



Associazione
Italiana
Società
Scientifiche
Agrarie

ISBN: 9788894592566

I QUADERNI DI



AISSA



ASSOCIAZIONE ITALIANA SOCIETÀ SCIENTIFICHE AGRARIE

Atti del XXII Convegno AISSA

Le Scienze Agrarie nell'approccio "One Health" tra
ricerca, innovazione e trasferimento tecnologico

Matera, 13-14 febbraio 2025

Volume 8, 2026

Su iniziativa del Consiglio di Presidenza dell'Associazione si è dato vita al progetto editoriale "I Quaderni di AISSA". L'obiettivo è quello di raccogliere e valorizzare i contributi presentati ai convegni di AISSA, al fine di testimoniare il contributo all'avanzamento della scienza in ambito agrario, forestale e alimentare.

Questo volume è scaricabile dal sito: <https://www.aissa.it/home.php>

ISBN: 9788894592566

Copyright: Associazione Italiana delle Società Scientifiche Agrarie – AISSA, 2026

I QUADERNI DI AISSA

ASSOCIAZIONE ITALIANA SOCIETÀ SCIENTIFICHE AGRARIE

Atti del XXII Convegno AISSA

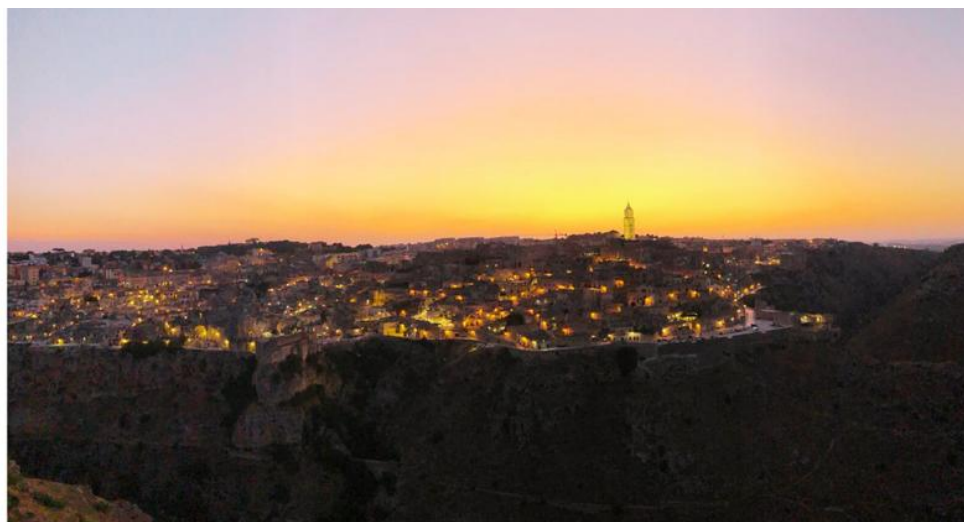
Le Scienze Agrarie nell'approccio "One Health" tra ricerca, innovazione
e trasferimento tecnologico

Matera, 13-14 febbraio 2025

Volume 8, 2026

a cura di:

Michele PERNIOLA



Associazione Italiana Società
Scientifiche Agrarie



Conferenza Nazionale
per la Didattica Universitaria di
AGRARIA



Le Scienze Agrarie nell’approccio “One Health” tra ricerca, innovazione e trasferimento tecnologico

Le moderne sfide globali poste dal clima, dalla domanda di salute e da un mondo sempre più interconnesso possono essere affrontate solo acquisendo consapevolezza che facciamo parte di un unico sistema, in cui la salute di ogni elemento del pianeta è strettamente interdipendente con quella degli altri.

Per questo motivo, l’approccio “One Health”, ovvero la constatazione che esiste una sola salute che interconnette l’uomo con le piante, con gli animali e l’ambiente (visione olistica del concetto di salute), è ormai centrale. In questo approccio, l’attività agricola gioca un ruolo chiave in quanto è l’unico settore che si occupa della gestione delle risorse naturali, delle piante, degli animali, dell’ambiente e della catena alimentare che, nel ciclo della materia e dell’energia, connette tutti questi elementi.

