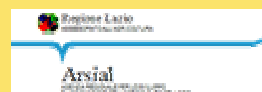


This project is cofunded by the
EUROPEAN UNION LIFE+ PROGRAM



SUSTGREENHOUSE

**Rapporto sugli effetti
agroambientali relativi alle prove
agronomiche dimostrative**



A project implemented by

- ARSIAL Agenzia Regionale per lo Sviluppo e l'Innovazione dell'Agricoltura del Lazio
- Dipartimento di Scienze e Tecnologie Agroambientali (Facoltà di Agraria "Alma Mater Studiorum" - Università di Bologna)

Progetto: SUSTGREENHOUSE “La serra sostenibile:azione dimostrativa per una serricoltura intensiva a zero emissioni” (LIFE+ 07 ENV/IT/000516)

RAPPORTO SUGLI EFFETTI AGROAMBIENTALI RELATIVI ALLE PROVE
AGRONOMICHE DIMOSTRATIVE CONDOTTE SULLE COLTURE DI ZUCCHINO E
POMODORO IN SUCCESSIONE IN SERRE UBICATE NELLA PIANA DI FONDI (LT)
(RISULTATI DI DUE ANNI DI OSSERVAZIONI)

1. INTRODUZIONE

Il presente rapporto riporta le valutazioni costi-benefici dal lato ambientale sulla base dei risultati analitici e di monitoraggio strumentale rilevati nei diversi modelli di culture in serra posti a confronto. In particolare verranno presi in considerazione: 1) LCA - Life CycleAssesment (Analisi del Ciclo di Vita); 2) i consumi di acqua di falda; 3) il profilo della sostanza organica e dell'azoto nitrico nel terreno.

Le seguenti righe introdurranno e spiegheranno la metodica del Life CycleAssesment o Analisi del Ciclo di Vita. In modo da definire lo strumento ambientale applicato a questo progetto.

1.1. Il Life CycleAssesment, in relazione agli altri strumenti ambientali

Per sostenere gli obiettivi degli aspetti della sostenibilità ambientale, diversi strumenti di supporto decisionale sono stati sviluppati. Strumenti come l'Environmental Impact Assessment (EIA), EnvironmentalRiskAssesment (ERA), Input-Output Analysis (IOA), Life CycleAssesment (LCA), Material Flow Accounting/Substance Flow Analysis or MaterialIntensity Analysis (MIA) (Leiden University,2009).

Alcuni di questi strumenti contengono al loro interno il concetto di ciclo di vita nella loro stessa definizione. La semplicistica prospettiva del controllare le fonti di emissione (end-of-pipe technologies), come un modo per sviluppare il senso di benessere ambientale a livello industriale o a livello di attività umana, è stato sostituito dall'idea che si può salvaguardare l'ambiente nel suo insieme se si adotta un approccio sistematico che consideri l'intero ciclo di vita di un'attività, di un prodotto o un servizio.

Questo è conosciuto come “life cycle approach” anche chiamato approccio “dalla culla alla tomba”, in quanto segue un’attività dall’estrazione delle materie prime (culla) fino al ritorno dei rifiuti al suolo (tomba).

Gli impatti di tutti i cicli di vita di ogni fase inclusa nel processo produttivo necessitano di essere considerati, in maniera tale da consentire decisioni ragionate riguardo all’intero processo produttivo e al consumo e alle eventuali strategie gestionali da adottare (Hospido, 2005)

Per considerare sistematicamente gli impatti ambientali del ciclo di vita di un prodotto o un servizio, la metodologia Life Cycle Assessment è quella maggiormente accettata e condivisa, essendo il solo strumento che presenta un processo di armonizzazione (Sonnemann, 2005).

1.2. Definizione di LCA

Il Life Cycle Assessment (LCA), o Analisi del Ciclo di Vita, è uno strumento di gestione che permette di valutare gli impatti sull’ambiente derivanti da tutto il ciclo di vita di un prodotto, dall’estrazione delle risorse fino alla gestione dei residui, includendo tutti gli stadi di produzione, trasporto ed uso dello stesso.

Fondamentalmente, l’LCA è un bilancio di materiali ed energia applicato a un prodotto (o sistema prodotto), combinato con una valutazione degli impatti ambientali relazionati con gli inputs e outputs da e verso il sistema, o prodotto stesso.

Da questa analisi, l’LCA indica i criteri per il decision-making in questioni riguardanti lo sviluppo di prodotto, pianificazione strategica, linee politiche di intervento, ecc. La prima definizione ufficiale della metodologia LCA fu fatta dalla Society for Environmental Toxicology and Chemistry (SETAC) dopo sette workshop e conferenze internazionali tra il 1990 ed il 1993, attraverso un documento che rappresenta una delle fonti più citate in questo settore (Consoliet *al*, 1993)

In questo documento si afferma che “ il Life-Cycle Assessment è un processo obiettivo per valutare i carichi ambientali associati a un prodotto, processo o un’attività mediante l’identificazione e la quantificazione di energia e materiali utilizzati e i rifiuti rilasciati nell’ambiente, per valutare l’impatto di questi usi e rilasci di energia e materiali nell’ambiente e per valutare ed implementare opportunità per influire su miglioramenti ambientali.

La valutazione include l'intero ciclo di vita del prodotto, processo o attività, comprendendo i processi di estrazione e lavorazione delle materie prime, lavorazioni intermedie, trasporti e distribuzione, usi, ri-usi, manutenzione, riciclaggio e smaltimento finale.”

La ISO (Organizzazione Internazionale per la Standardizzazione) ha provveduto a dare un grosso input al processo per la definizione dell'LCA. Seguendo gli standard della ISO 14040, l'LCA è (ISO 14040:1997) una tecnica per valutare gli aspetti ambientali e i potenziali impatti associati a un prodotto mediante:

- Compilazione di un inventario di rilevanti inputs e outputs del prodotto.
- Valutazione dei potenziali impatti ambientali derivanti dagli inputs e outputs stessi.
- Interpretazione dei risultati dell'analisi dell'inventario e valutazione dell'impatto ambientale di ogni singola fase in relazione agli obiettivi dello studio.

L'LCA studia gli aspetti ambientali e i potenziali impatti lungo tutto il ciclo di vita del prodotto (dalla culla alla tomba), dall'acquisizione delle materie prime alla produzione, uso e destino finale. Come si può vedere, entrambe le definizioni sono piuttosto simili, sottolineando che l'analisi deve tenere in considerazione l'intera catena di produzione e le potenziali conseguenze sull'ambiente. In entrambi i casi l' LCA si basa sulla compilazione di un bilancio di massa ed energia del prodotto e/o del sistema produttivo (Muñoz, 2006)

1.3. LCA storia e sviluppi attuali

L'LCA ha origine durante la crisi energetica tra la fine degli anni '60 e i primi anni '70, che forzò l'industria a cercare soluzioni per i propri prodotti sempre più efficienti dal punto di vista energetico. Come conseguenza nacque il concetto di “ciclo di vita”, che si rese necessario per ridurre il consumo di energia in tutti gli stadi di lavorazione implicati nel prodotto stesso: dall'estrazione delle materie prime fino alla gestione dei rifiuti. Il primo studio, paragonabile agli attuali studi sull' LCA, fu un progetto commissionato dalla Coca-Cola Company al MidwestResearchInstitute nel 1969 che permise di comparare differenti alternative di sistemi di impacchettamento dal punto di vista delle emissioni, dei materiali e del consumo energetico. Questo progetto fu chiamato REPA: Resource and EnvironmentalProfile Analysis (Fullana&Puig, 1997).

Molti altri studi come quello descritto furono eseguiti durante gli anni settanta, ma verso la fine del decennio e fino a metà degli anni ottanta l'interesse verso questa analisi calò, probabilmente in seguito al forte sviluppo economico (Fullana&Puig, 1997) che si verificò in quegli anni.

Dalla metà degli anni ottanta, comunque, l'interesse nel minimizzare il consumo di risorse e le emissioni crebbe ancora e, in istituti come l'EMPA e BUWAL in Svizzera e il CML in Olanda si svilupparono metodi per l'aggregazione delle sostanze in "categorie di impatto". Negli anni novanta l'uso dell'LCA come strumento di supporto decisionale sia nell'industria che nel settore pubblico iniziò ad essere alquanto generalizzato; in questa direzione, la pubblicazione di numerose guide alla metodologia LCA da differenti istituti quali U.S. Environmental Protection Agency, BUWAL, CML, Nordic Council of Ministers, SETAC, ecc, fu cruciale, in quanto questi iniziarono a fornire i primi database (Milà e Canals, 2003). Nel 1992 fu fondata da 20 compagnie europee la Società per la Promozione dello Sviluppo dell'LCA (SPOLD), con l'obiettivo di incoraggiare e standardizzare l'uso dell'LCA. Nel 1993 il Comitato Tecnico 207 della ISO lavorò sullo sviluppo degli standard internazionali dell'LCA, con in testa la redazione della serie di norme 14.04X

Figura II.1 The ISO 14.04X series on LCA.

- ISO 14040:1997 Environmental Management – LCA – Principles and Framework
- ISO 14041:1998 Environmental Management – LCA – Goal and Scope Definition and Inventory Analysis
- ISO 14042:1999 Environmental Management – LCA – Life Cycle Assessment
- ISO 14043:2000 Environmental Management – LCA – Life Cycle Interpretation
- ISO/TR 14047:2003 Environmental Management – LCA – Esempi di applicazione del ISO 14042
- ISO/TR 14049:2000 Environmental Management – LCA – Esempi di Applicazione del ISO 14041 to goal and scope definition and inventory analysis

Fonte: (Hospido, 2005)

Più di recente, nel 2006, la serie di norme 14.04X è stata aggiornata per aumentarne la leggibilità mentre i principi base ed il contenuto tecnico rimanevano invariati.

Figura II.2 The ISO 14,04X updated series on LCA.

- ISO 14040:2006 Environmental Management – Life Cycle Assessment – Principles and Framework provides a clear overview of the practice, application and limitations of LCA to a broad range of potential uses and stakeholders, including those with a limited knowledge of Life Cycle Assessment.
- ISO 14044:2006 Environmental Management – Life Cycle Assessment – Requirements and guidelines, is designed for the preparation of, conduct of, and critical review of, life cycle inventory analysis. It also provides guidance on the impact

assessment phase of LCA and on the interpretation of LCA results, as well as the nature and quality of the data collected.

Fonte: www.iso.org

ISO 14040: 2006 e ISO 14044:2006 sostituiscono le precedenti (ISO 14040:1997, ISO 14041:1999,

ISO 14042:2000 e ISO 14043:2000). I nuovi standard sono stati fissati dal lavoro dell' ISO technical committee

ISO/TC 207, Environmental management, subcommittee SC 5, Life Cycle Assessment (www.iso.org).

1.4. Metodologia

Gli standard ISO 14040 prevedono quattro stadi principali per lo studio dell'LCA, schematicamente rappresentati in Figura 1, e brevemente descritti in questa sezione

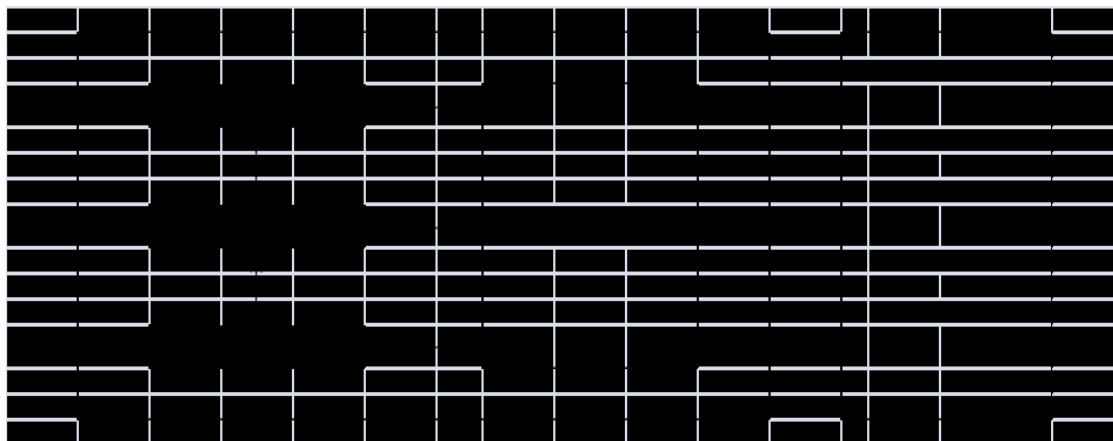


Figura 1 Fasi di una Life Cycle Assessment

Fonte: (ISO 14040:2006)

1.5. Definizione scopo ed obiettivi

Questo è il primo stadio dello studio e probabilmente il più importante, già da qui sono definiti lo scopo, le possibilità e le ipotesi principali che si intendono perseguire nello studio. L'obiettivo dello studio è il primo punto che deve essere definito, la ragione per cui si fa e se i risultati ottenuti sono per scopo uso interno (per aziende, per esempio) o per uso esterno (per divulgazione) (Muñoz I., 2006).

Successivamente c'è la definizione dello scopo, questo implica, tra le altre cose, la definizione del sistema, i suoi limiti (concettuali, geografici e temporali), la qualità dei dati utilizzati, l'ipotesi oggetto di studio e le limitazioni dello studio stesso. Punto fondamentale

dello scopo è la definizione dell'unità funzionale (ISO 14040:2006); questa è l'unità di prodotto o servizio sul quale gli impatti ambientali verranno valutati e comparati. L'unità funzionale è spesso espressa in termini di quantità di prodotto, ma potrebbe essere relazionata anche alla quantità di prodotto necessario per ottenere una data funzione (Muñoz I., 2006).

1.6. Analisi dell'Inventario

L'analisi di inventario è un processo tecnico di raccolta dati in maniera tale da quantificare gli inputs e gli outputs del sistema come definite nello scopo (ISO 14040:2006,, ISO 14041:1998).

L'energia e le materie prime consumate, le emissioni nell'aria, nell'acqua, e al suolo e i residui solidi prodotti dal sistema oggetto di studio sono suddivisi in numerosi sub sistemi ed unità di processo ed i dati ottenuti sono raggruppati in differenti categorie nella tabella del Life Cycle Inventory (LCI) (Muñoz I., 2006).

1.7. Valutazione di Impatto

La Valutazione di Impatto di ciclo di vita o Life Cycle Impact Assessment (LCIA) è un processo per identificare e caratterizzare i potenziali effetti prodotti nell'ambiente dal sistema oggetto di studio (ISO 14040:2006,,ISO 14042:1999).

Il punto di partenza dell'LCIA sono le informazioni ottenute nella fase di inventario: ne consegue che la qualità dei dati ottenuti da quest'ultimo sono il punto fondamentale per questo tipo di valutazione.

Si considera che l'LCIA consista di quattro fasi fondamentali brevemente descritte qui sotto

Prima fase Classificazione: le risorse consumate e cioè le emissioni nell'ambiente, identificate nella fase di analisi d'inventario, vengono raggruppate in differenti categorie d'impatto o indicatori d'impatto, secondo l'effetto ambientale che ci si attenda che producano. Per esempio, le emissioni di CO₂ e CH₄ vengono classificate sotto la categoria Global Warming Potential.

Tutte le metodologie esistenti per la redazione di un LCIA fanno capo a due approcci fondamentali:

- Metodo Problem-oriented

- Metodo Damage-oriented

Nel metodo problem-oriented tutti i carichi ambientali determinati dai dati dell'LCIA vengono associati ad una o più categorie di impatto sulla base di meccanismi ambientali nei quali sono coinvolti. Questo metodo, detto anche "midpoint" si limita quindi a determinare e quantificare i carichi di ogni categoria di impatto (ad esempio il quantitativo di CO₂ emesso in atmosfera e non il potenziale aumento di temperatura che ne deriva). Il metodo damage-oriented punta invece ad aggregare le varie categorie di impatto in base agli effetti che esse hanno sulla salute umana, sull'ecosistema e sull'esaurimento delle risorse. Questi tre grandi gruppi sono definiti indicatori "endpoint" in quanto sono centrati sui danni che i risultati della fase LCIA possono determinare in ambiti da tutelare.

Gli indicatori endpoint possono essere combinati secondo criteri predefiniti per dare un unico indicatore globale; in questa fase però entra una componente soggettiva di "ponderazione" dei diversi indicatori. L'analisi degli impatti ambientali ha come obiettivo fondamentale l'imputare i consumi e le emissioni ottenuti nella fase di inventario a specifiche categorie di impatto riferibili ad effetti ambientali conosciuti: tentano di quantificare, con opportuni metodi di standardizzazione, l'entità del contributo complessivo che il processo o il prodotto arreca al comparto ambientale potenzialmente danneggiato. In questo modo l'impatto risulta rappresentato da valori numerici ottenuti elaborando i risultati dell'LCIA con operazioni di raggruppamento e classificazione.

Per costituire le categorie d'impatto sono stati utilizzati i seguenti principali endpoints:

- 1) Ecologia (ecologicaleffects), effetti sulla popolazione vegetale ed animale dell'ecosistema
- 2) Salute (human health and safetyeffects), effetti sulla sicurezza e salute dell'uomo
- 3) Risorse (resourcedepletion), esaurimento di risorse di energie e di materiali.

