura in pre-trapianto, a cui seguono le operazioni colturali e le altri componenti. Per il trattamento MIN, tra le altre componenti spicca la produzione di concimi minerali in cui va ricordato come la produzione di N sia la più incidente come contributo nella voce NPK production.

3.1.2.4 Particulate matter/Particolato fine

L'indicatore particolato riprende la situazione che si verifica per gli indicatori acidificazione e eutrofizzazione delle acque dolci con il trattamento MIN che risulta meno impattante rispetto al SEPARATO SOLIDO e infine al COMPOST.

In Tab. 3.13 è riportato per ogni input, relativo ai processi che costituiscono il sistema progettuale alla base dell'analisi LCA, il contributo in termini quantitativi alla generazione dell'impatto emissioni di particolato.

Tabella 3.13: Impatto di Materia particolata (kg PM_{2,5}-eq.) dei diversi trattamenti negli anni, scorporato nei diversi input, sulla coltura mais, nel sito di Grugliasco.

	Input	2014	2015	2016
COMPOST	Electricity Bioplastic	0,10	0,10	0,10
	Bioplastic Production	0,09	0,09	0,09
	Diesel	0,01	0,02	0,02
	Compost Use	0,65	0,73	0,78
	Farm Tractor	0,09	0,09	0,09
	Pesticides Production	0,00	0,01	0,00
	Cultivation Operations	0,13	0,15	0,18
	Electricity Composting	0,02	0,02	0,02
	IrrigationPump	0,01	0,01	0,01
SEPARATO SOLIDO	Electricity Bioplastic	0,10	0,10	0,10
	Bioplastic Production	0,09	0,09	0,09
	Diesel	0,01	0,02	0,01
	Farm Tractor	0,09	0,09	0,09
	Pesticides Production	0,00	0,01	0,00
	Separato Solido Use	0,60	0,60	0,69
	Cultivation Operations	0,13	0,15	0,13
	IrrigationPump	0,01	0,01	0,01
MIN	Electricity Bioplastic	0,10	0,10	0,10
	Bioplastic Production	0,09	0,09	0,09
	Diesel	0,01	0,01	0,01
	Farm Tractor	0,09	0,09	0,09
	Fertiliser Use	0,47	0,47	0,47
	Pesticides Production	0,00	0,01	0,00
	NPK Production	0,01	0,01	0,01
	Cultivation Operations	0,13	0,15	0,13
	IrrigationPump	0,01	0,01	0,01

La situazione descritta per i trattamenti in merito al seguente indicatore è principalmente causata dall'elevato contributo da parte della voce relativa all'impiego di matrici organiche e concimi minerali e alle sue emissioni correlate, come viene riportato in Tab. 3.13. I contributi maggiori sono quindi legati alla distribuzione di fertilizzanti e le emissioni connesse al loro utilizzo in campo proprio perché le operazioni di distribuzione necessitano di maggiori consumi di gasolio e ore di lavoro della macchine operatrici (con conseguente

emissione di CO e NO_x). Inoltre, gli apporti di N sono stati nell'ordine COMPOST>SEPARATO SOLIDO>MIN generando volatilizzazione di NH₃ proporzionali agli apporti. Le gestioni COMPOST e SEPARATO SOLIDO si differenziano primariamente a causa dei processi legati alle fase di compostaggio, con emissioni di particolato connesse alla produzione di diesel ed energia per la vagliatura, i rivoltamenti e le altre operazioni volte ad arieggiare il cumulo, come si vedrà nei grafici successivi in figura 3.11.

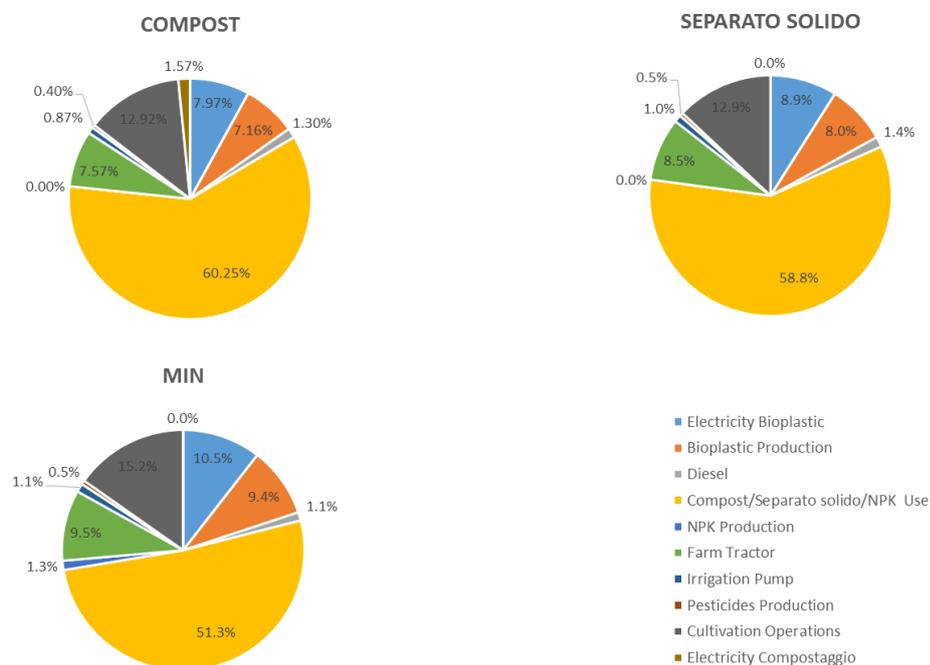


Figura 3.11: Contributo dei diversi input all'impatto di materiale particolato (espresso in percentuale) per i diversi trattamenti negli anni di sperimentazione, sulla coltura lattuga, nel sito di Grugliasco.

Dalla Fig.3.11 emerge come le distribuzioni di fertilizzanti e le emissioni dirette e indirette connesse all'impiego di concimi minerali, compost e separato solido incidano prevalentemente sul totale dell'impatto considerato. Seguono le operazioni colturali dove i contributi maggiori sono riconducibili alle operazioni di aratura.

3.1.2.5 Resource Depletion/Esaurimento delle risorse

L'esaurimento delle risorse presenta valori che si differenziano di poco fra i tre diversi trattamenti; tuttavia in questo caso la gestione MIN risulta la più inquinante, segue il COMPOST e il SEPARATO SOLIDO.

In Tab. 3.14 vengono descritti per ogni input, relativo all'analisi LCA, i contributi in termini quantitativi alla generazione dell'impatto esaurimento di risorse.

Tabella 3.14: Impatto di Esaurimento delle risorse (kg Sb-eq.) dei diversi trattamenti negli anni, scorporato nei diversi input, sulla coltura mais, nel sito di Grugliasco.

	Input	2014	2015	2016
COMPOST	Electricity Bioplastic	0,0008	0,0008	0,0008
	Bioplastic Production	0,0000	0,0000	0,0000
	Diesel	0,0001	0,0001	0,0001
	Compost Use	0,0000	0,0000	0,0000
	Farm Tractor	0,0026	0,0026	0,0026
	Pesticides Production	0,0004	0,0019	0,0004
	Cultivation Operations	0,0000	0,0000	0,0000
	Electricity Composting	0,0000	0,0000	0,0000
	IrrigationPump	0,0000	0,0000	0,0000
SEPARATO SOLIDO	Electricity Bioplastic	0,0008	0,0008	0,0008
	Bioplastic Production	0,0000	0,0000	0,0000
	Diesel	0,0001	0,0001	0,0001
	Farm Tractor	0,0026	0,0026	0,0026
	Pesticides Production	0,0004	0,0019	0,0004
	Separato Solido Use	0,0000	0,0000	0,0000
	Cultivation Operations	0,0000	0,0000	0,0000
	IrrigationPump	0,0000	0,0000	0,0000
	MIN	Electricity Bioplastic	0,0008	0,0008
Bioplastic Production		0,0000	0,0000	0,0000
Diesel		0,0001	0,0001	0,0001
Farm Tractor		0,0025	0,0025	0,0025
Fertiliser Use		0,0000	0,0000	0,0000
Pesticides Production		0,0004	0,0019	0,0004
NPK Production		0,0021	0,0012	0,0012
Cultivation Operations		0,0000	0,0000	0,0000
IrrigationPump		0,0000	0,0000	0,0000

Dai valori riportati in Tab. 3.14 si conferma che il MIN risulta più inquinante, segue il COMPOST e il SEPARATO SOLIDO per le seguenti ragioni: l'impiego di concimi minerali, in particolare la loro produzione (in particolare per P e K), genera impatti maggiori rispetto alle altre gestioni; quest'ultime si differenziano per i processi relativi alle operazioni necessarie per la produzione di compost a partire dal digestato solido. Risulta quindi il separato solido il trattamento meno impattante.

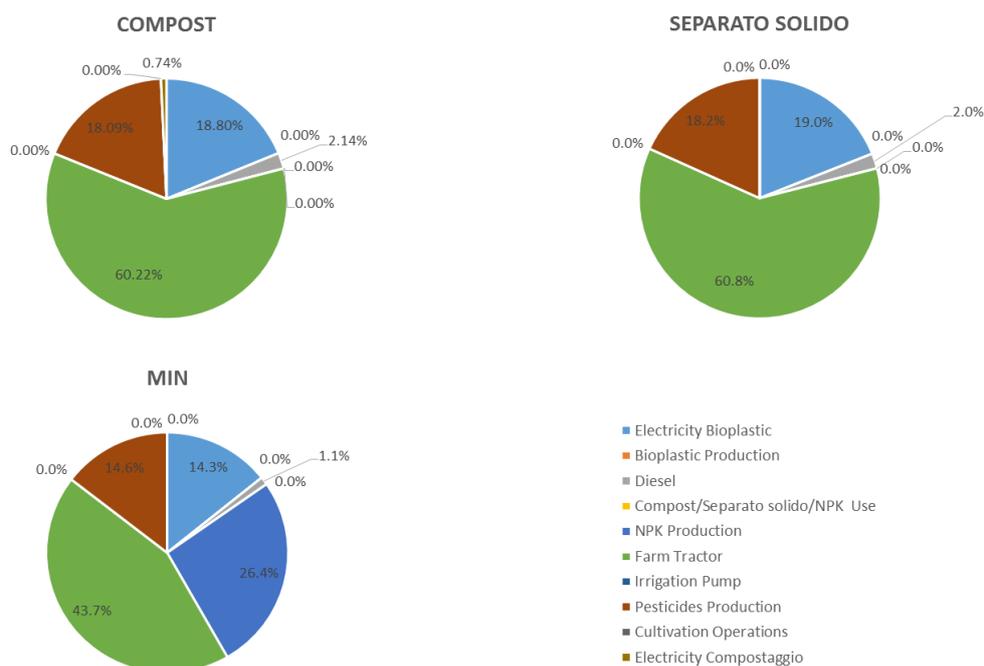


Figura 3.12: Contributo dei diversi input all’impatto di esaurimento delle risorse (espresso in percentuale) per i diversi trattamenti negli anni di sperimentazione, sulla coltura lattuga, nel sito di Grugliasco.

In figura 3.12 si evince come i contributi maggiori per i trattamenti organici siano dovuti all’utilizzo ed il consumo del trattore secondo le ore di lavoro prevista durante le operazioni colturali, a cui seguono la produzione di bioplastiche (in particolare il consumo elettrico per la produzione) e la produzione di agrofarmaci.

Per quanto riguarda il trattamento MIN i contributi maggiori sono sempre riconducibili all’utilizzo delle macchine operatrici, a cui seguono la produzione di concimi minerali con un contributo, la produzione di bioplastica relativamente il consumo elettrico e la voce pesticides, riferita alla produzione di prodotti fitosanitari.

Dai grafici e dalla tabella precedentemente descritti si comprende come la voce relativa alla produzione di concimi minerali incida prevalentemente sul totale dell’impatto relativo al consumo di risorse nel trattamento MIN.

3.1.2.6 Terrestrial eutrophication/Eutrofizzazione terrestre

L’eutrofizzazione terrestre risulta meno inquinante per il trattamento MIN rispetto ai trattamenti organici con il COMPOST che si attesta come più impattante.

In Tab. 3.15è riportato per ogni input, facenti parte dei processi LCA, il contributo in termini quantitativi alla generazione dell’impatto emissioni di particolato.

Tabella 3.15: Impatto di Eutrofizzazione terrestre (Mole of N eq.) dei diversi trattamenti negli anni, scorporato nei diversi input, sulla coltura mais, nel sito di Grugliasco.