La corretta gestione dell’attività agricola e forestale può quindi avere un forte impatto nel ristabilire i corretti equilibri ecologici, rendendo sostenibile, resiliente e durevole l’ecosistema e migliorando la salute del pianeta.

Questo quaderno raccoglie le conoscenze già acquisite nell’ambito delle Scienze Agrarie nell’approccio “One Health” per la salute del pianeta e presentate nel corso del XXII convegno AISSA tenutosi a Matera il 13-14 febbraio 2025.

Indice

<i>Le Scienze Agrarie nell'approccio "One Health" tra ricerca, innovazione e trasferimento tecnologico.....</i>	<i>IV</i>
<i>L'approccio "One Health" per una gestione sostenibile degli agroecosistemi.....</i>	<i>2</i>
Antichi D., Marraccini E., Renna M., Toselli M., Ventura F.....	2
<i>Coniugare conoscenza e innovazione per il ripristino degli equilibri trofici e della salute del sistema suolo-pianta.....</i>	<i>12</i>
Celi L., Bonifacio E., Zaccone C.....	12
<i>Il contributo di entomologia e malerbologia per la sostenibilità delle produzioni.....</i>	<i>18</i>
Vidotto F., Giunti G., Zappalà L.....	18
<i>Verso un Futuro Sostenibile: la Transizione del Sistema Alimentare.....</i>	<i>29</i>
Galgano F., Zotta T.....	29
<i>Contributo integrato del miglioramento genetico e delle tecnologie agro-alimentari per cereali più salutari e sostenibili: il caso dell'acrilammide.....</i>	<i>35</i>
Masci S., Messia M.C.....	35
<i>One Health Approach per lo Sviluppo Rurale Sostenibile: Le Sfide di Ricerca dell'Economia Agraria Italiana.....</i>	<i>41</i>
Fabio Boncinelli, Mario Cozzi.....	41
<i>Nuove tecnologie ed avanzamenti scientifici nella gestione integrata di territorio, ambiente e paesaggio rurale: sfide e opportunità nell'era "One Health".....</i>	<i>50</i>
Picuno P., Becciolini V., Conti L., D'Urso P.R., Cinardi G., Finzi A., Fumagalli N., Mattia A., Mautone A., Parlato M., Pezzuolo A., Rossi G., Senes G., Arcidiacono C.....	50

L'approccio "One Health" per una gestione sostenibile degli agroecosistemi

Antichi D.¹, Marraccini E.², Renna M.³, Toselli M.⁴, Ventura F.⁴

¹Dipartimento di Scienze Agrarie, Alimentari ed Agro-ambientali, via del Borghetto 80, Università di Pisa, Pisa

²Dipartimento di Scienze Agro-Alimentari, Ambientali e Animali, Università di Udine, via delle Scienze 206, Udine

³Dipartimento di Scienze del Suolo, della Pianta e degli Alimenti, Università di Bari Aldo Moro, Via Amendola, 165/A, Bari

⁴Dipartimento di Scienze e Tecnologie Agro-Alimentari, viale Fanin 44, Università di Bologna, Bologna

Riassunto: L'approccio One Health si prefigge di assicurare il benessere delle persone, degli animali e dell'ambiente attraverso la ricerca di collaborazioni locali, nazionali e globali volte a prevenire insidie derivanti dalle tristemente note zoonosi (passaggio di malattie dall'animale selvatico all'uomo), dalla sempre maggiore inefficacia degli antibiotici per la comparsa di ceppi batterici resistenti, dai rischi per la sicurezza alimentare. Tali insidie sono il frutto di uno sfruttamento antropocentrico delle risorse naturali che ha portato ad un rapido incremento dell'emissione di gas serra con conseguente riscaldamento globale, al degrado dei suoli (erosione, depauperamento della sostanza organica, salinità), alla perdita di biodiversità, all'aumento di input chimici (fitofarmaci, fertilizzanti, ecc.), con conseguente aumento dei costi di produzione, riduzione di salubrità dei prodotti alimentari e conseguente minore profitto. L'approccio One Health si persegue con la gestione sostenibile degli agroecosistemi, che include la massima fissazione di CO₂ da parte delle colture attraverso la copertura continua del suolo, la sostituzione, ove possibile dei fertilizzanti minerali con quelli organici ottenuti da riciclaggio di scarti domestici e agro-alimentari prodotti localmente, il mantenimento della biodiversità finalizzato alla gestione preventiva dei patogeni, dei fitofagi e delle infestanti attraverso il ricorso alla diversificazione colturale (sovescio, intercropping, multiple cropping), al recupero del germoplasma locale tollerante a patogeni e parassiti.