Su questa base vengono scelti gli specifici effetti caratterizzanti le varie categorie d'impatto (midpoint), che risultano definite come segue:

- 1) C1- Riscaldamento Globale (Global Warming)
- 2) C2- Assottigliamento della fascia di ozono (Stratospheric ozone depletion)
- 3) C3- Acidificazione delle acque (Acidification)
- 4) C4- Eutrofizzazione delle acque (Nutrient Enrichment)
- 5) C5- Formazione di smog fotochimico (Photochemical smog formation)
- 6) C6- Tossicità per l'uomo e per l'ambiente (Human and Eco-Toxicology)
- 7) C7- Consumo di risorse non rinnovabili (Resource depletion)

Operativamente la classificazione consiste nell'organizzare i dati dell'inventario, ovvero tutti i valori delle emissioni provocate direttamente ed indirettamente dalle operazioni

considerate, distribuendoli nelle varie categorie di impatto. Il problema però non è semplice, poiché una stessa sostanza costituente un'emissione può contribuire a più fenomeni di impatto, provocando effetti a catena sovente di difficile interpretazione.

Gli effetti ambientali sono inoltre caratterizzati da una diversa sfera di influenza, che può essere locale, regionale oppure globale.

Seconda fase, Caratterizzazione: consiste nel pesare il differente contributo delle sostanze appartenenti alla medesima categoria di impatto. Per ogni categoria di impatto incluse nell'LCIA, viene prodotto un risultato aggregato, in una determinata unità di misura. Per esempio, il Global Warming Potential viene espresso come kg equivalenti di CO₂, provenienti dalle emissioni di CO₂, CH₄ ed altri gas serra. A questo punto, si ottiene il cosiddetto profilo ambientale del sistema costituito da un set di punteggi.

Facendo riferimento all'uso dei midpoints, i dati dell'inventario vengono moltiplicati per fattori di standardizzazione (characterization factor, CF), che rappresentano il potenziale che ogni singola emissione o risorsa utilizzata ha nel contribuire all'incremento della specifica categoria di impatto. Questo permette di ottenere indicatori da inserire nella relativa categoria di impatto ambientale, come si evince nell'equazione generale:

$$\text{indicatore}_i \text{ della categoria di impatto} = \sum (E_j) \times CF_{i,j}$$

indicatore_i della categoria di impatto = valore dell'indicatore per unità funzionale della categoria di impatto i;

E_j = rilascio di emissioni j o consumo di risorsa j per unità funzionale;

CF_{i,j} = fattore di standardizzazione per l'emissione j o risorsa j che incide sulla categoria di impatto i.

I fattori di caratterizzazione sono specifici per ogni categoria, ad esempio, per GWP, che esprime l'effetto serra di una sostanza, la CO₂ è pari a 1, mentre il metano è 21. Pertanto un grammo di metano emesso ha effetto equivalente a 21 grammi di CO₂.

Terza fase, la Normalizzazione: mette in relazione il profilo ambientale del sistema con un sistema più ampio e generico, ad esempio relaziona il Global Warming Potential del sistema con il Global Warming Potential annuo di una nazione.

L'ultima fase è il Weighting (pesatura): in questa fase il profilo ambientale è ridotto, da una serie di indicatori, a singoli punteggi di impatto, usando fattori di ponderazione basati su

valori arbitrari soggettivi. Per questo un panel di esperti o membri delle amministrazioni pubbliche potrebbe essere costituito per dare indicazioni di ponderazione delle categorie di impatto. Il vantaggio di questa fase è che differenti classi di valori (categorie di impatto) possono essere convertite in valori numerici, rendendo più chiaro il peso che ognuna di esse comporta e agevolare gli utilizzatori della metodologia nel fare valutazioni e azioni sui processi considerati a rischio o pericolosi.

1.8. Interpretazione

Questo è l'ultima fase in uno studio di LCA, dove i risultati ottenuti sono presentati in una maniera sintetica, mostrando le fonti critiche di impatto e le opzioni per ridurle. L'interpretazione coinvolge un riesame di tutte le fasi di un processo di LCA, in modo da comprovare la veridicità dei dati ottenuti e la qualità dei dati utilizzati, in relazione agli obiettivi e agli scopi dello studio (Munoz I., 2006).

1.9. Benefici e limiti di una LCA

L'LCA comprende un approccio olistico; tutti gli input necessari e le emissioni nelle fasi e nelle operazioni del ciclo di vita vengono considerate all'interno dei limiti del sistema. Questo non solo comprende gli inputs e le emissioni dirette per produrre, distribuire, usare e smaltire, ma anche tutti gli input ed emissioni indirette (riguardanti ad esempio la produzione di energia usata nel processo produttivo) senza considerare come e quando avvengano. Se un vero miglioramento ambientale deve essere fatto mediante dei cambiamenti al processo produttivo o dei servizi è importante non causare grandi alterazioni ambientali delle condizioni al contorno in contesti differenti in luogo e tempo nello studio del ciclo di vita.

La forza di questo strumento è che il dibattito sui temi ambientali si può allargare da un singolo punto o una singola problematica fino ad un numero elevato di problematiche usando una metodologia quantitativa fondata su basi oggettive.

In accordo con Guinée *et al.* 2002, quindi, la caratteristica fondamentale dell'LCA è la sua natura olistica che, oltre ad essere la sua forza, rappresenta anche la sua principale limitazione. Infatti, la possibilità di analizzare l'intero ciclo di vita di prodotti e processi con una visione olistica, può solo essere realizzata mediante la semplificazione di molte delle fasi proprie del ciclo produttivo e di altri aspetti.

Particolari limiti dell'LCA possono essere riassunti così (Muñoz I., 2006):

- 1) La metodica si focalizza particolarmente su tematiche ambientali associate a prodotti o processi, escludendo tematiche di tipo economico e sociale.
- 2) La disponibilità di dati è una grossa limitazione. Sono stati sviluppati, e vengono tutt'ora sviluppati, database messi a punto in diversi paesi, ma in pratica, i dati sono spesso obsoleti, incomparabili e di qualità sconosciuta.

2. IL LIFE CYCLE ASSESSMENT NEL PROGETTO “SUSTGREENHOUSE”

2.1. Obiettivi dello studio

Le finalità di questo studio di LCA sono di valutare le differenze a livello ambientale che a livello agronomico di diversi sistemi colturali caratterizzati principalmente dall'utilizzo di diversi substrati (compost, terreno tal quale e terreno con zeolite) e gestioni di acqua (Imax e Irid) e azoto (Cmax e Crid) in una rotazione orticola tipo (zucchino-pomodoro) nella piana di Fondi (LT).

Per le prime due colture (zucchino 1°ciclo e pomodoro 1°ciclo) lo studio di LCA e la sua valutazione è stata approfondita e affinata per evidenziare il contributo dei tre differenti substrati di coltivazione (**tal quale, compost, zeolite**); in seguito si sono prese in considerazione anche le gestioni di acqua e fertilizzanti.

2.2. Descrizione del sistema

La figura mostra gli stadi e i sottostadi presi in considerazione nella coltivazione. L'intero sistema, dall'ottenimento delle materie prime utilizzate per manufatti e attrezzi, fino alla gestione dei rifiuti prodotti, è stato considerato in ogni stadio.

La commercializzazione del prodotto non è inclusa nello studio.

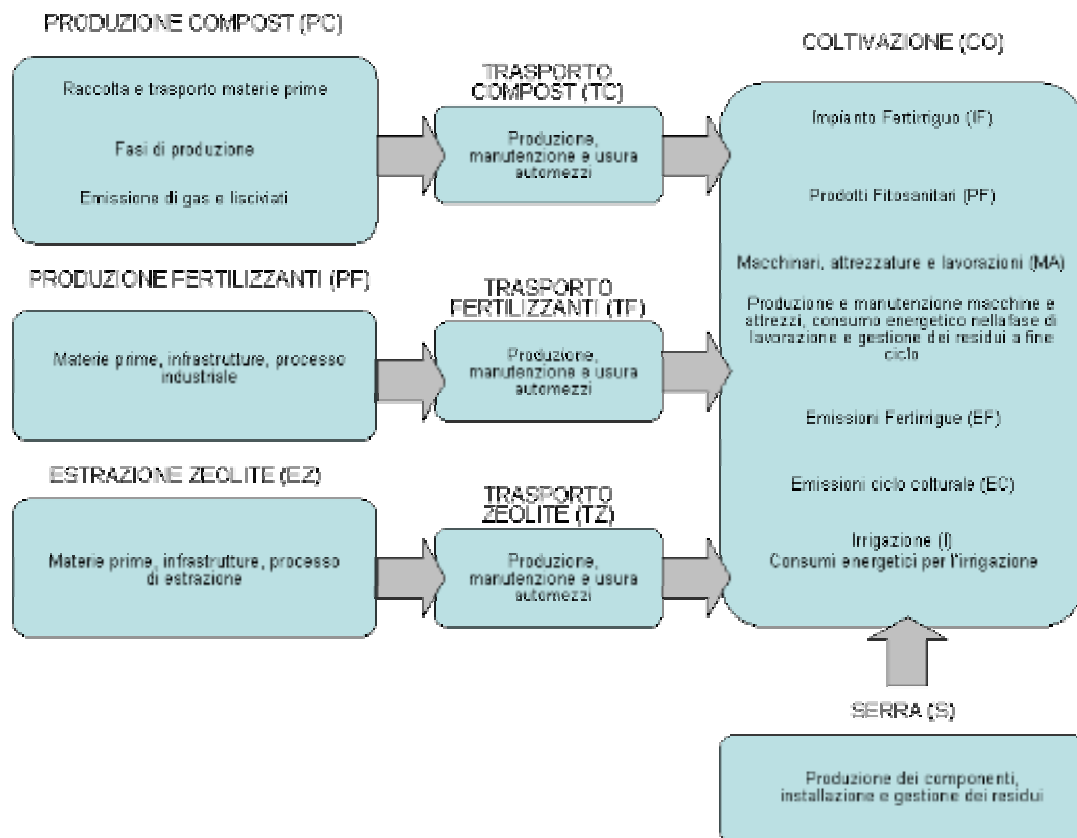


Figura 2. Processi presi in considerazione e limiti del sistema

Più in particolare, per le tre tesi a confronto sono presi in considerazione gli specifici processi produttivi

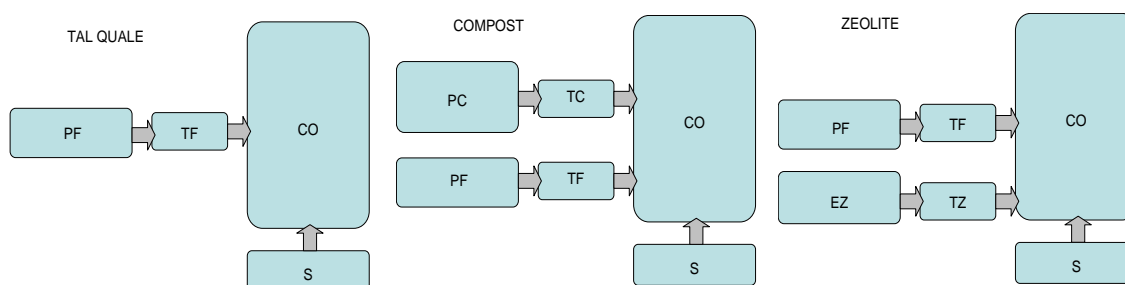


Figura 3. Processi specifici di ogni sistema colturale a confronto

2.3. Unità funzionale

Come unità funzionale è stata scelta la tonnellata di prodotto finale, come riferimento per la normalizzazione dei flussi in entrata e in uscita dal sistema produttivo (International

Organisation for Standardisation, 2006). In un sistema agricolo, infatti, come fattore principale dello studio deve essere considerata la produzione (Audsley, 1997).

2.4. Qualità e origine dei dati dell'inventario

L'intero sistema oggetto di studio richiede un processo di raccolta dati dettagliato.

La maggior parte di questi dati sono stati ottenuti sperimentalmente e direttamente in campo. Quando non erano presenti informazioni locali, si sono utilizzati dati da bibliografia o il database Ecoinvent v2.0 (Swiss Centre for Life Cycle Inventories, 2007), i quale è stato usato per completare la fase di inventario della LCA.

Dati della produzione di compost e trasporto. L'impianto di compostaggio da cui proveniva il compost utilizzato era situato a Ozzano dell'Emilia, provincia di Bologna. L'impianto ha una capacità di 4000t di materiale organico lavorato l'anno (frazione organica da residui solidi urbani e frazioni vegetali in genere) il quale prevede una prima preselezione e vagliatura del prodotto, una miscelazione dei materiali di partenza, poi una fase di produzione del compost mediante rivoltamento costante della massa all'aria aperta, per tutta la durata del periodo di maturazione. Non avendo a disposizione dati specifici dell'impianto di compostaggio di Ozzano, le emissioni relative alla produzione di compost sono state desunte utilizzando dati da bibliografia e dati non pubblicati, ma gentilmente offerti dall'Università Autonoma di Barcellona, relativi a impianti con stesso procedimento industriale di produzione, riadattati ai volumi reali lavorati dallo stabilimento di Ozzano (Colón *et al* 2010 (ES&T), Huerta *et al* 2008 (ESAB), Martínez-Blanco *et al* 2010 (WM), Cadena *et al* 2009 (IJLCA) Cisneros *et al* 2006, Antoni Sánchez).

Le caratteristiche del compost sono già state descritte in precedenza.

Produzione concimi chimici e trasporto. I dati di produzione dei concimi chimici e del trasporto del compost provengono dai processi inventariati nel database ecoinvent v2.0 (Swiss Centre for Life Cycle Inventories., 2007).

Dati della struttura. I dati riguardanti la serra sono stati ottenuti mediante misure dirette sul campo e interviste ai costruttori. La serra è un multitunnel a tre navate con pareti verticali; è costruita in archi di ferro zincato piantati direttamente a terra senza l'utilizzo di cemento; presenta finestre laterali su tutti e quattro i lati ad apertura manuale ed una finestra sul tetto nella sola navata centrale ad apertura elettrica. La superficie coperta è di circa 1500 m² e la copertura è costituita da film plastico di polietilene a bassa densità. I dati mancanti, soprattutto per i processi di estrazione e produzione dei materiali, sono stati estrapolati dal database ecoinvent v2.0 (Swiss Centre for Life Cycle Inventories., 2007).

Dati dell'impianto di fertirrigazione. I dati relativi all'impianto fertirriguo sono stati rilevati direttamente in campo. L'impianto consta di pompa elettrica sommersa, filtri, aspiratore venturi per la fertirrigazione, tubazioni principali, tubazioni secondarie, impianto di distribuzione a manichetta ed impianto di irrigazione per aspersione con microaspersori. Per quanto riguarda i dati riguardanti l'estrazione delle materie prime e i processi di produzione dei materiali utilizzati si è fatto riferimento al database ecoinvent v2.0 (Swiss Centre for Life Cycle Inventories, 2007).

Dati del ciclo colturale. I dati di emissione di CO₂ del ciclo colturale sono stati rilevati direttamente in campo, mediante campionature e determinazione del C organico in suolo e piante .

2.5. Categorie d'impatto e metodologia LCA

Sono state considerate sei categorie di impatto, più specificatamente, Potenziale Riscaldamento Globale (Global Warming), Assottigliamento della fascia di ozono (Ozone Depletion), Acidificazione delle acque (Acidification), Eutrofizzazione delle acque (Eutrophication), Formazione di smog fotochimico (Photochemical Smog Formation), Consumo di risorse non rinnovabili (Abiotic Depletion) definite dal CML 2001 (Guinée, 2001).

Per l'analisi di impatto ed elaborazione dati è stato utilizzato il SimaPro v. 7.1.8 (PRé Consultants, 2008) con la classificazione e fase di caratterizzazione obbligatoria definita dalle norme ISO 14040 (International Organisation for Standardisation, 2006).

3. MATERIALI E METODI PER IL LIFE CYCLE INVENTORY (LCI) NEL PROGETTO "SUSTGREENHOUSE"

3.1. Considerazioni preliminari

I valori di produzione ottenuti dalla prova sperimentale sono stati riferiti all'ettaro, così come tutti i fattori della produzione. Per quanto riguarda la struttura serra (superficie coperta 1500 m²), riferire il valore dei materiali della serra oggetto di studio all'ettaro, porta di fatto a un sovradimensionamento del valore in quanto i valori riguardanti le testate vanno a incidere notevolmente sulle quantità finali di materiale utilizzato. La zona di Fondi però è caratterizzata prevalentemente da strutture di questo tipo e per questo motivo si è deciso di mantenere questo *modus operandi* anche per la struttura.

Compost. Il compost è normalmente applicato in cicli di 2 anni. Di conseguenza, con il proposito di distribuire i carichi ambientali dei trasporti e dello spandimento, ad ogni coltura

della successione (zucchino-pomodoro) è stata attribuita metà della quota di compost totale.

Trasporti. In quasi tutte le fasi, per i trasporti è stato considerato il doppio della distanza tra la sorgente e la destinazione del prodotto. Questo, ovviamente, per tener in considerazione anche il viaggio di ritorno a vuoto.

3.2. Produzione compost

Questa fase include la produzione di rifiuti organici, gli input e gli output del processo industriale di compostaggio dell'impianto di Ozzano dell'Emilia (BO).