	Input	2014	2015	2016
COMPOST	Electricity Bioplastic	4,63	4,63	4,63
	Bioplastic Production	0,00	0,00	0,00
	Diesel	0,85	1,19	1,32
	Compost Use	132,04	140,71	150,56
	Farm Tractor	1,06	1,07	1,06
	Pesticides Production	0,05	0,29	0,05
	Cultivation Operations	9,67	11,05	13,53
	Electricity Composting	1,18	1,49	1,40
	IrrigationPump	1,05	1,05	1,05
SEPARATO SOLIDO	Electricity Bioplastic	4,63	4,63	4,63
	Bioplastic Production	0,00	0,00	0,00
	Diesel	1,03	1,10	1,03
	Farm Tractor	1,06	1,07	1,06
	Pesticides Production	0,05	0,29	0,05
	Separato Solido Use	112,33	111,89	131,72
	Cultivation Operations	9,67	11,05	9,67
	IrrigationPump	1,05	1,05	1,05
MIN	Electricity Bioplastic	4,63	4,63	4,63
	Bioplastic Production	0,00	0,00	0,00
	Diesel	0,71	0,79	0,71
	Farm Tractor	1,01	1,03	1,01
	Fertiliser Use	94,42	94,42	94,42
	Pesticides Production	0,05	0,29	0,05
	NPK Production	0,76	0,73	0,73
	Cultivation Operations	9,67	11,05	9,67
	IrrigationPump	1,05	1,05	1,05

Anche in questo caso il trattamento MIN risulta meno inquinante rispetto al SEPARATO SOLIDO e infine al COMPOST principalmente per via dell’elevato contributo da parte della voce relativa all’impiego di concimi minerali e matrici organiche e alle sue emissioni correlate. I trattamenti organici sono più impattante per via delle emissioni connesse agli apporti azotati, superiori rispetto il MIN; in particola il COMPOST presenta valori superiori nella voce legata alla fertilizzazione per via di apporti superiori anche sul SEPARATO SOLIDO. Il COMPOST, inoltre, presenta valori superiori rispetto al

SEPARATO SOLIDO anche perché nel bilancio entrano in gioco i processi legati alle fase di compostaggio come si evince dalla voce “electricity compostaggio” in Tab. 3.15.

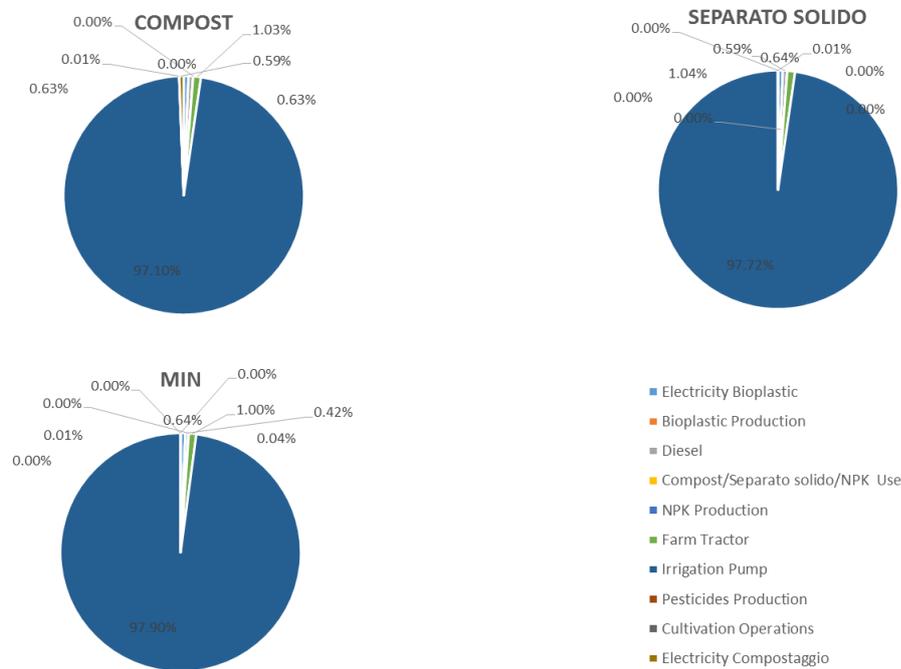


Figura 3.13: Contributo dei diversi input all’impatto di eutrofizzazione terrestre (espresso in percentuale) per i diversi trattamenti negli anni di sperimentazione, sulla coltura lattuga, nel sito di Grugliasco.

Le voci relative l’impiego di fertilizzanti organici risultano le più impattanti, poiché incidono molto le emissioni connesse agli apporti di N, che sono considerabili come perdite del sistema suolo. In particolare la deposizione di NH₃ (emissioni di ammoniaca) contribuisce a diversi problemi ambientali, quali l’eutrofizzazione terrestre.

3.1.2.7 Total freshwater consumption/Consumo d’acqua

La categoria di impatto consumo delle acque di falda presenta la seguente situazione: il COMPOST risulta il trattamento con consumo maggiore di acque dolci, segue il SEPARATO SOLIDO e infine il MIN.

In Tab. 3.16 è descritto per ogni input, relativo ai processi che costituiscono il sistema progettuali alla base dell’analisi LCA, il contributo in termini quantitativi alla generazione dell’impatto consumo totale delle acque dolci.

Tabella 3.16: Impatto di Consumo totale delle acque di falda (UBP) dei diversi trattamenti negli anni, scorporato nei diversi input, sulla coltura mais, nel sito di Grugliasco.

	Input	2014	2015	2016
COMPOST	Electricity Bioplastic	853,95	853,95	853,95
	Bioplastic Production	0,00	0,00	0,00
	Diesel	644,62	896,32	999,77
	Compost Use	0,00	0,00	0,00
	Farm Tractor	1388,78	1408,79	1388,78
	Pesticides Production	7,27	39,28	7,27
	Cultivation Operations	0,00	0,00	0,00
	Electricity Composting	698,21	879,22	826,61
	IrrigationPump	130950,00	130950,00	130950,00
SEPARATO SOLIDO	Electricity Bioplastic	853,95	853,95	853,95
	Bioplastic Production	0,00	0,00	0,00
	Diesel	775,03	831,80	775,03
	Farm Tractor	1388,78	1408,79	1388,78
	Pesticides Production	7,27	39,28	7,27
	Separato Solido Use	0,00	0,00	0,00
	Cultivation Operations	0,00	0,00	0,00
	IrrigationPump	130950,00	130950,00	130950,00
MIN	Electricity Bioplastic	853,95	853,95	853,95
	Bioplastic Production	0,00	0,00	0,00
	Diesel	536,61	593,38	536,61
	Farm Tractor	1328,75	1348,76	1328,75
	Fertiliser Use	0,00	0,00	0,00
	Pesticides Production	7,27	39,28	7,27
	NPK Production	49,49	49,34	49,34
	Cultivation Operations	0,00	0,00	0,00
	IrrigationPump	130950,00	130950,00	130950,00

Nel confronto fra tipi di gestioni si deduce dalla Tab. 3.16 come il trattamento MIN risulti il meno impattante; ciò è dovuto al fatto che le gestioni con substrati organici presentano operazioni di distribuzione del separato/compost che incidono maggiormente con i valori più elevati di consumo di carburante e utilizzo consumo orario delle macchine operatrici rispetto ad altre operazioni colturali convenzionali, in relazione ai quantitativi di fertilizzante organico distribuito (che sono superiori ai kg ha^{-1} di fertilizzante distribuito per MIN). Inoltre il COMPOST risulta meno vantaggioso per l'indicatore di consumo delle acque per via dei processi connessi alla fase di compostaggio che presentano, per la produzione di energia elettrica e di diesel, un consumo idrico. Infine è importante tener

presente come l'irrigazione sia la voce che prevale e che determina le differenze di maggiore interesse fra le diverse annate agrarie con differenti condizioni climatiche.

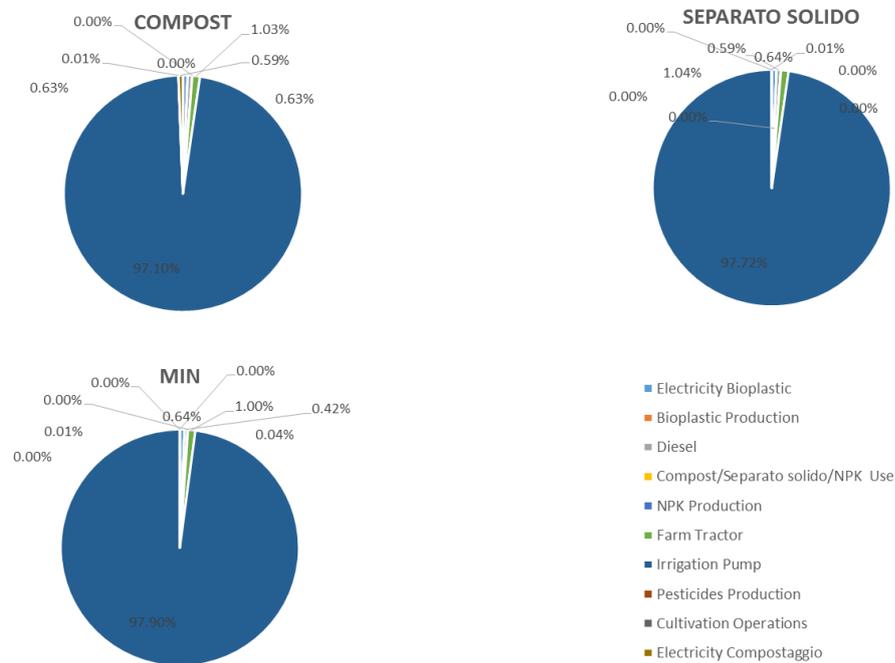


Figura 3.14: Contributo dei diversi input all'impatto di consumo totale delle acque dolci (espresso in percentuale) per i diversi trattamenti negli anni di sperimentazione, sulla coltura lattuga, nel sito di Grugliasco.

Come già detto in precedenza i contributi maggiori, per tutti e tre i trattamenti, rappresentati in figura 3.14, sono riconducibili agli interventi irrigui, successivamente si rilevano valori elevati per quanto riguarda la produzione di carburante impiegato e il consumo orario delle macchine operatrici. Per il compost contribuisce alla generazione dell'impatto la voce connessa all'energia elettrica legata alle fasi di compostaggio.

3.1.3 Coltura secondaria

Nel valutare l'impatto ambientale relativo la coltura secondaria, considerato che non vi sono differenze fra i trattamenti poiché tutte le gestioni presentano la medesimo agrotecnica e non vengono distribuiti concimi organici alla coltura, non è presente l'analisi statistica ed è stato deciso di descrivere brevemente i dati ottenuti confrontandoli con i valori medi degli impatti registrati per la coltura principale.

3.1.3.1 Dati di sintesi

In Tab.3.17 vengono riportati i principali valori di impatto generati dai trattamenti nel triennio di sperimentazione considerato, per la coltura secondaria.

Tabella 3.17: Principali impatti dei trattamenti a confronto nel triennio, sulla coltura secondaria, nel sito di Grugliasco.

	Acidification [Mole of H+ eq.]	Freshwater eutrophication [kg P eq]	IPCC global warming [kg CO2-Equiv.]	Particulate matter/Respiratory inorganics, [kg PM _{2,5} -Equiv.]	Resource Depletion, fossil and mineral CML2002 [kg Sb-Equiv.]	Terrestrial eutrophication [Mole of N eq.]	Total freshwater consumption [UBP]
COLTURA SECONDARIA	19,71	27,80	850,94	0,72	0,0058	92,94	53367,92

Analizzando in dettagli gli indicatori presi in considerazione si riscontrano valori più bassi rispetto alla coltura principale, in particolare per il potenziale di riscaldamento globale (meno impattante di circa il 50%) e il consumo totale di acque dolci (meno inquinante di circa il 40%); ciò è dovuto per il primo indicatore al minor numero di operazioni colturali e mezzi produttivi impiegati contribuenti all'impatto. Per la seconda categoria di impatto i valori inferiori sono dovuto alle quantità minori di acqua distribuite durante gli interventi irrigui: quest'ultimi sono stati minori in numero, per via dei fabbisogni idrici della coltura più bassi rispetto alla lattuga primaverile-estiva.

3.2 Bilancio economico

Oltre agli aspetti agro-ambientali, parte integrante del progetto, è la valutazione della sostenibilità economica delle diverse pratiche; risulta indispensabile al fine di fornire gli strumenti decisionali agli stakeholder, redigere un bilancio economico per le colture oggetto di indagine.

3.2.1 Mais

Nel presente paragrafo verrà descritto, per la coltura del mais, gli aspetti legati al bilancio economico considerando le voci in attivo come output (valore economico della granella venduta) e le voci in passivo come input, opportunamente rappresentate nelle tabelle e grafici successivi.

Tabella 3.183: Bilancio economico 2014 per la coltura mais, nel sito di Tetto Frati.

TRATTAMENTO	FATTORE	VALORE ECONOMICO (€)
SEPARATO 2014	Output	1961,02
	Input	878,64
	Diff	1082,38
COMPOST 2014	Output	1921,69
	Input	866,01
	Diff	1055,68
MIN 2014	Output	2451,04
	Input	866,01
	Diff	1585,03

Tabella 3.19: Bilancio economico 2015 per la coltura mais, nel sito di Tetto Frati.

TRATTAMENTO	FATTORE	VALORE ECONOMICO (€)
SEPARATO 2015	Output	1941,98
	Input	1065,80
	Diff	876,18
COMPOST 2015	Output	2128,88
	Input	2559,03
	Diff	-430,15
TRAD 2015	Output	2468,15
	Input	854,17
	Diff	1613,98

Tabella 3.20: Bilancio economico 2016 per la coltura mais, nel sito di Tetto Frati.