Abstract: The One Health approach aims to ensure the well-being of people, animals, and the environment by developing local, national, and global collaborations to prevent threats posed by zoonoses (the transmission of diseases from wild animals to humans), the increasing ineffectiveness of antibiotics due to the emergence of resistant bacterial strains, and food safety risks. These threats are the result of anthropocentric exploitation of natural resources, which has led to a rapid increase in greenhouse gas emissions, resulting in global warming, soil degradation (erosion, depletion of organic matter, salinity), loss of biodiversity, and increased use of chemical inputs (pesticides, fertilizers, etc.), resulting in higher production costs, reduced food safety, and consequently lower profits. The One Health approach is pursued through the sustainable management of agroecosystems, which includes maximizing CO₂ fixation by crops through continuous soil coverage, replacing mineral fertilizers, where possible, with organic fertilizers obtained from recycled domestic and agri-food waste produced locally, maintaining biodiversity aimed at the preventative management of pathogens, pests, and weeds through crop diversification (green manure, intercropping, multiple cropping), and recovering local germplasm tolerant to pathogens and parasites.

Keywords: *climate change, greenhouse gases, biodiversity, cover crops, intercropping, multiple cropping, organic matter, carbon sequestration*

Introduzione

La definizione di 'One Health', che nasce dalla consapevolezza che il benessere dell'uomo è direttamente collegato a quello degli animali, delle piante e più in generale dell'ambiente (inteso come flora, fauna, suolo e clima), è stata coniata una ventina di anni fa per evidenziare un approccio multidisciplinare alla salvaguardia della salute che in definitiva è una sola. Diversi istituti di ricerca hanno fornito una loro definizione all'approccio 'One Health'; ad esempio, secondo lo US Centers for Disease Control and Prevention and the One Health Commission: 'One Health is a collaborative, multisectoral, and transdisciplinary approach—working at the local, regional, national, and global levels—with the goal of achieving optimal health outcomes recognizing the interconnection between

people, animals, plants, and their shared environment'. Secondo il One Health Global Network: 'One Health recognizes that the health of humans, animals and ecosystems are interconnected. It involves applying a coordinated, collaborative, multidisciplinary and cross-sectoral approach to address potential or existing risks that originate at the animal-human-ecosystems interface. Infine, secondo il One Health Institute of the University of California at Davis: 'One Health is an approach to ensure the well-being of people, animals and the environment through collaborative problem solving—locally, nationally, and globally' (Mackenzie e Jeggo, 2019). Appare quindi evidente che con l'approccio One Health si cerca di mantenere un buon livello di salute attraverso un processo collaborativo che coinvolga diverse discipline a livello locale, nazionale e mondiale che interessano l'ambiente, l'ecosistema, le scienze sociali, l'ecologia, la flora e la fauna selvatica, il territorio, la biodiversità, i big data, l'informatica ecc.

Le insidie per la salute dell'uomo sono diventate evidenti negli ultimi anni e riguardano principalmente: 1) il costante rischio di zoonosi (passaggio di malattie dal regno animale a quello umano), particolarmente temuto in quelle aree meno evolute, dove la possibilità di cura non è diffusa a tutti ceti sociali; 2) la diminuzione dell'efficacia degli antibiotici per il continuo aumento della resistenza batterica; 3) i problemi legati alla sicurezza alimentare intesa come disponibilità di derrate alimentari per l'umanità e l'assenza di contaminazioni alimentari di qualsiasi natura (pesticidi, allergeni, micotossine, ecc.).