Raccolta e trasporto. Le materie prime per la produzione di compost sono state ottenute dalla raccolta differenziata della città di Bologna e dai comuni adiacenti, in un'area di 30 km di raggio dalla struttura. Il trasporto del materiale avviene mediante camion di 21t di portata massima. In questa fase è stata considerata anche il processo di produzione dei cassonetti di raccolta e la loro pulizia (Martínez-Blanco et al., 2009; Martínez-Blanco et al., 2010).

Processo di compostaggio. I dati di emissioni e consumi del processo di compostaggio sono stati ottenuti adattando i dati sperimentali di un impianto di compostaggio (Torrellas de Llobregat, Barcellona, Spagna) con caratteristiche, sia di processo che di prodotto finale, simili a quelle dell'impianto di Ozzano .

Il prodotto in entrata viene pesato, tritato e vagliato una prima volta per eliminare i materiali non compostabili. Successivamente, vengono mescolati i residui organici urbani con materiale vegetale fresco (ramaglie, foglie, ecc), in rapporti ottimali per il processo di compostaggio. La massa viene poi inumidita, secondo necessità.. La fase successiva prevede la formazione dei cumuli di compostaggio, in un capannone aperto lateralmente, i quali vengono periodicamente rimescolati, dapprima 1 volta al giorno, poi man mano che il processo prosegue con frequenza ridotta (fino a 1 volta la settimana). In questo tipo di impianti, non è previsto il trattamento dei gas emessi durante il processo. Dopo sei settimane si passa alla fase di maturazione che avviene sempre rivoltando la massa, senza più aggiungere acqua, ottenendo una temperatura di 40°C circa al centro dei cumuli; questa fase dura circa 14 settimane. Alla fine della fase di maturazione, il materiale viene vagliato in un setaccio cilindrico, o trommel, per separare la frazione organica da eventuali inerti e da materiali non compostati, i quali andranno in discarica. Il materiale vagliato viene poi compresso per la produzione dei pellets.

Dall'intero processo si emetterebbero 0,25 kg di N₂O, 4,37 kg di CH₄, 8,63 kg di NH₃ e 5,70 kg di VOC (Volatile Organic Compounds) per ogni tonnellata di residuo organico urbano e residuo verde compostato.

3.3. Produzione fertilizzanti minerali

I dati di produzione dei fertilizzanti minerali provengono dal database ecoinventv2.0 (Swiss Centre for Life Cycle Inventories., 2007), i quali includono infrastrutture, trasporto della materia prima, sintesi dei composti chimici necessari, deposito e trattamento dei rifiuti generati (Nemecek et al., 2004).

3.4. Estrazione Zeoliti

I dati di estrazione delle zeoliti provengono dal database ecoinvent. Non essendo presente il processo vero e proprio, si è utilizzato il processo di estrazione della bentonite il quale è molto simile; per la giusta ponderazione dei dati di emissioni e consumi, essendo la zeolite un materiale inerte, si è considerata una vita utile di 100 anni, come avviene per le sabbie e ghiaie.

3.5. Trasporto compost

Il compost è stato trasportato dall'impianto di compostaggio (Ozzano Emilia, Bologna) al luogo di utilizzo (Salto di Fondi, Latina) mediante camion 16t per una distanza di 330 km.

3.5. Trasporto concimi

I concimi azotati utilizzati provenivano tutti dalla ditta Yara, con stabilimento di produzione a Ferrara, è stato ipotizzato un trasporto con camion 16t per una distanza di 400 km; per tutti gli altri, non sapendone la provenienza, si è considerato come punto di partenza la sede legale della ditta produttrice.

3.6. Trasporto Zeolite

Per il trasporto della zeolite è stato considerato con camion di 28t di portata, con partenza dal luogo della cava (Pitigliano, AR), per un totale di km 280.

3.7. Coltivazione

La gestione della coltura è stata condotta utilizzando le normali pratiche agricole della zona.

Impianto di fertirrigazione. La somministrazione di acqua e fertilizzanti è stata effettuata mediante l'utilizzo di un impianto di fertirrigazione standard con pompa elettrica sommersa, filtro, tubo Venturi, manometri, condotte principali, secondarie, manichetta per la distribuzione microirrigua dell'acqua ed impianto ad aspersione con miscoaspersori. Sono stati considerati la produzione di questi elementi, il loro trasporto e la gestione dei rifiuti, in rapporto alla vita utile ed al ciclo produttivo della coltivazione.

Prodotti fitosanitari. I prodotti fitosanitari utilizzati sono tutti prodotti ammessi e registrati per la coltura e le dosi sono quelle riportate in etichetta. Il calcolo delle emissioni ha fatto riferimento non solo alla fase di produzione (database ecoinvent) ma anche alla distribuzione dei prodotti nei diversi comparti ambientali, in funzione della grandezza delle piante (LAI) e tempo di degradazione delle molecole utilizzate. Menzione particolare la merita il Rame, il quale pur essendo utilizzato come antiperonosporico di copertura anche in regimi di produzione biologica, a livello di tossicità ambientale è piuttosto dannoso in quanto chimicamente è considerato un metallo pesante con tempi di degradazione superiori agli 8000 anni. Questo porta, durante la fase di elaborazione dei dati, ad essere tra i fitofarmaci il fattore maggiormente impattante.

Macchinari, attrezzature e lavorazioni. Sono stati presi in considerazione la produzione, la manutenzione, il trasporto e la gestione dei rifiuti di trattori ed attrezzature per la lavorazione. Sono state considerate le lavorazioni comuni ai tre substrati di coltivazione ed anche quelle specifiche per le tesi Compost e Zeolite.

Irrigazione e fertirrigazione. Per queste due pratiche, sono state conteggiate le ore di funzionamento ed i consumi di energia elettrica della pompa durante tutto il ciclo di coltivazione.

Emissioni da concimazione e fertirrigazione. Per il calcolo delle emissioni dei concimi distribuiti in fertirrigazione sono state considerate le diverse forme di azoto contenute in essi secondo la metodica proposta da Audsley (Audsley, 1997) e da Bentrup e Küesters (Bentrup, 2000). Le emissioni in atmosfera sono state conteggiate come NH_3 , N_2O , NO_x e N_2 , mentre le emissioni nelle acque come NO_3 .

Emissioni dal ciclo colturale. Le emissioni di CO_2 del ciclo colturale sono state effettuate mediante misura diretta a fine ciclo. Il valore utilizzato proviene dal differenziale di C del suolo a fine ciclo rispetto a quello a inizio ciclo, epurato della quota organica dalla pianta e allocata nelle parti vegetative (pianta e frutti in formazione) e nella produzione.

Gestione dei residui colturali. Nel caso della coltura di zucchini si sono analizzate due ipotesi. La prima prevedeva la rimozione e lo smaltimento dei residui colturali a fine ciclo; la seconda, l'incorporamento degli stessi nel terreno. Nella pratica, nell'Azienda oggetto di studio, delle due ipotesi è stata seguita la seconda che ha lo scopo principale di innalzare il livello di sostanza organica nel terreno. Nel caso del pomodoro, invece, è stata considerata solo la prima opzione in quanto, per motivi di carattere fitosanitario, non è mai consigliabile interrare i residui colturali in serra.

Gestione degli altri residui dal sistema. Non sono stati tenuti in considerazione gli smaltimenti e la gestione dei residui dal sistema alla fine della propria durata tecnica.

3.8. Serra

Per lo studio di LCA, sono stati considerati per la serra la produzione, il trasporto, l'installazione e la gestione dei residui dei componenti.

Per il ferro della struttura degli archi è stato considerato il 90% della materia prima proveniente dal riciclo e solo il 10% da nuove materie prime di estrazione in accordo con le dichiarazioni dei produttori delle strutture. Tutti i componenti metallici sono stati galvanizzati e rivestiti di uno strato di zinco per la protezione dall'ossidazione. Si è assunta una durata di venti anni della struttura, mentre per il materiale di copertura tre anni. Per quanto riguarda la struttura sono stati tenuti in considerazione anche i fili di ferro passanti sopra le piante e il filo di rafia per il tutoraggio delle piante.

Tutte le finestre laterali sono ad apertura manuale, quindi non conteggiate, mentre la finestra al colmo della navata centrale è a comando elettrico, con associato consumo elettrico, per un utilizzo medio di 5 minuti al giorno.

3.9. Carica ambientale evitata, relativa ai residui organici urbani e alla materia vegetale fresca smaltiti in discarica

L'utilizzo del compost per la coltivazione non può essere considerato come semplice surrogato di una concimazione minerale o di un ammendante in genere, al compost bisogna comunque riconoscere una funzione in più: la riduzione dei volumi dei residui ed una minore quantità di materiale destinato alle discariche. Per questo, all'impatto ambientale della tesi compost viene sottratto l'impatto ambientale che avrebbe avuto la quantità di residui organici urbani e materia vegetale fresca utilizzati per la produzione di compost se fossero stati smaltiti in discarica (Martínez-Blanco et al., 2010).

4. I RISULTATI DI LCA APPLICATA ALLA “SUSTGREENHOUSE”

4.1. LCA Zucchino

Come precedentemente affermato, per lo zucchino 1°ciclo lo studio di LCA e la sua valutazione è stata approfondita e affinata per evidenziare il contributo dei tre differenti substrati di coltivazione (**tal quale, compost, zeolite**); per lo zucchino 2°ciclo si sono prese in considerazione anche le gestioni di acqua e fertilizzanti.

I risultati riportati nelle figure e nelle tabelle sono già riferiti all'unità funzionale (tonnellata di prodotto).

4.1.1. Contributo ambientale delle varie fasi del sistema(1° CICLO)

E' stato valutato il contributo ambientale delle varie fasi del sistema all'impatto totale delle tre tesi a confronto (coltivazione sui tre substrati: **tal quale, compost, zeolite**), considerando le due opzioni: 1) rimozione e smaltimento dei residui colturali ; 2) incorporamento nel terreno dei residui colturali(opzione effettivamente seguita durante le prove dimostrative).

Dalla Tabella 1 si può osservare che la tesi **compost** ha evidenziato valori più bassi rispetto sia alla coltivazione su substrato **tal quale** sia su **zeolite** in quasi tutte le categorie di impatto, eccetto che per le due che riguardano l'acidificazione delle acque (Ac) e l'eutrofizzazione delle acque (Eu).

Impact category	Unit	Rimozione residui colturali			Incorporamento residui colturali		
		Tal quale	Compost	Zeolite	Tal quale	Compost	Zeolite
AD	kg Sb eq	4.141	3.382	4.429	4.141	3.382	4.429
Ac	kg SO ₂ eq	2.517	22.319	2.729	2.517	22.319	2.729
Eu	kg PO ₄ ³⁻ eq	0.376	1.741	0.413	0.376	1.741	0.413
GW	kg CO ₂ eq	942	913	1126	298	16	317
OD	kg CFC-11 eq	3.16E-05	1.74E-05	3.48E-05	3.16E-05	1.74E-05	3.48E-05
PO	kg C ₂ H ₄	0.107	-0.020	0.114	0.107	-0.020	0.114

Tab. 1. Zucchino 1° ciclo. Influenza dei substrati di coltivazione e della rimozione o incorporamento nel terreno dei residui colturali su le varie categorie di impatto. Le emissioni sono espresse per tonnellata di prodotto commerciabile. AD = Consumo di risorse non rinnovabili; Ac = Acidificazione delle acque; Eu = Eutrofizzazione delle acque; GW = Riscaldamento Globale; OD = Assottigliamento della fascia di ozono; PO = Formazione di smog fotochimico.

Se si considera l'opzione "rimozione residui colturali", possiamo notare come ci sia stata una riduzione di circa il 20% per il consumo di risorse non rinnovabili (categoria AD), una lieve riduzione di emissione di CO₂(GW) - non tanto rispetto alla coltivazione normale ma rispetto alla **zeolite**(- 18%) -, un dimezzamento delle emissioni che riducono lo strato di ozono (OD) e una mancata produzione di agenti provocanti ossidazione fotochimica (PO). Per contro si ha un notevole aumento del potere acidificante (fino a dieci volte) e del potere eutrofizzante (fino a 4 volte).

La coltivazione su **zeolite** ha influenzato le categorie d'impatto in modo non molto diverso della coltivazione sul substrato **tal quale**. Di sostanziale si è osservato, rispetto a quest'ultima, un incremento del 20% delle emissioni di CO₂ (GW).

Considerando l'opzione "incorporamento dei residui colturali", l'impatto della coltura non cambia per quasi tutte le categorie di impatto: fa eccezione il riscaldamento globale (GW), dove il **compost** ha per messo una riduzione delle emissioni di CO₂ del 95% sia nei confronti del substrato **tal quale** che della **zeolite**.

In Figura 4, per l'opzione "rimozione dei residui colturali", viene riportata per ogni categoria di impatto, l'incidenza o contributo dovuto ai diversi fattori d'impatto.

E' da notare, innanzitutto che nei sistemi **tal quale** e **zeolite** i fattori d'impatto hanno effetti assai simili con le emissioni dovute all'estrazione della zeolite che incidono per ben poca cosa sull'impatto totale. In entrambi questi sistemi e per tutte le categorie d'impatto, eccetto che per il "Riscaldamento Globale" (GW), la struttura(serra) è il fattore di impatto che ha evidenziato l'incidenza maggiore, spesso superiore al 50%. Questi risultati provengono principalmente dalle materie prime utilizzate, le quali vanno a incidere in maniera considerevole sulla categoria "Consumo di risorse non rinnovabili" (AD) - ben oltre il 60% - e per valori molto alti anche per le altre categorie d'impatto. Questo è da imputare principalmente al processo di lavorazione e galvanizzazione dei materiali.

Il processo maggiormente impattante, successivo per ordine d'importanza, sono le operazioni colturali, soprattutto per quanto riguarda le categorie "Acidificazione delle acque" (Ac), con circa 20%, "Eutrofizzazione delle acque" (Eu), con circa 25% e "Assottigliamento della fascia di ozono" (OD), con circa 30%. In contrapposizione alle operazioni colturali, si può notare come nelle categorie "Consumo di risorse non rinnovabili" (AD) e "Formazione di smog fotochimico" (PO), siano più elevati i valori provenienti dall'impianto di fertirrigazione - rispettivamente 20% e 15% circa - dove

l'utilizzo di materie prime non rinnovabili e il processo di lavorazione portano un contributo significativo.

Per quanto riguarda la categoria "Riscaldamento Globale" (GW) le emissioni preponderanti, in questo caso di CO₂, derivano dal ciclo di produzione, inteso prevalentemente come respirazione del terreno, il tutto rapportato ovviamente alla produzione ottenuta. Nel **tal qualesi** è osservata un'incidenza pari al 52%, mentre per la **zeolite** circa il 56%; questi valori, nonostante il tasso di respirazione sia stato simile nei due substrati per tutto il ciclo colturale, differiscono per il fatto che la produzione è stata leggermente inferiore nel terreno ammendato con zeolite, anche se non differente significativamente.

Per quanto riguarda il **compost** possiamo notare l'effetto nel sistema della carica ambientale evitata. Da un lato possiamo vedere come per certe categorie d'impatto si sia avuta una riduzione più o meno marcata degli impatti come in AD, GW, OD e PO, mentre in altre categorie si siano osservati degli aumenti (Ac ed Eu). Più in particolare l'impiego del compost come ammendante ha permesso di ridurre le emissioni o impatti con la seguente incidenza: 12% nella categoria AD, 20% nella categoria GW, 30%, nella categoria OD e 50% nella categoria PO. Per contro, nella categoria AC abbiamo un 85% da attribuire alla produzione di compost mentre nella categoria EU un 70%. Questi maggiori impatti sono da attribuire principalmente al processo di produzione del compost e più in particolare all'elevato dispendio energetico, alla produzione di composti volatili e ai colaticci, che vanno ad interessare principalmente queste categorie di impatto. Sempre nel sistema **compost** la struttura rimane preponderante nella categoria AD (58%) e di notevole entità anche nelle categoria OD (45%) e PO (35%). Elevata rimane anche l'importanza relativa del ciclo di coltivazione nella categoria GW (45% circa).

Dalla Figura 5, dove viene riportato il contributo dei diversi fattori d'impatto per l'opzione "incorporamento dei residui colturali", si nota sostanzialmente che tale opzione contribuisce a ridurre unicamente le emissioni di CO₂ per un 25% circa nel caso del **tal quale** e della **zeolite** e per un 17% circa nel caso del **compost**.