TRATTAMENTO	FATTORE	VALORE ECONOMICO (€)
SEPARATO 2016	Output	2042,75
	Input	1108,24
	Diff	934,51
COMPOST 2016	Output	1947,52
	Input	2821,98
	Diff	-874,46
TRAD 2016	Output	2301,40
	Input	844,28
	Diff	1457,12

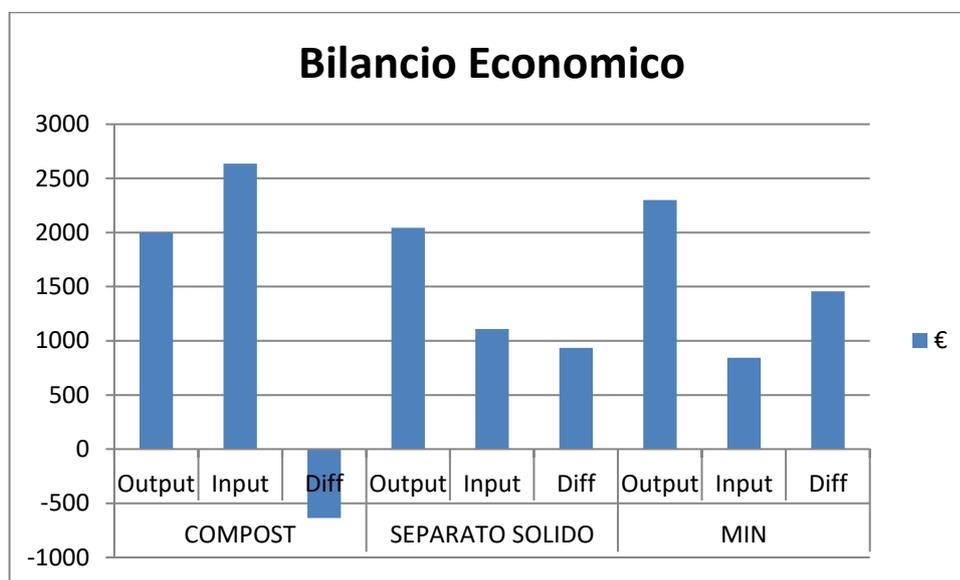


Figura 3.154: Bilanci economici a confronto fra i tre trattamenti, anni mediati, per la coltura mais, nel sito di Tetto Frati.

Per quanto riguarda l'analisi dei bilanci economici si evince, sia dalle tabelle 3.18, 3.19 e 3.20 che dall'istogramma in figura 3.15, che fra gli anni sperimentazione non vi siano delle grandi differenze fra gli output e fra gli input, altresì si osservano valori diversi in funzione dei diversi trattamenti. Si osserva che i valori calcolati sono in linea con le valutazioni economiche presenti nello studio di Basso *et. al* (2011) su colture cerealicole. La gestione minerale risulta la più efficiente con valori di output maggiori, rispetto agli altri trattamenti, riconducibili alle differenti efficienze in termini produttivi. Tale situazione riprende le considerazioni relative alle rese di cui si rimanda al paragrafo 2.6.2. Prendendo in considerazione le voci di costo (input) si riscontra che i valori maggiori sono riconducibili alla gestione con compost in cui l'acquisto dell'ammendante è la componente

più costosa, la quale determina le differenze fra i trattamenti e induce il bilancio ad avere valori negativi, poiché il prezzo di vendita della prodotto impiegato risulta elevato. Inoltre va considerato che il prezzo del separato, in mancanza di un mercato, è stato equiparato al prezzo di mercato, pur aleatorio, del letame, il quale è notevolmente inferiore al prezzo di vendita del compost impiegato. Risulterebbe interessante impiegare compost nel caso che il suo valore economico scenda con prezzi ridotti di circa il 50%, anche se la gestione convenzionale in maiscoltura, rimane più adatta e redditizia a fronte del raggiungimento di rese maggiori.

Nelle figure seguenti vengono riportati i grafici a torta concernenti l'incidenza delle componenti di costo sulla voce input, mediati fra gli anni di sperimentazione, suddivise per i tre trattamenti.

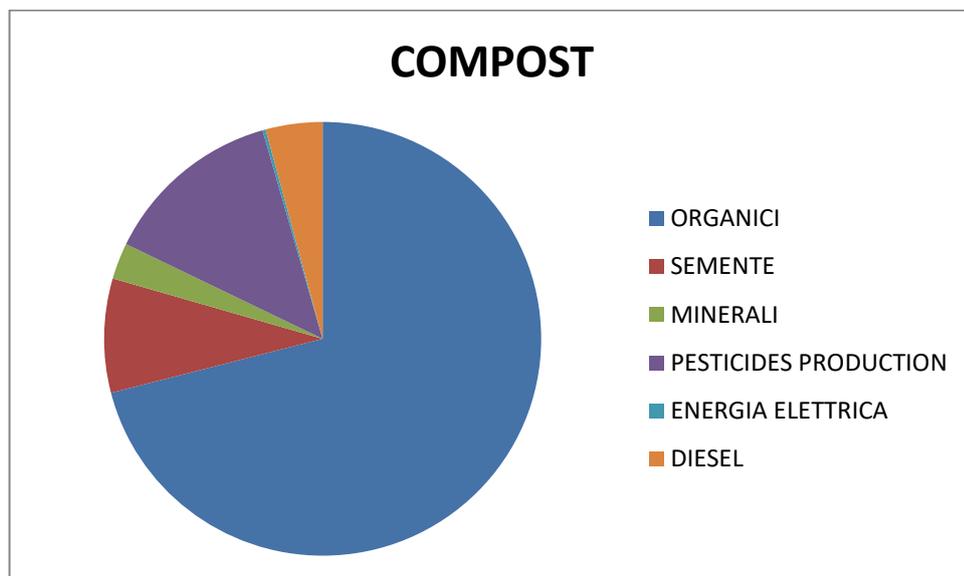


Figura 3.16: Contributo delle componenti alla voce input (costi) per il trattamento compost, per la coltura mais, nel sito di Tetto Frati.

Nel grafico in figura, si osserva come il compost sia la componente preponderante con un contributo percentuale pari a 70,99%, seguono i fattori di costo relativi alla acquisto di agrofarmaci con un valore di 13,37%. Inoltre, va sottolineato come l'acquisto della semente incida del 8,50% sul totale dei costi e successivamente il carburante utilizzate per le operazioni colturali con un valore pari al 4,20%.

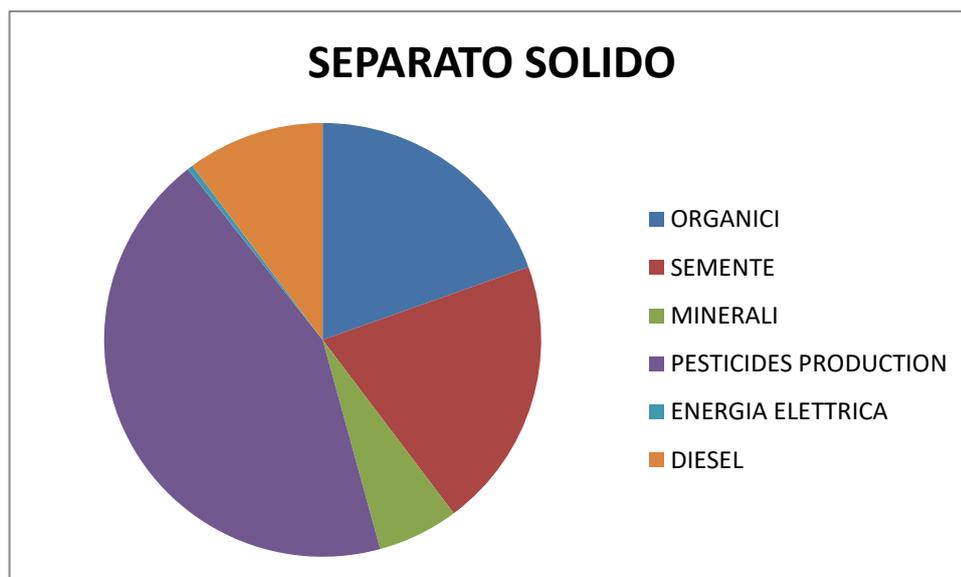


Figura 3.17: Contributo delle componenti alla voce input (costi) per il trattamento separato solido, per la coltura mais, nel sito di Tetto Frati.

Nel caso del trattamento separato solido, si osserva come gli agrofarmaci siano la componente principale ad incidere sul totale dei costi con valori di 43,66%, seguono i fattori di costo relativi all'acquisto di separato solido con un contributo percentuale pari a di 19,55%. Infine si osservano i contributi relativi all'acquisto della semente che incide del 20,21% sul totale dei costi e il carburante utilizzate per le operazioni colturali con un valori di 10,17%.

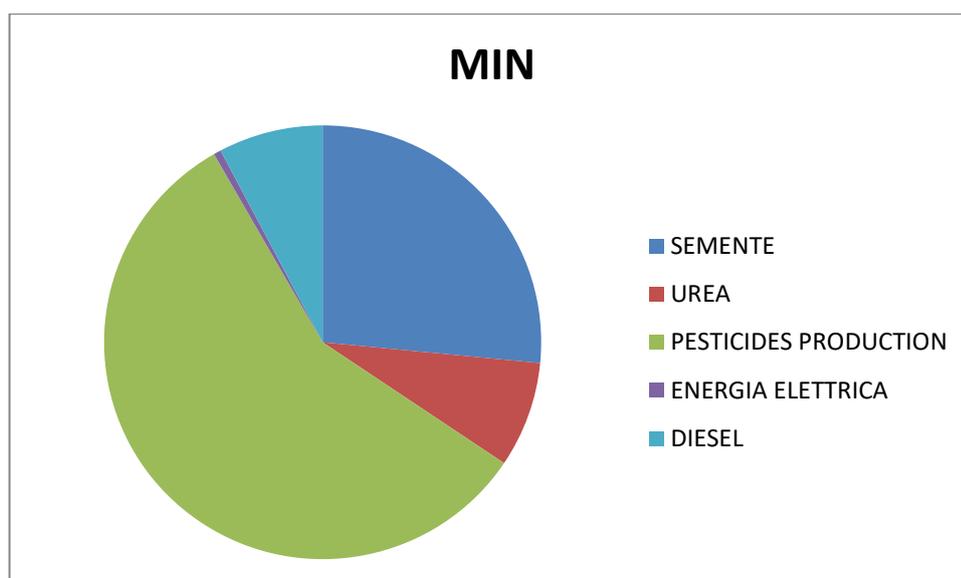


Figura 3.18: Contributo delle componenti alla voce input (costi) per il trattamento minerale, per la coltura mais, nel sito di Tetto Frati.

La gestione convenzionale descrive una situazione diversa dalle precedenti, poiché non è presente la voce relativa l'acquisto di matrici organiche, tuttavia si osserva come, anche per questo trattamento, gli agrofarmaci siano la componente principale ad incidere sul totale dei costi con valori di 57,31%, seguono i contributi relativi all'acquisto della semente che incide del 26,53 % sul totale dei costi, l'acquisto di urea con un valore di 7,88% e il carburante utilizzato per le operazioni colturali con un valori di 7,74%.

3.2.2 Colture orticole

La valutazione economica per l'azienda orticola è stata suddivisa in funzione del tipo di coltura, esaminando separatamente la coltura principale (lattuga) e la coltura secondaria, al fine di valutare con precisione le differenti voci di output e input per i diversi trattamenti, tenendo presente della variabilità interannuale dei dati produttivi.

3.2.2.1 Lattuga

Tabella 3.214: Bilancio economico 2014 per la coltura lattuga, nel sito di Tetto Frati.

TRATTAMENTO	FATTORE	VALORE ECONOMICO (€)
SEPARATO 2014	Output	17367,00
	Input	1973,95
	Diff	15393,05
COMPOST 2014	Output	17404,50
	Input	4776,89
	Diff	12627,61
MIN 2014	Output	16116,50
	Input	1908,69
	Diff	14207,81

Tabella 3.225: Bilancio economico 2015 per la coltura lattuga, nel sito di Tetto Frati.

TRATTAMENTO	FATTORE	VALORE ECONOMICO (€)
SEPARATO 2015	Output	22335,00
	Input	1980,81
	Diff	20354,19
COMPOST 2015	Output	25747,00
	Input	1980,81
	Diff	23766,19
MIN 2015	Output	18896,00
	Input	1980,81
	Diff	16915,19

Tabella 3.23: Bilancio economico 2016 per la coltura lattuga, nel sito di Tetto Frati.

TRATTAMENTO	FATTORE	VALORE ECONOMICO (€)
SEPARATO 2016	Output	25650,00
	Input	1990,35
	Diff	23659,65
COMPOST 2016	Output	27084,50
	Input	4776,89
	Diff	22307,61
MIN 2016	Output	21865,50
	Input	1908,69
	Diff	19956,81

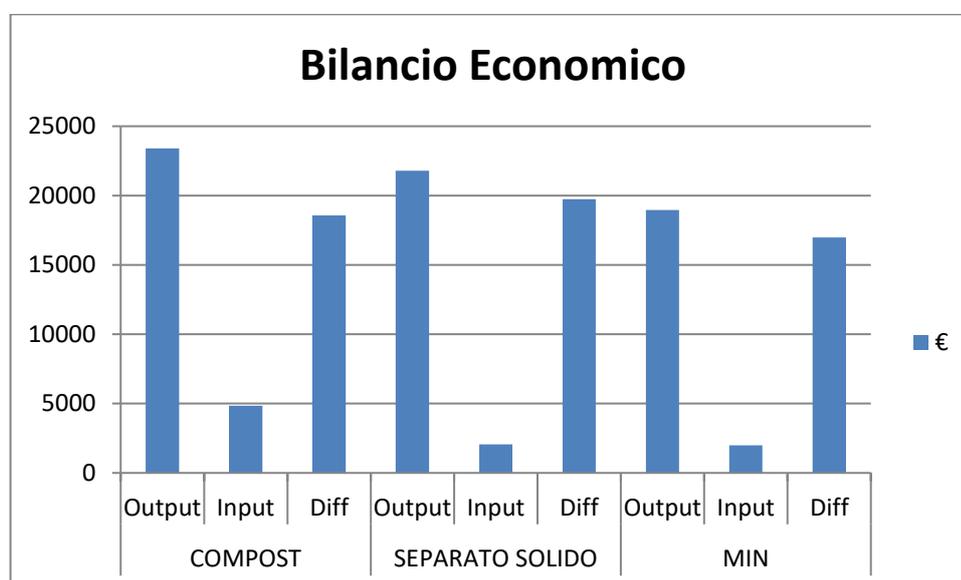


Figura 3.195: Bilanci economici a confronto fra i tre trattamenti, anni mediati, per la coltura lattuga, nel sito di Grugliasco.