Tra le cause dell'aumento di questi rischi vi è la gestione antropocentrica degli agroecosistemi basata sullo sfruttamento delle risorse invece che sulla loro rigenerazione. In tal modo, l'uomo si comporta da acceleratore dei cambiamenti climatici che inevitabilmente si traducono in rischi per la salute umana e per l'ambiente.

One health e cambiamenti climatici

Com'è noto l'aumento della concentrazione atmosferica di CO₂ è il principale responsabile dell'effetto serra e dell'aumento delle temperature. All'inizio degli anni '90 la concentrazione di CO₂ nell'aria era di 333 ppm, attualmente essa ha superato le 420 ppm e, secondo alcune proiezioni, con questo ritmo, alla fine del secolo potrebbe essere dell'ordine di 700 ppm (Medda et al., 2022), con effetti sul clima difficilmente pronosticabili. Secondo la Berkeley Earth (<http://berkeleyearth.org/>) il riscaldamento dell'atmosfera, rispetto al ventennio 1880-1899, è aumentato in maniera maggiore nel bacino del Mediterraneo (+1.4 °C) rispetto a quello del pianeta (+1 °C). Questo ha portato ad un aumento medio delle temperature del mare tra 0,4 e 0,6 °C, con inevitabili effetti sulle precipitazioni atmosferiche. La siccità nel bacino del Mediterraneo, infatti si alterna a periodi di eccessi di pioggia ed inondazioni. Ad esempio, nel 2024, periodi prolungati con temperature superiori alla media e scarse precipitazioni hanno causato gravi condizioni di siccità in numerose aree dell'Italia meridionale, della Spagna meridionale, di Malta, del Marocco, dell'Algeria e della Tunisia. I cambiamenti climatici agiscono in maniera negativa sulla salute degli agro-ecosistemi manifestandosi con: aumento della frequenza e intensità di anomalie di segno opposto, irregolarità nella distribuzione delle precipitazioni, maggiori rischi di avversità abiotiche, squilibri nei processi vegetativi e riproduttivi, irregolarità nello sviluppo fenologico, mutamenti negli equilibri pianta-patogeno e malerbe, desincronizzazione del ciclo di vita pianta-insetti, con ripercussioni spesso negative sull'impollinazione, aumento della pressione di specie aliene invasive sulle aree coltivate, aumento dell'intrusione salina nelle aree coltivate delle foci dei fiumi e delle coste.

L'irrazionale gestione antropocentrica delle risorse ambientali, inoltre, comporta continue minacce per gli agroecosistemi che si evidenziano con il degrado dei suoli (erosione, depauperamento SOM, salinità), la perdita di biodiversità, l'aumento di input chimici (fitofarmaci, fertilizzanti, ecc.), spesso accompagnate da perdite di resa e inevitabilmente da minore profitto e perdita di sostenibilità economica.

La gestione sostenibile degli agroecosistemi per un approccio "One Health"

Che la salute dell'uomo dipendesse dall'ambiente in cui esso vive così come la salute dell'ambiente fosse condizionata dalle scelte umane era già noto in passato. In particolare, i pionieri dell'agricoltura biologica avevano piena consapevolezza dell'importanza della salute del suolo in agricoltura, principio enunciato nel trattato 'The Health principle' da Lady Evelyn Barbara Balfour (1946) che evidenzia un *continuum* tra la salute del suolo, delle piante, degli animali e dell'uomo e tuttora presente nei principi dell'agricoltura biologica riconosciuti, a livello globale, dalla International Federation of Organic Agriculture Movements (IFOAM) e, a livello europeo dal Regolamento Comunitario 2018/1848. Da queste riflessioni sono nati i primi tentativi di preservare la salute comune attraverso un approccio sostenibile alle produzioni agro-alimentari, che oggi, in maniera trasversale rispetto ai metodi produttivi, confluisce nell'approccio "One Crop Health". Secondo quest'ultimo, la salute delle colture dipende dall'interazione tra molteplici aspetti agronomici ed ambientali, riconoscendo il ruolo profondo, ad esempio dei microrganismi edafici nel determinare lo stato di salute delle colture, producendo la sintesi di elicitori di tolleranza agli stress o addirittura l'accumulo di sostanze antibiotiche all'interno dei tessuti delle colture.