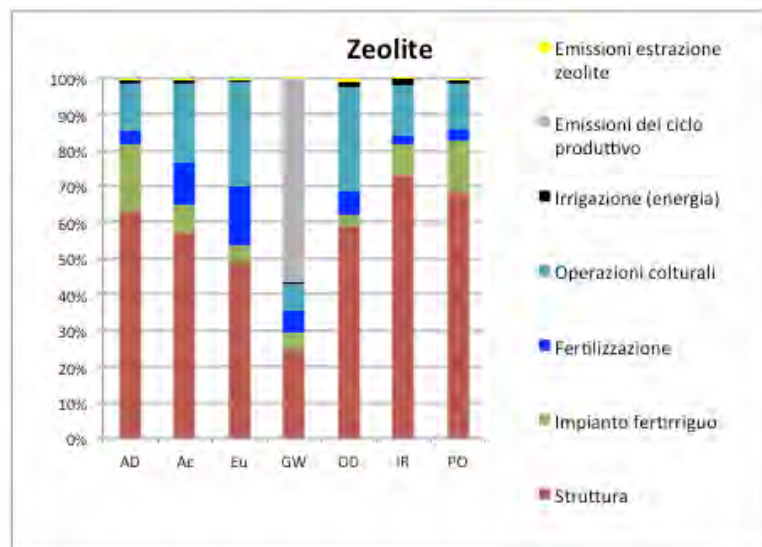
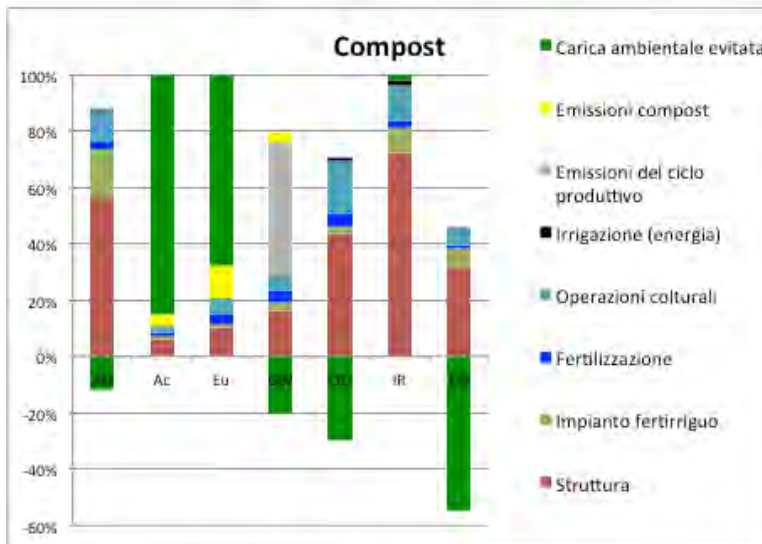
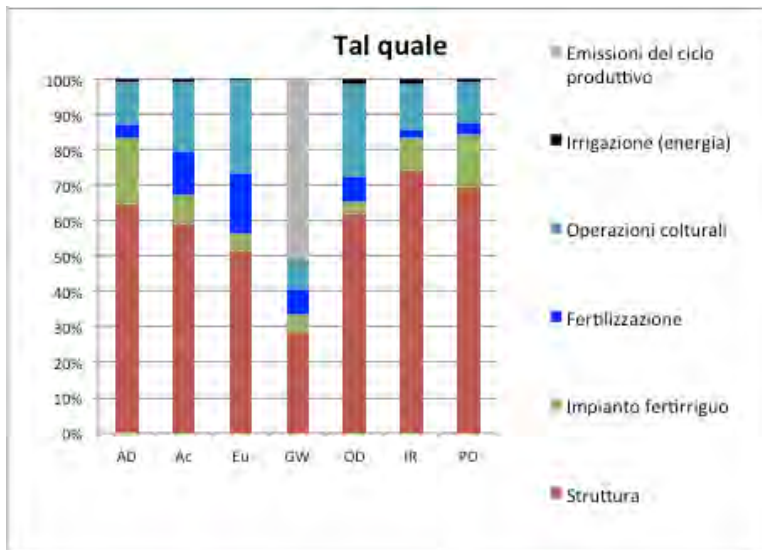


Figura 4 – Zucchino 1° ciclo. Distribuzione percentuale dei processi per categoria d'impatto nei sistemi **tal quale**, **compost** e **zeolite**, nell'ipotesi di rimozione e smaltimento dei residui colturali. Le emissioni sono espresse per tonnellata di prodotto commerciabile. AD = Consumo di risorse non rinnovabili; Ac = Acidificazione delle acque; Eu =

Eutrofizzazione delle acque; GW = Riscaldamento Globale; OD = Assottigliamento della fascia di ozono; PO = Formazione di smog fotochimico.

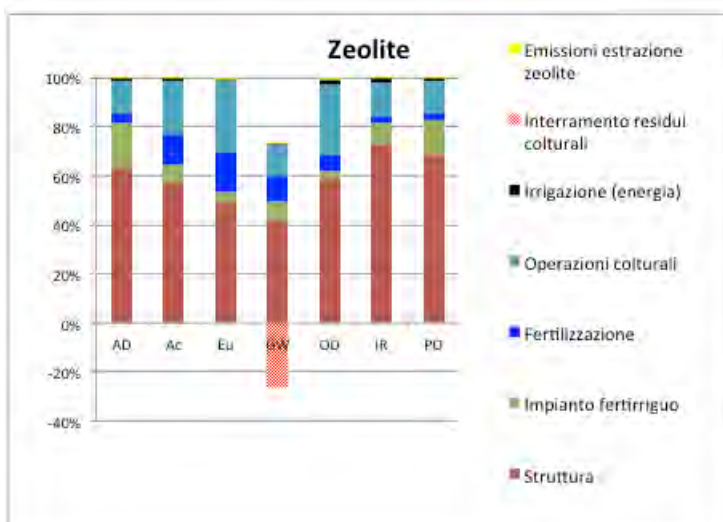
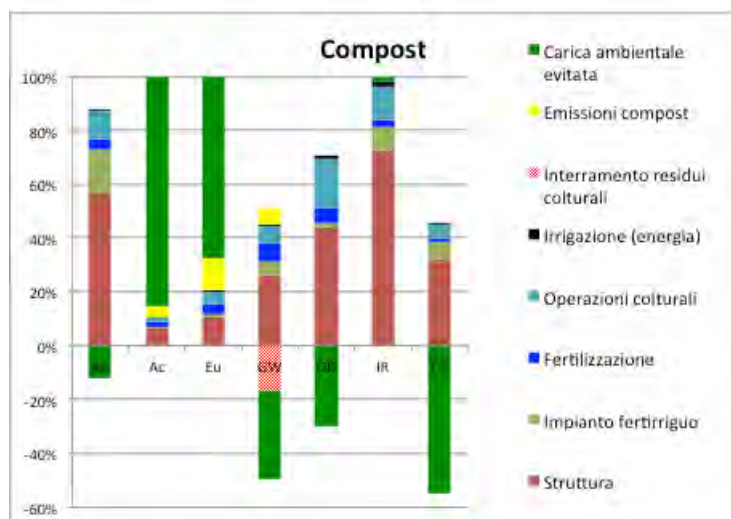
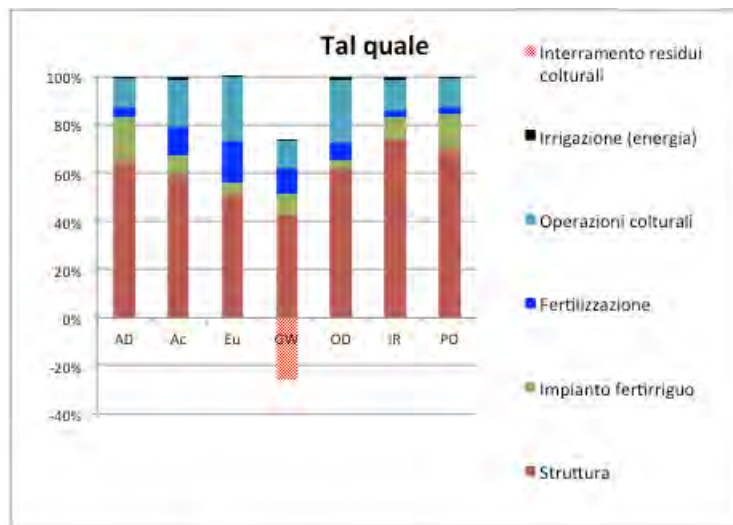


Figura 5 – Zucchino 1° ciclo. Distribuzione percentuale dei processi per categoria di impatto nei sistemi **tal quale**, **compost** e **zeolite**, nell'ipotesi di incorporamento nel terreno dei residui colturali. Le emissioni sono espresse per tonnellata di prodotto commerciabile. AD = Consumo di risorse non rinnovabili; Ac = Acidificazione delle acque; Eu =

Eutrofizzazione delle acque; GW = Riscaldamento Globale; OD = Assottigliamento della fascia di ozono; PO = Formazione di smog fotochimico.

4.1.2. Contributo ambientale delle varie fasi del sistema(2° CICLO)

Nel secondo ciclo, come nel primo, è stato valutato il contributo ambientale delle varie fasi del sistema all'impatto totale delle tre tesi a confronto (coltivazione sui tre substrati: **tal quale, compost, zeolite**), considerando le due opzioni: 1) rimozione e smaltimento dei residui colturali ; 2) incorporamento nel terreno dei residui colturali

I risultati ottenuti nella tabella e nelle figure sono già riferiti all'unità funzionale (tonnellata di prodotto).

Dalla Tabella 2 si può osservare che anche in questo ciclo la tesi **compost** ha evidenziato valori più bassi rispetto sia alla coltivazione su substrato **tal quale** sia su **zeolite** in quasi tutte le categorie di impatto, eccetto che per le due che riguardano l'acidificazione delle acque (Ac) e l'eutrofizzazione delle acque (Eu).

Impact category	Unit	Rimozione residui colturali			Incorporamento residui colturali		
		Tal quale	Compost	Zeolite	Tal quale	Compost	Zeolite
AD	kg Sb eq	5.201	3.900	5.532	5.201	3.900	5.532
Ac	kg SO ₂ eq	3.122	24.510	3.338	3.122	24.510	3.338
Eu	kg PO ₄ ³⁻ eq	0.458	1.803	0.484	0.458	1.803	0.484
GW	kg CO ₂ eq	1504	283	154	388	-9	449
OD	kg CFC-11 eq	4.03E-05	3.49E-05	4.25E-05	4.03E-05	3.49E-05	4.25E-05

Tab. 2. Zucchino 2° ciclo. Influenza dei substrati di coltivazione e della rimozione o incorporamento nel terreno dei residui colturali sulle varie categorie di impatto. Le emissioni sono espresse per tonnellata di prodotto commerciabile. AD = Consumo di risorse non rinnovabili; Ac = Acidificazione delle acque; Eu = Eutrofizzazione delle acque; GW = Riscaldamento Globale; OD = Assottigliamento della fascia di ozono.

Se si considera l'opzione "rimozione residui colturali", possiamo notare come rispetto a **tal quale** il **compost** abbia permesso una riduzione di circa il 25% per il consumo di risorse non rinnovabili (categoria AD), di oltre l' 80%per le emissioni di CO₂ (GW) e di un 13% delle emissioni che riducono lo strato di ozono (OD).Per contro si ha un notevole aumento del potere acidificante (fino a sei volte) e del potere eutrofizzante (fino a 3 volte).

La coltivazione su **zeolite** ha influenzato le categorie d'impatto in modo non molto diverso della coltivazione sul substrato **tal quale** (variazioni dell'ordine del 5%), ad esclusione

delle emissioni di CO₂ (GW) che in questo ciclo sono apparse notevolmente ridotte (90% in meno rispetto a **tal quale**). Ciò è stato determinato da un bilancio più favorevole tra fotosintesi e respirazione del terreno.

Considerando l'opzione "incorporamento dei residui colturali", l'impatto della coltura non è cambiato per quasi tutte le categorie di impatto: ha fatto eccezione il riscaldamento globale (GW), dove il **compost** ha permesso un azzeramento delle emissioni e il **tal quale** una riduzione delle emissioni di CO₂ del 75%. Con **zeolite**, invece, GW ha subito un incremento di circa il 200% rispetto all'opzione "rimozione dei residui colturali"; questo è chiaramente dovuto alla rimessa in circolo di sostanza organica soggetta a processi respirativi.

In Figura 6, per l'opzione "rimozione dei residui colturali", viene riportata per ogni categoria di impatto, l'incidenza o contributo dovuto ai diversi fattori d'impatto.

E' da notare che anche per questo ciclo le emissioni dovute all'estrazione della zeolite incidono per ben poca cosa sull'impatto totale di questo sistema. Inoltre, nei sistemi **tal quale** e **zeolite** il fattore d'impatto che ha evidenziato l'incidenza maggiore per tutte le categorie d'impatto, eccetto che per il "Riscaldamento Globale" (GW), è la struttura (serra) la cui incidenza è parsa spesso superiore al 50%. Questi risultati provengono principalmente dalle materie prime utilizzate, le quali vanno a incidere in maniera considerevole sulla categoria "Consumo di risorse non rinnovabili" (AD) - ben oltre il 60% - e per valori molto alti anche per le altre categorie d'impatto. Questo è da imputare principalmente al processo di lavorazione e galvanizzazione dei materiali.

Nel sistema **tal quale**, il processo maggiormente impattante, successivo per ordine d'importanza, sono apparse le operazioni colturali, soprattutto per quanto riguarda le categorie "Acidificazione delle acque" (Ac), con circa 19%, "Eutrofizzazione delle acque" (Eu), con circa 26% e "Assottigliamento della fascia di ozono" (OD), con circa 25%. In contrapposizione alle operazioni colturali, si può notare come nelle categorie "Consumo di risorse non rinnovabili" (AD), siano più elevati i valori provenienti dall'impianto di fertirrigazione con il 18% circa, dove l'utilizzo di materie prime non rinnovabili e il processo di lavorazione portano un contributo significativo.

Nel sistema **zeolite**, il processo maggiormente impattante, successivo per ordine d'importanza alla struttura, è risultata la fertilizzazione seguita a breve distanza dalle operazioni colturali, soprattutto per quanto riguarda le categorie "Acidificazione delle acque" (Ac), con circa 17% e 15% rispettivamente e "Eutrofizzazione delle acque" (Eu), con circa 24% e 21%, rispettivamente.

Per quanto riguarda la categoria “Riscaldamento Globale” (GW), gli effetti si differenziano notevolmente tra il sistema **tal quale** e il sistema **zeolite**. Nel **tal quale**, le emissioni preponderanti di CO₂ derivano dal ciclo di produzione, inteso prevalentemente come respirazione del terreno, che incide per il 62% su tale categoria d’impatto. In **zeolite**, **invece**, la ridotta respirazione del terreno ha spostato decisamente l’equilibrio CO₂ *organicata:CO₂ emessa* verso il primo termine, determinando una sostanziale riduzione nella categoria GW.

Per quanto riguarda il **compost**, ancora una volta si è potuto notare l’effetto nel sistema della carica ambientale evitata. Da un lato possiamo vedere come per certe categorie d’impatto ciò ha permesso una riduzione più o meno marcata degli impatti come in AD e GW, mentre in altre categorie si siano osservati degli aumenti (Ac ed Eu). Più in particolare l’impiego del compost come ammendante ha permesso di ridurre le emissioni o impatti per oltre il 10% e 35% nella categoria AD e GW, rispettivamente. Per contro, nella categoria AC abbiamo un 87% da attribuire alla produzione di compost mentre nella categoria EU un 74%. Questi maggiori impatti sono da attribuire principalmente al processo di produzione del compost e più in particolare all’elevato dispendio energetico, alla produzione di composti volatili e ai colaticci, che vanno ad interessare principalmente queste categorie di impatto. Sempre nel sistema **compost** la struttura rimane preponderante nelle categorie AD (63%) e OD (60%) e di notevole entità anche nella categoria GW (44%). In questo ciclo più contenuto è l’effetto del ciclo di coltivazione nella categoria GW (incidenza del 20% circa).

Dalla Figura 7, dove viene riportato il contributo dei diversi fattori d’impatto per l’opzione “incorporamento dei residui colturali”, si nota sostanzialmente che tale opzione contribuisce a ridurre unicamente le emissioni di CO₂ per un 25% circa nel caso **del tal quale** e per un 15% circa nel caso del **compost**. Come precedentemente affermato, nel caso della **zeolite** con l’incorporamento dei residui vegetali viene aumentato il potenziale di respirazione del terreno e , di conseguenza il valore di GW.