Come si osserva dalla tabelle precedenti e dal grafico in figura la stima economica dei costi e dei ricavi per quanto riguarda la lattuga, presenta poche differenze fra i diversi anni di sperimentazione, mentre è interessante valutare le voci di bilancio confrontando i diversi trattamenti. La gestione con compost risulta la più efficiente in termini di output con valori maggiori, rispetto agli altri trattamenti, riconducibili alle rese superiori, connesse coi vantaggi apportati dal substrato impiegato, come descritto nel paragrafo 2.7.2 Tuttavia, le voci di costo (input) presentano valori maggiori per il trattamento compost, in confronto con le altre gestioni, in cui l'acquisto di tale matrice è la componente più costosa, come descritto in precedenza nel paragrafo 3.2.1. Risulterebbe molto interessante impiegare compost, soprattutto in relazione del suo impiego indicato in orticoltura che permette rese

superiori, nel caso che il suo valore economico scenda con prezzi ridotti di circa il 45%, presentando così un ulteriore vantaggio rispetto alla gestione convenzionale.

Nelle figure seguenti vengono riportati i grafici a torta concernenti l'incidenza delle componenti di costo sulla voce input, mediati fra gli anni di sperimentazione, suddivise per i tre trattamenti.

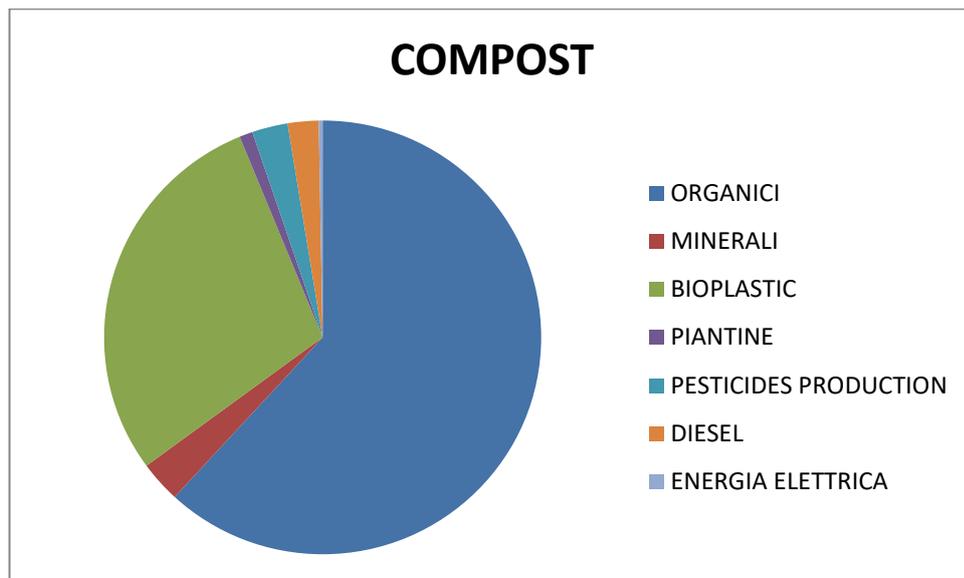


Figura 3.20: Contributo delle componenti alla voce input (costi) per il trattamento compost, per la coltura lattuga, nel sito di Grugliasco.

Nel grafico in figura 3.20, si osserva come il compost sia la componente preponderante con un contributo percentuale pari a 61,84%, seguono i fattori di costo relativi alla acquisto di teli per la pacciamatura con un valore di 28,88% e le altre componenti. Inoltre, va sottolineato come l'acquisto delle piantine incida molto poco con un valore pari al 0,98%.

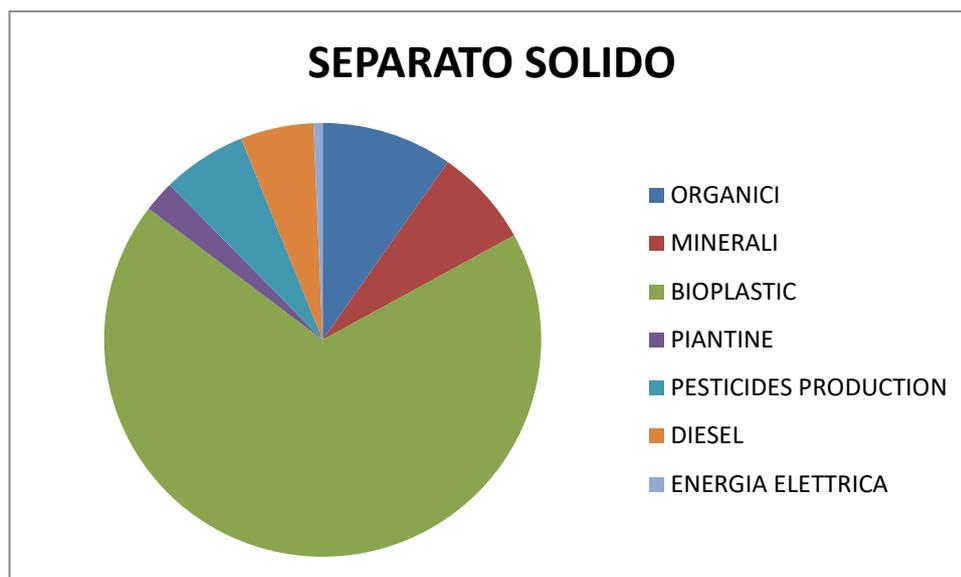


Figura 3.21: Contributo delle componenti alla voce input (costi) per il trattamento separato solido, per la coltura lattuga, nel sito di Grugliasco.

Nel caso del trattamento separato solido, si osserva come i teli in bioplastica, utilizzati per la pacciamatura, siano la componente principale ad incidere sul totale dei costi con valori di 68,34%, seguono i fattori di costo relativi all'acquisto di separato solido con un contributo percentuale pari a di 9,71% ed all'acquisto dei concimi minerali con un valore di 7,29%.

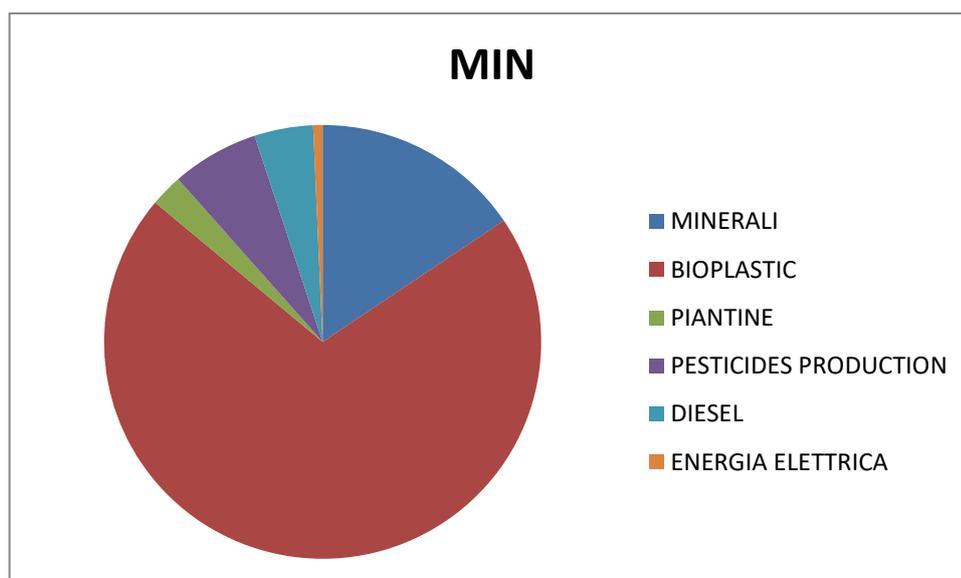


Figura 3.22: Contributo delle componenti alla voce input (costi) per il trattamento minerale, per la coltura lattuga, nel sito di Grugliasco.

Anche per il trattamento minerale si denota come i teli in bioplastica, utilizzati per la pacciamatura, siano la componente principale ad incidere sul totale dei costi con valori di 70,55%, seguono i fattori di costo relativi all'acquisto dei concimi minerali con un valore di 15,55% e all'acquisto di agrofarmaci con un contributo percentuale pari a di 6,46%.

3.2.2.2 *Coltura secondaria*

Tabella 3.24: Bilancio economico 2014 per la coltura secondaria, nel sito di Grugliasco.

TRATTAMENTO	FATTORE	VALORE ECONOMICO (€)
SEPARATO 2014	Output	21179,40
	Input	648,64
	Diff	20530,76
COMPOST 2014	Output	21017,15
	Input	648,64
	Diff	20368,51
MIN 2014	Output	20590,63
	Input	648,64
	Diff	19941,98

Tabella 3.25: Bilancio economico 2015 per la coltura secondaria, nel sito di Grugliasco.

TRATTAMENTO	FATTORE	VALORE ECONOMICO (€)
SEPARATO 2015	Output	5807,88
	Input	614,19
	Diff	5193,69
COMPOST 2015	Output	6811,67
	Input	614,19
	Diff	6197,47
MIN 2015	Output	7543,77
	Input	614,19
	Diff	6929,57

Tabella 3.26: Bilancio economico 2016 per la coltura secondaria, nel sito di Grugliasco.

TRATTAMENTO	FATTORE	VALORE ECONOMICO (€)
SEPARATO 2016	Output	13184,80
	Input	648,64
	Diff	12536,16
COMPOST 2016	Output	12723,31
	Input	648,64
	Diff	12074,67
MIN 2016	Output	16018,65
	Input	648,64
	Diff	15370,01

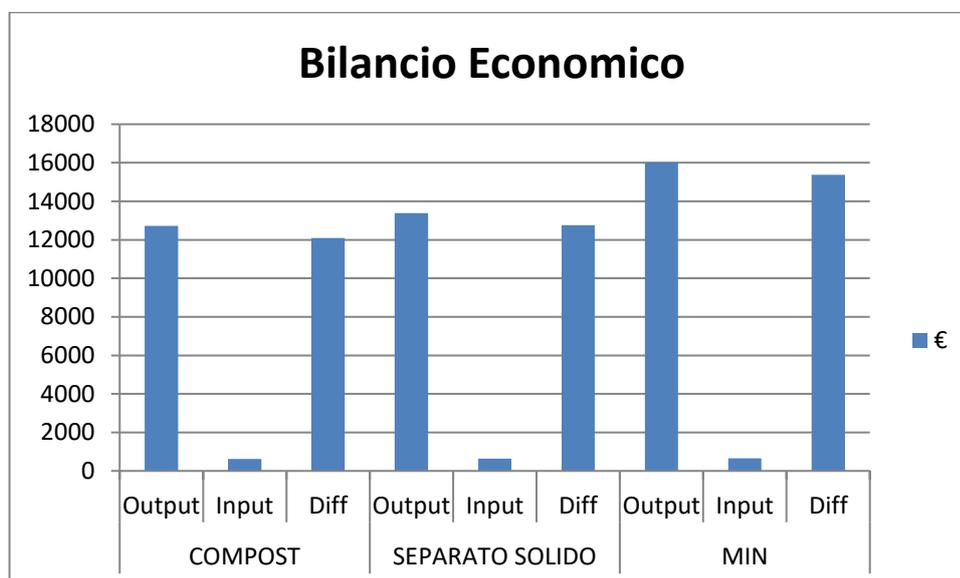


Figura 3.23: Bilanci economici a confronto fra i tre trattamenti, anni mediati, per la coltura secondaria, nel sito di Grugliasco.

Come si osserva dalla tabelle precedenti e dal grafico in figura la stima economica dei costi e dei ricavi per quanto riguarda la lattuga, presenta delle differenze fra i diversi anni di sperimentazione: nel 2015 le rese sono state nettamente inferiori per via di un'errata scelta da parte dell'agricoltore nelle epoca di trapianto della coltura, determinando dei ricavi contenuti. Valutando ora le voci di bilancio a confronto fra i diversi trattamenti si riscontra dalla diagramma a barre verticali in figura che la gestione con minerale risulta la più efficiente in termini di output con valori maggiori, rispetto agli altri trattamenti, riconducibili alle rese superiori. Il potenziale contributo dovuto all'apporto di compost sulla coltura principale che sulla coltura successiva determinerebbe effettui residui di apporto di nutrienti e le migliorate condizioni chimico-fisiche del suolo a fronte

dell'apporto di tale ammendante, non ha prodotto gli effetti auspicati. Tuttavia, va sottolineato che la sperimentazione ha avuto luogo per soli quattro anni consecutivi e in tale studio vengono riportati soltanto i dati del primo triennio. Sarebbe interessante poter valutare sul lungo periodo i potenziali benefici del compost anche sulla coltura orticola secondaria, come affermano gli studi condotti dal C.R.P.A nel 2008, dal CRA nel 2011 e di Pinamonti nel 1997, da considerare in parallelo con l'analisi ambientale verificandone i vantaggi e producendo degli indicatori di efficienza globali.

Analizzando in dettaglio le voci di costo (input) si riscontrano i medesimi valori di costo negli anni poiché l'agrotecnica è rimasta invariata fra i trattamenti.