L'importanza della biodiversità nella gestione 'One Health'

Numerosi studi sottolineano come gli ecosistemi o gli agro-ecosistemi più fragili si riscontrino dove è minore la biodiversità vegetale (Altieri, 1999). Ramirez-Villegas et al. (2022), hanno mostrato come per le 25 colture più importanti su scala mondiale, la diversità conservata *ex-situ* sia maggiore nelle aree con sistemi agricoli più diversificati e a più piccola scala, come le aree tropicali, il Sud-Est asiatico e il Mediterraneo. Inoltre, gli studi riguardanti il cosiddetto yield gap, ovvero la differenza tra la resa potenziale e quella ottenuta, mostrano come nelle aree a maggiore produttività e minore diversificazione colturale, la resa delle grandi colture come mais e frumento non cresca, nonostante ci sia il potenziale per farlo e la resa di frumento risulti in calo soprattutto nelle aree altamente produttive delle grandi pianure americane e dell'Est Europa (Gerber et al., 2024). Letourneau et al. (2011) in uno dei primi studi di meta-analisi su questo argomento hanno mostrato come l'effetto totale e individuale di pratiche di diversificazione sia sempre positivo sul controllo dei fitofagi, la riduzione del danno, l'aumento dei predatori e dei parassitoidi e la resa rispetto a sistemi in monocoltura. Trattasi soltanto di alcuni esempi che supportano l'idea della necessità di un approccio alternativo alla gestione degli agroecosistemi.

Per ottenere una gestione "sana" degli agroecosistemi, l'approccio agroecologico prevede come strategia fondamentale quella dell'incremento della biodiversità (Wezel et al., 2020), che si può ottenere sia a livello dell'ambiente naturale in cui si inserisce l'azienda (ad esempio attraverso l'introduzione o la conservazione di aree semi-naturali), sia a livello del sistema colturale. In generale, le strategie di diversificazione si esplicano a livello genetico ("within species"), di specie ("between species") e di paesaggio. Una buona parte della letteratura, tuttavia, include fra gli strumenti di diversificazione anche la gestione agronomica, intendendo per quest'ultima la pratica di alternare e differenziare nel tempo le tecniche agronomiche applicate sul medesimo appezzamento (Tamburini et al., 2020). La diversificazione dei sistemi colturali può seguire diverse possibilità largamente praticabili dagli agricoltori, che vanno ad agire sia nello spazio che nel tempo, in funzione delle caratteristiche ambientali e della tipologia di sistema colturale. Nell'ambito dei sistemi erbacei, la via maestra alla diversificazione è certamente l'avvicendamento delle colture, la scelta agronomica per eccellenza, capace di determinare alternanze virtuose delle colture e delle tecniche gestionali, che in sintesi si ripercuotono positivamente sia sulla biodiversità pianificata (scelta dall'agricoltore) che su quella associata (spontanea), con una riduzione della pressione delle avversità biotiche delle colture ed una riduzione dell'impiego di input esterni (Messean et al., 2021).

In chiave agroecologica, l'avvicendamento delle colture dovrebbe essere sufficientemente lungo e complesso, sebbene non vi siano chiari riferimenti in letteratura su quali siano durata e diversità minimi per poter considerare un avvicendamento "sostenibile". Le stesse politiche europee (PAC e regolamento sull'agricoltura biologica) di fatto si limitano ad indicare un requisito minimo di base

facilmente applicabile dalla totalità delle aziende. Seguendo un approccio agroecologico, tuttavia, appare chiaro come l'allungamento della rotazione dovrebbe avvenire aumentando non solo il numero di specie coltivate, ma anche la loro diversità funzionale (Martin e Isaac, 2015), oppure attraverso l'inserimento di colture capaci di rigenerare la fertilità dei suoli come le foraggere poliennali (es. prati monofiti di erba medica o prati polifiti). Spesso l'allungamento degli avvicendamenti ha come conseguenza la riduzione della superficie annuale delle singole colture da reddito, con possibili ripercussioni a livello economico ed organizzativo per le aziende agricole, a vantaggio però di una maggiore complessità del paesaggio, con indubbi benefici sulla biodiversità e sul contenimento delle avversità biotiche delle colture e di una maggiore stabilità delle produzioni di fronte all'aleatorietà degli andamenti meteorologici o dei mercati dei prodotti agricoli.