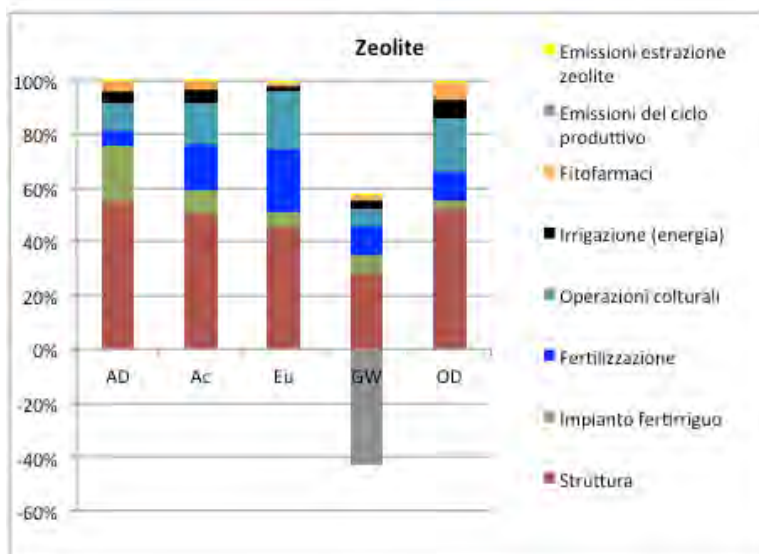
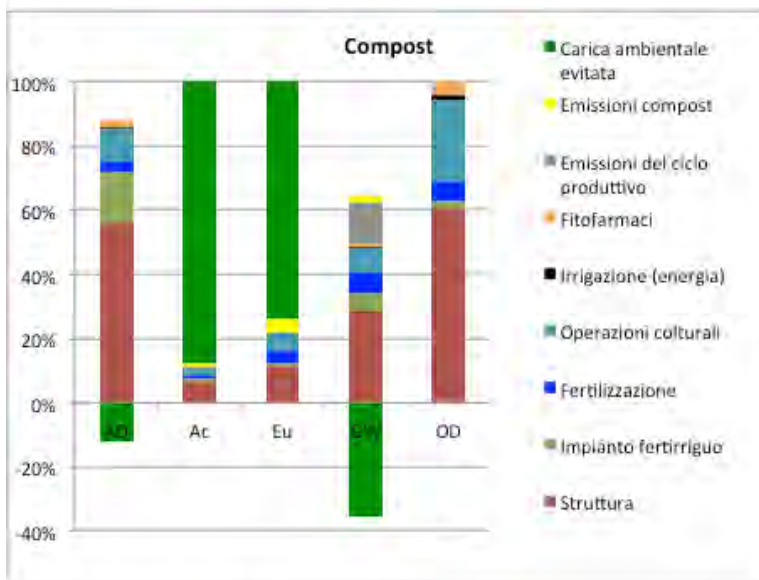
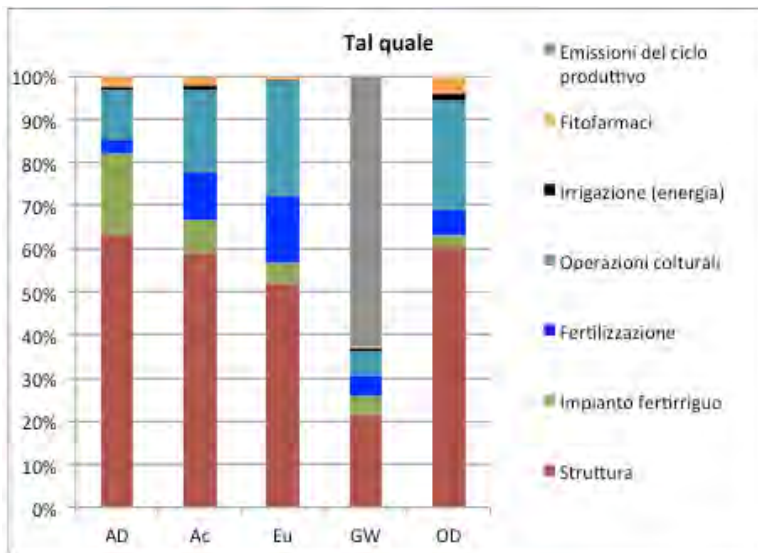


Figura 6 – Zucchino 2° ciclo. Distribuzione percentuale dei processi per categoria d'impatto nei sistemi **tal quale**, **compost** e **zeolite**, nell'ipotesi di rimozione e smaltimento dei residui colturali. AD = Consumo di risorse non rinnovabili; Ac = Acidificazione delle acque; Eu = Eutrofizzazione delle acque; GW = Riscaldamento Globale; OD = Assottigliamento della fascia di ozono.

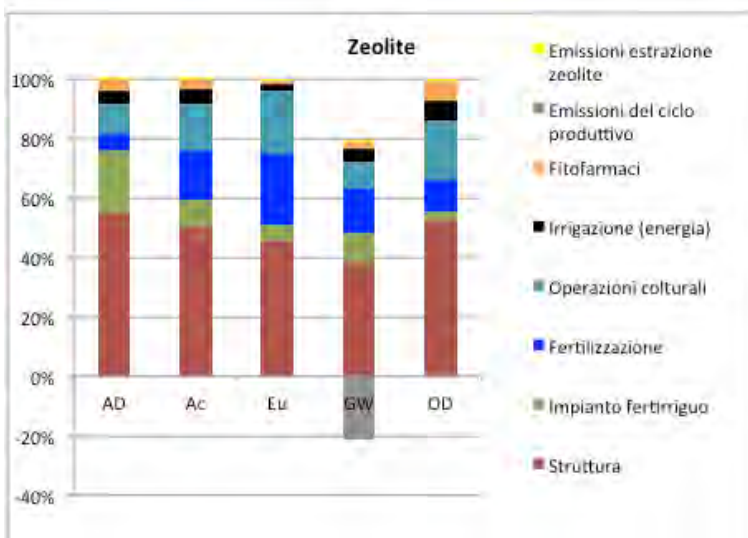
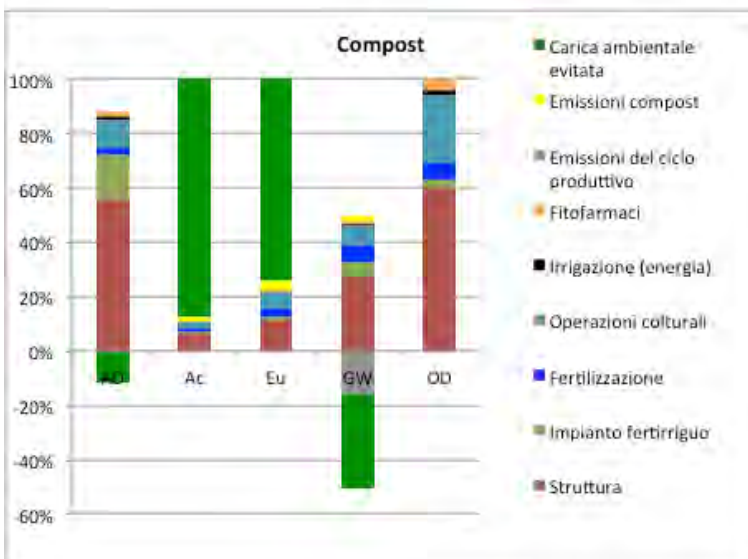
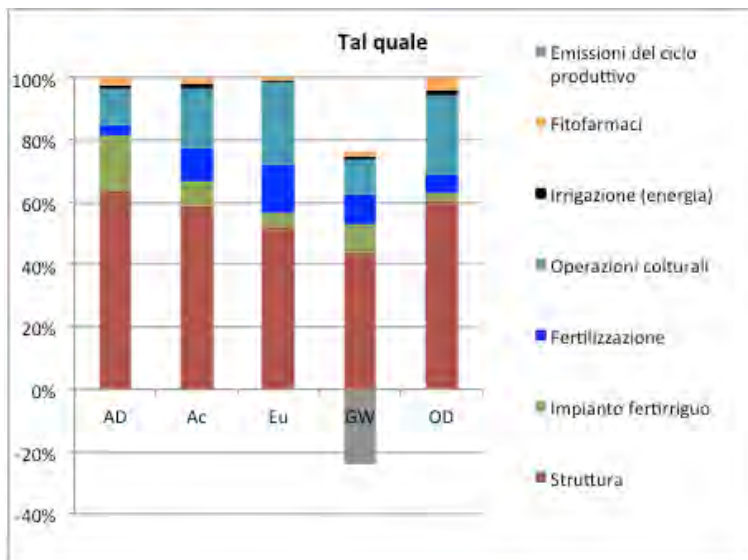


Figura 7 – Zucchini 2° ciclo. Distribuzione percentuale dei processi per categoria d'impatto nei sistemi **tal quale**, **compost** e **zeolite**, nell'ipotesi di incorporamento nel terreno dei residui colturali. AD = Consumo di risorse non rinnovabili; Ac = Acidificazione delle acque; Eu = Eutrofizzazione delle acque; GW = Riscaldamento Globale; OD = Assottigliamento della fascia di ozono.

In tabella 3 vengono riportati più in dettaglio tutti gli effetti dei fattori a confronto sulle categorie di impatto. E' interessante osservare come su **tal quale** e **zeolite** la riduzione sia dei volumi irrigui (Irid) sia dei concimi (Crid) abbia permesso di ridurre le emissioni in tutte le categorie di impatto, con effetti più evidenti dovuti alla gestione irrigua. Ad esempio per quanto riguarda la categoria GW sia su **tal quale** sia su **zeolite**, passando dalla **tesilmaxCmax** (controllo) a **IridCmax**, **ImaxCrid** e **IridCrid** si sono registrate riduzioni dei valori sull'ordine del 18%, 7% e 24%, rispettivamente. Su **compost**, invece, le diverse strategie agronomiche hanno avuto un effetto molto più modesto.

Tab. 3. Zucchino 2° ciclo. Influenza dei substrati di coltivazione, della gestione dell'irrigazione e della gestione della concimazione sulle varie categorie d'impatto. Coltura di zucchino i cui residui colturali sono stati incorporati nel terreno a fine ciclo. Le emissioni sono espresse per tonnellata di prodotto commerciabile. AD = Consumo di risorse non rinnovabili; Ac = Acidificazione delle acque; Eu = Eutrofizzazione delle acque; GW = Riscaldamento Globale; OD = Assottigliamento della fascia di ozono.

Tesi	tal quale				compost				Zeolite			
	Imax	Irid	Imax	Irid	Imax	Irid	Imax	Irid	Imax	Irid	Imax	Irid
	Cmax	Cmax	Crid	Crid	Cmax	Cmax	Crid	Crid	Cmax	Cmax	Crid	Crid
AD - kg Sb eq												
- medi	5.834	4.627	5.769	4.575	3.933	3.918	3.883	3.868	6.154	5.039	6.032	4.937
- min	4.652	4.135	4.600	4.089	3.535	3.522	3.490	3.477	5.197	4.436	5.094	4.346
- max	7.832	5.251	7.745	5.193	4.432	4.415	4.375	4.358	7.534	5.837	7.384	5.719
Ac - kg SO₂eq												
- medi	3.550	2.814	3.415	2.708	24.567	24.557	24.463	24.452	3.728	3.162	3.508	2.980
- min	2.830	2.515	2.723	2.420	22.082	22.073	21.988	21.979	3.148	2.784	2.963	2.623
- max	4.766	3.194	4.585	3.073	27.682	27.671	27.565	27.553	4.564	3.663	4.295	3.452
Eu - kg PO₄³⁻eq												
- medi	0.525	0.417	0.497	0.395	1.814	1.813	1.792	1.792	0.542	0.470	0.496	0.432
- min	0.419	0.372	0.396	0.353	1.630	1.630	1.611	1.610	0.457	0.414	0.419	0.381
- max	0.705	0.473	0.668	0.448	2.044	2.043	2.019	2.019	0.663	0.544	0.608	0.501
GW - kg CO₂eq												
- medi	441.1	360.1	412.9	337.8	2.9	0.8	-19.0	-21.1	517.5	424.5	472.7	387.3
- min	351.7	321.9	329.2	301.8	2.6	0.7	-17.1	-19.0	437.0	373.7	399.2	341.0
- max	592.2	408.8	554.3	383.4	3.3	0.9	-21.5	-23.8	633.5	491.7	578.7	448.6
OD - kg CFC-11 eq												
- medi	4.54 E-05	3.60 E-05	4.45 E-05	3.52 E-05	3.54 E-05	3.52 E-05	3.46 E-05	3.45 E-05	4.68 E-05	4.02 E-05	4.51 E-05	3.87 E-05
- min	3.62 E-05	3.22 E-05	3.54 E-05	3.15 E-05	3.18 E-05	3.16 E-05	3.11 E-05	3.10 E-05	3.96 E-05	3.53 E-05	3.81 E-05	3.41 E-05
- max	6.09 E-05	4.08 E-05	5.97 E-05	4.00 E-05	3.99 E-05	3.97 E-05	3.90 E-05	3.89 E-05	5.74 E-05	4.65 E-05	5.52 E-05	4.48 E-05

4.2. LCA Pomodoro

Come per lo zucchini, anche per il pomodoro 1° ciclo lo studio di LCA e la sua valutazione è stata approfondita e affinata per evidenziare il contributo dei tre differenti substrati di coltivazione (**tal quale**, **compost**, **zeolite**); per il pomodoro 2° ciclo si sono prese in considerazione anche le gestioni di acqua e fertilizzanti.

I risultati riportati nelle figure e nelle tabelle sono già riferiti all'unità funzionale (tonnellata di prodotto).

4.2.1. Contributo ambientale delle varie fasi del sistema (1° CICLO)

Dalla Tabella 4 si può osservare che la tesi **compost** ha evidenziato valori più bassi rispetto sia alla coltivazione su substrato **tal quale** sia su **zeolite** in quasi tutte le categorie di impatto, eccetto che per le due che riguardano l'acidificazione delle acque (Ac) e l'eutrofizzazione delle acque (Eu).

Impact category	Unit	Tal quale	Compost	Zeolite
AD	kg Sb eq	0,422	0,382	0,455
Ac	kg SO ₂ eq	0,266	2,185	0,287
Eu	kg PO ₄ ³⁻ eq	0,039	0,178	0,043
GW	kg CO ₂ eq	94,3	64,9	78,3
OD	kg CFC-11 eq	3,06E-06	1,96E-06	3,33E-06
PO	kg C ₂ H ₄	0,011	-0,001	0,011

Tab. 4. Pomodoro 1° ciclo. Influenza dei substrati di coltivazione sulle varie categorie di impatto. Le emissioni sono espresse per tonnellata di prodotto commerciabile. AD = Consumo di risorse non rinnovabili; Ac = Acidificazione delle acque; Eu = Eutrofizzazione delle acque; GW = Riscaldamento Globale; OD = Assottigliamento della fascia di ozono; PO = Formazione di smog fotochimico.

Possiamo notare come rispetto a **tal quale** il **compost** abbia permesso una riduzione di circa il 10% per il consumo di risorse non rinnovabili (categoria AD), di oltre il 30% per le emissioni di CO₂ (GW) e di oltre il 35% delle emissioni che riducono lo strato di ozono (OD). Per contro si ha un notevole aumento del potere acidificante (oltre otto volte) e del potere eutrofizzante (oltre 4 volte).

La coltivazione su **zeolite** ha influenzato le categorie d'impatto in modo non molto diverso della coltivazione sul substrato **tal quale** (variazioni inferiori al 10%), ad esclusione delle emissioni di CO₂ (GW) che in questo ciclo sono apparse ridotte di circa il 20% rispetto a **tal quale**. Ciò è stato determinato da un bilancio più favorevole tra fotosintesi e respirazione del terreno.

Dalla Figura 8, si può osservare che la distribuzione percentuale dei processi per categoria d'impatto non si è molto differenziata tra i sistemi **tal quale** e **zeolite**. Anche per il pomodoro le emissioni dovute all'estrazione della zeolite incidono per ben poca cosa sull'impatto totale di questo sistema. Inoltre, in tutte le categorie di impatto, eccetto per il "Riscaldamento Globale" (GW), la struttura ha ancora evidenziato l'incidenza maggiore, spesso superiore al 50%. I valori più elevati li possiamo riscontrare nelle categorie "Formazione di smog fotochimico" (PO), "Assottigliamento della fascia di ozono" (OD) e "Consumo di risorse non rinnovabili" (AD); questi valori sono molto simili tra di loro e vanno dal 55% al 60% circa, principalmente per i processi di estrazione e lavorazione delle materie prime (metallo e plastiche).

Seppur la struttura incida prevalentemente sulle categorie "Acidificazione delle acque" (AC), per circa il 45% e "Eutrofizzazione delle acque" (EU), per circa il 42%, i concimi hanno un ruolo importante in queste categorie attestandosi sul 21% per AC e sul 30% per EU.

Come per lo zucchini, in contrapposizione alle operazioni colturali, si può notare come nelle categorie "Consumo di risorse non rinnovabili" (AD) e "Formazione di smog fotochimico" (PO), siano più elevati i valori provenienti dall'impianto di fertirrigazione - rispettivamente 20% e 15% circa - dove l'utilizzo di materie prime non rinnovabili e il processo di lavorazione portano un contributo significativo.

Per quanto riguarda la categoria "Riscaldamento Globale" (GW) le emissioni preponderanti, in questo caso di CO₂, derivano dal ciclo di produzione, inteso prevalentemente come respirazione del terreno: nel **tal quale** si è osservata un'incidenza pari al 50%, mentre per la **zeolite** circa al 35%; questi valori differiscono per il fatto che la produzione è stata leggermente inferiore nel terreno ammendato con zeolite. Gli altri fattori importanti per la categoria GW sono i processi di produzione della struttura (30% circa) e i processi di produzione dei concimi (18% circa).