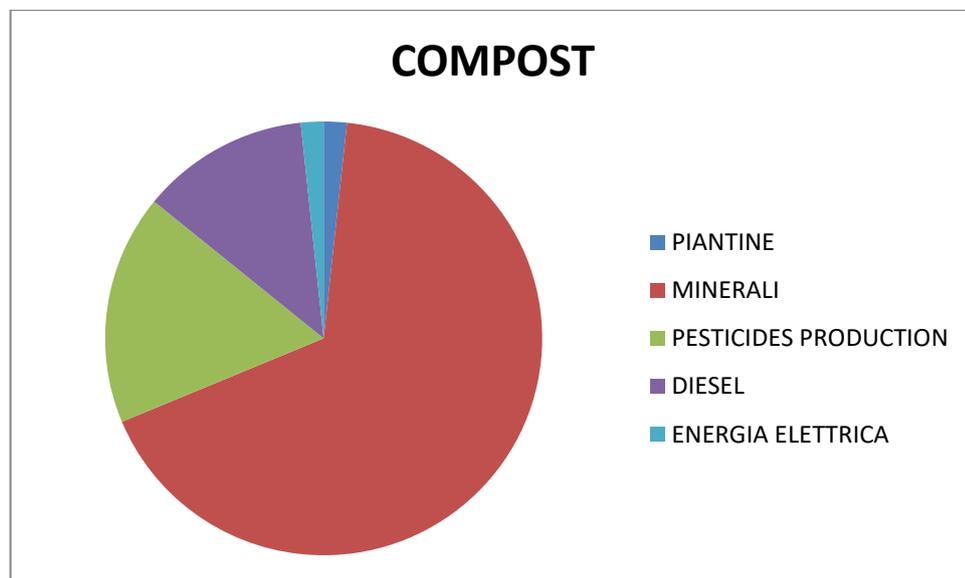


Figura 3.24: Contributo delle componenti alla voce input (costi) per il trattamento compost, per la coltura secondaria, nel sito di Grugliasco.

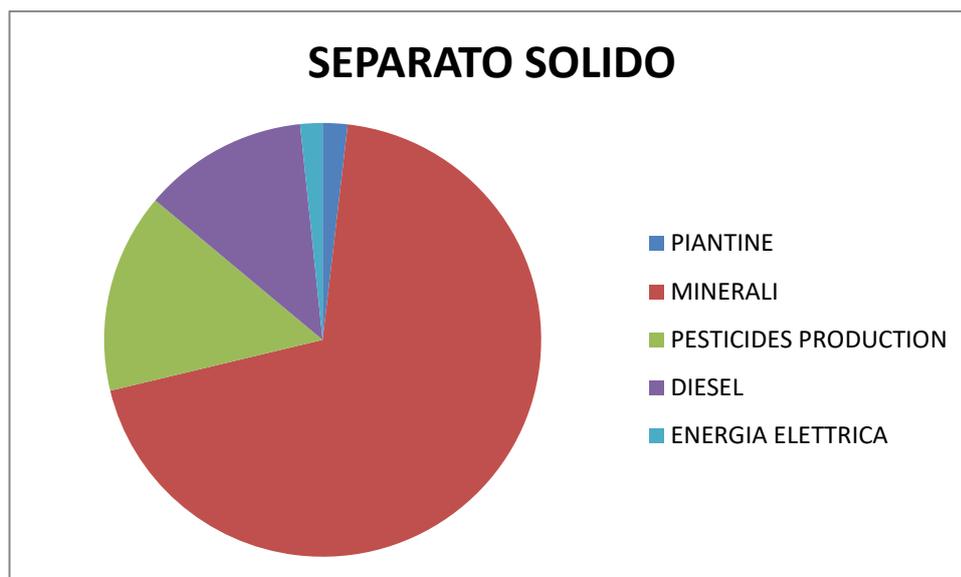


Figura 3.25: Contributo delle componenti alla voce input (costi) per il trattamento separato solido, per la coltura secondaria, nel sito di Grugliasco.

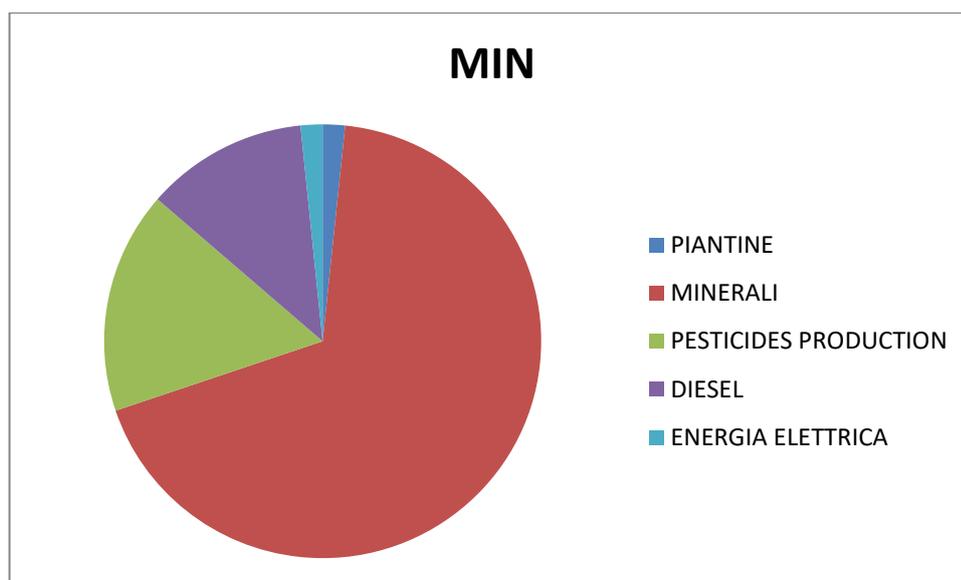


Figura 3.26: Contributo delle componenti alla voce input (costi) per il trattamento minerale, per la coltura secondaria, nel sito di Grugliasco.

In tutti i trattamenti le voci che incidono prevalentemente sul totale dei costi sono l'acquisto di concimi minerali con un valore del 69,39%, seguono gli agrofarmaci con un contributo percentuale del 14,89% e i carburanti con un valore pari al 12,23% e le altre componenti con valori considerevolmente più bassi.

3.3 Bilancio energetico

È stato redatto per ogni tipo di indirizzo produttivo (maiscoltura e orticoltura) un bilancio energetico volto a considerare l'importanza dell'utilizzo di indicatori energetici in campo agro-ambientale con l'intento di comprendere se la gestione colturale permette la produzione energia (alimenti) o se determina un consumo. Tali indicatori possono essere considerati come un valore aggiunto al bilancio economico, il quale risente della folle fluttuazione dei prezzi. Inoltre l'unità di misura dei bilanci energetici (MJ) ci permette di confrontare colture diverse e valutare più colture all'interno dello stesso anno.

3.3.1 Mais

Nel presente paragrafo verranno descritti, per la coltura del mais, gli aspetti legati al bilancio energetico del mais (valore energetico della granella raccolta - valore energetico dei mezzi produttivi impiegati) e le efficienze energetiche messe a confronto tra i diversi trattamenti adottati.

Tabella 3.276: Bilancio energetico 2014 per la coltura mais, nel sito di Tetto Frati.

TRATTAMENTO	FATTORE	VALORE ENERGETICO (MJ)
SEPARATO 2014	Output	261285,20
	Input	19649,12
	Diff	241636,08
COMPOST 2014	Output	256044,36
	Input	19649,12
	Diff	236395,24
TRAD 2014	Output	279221,36
	Input	17860,89
	Diff	261360,47

Tabella 3.287: Bilancio energetico 2015 per la coltura mais, nel sito di Tetto Frati.

TRATTAMENTO	FATTORE	VALORE ENERGETICO (MJ)
SEPARATO 2015	Output	206417,20
	Input	19833,47
	Diff	186583,73
COMPOST 2015	Output	226283,20
	Input	19833,47
	Diff	206449,73
TRAD 2015	Output	262344,72
	Input	18045,24
	Diff	244299,48

Tabella 3.29: Bilancio energetico 2016 per la coltura mais, nel sito di Tetto Frati.

TRATTAMENTO	FATTORE	VALORE ENERGETICO (MJ)
SEPARATO 2016	Output	215915,04
	Input	18890,81
	Diff	197024,23
COMPOST 2016	Output	205849,60
	Input	18890,81
	Diff	186958,79
TRAD 2016	Output	243254,44
	Input	17102,57
	Diff	226151,87

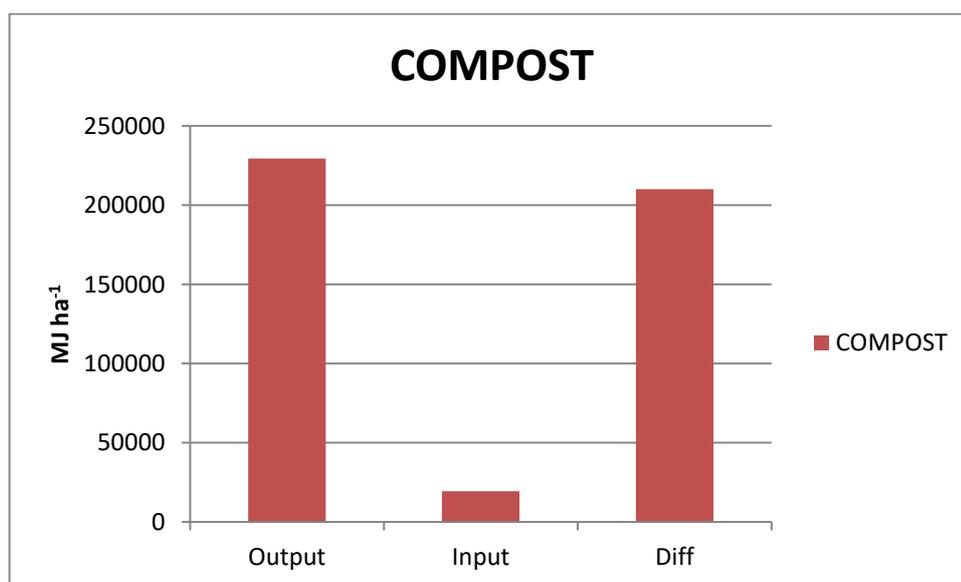


Figura 3.27: Bilancio energetico per il trattamento compost, anni mediati, per la coltura mais, nel sito di Tetto Frati.

Come si osserva dalla tabelle precedenti (3.27, 3.28 e 3.29) e dal grafico in figura 3.27 il bilancio energetico relativo al trattamento compost si evidenzia come gli output energetici derivanti dalla granella raccolta siano superiori agli input riconducibili ai mezzi produttivi impiegati per la gestione colturale del mais, determinando, pertanto, un guadagno energetico ottimale con un valore di 209934,59 MJ ha⁻¹.

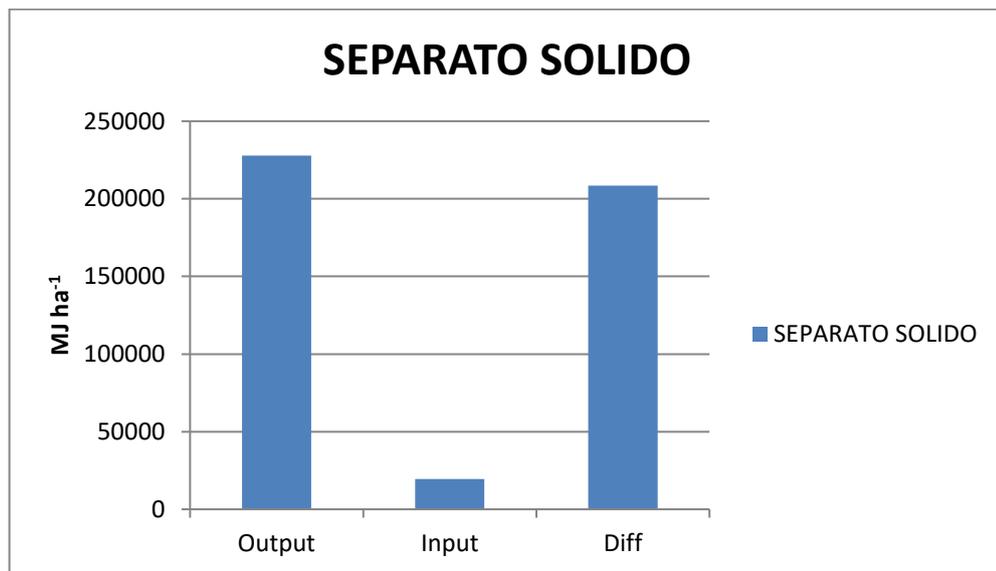


Figura 3.28: Bilancio energetico per il trattamento separato solido, anni mediati, per la coltura mais, nel sito di Tetto Frati.

In Fig. 3.28, l'istogramma a barre verticali, descrivono una situazione, per il trattamento separato solido, molto simile al compost, in cui si evidenzia come gli output energetici derivanti dalle rese in granella raggiungano livelli nettamente superiori agli input energetici relativi ai mezzi produttivi impiegati per la gestione colturale del mais, determinando, pertanto, un guadagno energetico ottimale pari a 208414,68 MJ ha⁻¹.