Un'interessante opportunità di diversificazione degli avvicendamenti all'interno dei singoli anni, che in certi ambienti è stata paradossalmente resa possibile dal cambiamento climatico stesso (Kawasaki, 2019), è il *multiple cropping*, ossia la coltivazione di più colture da reddito consecutive in una stessa annata agraria, permettendo oltretutto la coltivazione di colture principali anche di colture intercalari. Questa forma di diversificazione è possibile laddove la stagione produttiva sia caratterizzata dalla presenza di temperature adeguate e disponibilità di acqua (pioggia o irrigazione). Esempio sono i sistemi destinati alla produzione di bioenergie basati sulla successione in una stessa annata di triticale autunno-vernino e mais da insilato in secondo raccolto, oppure i sistemi cerealicoli basati su cereale autunno-vernino, spesso orzo, e soia in secondo raccolto. Negli ambienti mediterranei, caratterizzati da stagioni estive calde e secche, più tipicamente il *multiple cropping* si realizza coltivando nella stessa annata agraria una coltura principale da reddito a ciclo primaverile-estivo (es. mais, soia, girasole), seguita dalla coltivazione di cover crop autunno-vernine, allo scopo di mantenere coperto il terreno nel periodo di massima piovosità e alto rischio erosivo, producendo servizi ecosistemici a vantaggio dell'intero avvicendamento o della singola coltura in successione (es. sequestro di C, ciclizzazione dei nutrienti, controllo delle infestanti). Sebbene siano strumenti agronomici sempre più popolari e conosciuti, oltre che ben supportati dalle politiche europee (soprattutto nell'ambito del II Pilastro della PAC), le cover crop sono ancora poco adottate dagli agricoltori europei (Fendrich et al., 2023). La letteratura scientifica ne ha ampiamente riconosciuto i benefici in termini di erogazione di servizi ecosistemici, *in primis* sequestro di C, ciclizzazione dei nutrienti, stimolo dell'attività microbica e conservazione della biodiversità dei micro-artropodi edafici (Sapkota et al., 2012), evidenziandone tuttavia anche alcuni limiti, come i possibili effetti competitivi nei confronti delle colture da reddito e gli impatti economici ed ambientali legati alla loro coltivazione. In una recente meta-analisi globale sulle cover crop, Qiu et al. (2024) hanno dimostrato tuttavia come una coltivazione sistematica e di lungo periodo delle cover crop, abbinata ad opportune scelte agronomiche, come ad esempio l'impiego di miscugli di specie più appropriate all'ambiente o l'adozione di lavorazioni conservative (minimum tillage o no-tillage), possa portare ad enfatizzare gli effetti positivi delle cover crop (+1,25% di servizi ecosistemici multipli stimati), minimizzando gli impatti negativi, in particolare quelli legati alle emissioni dirette di gas ad effetto clima-alterante (GHG), con un contributo netto al sequestro della CO₂ atmosferica pari a 21,7 Pg per anno.

Un'altra forma di diversificazione è la consociazione (*intercropping*), che si basa su una diversificazione nello spazio andando ad aumentare la diversità specifica su una stessa unità spaziale (Caporali, 1987) ma anche come diversificazione nel tempo nel caso di consociazioni a staffetta (*relay cropping*), quali ad esempio la bulatura, dove le colture consociate sono entrambe presenti su una stessa unità spaziale soltanto per una parte del loro ciclo. La tipologia di consociazione maggiormente utilizzata a scala mondiale è quella che associa un cereale ad una leguminosa come riportato da Martin-Guay et al. (2018), rappresentata in Figura 1. Le specie consociate possono essere entrambe raccolte, oppure si può avere una specie raccolta (coltura principale) e una o più specie compagne, che vanno a fornire servizi ecosistemici. Tra i servizi ecosistemici che sono direttamente imputabili alla coltura principale vi è sicuramente la produzione, mentre alla coltura compagna sono

maggiormente imputabili servizi di regolazione come il controllo delle infestanti o dei fitofagi

(Gardarin et al., 2022). Tuttavia, a seconda della combinazione tra le colture in consociazione, alla coltura compagna possono essere imputati anche dei disservizi come un'emergenza ritardata della coltura principale, un aumento dei patogeni, difficoltà di separazione delle granelle alla raccolta.