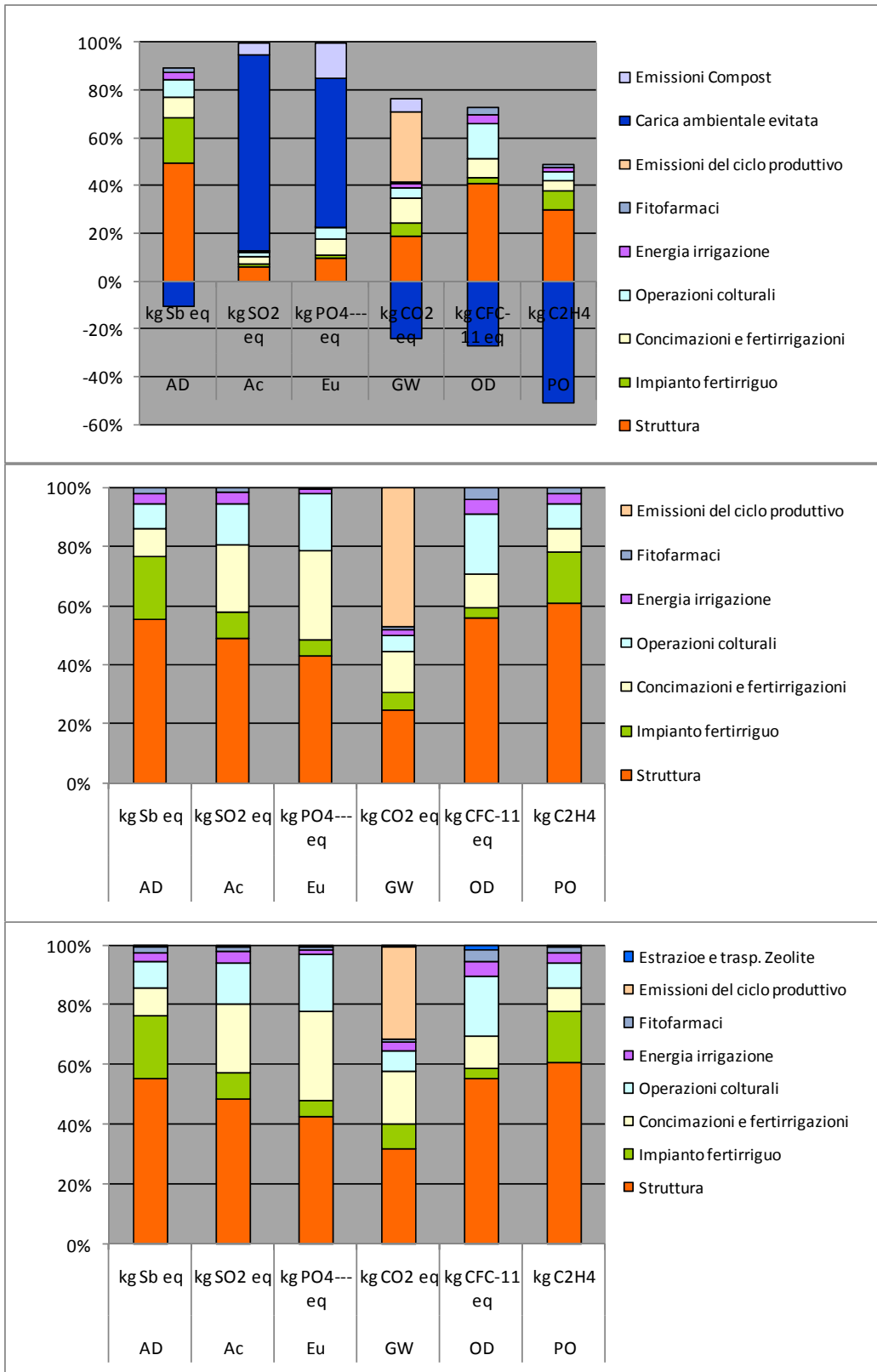


Figura 8 – Pomodoro 1° ciclo. Distribuzione percentuale dei processi per categoria d'impatto nei sistemi **tal quale**, **compost** e **zeolite**(compost, in alto; tal quale, al centro; zeolite, in basso). AD = Consumo di risorse non rinnovabili; Ac = Acidificazione delle acque; Eu = Eutrofizzazione delle acque; GW = Riscaldamento Globale; OD = Assottigliamento della fascia di ozono; PO = Formazione di smog fotochimico.

Per quanto riguarda il compost, la carica ambientale evitata ha contribuito alla riduzione delle categorie di impatto per il 12% nel caso di AD, 20% per GW, 30% per OD e 50% per PO. Per contro, nella categoria Aced Eu abbiamo un 85% e 70% rispettivamente da attribuire alla produzione di compost. La struttura è preponderante nella categoria AD per un 50% e nella categoria OD per un 40%; rimane di notevole entità anche nella categoria PO con un 30%. Elevata rimane l'importanza relativa del ciclo di coltivazione con compost nella categoria GW (30% circa).

4.2.2. Contributo ambientale delle varie fasi del sistema (2° CICLO)

Nel secondo ciclo, oltre al contributo ambientale dei sistemi **tal quale**, **compost**, **zeolite**, sono stati valutati e approfonditi anche i contributi della gestione dell'irrigazione (**Imax** vs **Irid**) e della fertilizzazione (**Cmax** vs **Crid**).

Dalla Tabella 5 si può osservare che in questo ciclo il substrato migliore si è rivelato il **tal quale** con valori nettamente più bassi di emissione di CO₂ rispetto sia al **compost** (circa 20% in meno) sia alla **zeolite** (circa 75% in meno). Rispetto a **tal quale** il **compost** conferma i risultati migliori per le categorie AD (oltre 10% in meno) e OD (circa 35% in meno), ma il notevole aumento di Ac (fino a otto volte) e di Eu (oltre a 4 volte).

Per le altre voci la coltivazione su **zeolite** ha influenzato le categorie d'impatto in modo assai simile alla coltivazione sul substrato **tal quale** (variazioni dell'ordine del 2%).

Impact category	Unit	Tal quale	Compost	Zeolite
AD	kg Sb eq	0.476	0.429	0.488
Ac	kg SO ₂ eq	0.290	2.324	0.295
Eu	kg PO ₄ ³⁻ eq	0.042	0.175	0.043
GW	kg CO ₂ eq	104	123	181
OD	kg CFC-11 eq	3.67E-06	2.41E-06	3.77E-06

Tab. 5. Pomodoro 2° ciclo. Influenza dei substrati di coltivazione sulle varie categorie di impatto. Le emissioni sono espresse per tonnellata di prodotto commerciabile. AD = Consumo di risorse non rinnovabili; Ac = Acidificazione delle acque; Eu = Eutrofizzazione delle acque; GW = Riscaldamento Globale; OD = Assottigliamento della fascia di ozono.

Nella tabella 6 si può osservare che tutte le categorie di impatto sono state influenzate in maniera assai ridotta dalla gestione ridotta della concimazione **Crid**(rispetto a **Cmax**, si sono osservate riduzioni al massimo pari al 5 %).

Impact category	Unit	C_MAX	C_RID
AD	kg Sb eq	0.480	0.473
Ac	kg SO ₂ eq	0.296	0.285
Eu	kg PO ₄ ³⁻ eq	0.043	0.041
GW	kg CO ₂ eq	105	103
OD	kg CFC-11 eq	3.71E-06	3.62E-06

*Tab. 6. Pomodoro 2° ciclo. Influenza della gestione della fertilizzazione (valori medi del substrato **tal quale**) sulle varie categorie d'impatto. Le emissioni sono espresse per tonnellata di prodotto commerciabile. AD = Consumo di risorse non rinnovabili; Ac = Acidificazione delle acque; Eu = Eutrofizzazione delle acque; GW = Riscaldamento Globale; OD = Assottigliamento della fascia di ozono.*

Nella tabella 7, invece, si può osservare che, sebbene la gestione ridotta dell'irrigazione **Irid** abbia incrementato del 17-19% rispetto a **Imax** le emissioni di AD, Ac, Eu e OD, ha permesso di ridurre del 28% circa le emissioni di CO₂ (GW).

Impact category	Unit	I_MAX	I_RID
AD	kg Sb eq	0.437	0.515
Ac	kg SO ₂ eq	0.267	0.314
Eu	kg PO ₄ ³⁻ eq	0.038	0.046
GW	kg CO ₂ eq	121	87
OD	kg CFC-11 eq	3.38E-06	3.96E-06

*Tab. 7. Pomodoro 2° ciclo. Influenza della gestione dell'irrigazione (valori medi del substrato **tal quale**) sulle varie categorie d'impatto. Le emissioni sono espresse per tonnellata di prodotto commerciabile. AD = Consumo di risorse non rinnovabili; Ac = Acidificazione delle acque; Eu = Eutrofizzazione delle acque; GW = Riscaldamento Globale; OD = Assottigliamento della fascia di ozono.*

In Figura 9, viene riportata, per ogni categoria di impatto, l'influenza dei sistemi **tal quale**, **composte zeolite** sull'incidenza o contributo dovuto ai diversi fattori d'impatto.

E' da notare che ancora una volta le emissioni dovute all'estrazione della zeolite incidono per ben poca cosa sull'impatto totale di questo sistema. Di conseguenza se si esclude la categoria "Riscaldamento globale (GW), i contributi dei diversi fattori d'impatto è parsa assai simile nei due sistemi **tal quale** e **zeolite**.

In tali sistemi il fattore d'impatto che ha evidenziato l'incidenza è ancora una volta la struttura (serra) la cui incidenza è stata di circa il 50%.

i fattori successivi per ordine d'importanza, sono apparsi la fertilizzazione e le operazioni colturali.

Per quanto riguarda la categoria "Riscaldamento Globale" (GW), gli effetti si differenziano notevolmente tra il sistema **tal quale** e il sistema **zeolite**. In **zeolite**, le emissioni preponderanti di CO₂ derivano dal ciclo di produzione, inteso prevalentemente come respirazione del terreno, che incide per il 70% su tale categoria d'impatto. In **tal quale**, invece, tale fattore incide di meno (48%) e riprende importanza la struttura (25%).

Per quanto riguarda il **compost**, ancora una volta si è potuto notare l'effetto nel sistema della carica ambientale evitata. Da un lato possiamo vedere come per certe categorie d'impatto ciò ha permesso una riduzione più o meno marcata degli impatti come in AD, GW e OD mentre in altre categorie si siano osservati degli aumenti (Ac ed Eu). Più in particolare l'impiego del compost come ammendante ha permesso di ridurre le emissioni o impatti per oltre il 5%, 15 e 20% nella categoria AD, GW e OD, rispettivamente. Per contro, nella categoria AC abbiamo un 86% da attribuire alla produzione di compost mentre nella categoria EU un 70%. Questi maggiori impatti sono da attribuire principalmente al processo di produzione del compost e più in particolare all'elevato dispendio energetico, alla produzione di composti volatili e ai colatici, che vanno ad interessare principalmente queste categorie di impatto. Sempre nel sistema **compost** la struttura rimane preponderante nelle categorie AD (5%) e OD (52%). In questo ciclo rimane elevato l'effetto del ciclo di coltivazione nella categoria GW (incidenza del 65% circa).

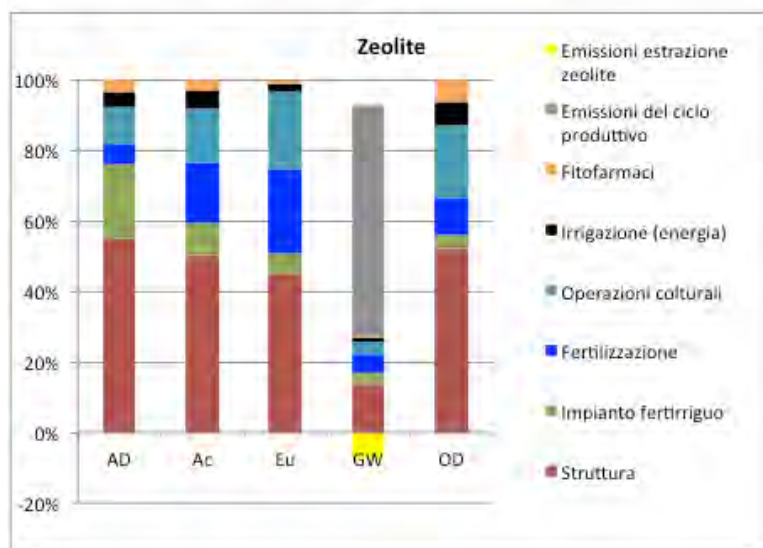
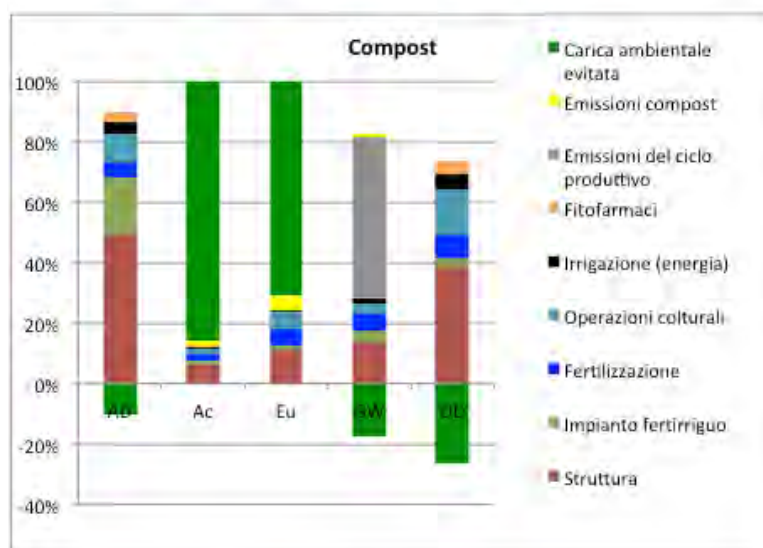
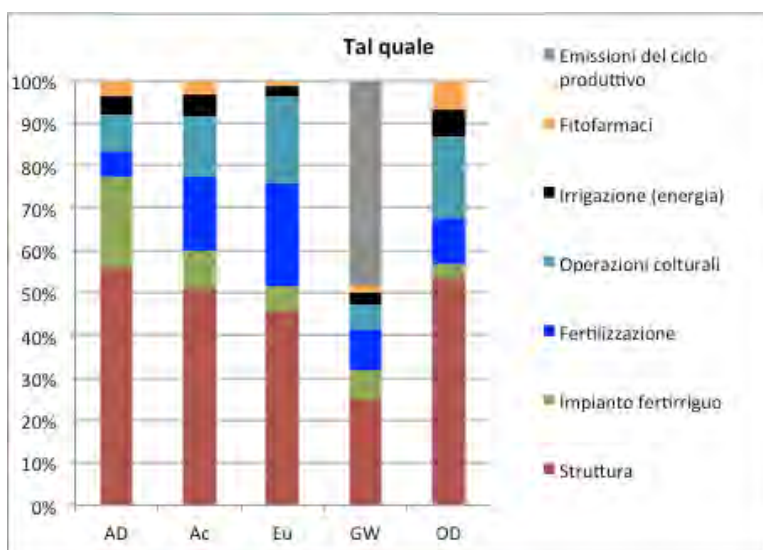


Figura 9 – Pomodoro 2° ciclo. Distribuzione percentuale dei processi per categoria d'impatto nei sistemi **tal quale**, **compost** e **zeolite**. AD = Consumo di risorse non rinnovabili; Ac = Acidificazione delle acque; Eu = Eutrofizzazione delle acque; GW = Riscaldamento Globale; OD = Assottigliamento della fascia di ozono.

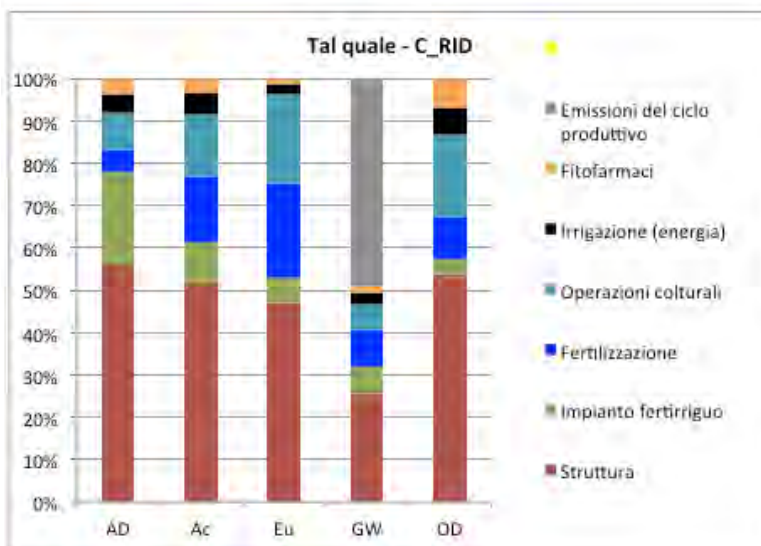
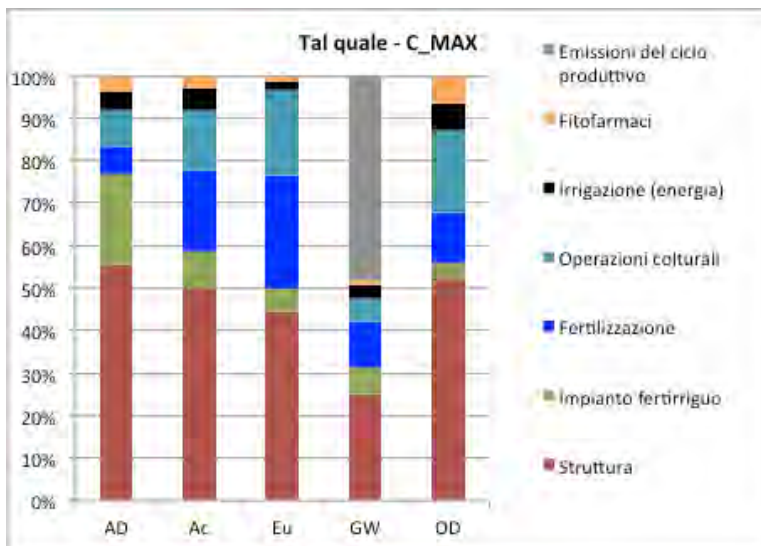


Figura 10 – Pomodoro 2° ciclo. Distribuzione percentuale dei processi per categoria d'impatto nei sistemi a differente gestione della fertilizzazione (valori medi del substrato **tal quale**). AD = Consumo di risorse non rinnovabili; Ac = Acidificazione delle acque; Eu = Eutrofizzazione delle acque; GW = Riscaldamento Globale; OD = Assottigliamento della fascia di ozono.