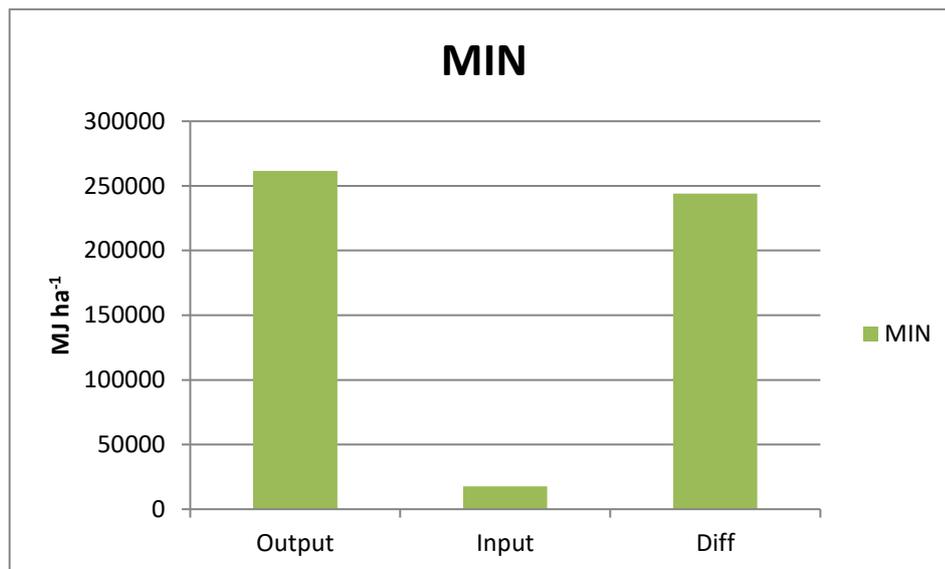


Figura 3.29: Bilancio energetico per il trattamento minerale, anni mediati, per la coltura mais, nel sito di Tetto Frati.

Nelle tabelle 3.27, 3.28, 3.29 ed in figura 3.29, viene descritto il raggiungimento di un valore, per la gestione tradizionale, in termini di guadagno energetico derivante dalla differenza fra output ed input con un valore, equivalente a 243937,28 MJ ha⁻¹.

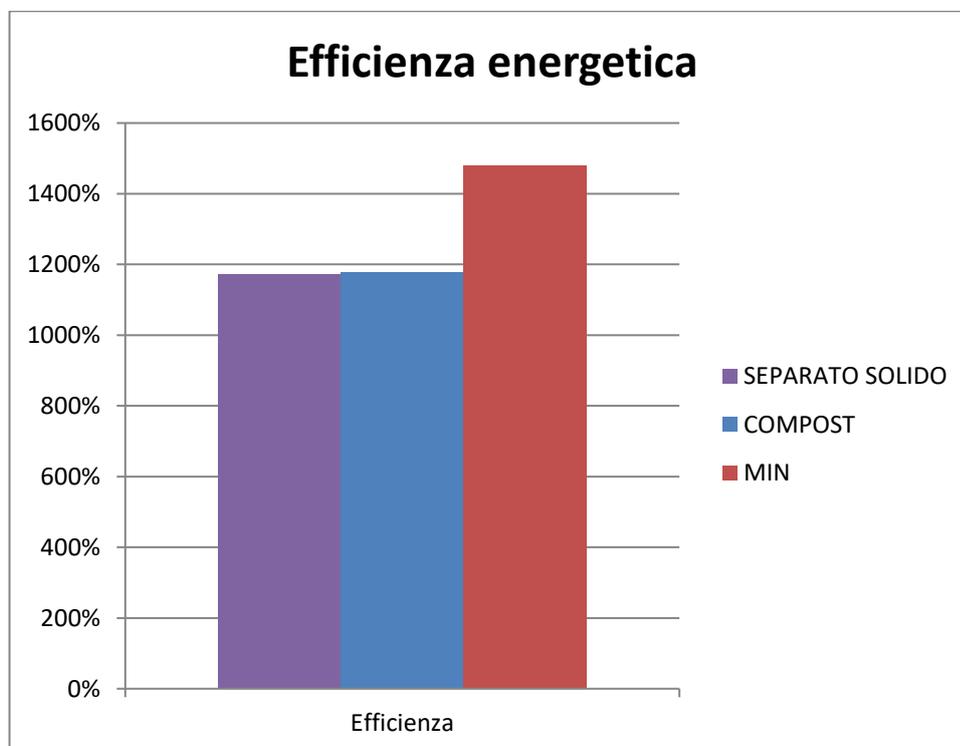


Figura 3.30: Efficienza energetica a confronto fra i diversi trattamenti, anni mediati, per la coltura mais, nel sito di Tetto Frati.

Il confronto fra le efficienze energetiche dei diversi trattamenti descrive come la gestione minerale presenta dei valori superiori di circa un 305 % nei confronti dei due restanti trattamenti. Le principali differenze fra i trattamenti sono legate alle produzioni maggiori (output energetici) nella gestione convenzionale e al consumo di carburante riferito alle operazioni di distribuzione dei due substrati organici.

Riassumendo i risultati relativi ai bilanci energetici, i quali sono in linea con i dati presentati nello studio di Alluvione *et al.* (2011), è interessante osservare come nel mais risulta energeticamente più vantaggiosa la gestione con l'urea rispetto alle gestione con substrati organici. Un ulteriore affinamento dell'analisi energetica che tenga conto anche della quota di energia derivante dalla produzione dell'impianto di biogas a monte della presente analisi potrebbe modificare gli scenari descritti.

3.3.2 Colture orticole

Nel presente paragrafo verrà descritto, per le colture orticole, gli aspetti legati al bilancio energetico considerando le voci in attivo come output (valore energetico della granello raccolta) e le voci in passivo come input (valore energetico dei mezzi produttivi impiegati), e le efficienze energetiche messe a confronto tra i diversi trattamenti adottati. I bilanci hanno preso in considerazione le due colture orticole congiuntamente, sommando i valori di output ed input al fine di valutare le efficienze energetiche dei diversi trattamenti riferibile al tipo di ordinamento produttivo.

Tabella 3.308: Bilancio energetico 2014 per la colture orticole (lattuga + coltura secondaria), nel sito di Grugliasco.

TRATTAMENTO	FATTORE	VALORE ENERGETICO (MJ)
SEPARATO 2014	Output	63169,14
	Input	92690,54
	Diff	-29521,40
COMPOST 2014	Output	62927,39
	Input	92690,54
	Diff	-29763,15
MIN 2014	Output	60322,93
	Input	111245,69
	Diff	-50922,76

Tabella 3.319: Bilancio energetico 2015 per la colture orticole (lattuga + coltura secondaria), nel sito di Grugliasco.

TRATTAMENTO	FATTORE	VALORE ENERGETICO (MJ)
SEPARATO 2015	Output	39459,54
	Input	93874,52
	Diff	-54414,98
COMPOST 2015	Output	45642,96
	Input	93874,52
	Diff	-48231,56
MIN 2015	Output	36890,67
	Input	112429,68
	Diff	-75539,00

Tabella 3.32: Bilancio energetico 2016 per la colture orticole (lattuga + coltura secondaria), nel sito di Grugliasco.

TRATTAMENTO	FATTORE	VALORE ENERGETICO (MJ)
SEPARATO 2016	Output	60395,37
	Input	92690,54
	Diff	-32295,17
COMPOST 2016	Output	61593,28
	Input	92690,54
	Diff	-31097,26
MIN 2016	Output	60173,83
	Input	111245,69
	Diff	-51071,86

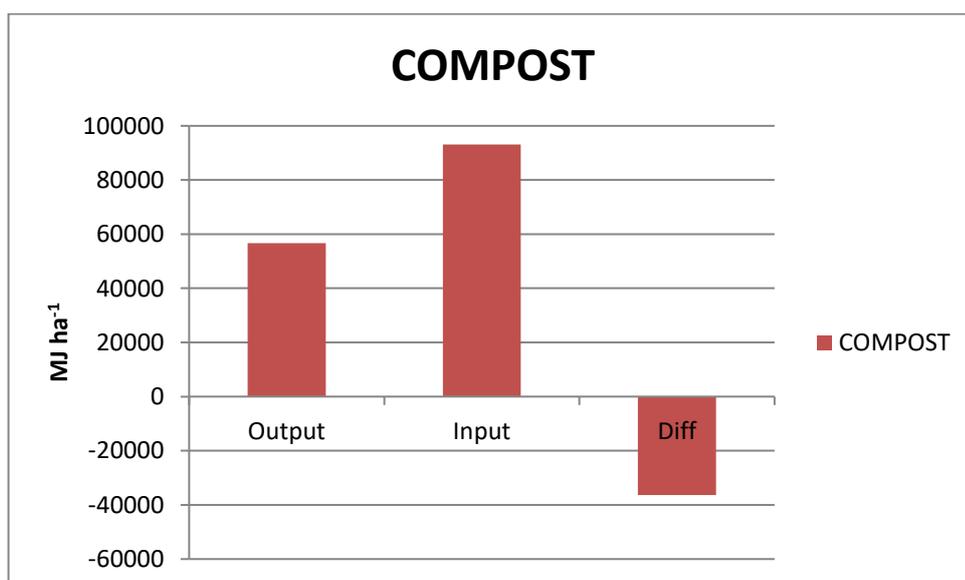


Figura 3.316: Bilancio energetico per il trattamento compost, anni mediati, per la colture orticole (lattuga + coltura secondaria), nel sito di Grugliasco.

Come si osserva dalle tabelle precedenti (3.30, 3.31 e 3.32) e dal grafico in figura 3.31 il bilancio energetico relativo al trattamento compost si evidenzia come gli output energetici derivanti dalle rese siano insufficienti in termini energetici a fronte dei valori di input nettamente superiori, quindi comportando un deficit energetico con un valore di $-36363,99 \text{ MJ ha}^{-1}$.

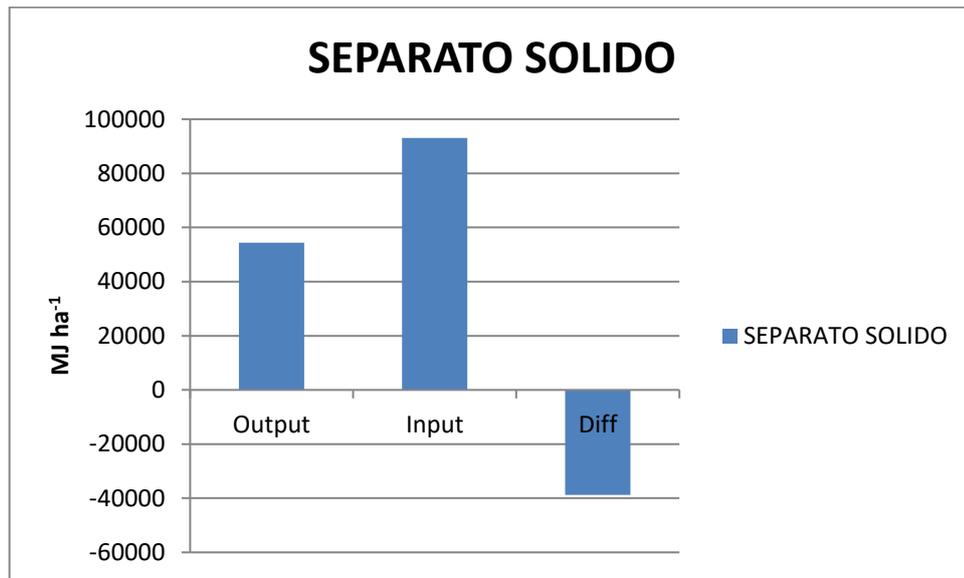


Figura 3.32: Bilancio energetico per il trattamento separato solido, anni mediati, per la colture orticole (lattuga + coltura secondaria), nel sito di Grugliasco.

In figura 3.32, l'istogramma a barre verticali, descrive una situazione, per il trattamento separato solido, molto simile al compost, in cui si evidenzia come gli output energetici derivanti dalle rese delle colture orticole siano inferiori agli input, riferiti ai mezzi produttivi impiegati per la gestione colturale. Ciò comporta un deficit energetico di $-38743,85 \text{ MJ ha}^{-1}$.

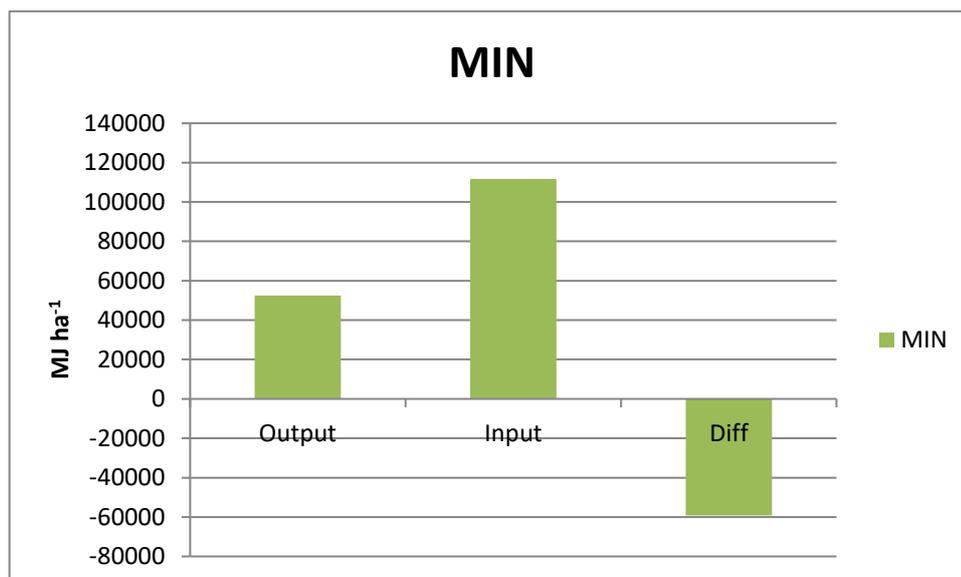


Figura 3.33: Bilancio energetico per il trattamento minerale, anni mediati, per la colture orticole (lattuga + coltura secondaria), nel sito di Grugliasco.

Nelle tabelle 3.30, 3.31 e 3.32 ed in figura 3.33, viene descritto il raggiungimento di un valore negativo, per la gestione tradizionale, registrando un deficit energetico derivante dalla differenza fra output ed input con un valore, equivalente a $-59177,87 \text{ MJ ha}^{-1}$, nettamente inferiore rispetto ai deficit rilevati nei precedenti trattamenti.

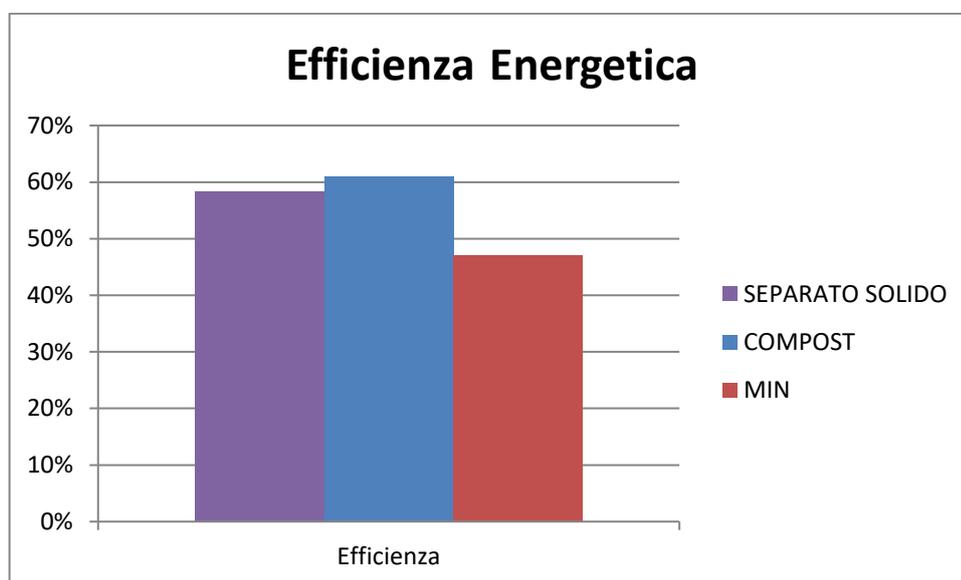


Figura 3.34: Efficienza energetica a confronto fra i diversi trattamenti, anni mediati, per le colture orticole (lattuga + coltura secondaria), nel sito di Grugliasco.

Il confronto fra le efficienze energetiche, in riferimento ad entrambe le colture orticole oggetto d'indagine, dei diversi trattamenti descrive come il trattamento compost, il più efficiente, presenta dei valori superiori di circa un 14 % nei confronti del minerale. E' importante tener presente come le operazioni colturali, con il consumo di carburanti, incidano prevalentemente sulle voci passive di bilancio, seguono infine i concimi minerali, i quali contribuiscono ad implementare i deficit energetici.

Riassumendo i risultati relativi ai bilanci energetici, risulta interessante osservare come l'impiego di matrici organiche risulti più efficiente rispetto alla gestione convenzionale con concimi minerali nelle orticole. Un ulteriore affinamento dell'analisi energetica che tenga conto anche della quota di energia derivante dalla produzione dell'impianto di biogas a monte della presente analisi potrebbe valorizzare gli scenari descritti.

3.4 Prospettive per il completamento del lavoro

Ai fini di integrare e completare il presente studio, oltre ad includere anche l'annata agraria 2017, sarà necessario implementare la valutazione del bilancio ambientale in fase progettuale considerando ulteriori processi a valle dei risultati, i quali dovrebbero determinare maggiori differenze tra i trattamenti, con vantaggi per le gestioni con matrici organiche, quali:

- lo stoccaggio di carbonio potenziale nel suolo in relazione all'apporto di compost;
- la produzione di energia verde derivante dalla produzione di biogas a monte del processo di produzione del compost e separato solido.

Sarà interessante, una volta conclusa la sperimentazione e la fase di raccolta ed elaborazione dei dati, parametrizzare gli impatti in relazione al kg di prodotto raccolto edibile per la lattuga e ai kg di granella secca raccolta e in funzione di un valore energetico di riferimento (MJ) per verificare potenziali differenze fra i diversi scenari secondo una scala diversa rispetto a quella adottata nel presente studio.

4. Conclusioni

Tale sperimentazione ha permesso di evidenziare, attraverso i risultati dell'analisi LCA, che per la coltivazione di mais l'impiego di separato solido risulta il trattamento meno impattante sull'ambiente, seguito dal trattamento compost e infine dalla gestione tradizionale con i fertilizzanti minerali. La differenza tra il compost e il separato solido è principalmente legata ai maggiori dispendi energetici dovuti alla fase di compostaggio stessa. Un'altra ragione, anche se meno importante, è la resa in granella che nel trattamento compost è leggermente minore rispetto al separato solido; ciò implica, nel calcolo del bilancio dei nutrienti, la determinazione di asporti più bassi e quindi surplus di nutrienti maggiori, che a loro volta comportano impatti maggiori per il compost rispetto al separato solido. Il maggiore impatto dell'urea, nonostante le più alte performance produttive, è invece dovuto alla produzione del fertilizzante stesso.

Per quanto riguarda le colture orticole, invece, è stata registrata una situazione opposta, con il trattamento compost che è il più impattante e il minerale il meno inquinante. Tale condizione è riconducibile agli impatti generati dai surplus di nutrienti, che sono maggiori laddove gli apporti sono stati maggiori: il compost ha infatti ricevuto maggiori quantità di NPK e questo non è stato completamente compensato dai maggiori asporti. Tuttavia, è opportuno considerare che, tali matrici organiche presentano una lenta cessione degli elementi nutritivi nel suolo ed un incremento negli anni del contenuto di carbonio nel terreno, agevolando l'assorbimento da parte delle radici dei macro e micro-nutrienti proprio nella fase in cui la coltura presenta i maggiori asporti. Ciò determina tendenzialmente l'ottenimento di rese superiori con l'utilizzo di compost rispetto alle altre gestioni.

I rapporti relativi tra i trattamenti potrebbero cambiare quando si terrà in opportuna considerazione la variazione dello stock di carbonio nel suolo e il beneficio ambientale legato alla produzione di biogas.

Nell'ambito dei bilanci economici, risulta interessante osservare come a fronte di tutte le voci di costo sia stato raggiunto un ottimo profitto sia per il mais, soprattutto per la gestione convenzionale, che per la lattuga, in cui il trattamento compost risulta il più vantaggioso. Opportuna considerazione va fatta in merito all'incidenza degli ammendanti e

dei concimi minerali acquistati, che costituiscono la voce di contributo maggiore tra i costi del bilancio.

Valutando i bilanci energetici, risulta interessante osservare come l'impiego di matrici organiche sia più efficiente rispetto alla gestione convenzionale con concimi minerali nelle orticole, mentre nel mais è più energeticamente vantaggiosa la gestione con l'urea, perché determina produzioni maggiori. Un ulteriore affinamento dell'analisi energetica che tenga conto anche della quota di energia derivante dalla produzione dell'impianto di biogas a monte della presente analisi potrebbe modificare gli scenari descritti.

Risulta di grande interesse considerare come l'attuale pensiero in ambito agronomico europeo stia evolvendo verso l'importanza della valorizzazione dei servizi agroecosistemici, quali lo stoccaggio di carbonio. L'aumento di carbonio nel suolo, in forma stabile, a fronte dell'impiego di matrici organiche, dovrà essere oggetto di ulteriori studi volti a valutare gli effetti benefici in tale direzione. Sarà interessante, una volta conclusa la fase di sperimentazione del progetto Life+, che terminerà nel 2018, implementare l'analisi LCA con i dati di stoccaggio di carbonio nel suolo così da valutare in modo complessivo il possibile vantaggio ambientale derivante dall'uso del compost, anche rispetto al trattamento con il separato solido. Sarà importante verificare se tale aumento di carbonio controbilanci o meno gli svantaggi ambientali derivanti dal surplus di elementi nutritivi, in particolare azoto, come si è riscontrato specialmente per le colture orticole. Inoltre, la produzione di energia verde a monte del processo di compostaggio del digestato, se considerata nel bilancio ambientale, potrebbe alleggerire, in termini di emissioni, la gestione con matrici organiche e rendere ancor più vantaggioso l'impiego di compost e separato solido in agricoltura.

Ulteriore considerazione in merito ai bilanci ambientali riguarda la necessità di utilizzare degli indicatori di sintesi per permettere di sensibilizzare più facilmente gli *stakeholder* e l'opinione pubblica. Tali indicatori di sintesi vanno a contabilizzare tutti gli impatti normalizzati e pesati in funzione dell'unità di misura più appropriata (ad esempio il personal equivalent proposto dalla metodologia LCA europea ILCD/PEF). Risulta tuttavia difficile tale applicazione poiché, la fase di normalizzazione e pesatura degli indicatori è tutt'oggi oggetto di molti dibattiti e discussioni da parte della comunità scientifica specializzata in Life Cycle Thinking.

In conclusione, questo studio, volto a valorizzare l'utilizzo del compost in agricoltura analizzando tale matrice come una risorsa in termini ambientali, energetici ed economici, ha evidenziato taluni aspetti migliorabili, connessi alla filiera di produzione del compost e alla sua gestione aziendale. In ambito agronomico risulta vantaggioso applicare matrici compostate in orticoltura, non solo perché le colture orticole si avvantaggiano della lenta cessione di elementi nutritivi del terreno e dell'effetto ammendante del compost, ma anche per eventuali caratteristiche di soppressività su compost e separato solido, riscontrate in prove in laboratorio connesse al progetto Life+ CarbOnFarm. Sarebbe utile approfondire tale aspetto, verificando la soppressività del compost nello schema sperimentale adottato in campo. Inoltre sarebbe interessante valutare se a fronte di un conseguente minor impiego di prodotti fitosanitari, gli scenari ambientali andrebbero a modificarsi valorizzando il compost. In termini ambientali, risulterebbe interessante valutare se l'utilizzo di macchine operatrici semoventi specializzate nella distribuzione di compost possa limitare l'impatto ambientale. Mediante l'impiego di macchine distributrici specializzate potrebbe limitare gli impatti ottimizzandole dal punto di vista della distribuzione del prodotto in campo (dose rateo variabile, geo-localizzazione della distribuzione), così evitando perdite di prodotto nel sistema suolo-acqua-atmosfera e minori consumi di carburante. Infine, in ambito economico occorrerebbe impiegare compost a prezzi più ridotti per generare guadagni soddisfacenti, mantenendo invariate le caratteristiche qualitative dell'ammendante, ma puntando a creare una vera e propria filiera che coinvolga non solo i compostatori e la ricerca ma, in primis, gli agricoltori, sensibilizzando quest'ultimi verso l'utilizzo e eventualmente la produzione di ammendanti nella loro gestione aziendale.

5. Bibliografia

A study to examine the benefits of the End of Life Vehicles Directive and the costs and benefits of a revision of the 2015 targets for recycling, re-use and recovery under the ELV Directive. Final Report to DG Environment. 2006. ANNEX 5 ENVIRONMENTAL IMPACTS ANALYSED AND CHARACTERISATION FACTORS. European Commission.

Abiotic resource depletion in LCA. Improving characterisation factors of abiotic resource depletion as recommended in the new Dutch LCA handbook. 2002. Directoraat-generaal Rijkswaterstaat. Ministerie van Verkeer en Waterstaat.

Alluvione F., Moretti B., Sacco D., Grignani C. 2011. EUE (energy use efficiency) of cropping systems for a sustainable agriculture. *Energy* 36: 4468-4481.

Ambiente e Territorio. Coldiretti, 2008. Compostaggio e agricoltura. (http://www.ambienteterritorio.coldiretti.it/Documents/COMPOSTAGGIO%20E%20AGRICOLTURA_2008.pdf). Accessed 10-5-2017.

Atkinson, C.F., Jones, D.D., Gauthier, J.J., 1996a. Biodegradabilities and microbial activities during composting of oxidation ditch sludge. *Compost. Sci. Utiliz.* 4, 84-96.

Baldo G.L., Marino M., Rossi S., (2005). *Analisi del ciclo di vita LCA. Materiali, prodotti, processi.* Edizioni Ambiente, Milano.

Baldo G.L., Marino M., Rossi S., (2008). *Analisi del ciclo di vita LCA. Gli strumenti per la progettazione sostenibile di materiali, prodotti e processi.* Edizioni Ambiente, Milano.

Baldoni R., Giardini L., (1982). *Coltivazioni erbacee.* Patron Ed.

Basso B., Sartori L., Bertocco M., Cammarano D., Martine E. C., Gracec P. R. 2011. *European Journal of Agronomy* 35: 83-92

Bertora C., Bertolotto L., Grignani C. 2015. Compostaggio del digestato da produzione di biogas: l'esperienza dell'azienda MarcoPolo Engineering. *La produzione di compost nell'azienda agricola.* Progetto CarbOnFarm -LIFE ENV/IT/000719. Capitolo 7.

C.R.P.A - Centro Ricerche Produzioni Animali, 2008. Impiego in agricoltura di ammendanti compostati. Risultati di sei anni di sperimentazioni.

Carter M. R., Sanderson J. B., MacLeod J. A. 2003. Influence of compost on the physical properties and organic matter fractions of a fine sandy loam through out the cycle of a potato rotation. Agriculture and Agri-Food Canada, Research Centre.

Centemero M. (2005). *La produzione di Ammendante Compostato in Italia*, CIC.