Dalla Figura 10, dove viene riportato l'effetto della gestione della fertilizzazione sul contributo dei diversi fattori d'impatto, si nota sostanzialmente che **Crid** permette solo una lieve riduzione del contributo della fertilizzazione a tutte le categorie di impatto.

Per quanto riguarda la gestione dell'irrigazione (Fig. 11), con **Irid**, oltre ad avere una lieve riduzione del contributo dell'energia per la irrigazione su tutte le categorie di impatto, si è osservato un minore contributo delle emissioni del ciclo produttivo (34%, rispetto a 59% di **Imax**) su GW. Ciò è sostanzialmente determinato dalle miori produzioni ottenute in questo ciclo con **Irid**.

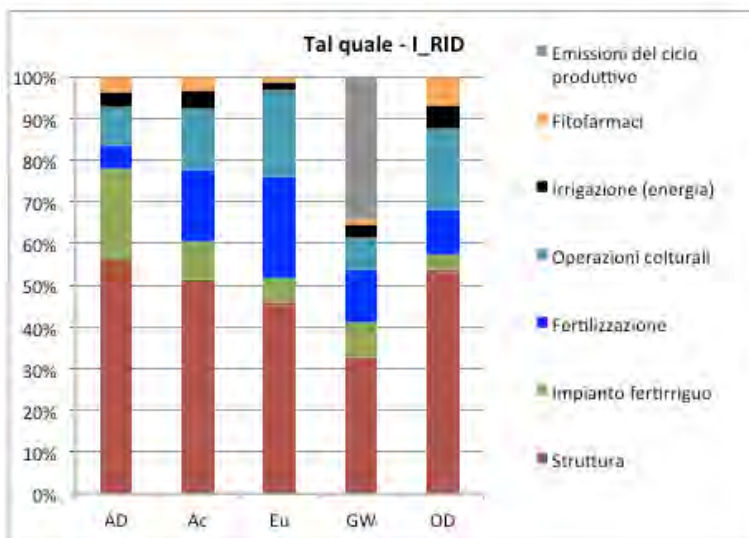
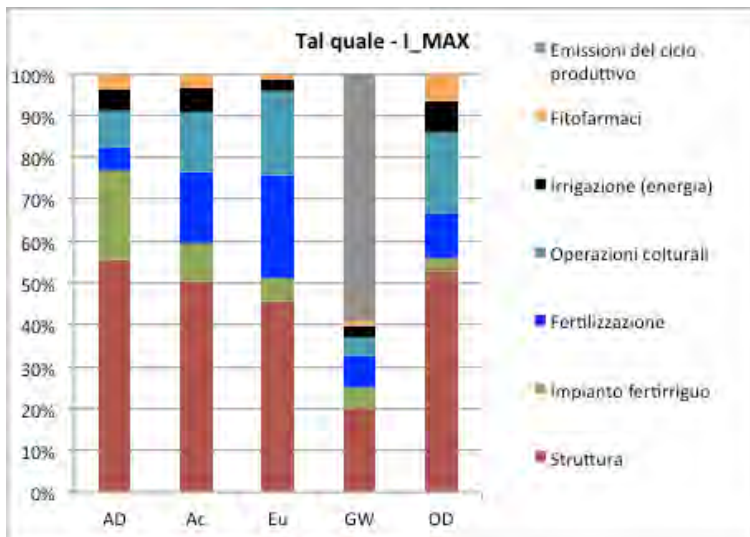


Figura 11 – Pomodoro 2° ciclo. Distribuzione percentuale dei processi per categoria d'impatto nei sistemi a differente gestione dell'irrigazione (valori medi del substrato **tal quale**). AD = Consumo di risorse non rinnovabili; Ac = Acidificazione delle acque; Eu = Eutrofizzazione delle acque; GW = Riscaldamento Globale; OD = Assottigliamento della fascia di ozono.

In tabella 8 vengono riportati più in dettaglio tutti gli effetti dei fattori a confronto sulle categorie di impatto. E' interessante osservare come su tutti i substrati la riduzione dei concimi (Crid) abbia permesso di ridurre, seppur di poco, le emissioni in tutte le categorie di impatto. La riduzione dei volumi irrigui (Irid), invece ha permesso di ridurre solo, ma in modo consistente le emissioni di CO₂ (GW) su **tal quale** e **zeolite**. La maggiore respirazione del terreno ha invece indotto sul **compost** un sensibile aumento di GW in corrispondenza **dilrid**.

A titolo d'esempio per quanto riguarda la categoria GW su **tal quale** passando dalla **tesilmaxCmax** (controllo) a **IridCmax**, **ImaxCrid** e **IridCrid** si sono registrate riduzioni dei

valori sull'ordine del 27%, 2% e 29%, rispettivamente; **sszeolite**, passando dalla **tesilmaxCmax** (controllo) a **IridCmax**, **ImaxCrid** e **IridCrid** si sono registrate riduzioni dei valori sull'ordine del 43%, 1% e 44%, rispettivamente. Su **compost**, invece, solo con la tesi **ImaxCrid** si è osservata una riduzione dei valori (-5%); passando dalla **tesilmaxCmax** (controllo) a **IridCmax** e **IridCrid** i valori di GW sono aumentati di oltre 4 volte e mezzo.

Tab. 8. Pomodoro 2° ciclo. Influenza dei substrati di coltivazione, della gestione dell'irrigazione e della gestione della concimazione sulle varie categorie d'impatto. Le emissioni sono espresse per tonnellata di prodotto commerciabile. AD = Consumo di risorse non rinnovabili; Ac = Acidificazione delle acque; Eu = Eutrofizzazione delle acque; GW = Riscaldamento Globale; OD = Assottigliamento della fascia di ozono.

Tesi	tal quale				compost				zeolite			
	Imax	Irid	Imax	Irid	Imax	Irid	Imax	Irid	Imax	Irid	Imax	Irid
	Cmax	Cmax	Crid	Crid	Cmax	Cmax	Crid	Crid	Cmax	Cmax	Crid	Crid
AD - kg Sb eq												
- medi	0.440	0.519	0.435	0.512	0.397	0.467	0.391	0.460	0.451	0.531	0.445	0.524
- min	0.396	0.464	0.390	0.457	0.356	0.417	0.351	0.411	0.405	0.474	0.399	0.468
- max	0.497	0.589	0.490	0.581	0.447	0.530	0.441	0.522	0.508	0.603	0.501	0.595
Ac - kg SO₂eq												
- medi	0.272	0.320	0.262	0.307	2.120	2.541	2.109	2.528	0.271	0.331	0.260	0.318
- min	0.245	0.286	0.235	0.275	1.904	2.270	1.895	2.258	0.244	0.296	0.234	0.284
- max	0.307	0.364	0.295	0.349	2.390	2.886	2.378	2.872	0.306	0.376	0.294	0.362
Eu - kg PO₄³⁻eq												
- medi	0.039	0.047	0.037	0.044	0.159	0.192	0.157	0.190	0.039	0.049	0.037	0.046
- min	0.035	0.042	0.033	0.039	0.143	0.172	0.141	0.170	0.035	0.044	0.033	0.041
- max	0.044	0.053	0.042	0.050	0.180	0.219	0.177	0.216	0.044	0.056	0.042	0.053
GW - kg CO₂eq												
- medi	122.0	88.7	119.8	86.2	44.1	204.6	41.9	202.0	232.8	132.2	230.6	129.6
- min	109.6	79.3	107.7	76.9	39.6	182.8	37.7	180.4	209.1	118.1	207.2	115.8
- max	137.5	100.8	135.1	97.9	49.7	232.4	47.2	229.5	262.4	150.2	260.0	147.2
OD - kg CFC-11 eq												
- medi	3.42 E-06	4.01 E-06	3.34 E-06	3.90 E-06	2.17 E-06	2.73 E-06	2.09 E-06	2.63 E-06	3.42 E-06	4.22 E-06	3.33 E-06	4.12 E-06
- min	3.07 E-06	3.58 E-06	3.00 E-06	3.49 E-06	1.95 E-06	2.44 E-06	1.88 E-06	2.35 E-06	3.07 E-06	3.77 E-06	3.00 E-06	3.68 E-06
- max	3.86 E-06	4.55 E-06	3.76 E-06	4.43 E-06	2.45 E-06	3.10 E-06	2.35 E-06	2.99 E-06	3.85 E-06	4.79 E-06	3.76 E-06	4.68 E-06

5. CONSUMI IDRICI E DINAMICA DELL'ACQUA NEL TERRENO

Considerando i consumi di acqua per l'irrigazione dei quattro cicli colturali, si può costatare che con le tesi **Imax** nel complesso si sono utilizzati 6828 m³/ha mentre nelle tesi **Irid** se ne sono utilizzati 4008, con un risparmio quindi di 2820 m³/ha (1410 m³/ha/anno). Se si esclude il secondo ciclo di pomodoro, durante il quale la riduzione dell'irrigazione ha comportato una riduzione significativa della produzione, le tecniche adottate sono da considerarsi auspicabili al fine di risparmiare una elevata quantità di acqua prelevata dai pozzi e quindi scongiurare o almeno ridurre l'abbassamento della falda acquifera e conseguentemente il cuneo di intrusione salina. Sicuramente altri studi sono da compiere per ottimizzare gli interventi irrigui in termini di tempi e volumi di irrigazione per meglio conseguire, oltre al risparmio idrico, anche elevate produzioni commerciabili. Calcolando che nell'area del progetto vi sono circa 250 ha di serre, il risparmio globale se l'esempio progettuale fosse recepito si aggirerebbe su 705 milioni di litri d'acqua per anno.

Considerando i profili idrici nei tre tipi di terreno, si può affermare che con l'utilizzo del compost potrebbero essere possibili ulteriori risparmi idrici. Questo substrato di coltivazione ha permesso infatti, nella generalità dei casi (Fig. 12, 13 e 14), il mantenimento di livelli di umidità più elevati sia nei pressi del piede della pianta (distanza dalla fila 10 cm) che a maggiore distanza (distanza dalla fila 20 cm). Nelle figure 15, 16 e 17 vengono riportati i profili di umidità del terreno in relazione alla diversa gestione dell'irrigazione nei cicli colturali. E' possibile osservare la elevata umidità del terreno irrigato con **Imax** nello strato più profondo misurato. Questo può rappresentare un rischio, in quanto, se non trattenuta o assorbita dalle radici, tale quota d'acqua è più soggetta a perdite per percolazione profonda portando con se anche eventuali sali disciolti (es. nitrati).

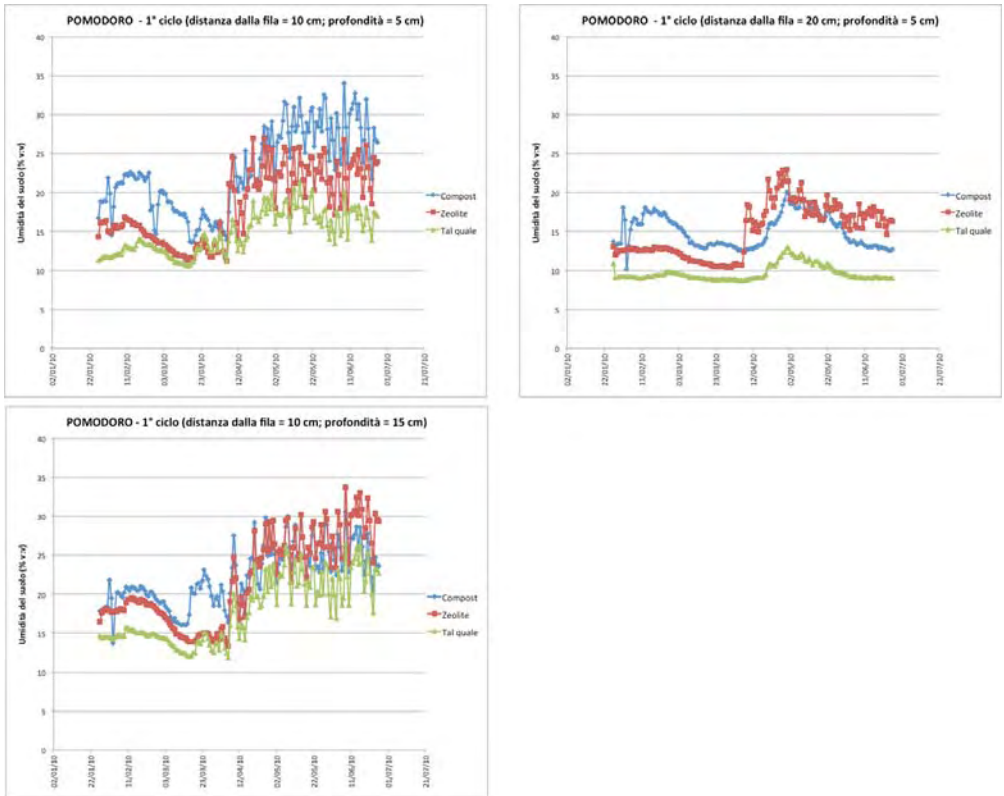


Figura 12 – Pomodoro 1° ciclo. Influenza del substrato di coltivazione sui profili di umidità del terreno, misurata con sonde FDR.

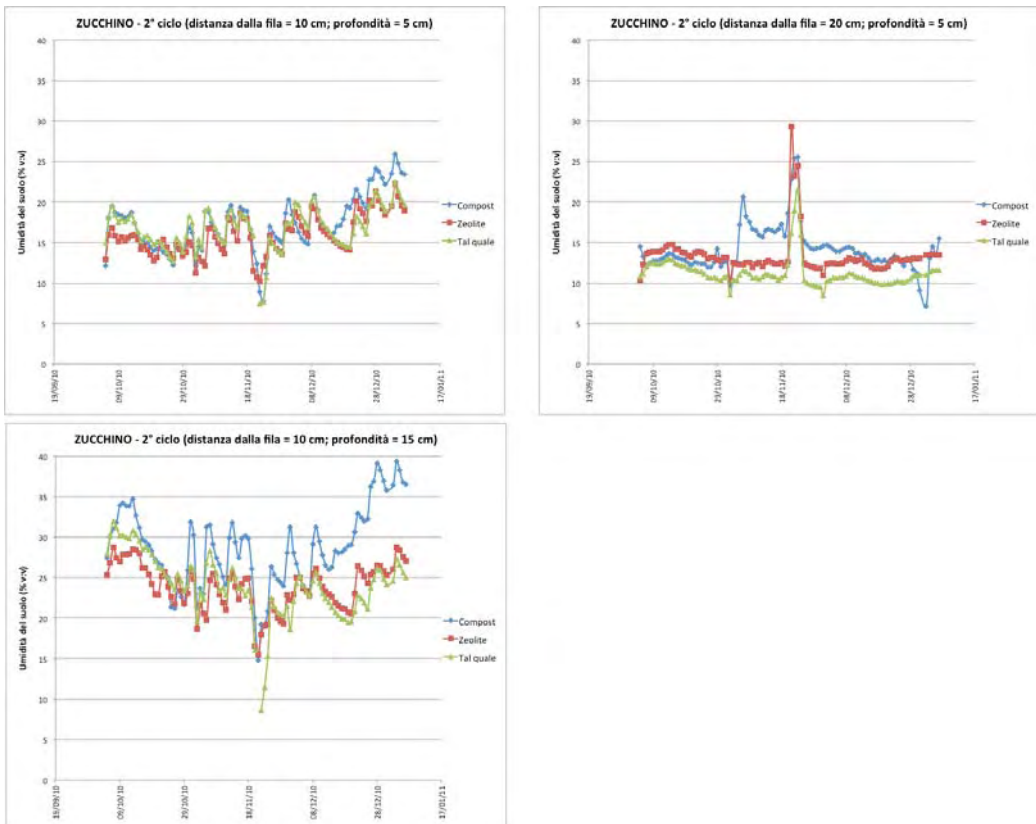


Figura 13 – Zucchini 2° ciclo. Influenza del substrato di coltivazione sui profili di umidità del terreno, misurata con sonde FDR.

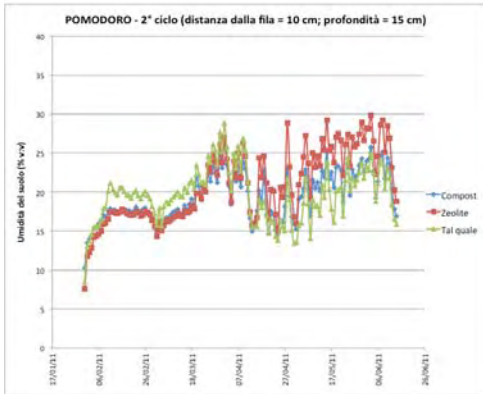
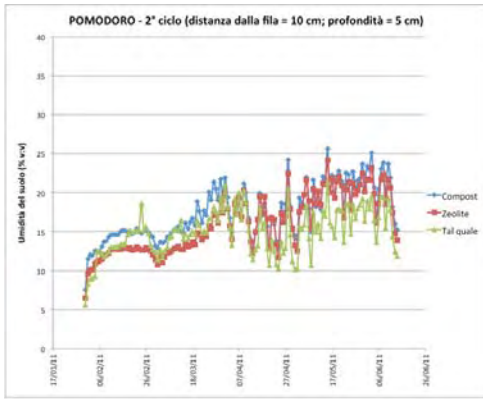


Figura 14 – Pomodoro 2° ciclo. Influenza del substrato di coltivazione sui profili di umidità del terreno, misurata con sonde FDR.