Centemero M. 2010. Le ultime novità normative sui fertilizzanti. *Compost di qualità 2009/2010 sesta edizione.* Il Verde Editoriale. Capitolo 3.

- Centemero M. 2014. Il sistema di compostaggio in Italia: alcuni numeri indice.
- Centemero M., Corti C. 2000. Caratteristiche tecniche del compost per un'agricoltura sostenibile. *L'Informatore Agrario*. 6: 33-39.
- Centemero M., Newman D. 2007. Cresce e punta sulla qualità il «sistema compostaggio». *Supplemento A - L'Informatore Agrario*. 13: 6-11.
- Centemero M., Zanardi W. 2008. Il trattamento biologico dei rifiuti urbani in Italia: compostaggio, trattamento meccanico-biologico, digestione anaerobica. *Biogas da Rifiuti Solidi Urbani Tecnologia – Applicazioni – Utilizzo*. Dario Flaccovio Editore. Capitolo 1.
- Characterisation factors of the ILCD Recommended Life Cycle Impact. Assessment methods. Database and supporting information. JRC - Joint Research Centre, European Commission.
- Chillemi G., Lazzarin R. (1998). “Lattuga”. La tecnica colturale. *Informatore Agrario*. Supplemento n. 14.
- CIC 2012. Compendio tecnico 2012, pp 68.
- CIC. 2010. Il compost nelle politiche di green public procurement. *Compost di qualità 2009/2010 sesta edizione*. Il Verde Editoriale. Capitolo 4.
- CRA - Consiglio per la Ricerca e la sperimentazione in Agricoltura. Elementi di conoscenza del compostaggio e dei compost e loro impiego in orticoltura. CRA 2011.
- Cristoforetti A., Piccinini S., Rossi L. 1997. Il compostaggio in ambito rurale. *Supplemento A - L'Informatore Agrario*. 44: 33-38.
- Dati Annuali Sintetici 2015. CIC, Consorzio Italiano Compostatori.
- De Klein C., Novoa R. S.A., Ogle S., Smith K. A., Rochette P., Wirth T. C., McConkey B. G., Mosier A., Rypdal K. 2006. N₂O Emissions from managed soils, and CO₂ emissions from lime and urea application. IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories.
- Decreto Legislativo 29 aprile 2010, n. 75. Riordino e revisione della disciplina in materia di fertilizzanti, a norma dell'articolo 13 della legge 7 luglio 2009, n. 88.
- Decreto Ministeriale 07/04/2006. MIPAAF. Criteri e norme tecniche generali per la disciplina regionale dell'utilizzazione agronomica degli effluenti di allevamento, di cui all'articolo 38 del decreto legislativo 11 maggio 1999, n. 152. GU n. 109 del 12/5/2006 Suppl. Ord. n.120.
- DEPUIIS - Design of Environmentally friendly Products Using Information Standards. 2010. ENEA.

- EMEP/EEA air pollution emission inventory guidebook 2009. Emission Environment Agency.
- ENEA “Life Cycle Assessment”. Rapporto ENEA n° OZ-SCA- 00005, 2002.
- European Compost Network – ECN. 2010. Sustainable Compost Application in Agriculture. ECN-INFO 2: 38.
- Falocco S., 2007. La metodologia dell’analisi del ciclo di vita (Life Cycle Assessment).Ecosistemi srl, Roma.
- Fecondo G., Bucciarelli S.,Civitella D., Ventura F. 2012. Gli effetti del compost su frumento duro e pomodoro. *L’Informatore Agrario*. 43: 52-56.
- Fontana E., Grignani C., Nicola S. Book of Abstract. 2013. International Workshop on Nitrogen, Environment and Vegetables. NEV2013.
- Franz L., Germani F., Bergamin L., Zanardi W., Bianconi L. 2010. Gli impieghi del compost nel verde pubblico. *Compost di qualità 2009/2010 sesta edizione*. Il Verde Editoriale. Capitolo 5.
- Gaiotti F., Marcuzzo P., Tomasi D., Belfiore N., Lovat L., Fornasier F. 2015. Il benessere delle radici migliora con il compost. *Speciale Vigneto - L’Informatore Agrario*. 6: 43-47.
- Gaudino S., Goia I., Borreani G., Tabacco E., Sacco D. 2014.Cropping system intensification grading using an agro-environmental indicator set in northern Italy. *Ecological Indicators*.
- Getachew Agegnehu., Adrian M. Bass., Paul N. Nelson., Michael I. Bird. 2015. Benefits of biochar, compost and biochar–compost for soil quality, maize yield and greenhouse gas emissions in a tropical agricultural soil. *Science of the Total Environment*.
- Giovannone F. 2012. Analisi Del Ciclo Di Vita Di Un Pannello In Eps Per L’isolamento Termico. Tesi di laurea in Gestione Ambientale. Università Ca’ Foscari di Venezia Dipartimento di Scienze Ambientali, Informatica e Statistica.
- Goia Irene. 2011. Indicatori Agro-ambientali per la valutazione della sostenibilità di sistemi colturali di aziende cerealicole e zootecnica. Tesi di Laurea Magistrale in Agroecologia. Università degli Studi di Torino Facoltà di Agraria.
- Golueke, C.G., 1991. Principles of composting. The State of BioCycle Journal of Waste Recycling. The Art and Science of Composting. The JG Press Inc., Pennsylvania, USA, pp. 14-27.
- Grignani C. 2016. Fertilizzazione sostenibile. Principi, tecnologie ed esempi operative. Edagricole.

- Grignani C., Bassanino M., Sacco D., Zavattaro L., 2003. Il bilancio degli elementi nutritivi per la redazione del piano di concimazione. *Rivista di Agronomia* 37: 155-172.
- Haug, R.T., 1993. *The Practical Handbook of Compost Engineering*. Lewis Publishers, Boca Raton, USA.
- Hutchings N., Webb J., Amon B. 2016. Crop production and agricultural soils. *EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2016*.
- Informatore Agrario. Supplemento n.1/1992.
- IPCC 2001. *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of IPCC*, p 94.
- IPCC 2004. *Climate Change 2004: Synthesis Rapport. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of IPCC*, p 151.
- Italian Greenhouse Gas. Inventory 1990-2012. National Inventory Report 2014. ISPRA.
- LIFE Project Number<LIFE12 ENV/IT 000719>. CarbOnFarm MIDTERM Report. Covering the project activities from 01/07/2013to 31/12/2015. 2016.
- Luciani R., Masoni P., Santino D. 2011. Indicatori di sostenibilità: la carbon footprint. *EAI -Energia, Ambiente e Innovazione*. 3: 49-51.
- Marino M., Pratesi C. A. 2015. *Il cibo perfetto. Aziende consumatori, e impatto ambientale del cibo*. Edizioni Ambiente.
- Martínez-Blanco J., Lazcano C., Christensen T. H., Muñoz P., Rieradevall J., Møller J., Antón A., Boldrin A. 2013. Compost benefits for agriculture evaluated by life cycle assessment. A review. *INRA and Springer-Verlag France 2013*.
- Montemurro F., Diacono M. 2016. Ammendanti. *Fertilizzazione Sostenibile. Principi, tecnologie ed esempi operativi*. Edagricole.Capitolo 4.
- Moretti B., Remogna E., Sanino N., Grignani C., Celi L., Barberis E., Tivano P., Sacco D. 2014. Efficacia del compost da Forsu: bene su mais, meno su frumento. *L'Informatore Agrario*. 22: 42-45.
- Notarnicola B., Salomone R., Petti L., Renzulli P. A., Roma R., Cerutti A. K. 2015. *Life Cycle Assessment in the Agri-food Sector. Case Studies, Methodological Issues and Best Practices*. Springer International Publishing Switzerland.
- Palese A.M., Persiani A., Pastore V., Pergola M., Celano G. 2015. I principi del compostaggio e le soluzioni tecnologiche. *La produzione di compost nell'azienda agricola*. Progetto CarbOnFarm -LIFE ENV/IT/000719. Capitolo 2.

Pepi M., Focardi S. 2012. Caratterizzazione Microbiologica dei Compost da Reflui Oleari. (<http://www.tirsavplus.eu/documenti/task%20c/CARATTERIZZAZIONE%20MICROBIOLOGICA%20DEI%20COMPOST%20DA%20REFLUI%20OLEARI.pdf>). Last accessed 12-08-2017.

Perosino, G. C., Zaccara, P. (2006) Elementi climatici del Piemonte

Piccinini S., Centemero M. 2008. L'integrazione fra digestione anaerobica e compostaggio. *Biogas da Rifiuti Solidi Urbani Tecnologia – Applicazioni – Utilizzo*. Dario Flaccovio Editore. Capitolo 9.

Piccinini S., Rossi L. 2010. La digestione anaerobica. Gli impieghi del compost nel verde pubblico. *Compost di qualità 2009/2010 sesta edizione*. Il Verde Editoriale. Capitolo 8.

Pinamonti F. 1997. L'impiego del compost sui terreni agricoli. *Supplemento A - L'Informatore Agrario*. 44: 45-49.

Rallo C. 2011. Applicazione della metodologia Life Cycle Assessment al Passito di Pantelleria. Tesi di laurea in Gestione Ambientale. Università di Bologna Dipartimento di Scienze Matematiche Fisiche e Naturali.

Rapporto 2017 CIC, Consorzio Italiano Compostatori.

Razza F., Cerutti A. K. 2017. Life Cycle and Environmental Cycle Assessment of Biodegradable Plastics for Agriculture. *Soil Degradable Bioplastics for a Sustainable Modern Agriculture, Green Chemistry and Sustainable Technology*. Chapter 7.

Regolamento regionale 29 ottobre 2007, n. 10/R. Disciplina generale dell'utilizzazione agronomica degli effluenti zootecnici e delle acque reflue e programma di azione per le zone vulnerabili da nitrati di origine agricola (Legge regionale 29 dicembre 2000, n. 61).

Rossi L., Piccinini S. 2010. I sistemi di compostaggio. Gli impieghi del compost nel verde pubblico. *Compost di qualità 2009/2010 sesta edizione*. Il Verde Editoriale. Capitolo 9.

Rossi L., Piccinini S. 2010. Le macchine per la distribuzione del compost. Gli impieghi del compost nel verde pubblico. *Compost di qualità 2009/2010 sesta edizione*. Il Verde Editoriale. Capitolo 10.

Seppälä, J., et al., Country-dependent characterisation factors for acidification and terrestrial eutrophication based on accumulated exceedance as an impact category indicator. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 2006. Chapter 11(6).

SETAC (1993). Guidelines for Life Cycle Assessment: a code of practice. SETAC Bruxelles.

Silvestri S., Favoino E. 1997. Matrici organiche compostabili e organizzazione del recupero. *Supplemento A - L'Informatore Agrario*. 44: 15-20.

Simonetto M. 2013. Studio mediante tecniche LCA della produzione di forgiati in acciaio. Tesi di laurea magistrale in ingegneria gestionale. Università degli Studi di Padova - Facoltà di Ingegneria. Dipartimento di Tecnica e Gestione dei Sistemi Industriali.

Swiss Eco-Factors 2013 according to the Ecological Scarcity Method. Methodological fundamentals and their application in Switzerland. 2013. Federal Office for the Environment FOEN.

Tugnoli V., Tugnoli S. 2007. Dal compost una valido aiuto per la fertilità dei terreni. *L'Informatore Agrario*. 2: 64-67.

Turchi A., Turchi F. (1997). *Orticoltura Pratica*. Edagricole.

Vollaro A., 2004. La valutazione del ciclo di vita (LCA) e le sue applicazioni alla gestione dei rifiuti. Roma.

Wassmann R., Yagi K., Bhattacharya S., Brenner J. S., Partson Daka J., González S. P., Krug T., Li Y., Martino D. L., McConkey B. G., Smith P., Tyler S. C., Zhakata W. 2006. Cropland. IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories.

Zaccardelli M., Catello P., Scotti R. 2015. Aspetti microbiologici del compost aziendale. *La produzione di compost nell'azienda agricola*. Progetto CarbOnFarm -LIFE ENV/IT/000719. Capitolo 3.

6. Sitografia

1. <https://www.arpa.piemonte.it/approfondimenti/temi-ambientali/meteorologia-e-clima/clima/documentazione-e-dati>
2. <http://www.carbonfarm.eu/progetto.html>
3. <http://www.sistemapiemonte.it/>
4. <http://www.regione.piemonte.it>
5. <https://www.arpa.piemonte.gov.it/approfondimenti/temi-ambientali/meteorologia-e-clima/clima/documentazione-e-dati>
6. <http://www.ismeamercati.it/flex/cm/pages/ServeBLOB.php/L/IT/IDPagina/509>
7. <https://www.to.camcom.it/borsa-merci-di-torino>
8. <http://www.reteitalianalca.it/>
9. <https://www.compost.it/>
10. <http://www.biteco-energy.com/resa-biogas/>
11. http://fitogest.imagelinetwork.com/it/acquista-online/?gclid=EAIaIQobChMIg4bNt9zq1gIVQecbCh3pQAunEAAYASAAEgIzzPD_BwE
12. <http://shop.agrimag.it/>
13. <http://compostabile.com/>
14. <https://www.politicheagricole.it/flex/cm/pages/ServeBLOB.php/L/IT/IDPagina/202>
15. <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol4.html>
16. <http://www.lifedop.eu/life-dop-ecomondo/>
17. http://www.iaraosta.isiportal.com/UploadDocs/1503_Integrazione_Quaderno_Ricerca_n_2.pdf
18. <http://eplca.jrc.ec.europa.eu>
19. www.solidworks.it