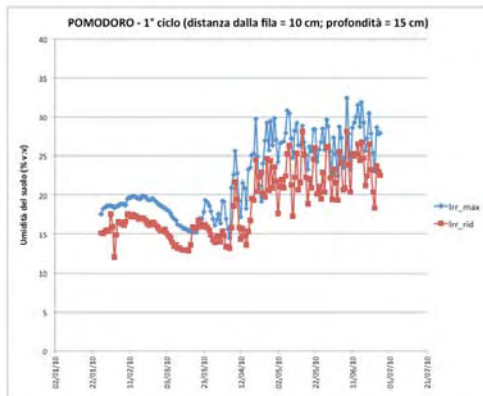
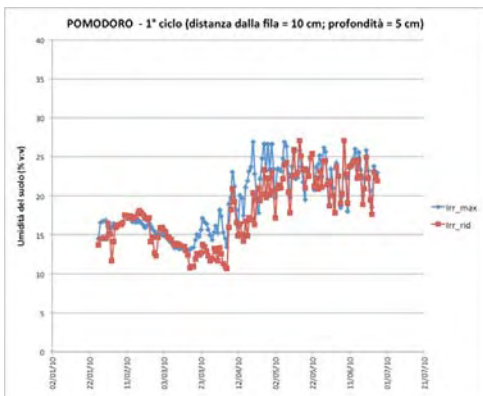


Figura 15 – Pomodoro 1° ciclo. Influenza della gestione dell'irrigazione sui profili di umidità del terreno, misurata con sonde FDR.



Figura 16 – Zucchini 2° ciclo. Influenza della gestione dell'irrigazione sui profili di umidità del terreno, misurata con sonde FDR.

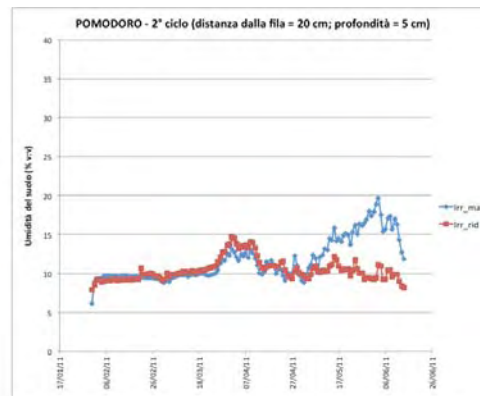
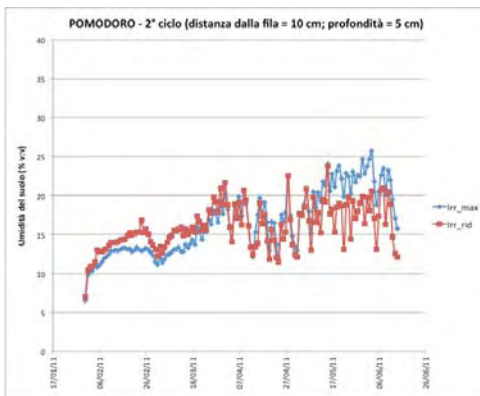


Figura 17 – Pomodoro 2° ciclo. Influenza della gestione dell'irrigazione sui profili di umidità del terreno, misurata con sonde FDR.

Per quanto riguarda l'idroserra (vedi relazione finale su idroserra) e considerando l'opzione testata nell'ultimo ciclo colturale che prevede la sostituzione dell'idroserra tradizionale con serre dotate di schermi termici, è stato dimostrato che è possibile conseguire risparmi di acqua pari a circa 41 m³/ha per ogni ora di normale utilizzo dell'idroserra. Considerando che mediamente per ogni notte in cui è previsto gelo, l'idroserra funziona per circa 9 ore e che gli impianti possono essere azionati anche 20-30 volte durante l'inverno - fine primavera, il risparmio d'acqua complessivo può raggiungere 7400-11100 m³/ha per anno. Calcolando i 250 ha di serrenell'area del progetto, il risparmio globale se l'esempio progettuale fosse recepito si aggirerebbe tra 1850 e 2775 milioni di litri d'acqua per anno che si andrebbero ad aggiungere ai 705 milioni di litri risparmiati per la più razionale gestione dell'irrigazione. Questo, non solo senza danni da gelo per le colture, ma addirittura con incrementi produttivi e minor utilizzo di fitofarmici permessi dal miglioramento del microclima in seguito all'adozione degli schermi termici nella serra. Nella relazione finale dell'idroserra viene anche dimostrata la convenienza economica dell'utilizzo di tali sistemi di difesa.

6. CONSUMI DI AZOTO E PROFILO DEI NITRATI NEL TERRENO

Considerando i consumi di AZOTO dei quattro cicli colturali, si può constatare che con le tesi **Cmax** nel complesso si sono utilizzati 363kg/ha di N mentre nelle tesi **Crid** se ne sono utilizzati 259, con un risparmio quindi di 104kg/ha (52kg/ha/anno). Si è osservato che le tecniche adottate sono da considerarsi auspicabili al fine di ridurre gli sprechi di nutrienti poiché con la riduzione dei quantitativi di fertilizzante si sono comunque ottenute produzioni soddisfacenti.

Dai profili relativi all'azoto nitrico nel terreno a conclusione dei cicli di coltivazione, riportati in figura 18 è possibile fare alcune considerazioni:

- 1) la **zeolite** ha evidenziato i minori contenuti di N-NO₃ nei primi 40 cm di profondità, mentre tra **compost** e **tal quale** non si sono osservate differenze sul contenuto totale in tale strato di terreno. Tuttavia si può osservare che con il **tal quale** l'N-NO₃ tende a spostarsi più in profondità con maggiori rischi di lisciviazione e contaminazione delle falde.
- 2) **I_{max}** tende a spostare più in profondità N-NO₃ con maggiori rischi di lisciviazione e contaminazione delle falde.
- 3) più elevate concentrazioni di N-NO₃ si possono osservare nel terreno in corrispondenza delle tesi **Cmax**.

Anche per questa tematica ambientale, quindi, appare più favorevole ammendare il terreno con compost e rivolgersi verso sistemi di riduzione/ottimizzazione di acqua e nutrienti attraverso più razionali sistemi di irrigazione e concimazione.

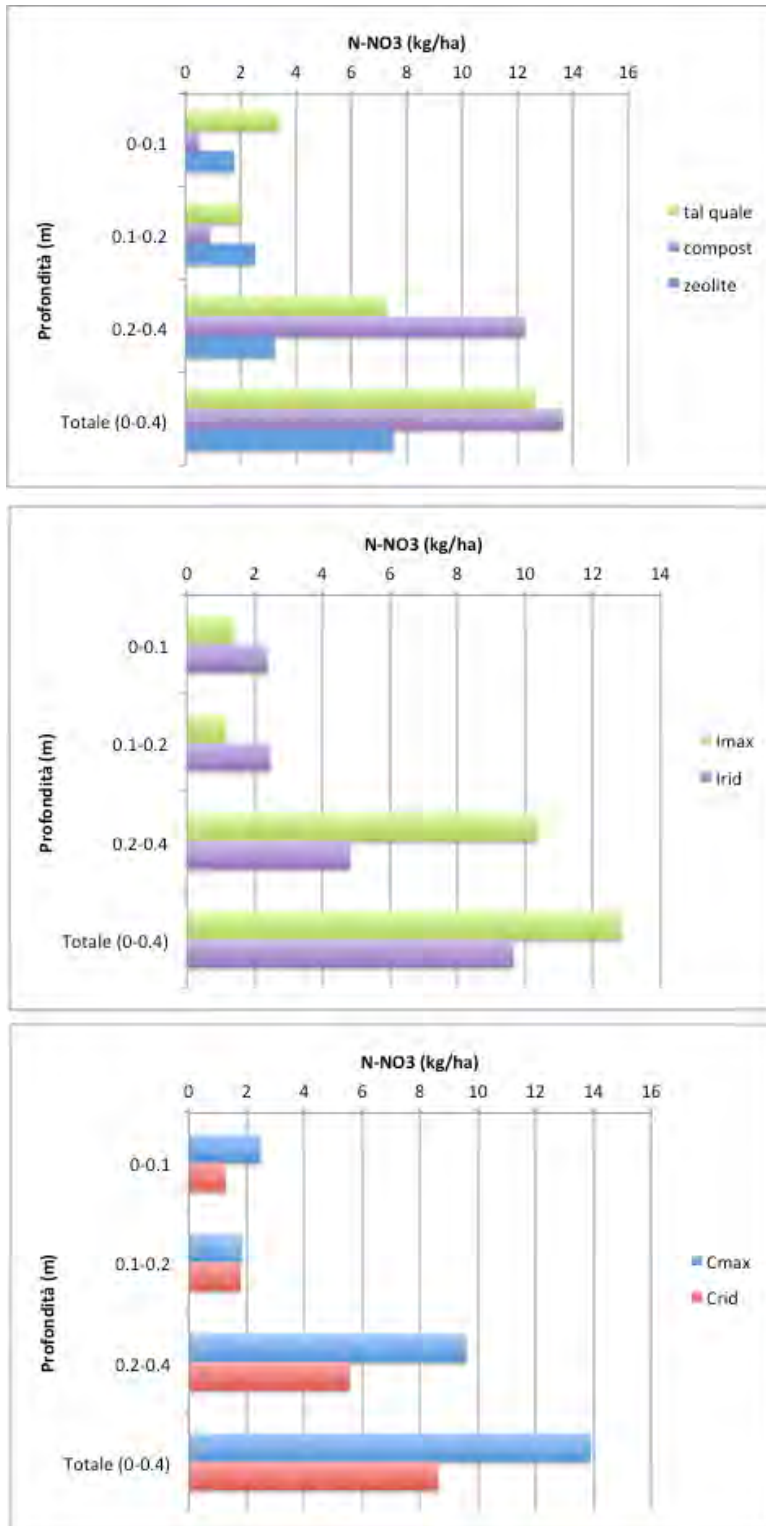


Figura 18 – Influenza di substrato di coltivazione, gestione dell'irrigazione e gestione della fertilizzazione azotata sui profili dell'azoto nitrico nel terreno, alla fine dei due anni di prova in serra.

7. DISCUSSIONE

Considerando la media dei 4 cicli colturali (Tab. 9), è possibile osservare che per quanto riguarda i differenti substrati di coltivazione, l'analisi ambientale di LCA non ha permesso di evidenziare grosse differenze tra il **tal quale** e la **zeolite**. Un discorso a parte merita il **compost**. Infatti, se prendiamo in considerazione tutti i carichi ambientali imputati al compost, come precedentemente descritto nell'elaborazione, il risultato dipende dalle categorie di impatto considerate. L'uso di compost infatti determina un netto miglioramento della categoria "Riscaldamento Globale" e un sostanziale miglioramento anche di "Consumo di risorse non rinnovabili", "Assottigliamento della fascia di ozono" e "Formazione di smog fotochimico", ma un forte peggioramento di "Acidificazione delle acque" ed "Eutrofizzazione delle acque". Il peggioramento di queste due categorie di impatto è dovuto principalmente al tipo di processo utilizzato dall'impianto di compostaggio, molto semplice caratterizzato da un eccessivo uso di energie e produzione di sostanze volatili, senza il loro recupero e riciclo, e senza trattamento dei colaticci, i quali sono i principali responsabili dell'aumento dell'impatto ambientale nelle due categorie di impatto incriminate. La produzione di compost con sistemi di ultima generazione (a maggior efficienza e con recupero e filtrazione dei gas emessi) potrebbe permettere l'abbassamento della carica ambientale apportata dal prodotto finito, rendendo il compost ancora più interessante, in questo caso, non solo dal punto di vista economico/agronomico, e per la riduzione delle emissioni di CO₂ ma dal punto di vista ambientale nel suo complesso, tanto da farlo rientrare in una politica provinciale/regionale/nazionale di gestione dei rifiuti.

Considerando anche gli altri fattori allo studio e osservando i valori indicizzati e medi degli ultimi 2 cicli colturali (Tab. 10), viene confermata la validità del **compost** indipendentemente dalla gestione dell'irrigazione e concimazione nel ridurre considerevolmente le emissioni di CO₂ rispetto al controllo (valori migliori sono stati ottenuti tuttavia con le tesi **Imax**). Tali emissioni possono essere anche sensibilmente ridotte sul substrato **tal quale** adottando una gestione dell'irrigazione più oculata (**Irid**). Su **zeolite** invece non appaiono strategie in grado di ridurre sostanzialmente gli impatti rispetto al controllo.

Tab. 9. Influenza dei substrati di coltivazione sulle varie categorie d'impatto. Le emissioni sono espresse da indici (**tal quale** = 100) e rappresentano la media dei 4 cicli colturali. AD = Consumo di risorse non rinnovabili; Ac = Acidificazione delle acque; Eu = Eutrofizzazione delle acque; GW = Riscaldamento Globale; OD = Assottigliamento della fascia di ozono; PO = Formazione di smog fotochimico.

Impact category	Unit	Tal quale	Compost	Zeolite
AD	kg Sb eq	100	84	106
Ac	kg SO ₂ eq	100	824	106
Eu	kg PO ₄ ³⁻ eq	100	432	107
GW	kg CO ₂ eq	100	48	120
OD	kg CFC-11 eq	100	68	107
PO	kg C ₂ H ₄	100	-14	103

Tab. 10. Pomodoro 2° ciclo. Influenza dei substrati di coltivazione, della gestione dell'irrigazione e della gestione della concimazione sulle varie categorie d'impatto. Le emissioni sono espresse da indici (**tal quale–ImaxCmax**, controllo = 100) e rappresentano la media degli ultimi 2 cicli colturali. AD = Consumo di risorse non rinnovabili; Ac = Acidificazione delle acque; Eu = Eutrofizzazione delle acque; GW = Riscaldamento Globale; OD = Assottigliamento della fascia di ozono.

Tesi	tal quale				compost				zeolite			
	Imax	Irid	Imax	Irid	Imax	Irid	Imax	Irid	Imax	Irid	Imax	Irid
	Cmax	Cmax	Crid	Crid	Cmax	Cmax	Crid	Crid	Cmax	Cmax	Crid	Crid
AD - kg Sb eq	100	99	99	97	79	87	78	85	104	103	102	102
Ac - kg SO ₂ eq	100	98	96	95	735	813	732	809	102	105	97	100
Eu - kg PO ₄ ³⁻ eq	100	99	95	94	375	417	370	411	101	107	94	100
GW - kg CO ₂ eq	100	77	96	74	18	84	15	80	154	102	148	97
OD - kg CFC-11 eq	100	98	98	96	71	79	69	76	102	106	98	103

Altra osservazione da fare riguarda la struttura (serra) che ha sempre occupato uno spazio predominante a livello di impatto. I contributi riscontrati sono riconducibili a quanto riscontrato in bibliografia (Antón, 2004; Antón *et al*, 2005). Tuttavia gli impatti elevati sono attribuibili al fatto che la serra è quasi totalmente priva di automazioni, con bassi consumi

energetici e di piccola dimensione (superficie coperta), il che porta a una sovrastima dei materiali impiegati se rapportati all'ettaro. Un miglioramento della tecnologia adoperata in serra e l'adozione di serre di forma e dimensione più adatte all'ambiente di coltivazione potrebbero contribuire notevolmente alla riduzione degli impatti.

In conclusione, l'analisi LCA mediante utilizzo di indicatori mid-point CML 2001 ha permesso di condurre un'analisi approfondita di tutti i processi che intervengono all'interno del ciclo produttivo, nonostante ciò non dobbiamo dimenticare che questo strumento è nato nel settore chimico, quindi vengono discriminati molto bene tossicità ed impatti di prodotti, molecole e processi industriali, mentre, in campo agronomico, è ancora necessario un approfondimento delle dinamiche e dei meccanismi di relazione tra i diversi comparti ambientali dato che il sistema agricolo (relazioni microfauna-suolo, suolo-pianta, ecc.) è tra i più complessi in assoluto.

Tuttavia i dati riportati richiedono successive conferme, ma a livello di processi coinvolti, possiamo affermare che sono il frutto di una buona sintesi, ancor più perché l'analisi LCA è stata condotta principalmente su parametri misurati e non estrapolati da database generici, cosa che in questo momento manca un po' in questo genere di studi.

Per quanto riguarda i consumi idrici, è stata dimostrata la possibilità di ridurre drasticamente gli sprechi d'acqua utilizzando al posto della tradizionale idroserra, schermi termici che permettono, oltre alla difesa delle colture dalle gelate, anche un miglioramento generale del microclima e di conseguenza migliori produzioni con minor impiego di fitofarmaci. La sostituzione dell'idroserra con queste tecnologie permetterebbe, infatti, se adotta su larga scala nell'area del progetto (250 ha di serre), risparmi d'acqua fino a oltre 2500 milioni di litri per anno, ai quali potrebbero aggiungersi altri 700 milioni di litri circa determinati dall'adozione di sistemi di ottimizzazione dell'irrigazione. La razionalizzazione dell'irrigazione permetterebbe inoltre di ridurre i rischi di lisciviazione dell'azoto nitrico nel terreno, rischi che verrebbero sostanzialmente ridotti anche con la razionalizzazione/ottimizzazione della concimazione e con l'impiego di compost come ammendante del terreno.