Figura 1: a sinistra, consociazione cereale-leguminosa, nello specifico cece-frumento tenero, presso l'Azienda Sperimentale A. Servadei, Udine, progetto PRIN22 LEG-ITA. In questa sperimentazione, il frumento è la coltura di servizio, dedicata al controllo delle infestanti; a destra, miscuglio varietale di grano saraceno, per la valutazione dell'effetto del miscuglio sulla stabilità della resa (LEG-ITA <https://legita.uniud.it/>; ECO-DRESS <https://ecodress.uniud.it/>)

La sperimentazione di nuove forme di consociazioni sia in termini di colture associate che di tipologia di layout, può aumentare i servizi ecosistemici associati a tale pratica. Sperimentazioni in corso presso l'Università di Udine, ad esempio, hanno valutato il potenziale del grano saraceno come coltura di servizio, consociata con tre leguminose da granella: cece, lenticchia e soia. In tale sperimentazione sono state valutate diverse tipologie di consociazioni: a file alternate e miste sulla fila, con diverse densità di semina, 2:1 e 4:1 al fine di identificare quale sia il miglior potenziale produttivo e di controllo delle infestanti. I risultati hanno mostrato come la soia sia la coltura con maggiore potenziale di consociazione con grano saraceno, poco influenzata dall'effetto dell'anno e che, nel 2024, ha permesso un doppio raccolto, sia della leguminosa che del grano saraceno. La lenticchia sembra invece essere la specie che maggiormente è influenzata dalla competizione con la coltura compagna, ma anche dall'anno, mostrando una maggiore instabilità della resa (Virili et al., 2024). La consociazione di grano saraceno e soia è anche oggetto del progetto PRIN 22 PNRR ECO-DRESS, coordinato dall'Università di Padova. L'obiettivo del progetto è quello di testare la performance di consociazioni a strisce soia-grano saraceno rispetto alla soia pura. Sono, in questo caso, in corso di sperimentazione diverse tipologie di consociazioni utilizzando: 'frame' ovvero riquadro di grano saraceno lungo tutti i bordi del campo, strisce soia-grano saraceno 1:1 e strisce 2:1. I risultati preliminari mostrano come la presenza di grano saraceno vada a massimizzare i servizi ecosistemici, qualunque sia la configurazione innovativa adottata. I risultati ottenuti in azienda sperimentale sono tuttavia soggetti a limiti, quali l'adattabilità in condizioni aziendali e un aumentato effetto bordo dato dalla dimensione ridotta delle parcelle sperimentali. Al fine di valutare gli effetti delle consociazioni in condizioni ordinarie, è opportuno valutarle ulteriormente nelle aziende agricole. A tal proposito, Brooker et al. (2024) hanno recentemente mostrato come l'effetto delle consociazioni sulla resa in sperimentazioni aziendali sia positivo ma variabile a seconda dell'andamento climatico, delle colture in consociazione e della gestione tecnica.

Una particolare forma di consociazione è quella che va ad aumentare la diversità genetica e non

specificata. Si parla in tal caso di miscugli varietali (Fig. 1). Anche in questo caso si associano varietà diverse per aumentare i servizi ecosistemici (Chabert et al., 2024; Su et al., 2025). Tra i miscugli varietali di maggiore successo ritroviamo, in colza, l'associazione di un 5% di cultivar precoci con cultivar ordinarie capace di attirare alcuni fitofagi e limitarne l'infestazione (Cerrutti et al., 2024). In frumento e lenticchia, l'associazione di diverse cultivar permette di aumentare la stabilità della resa e rendere la coltura più resiliente alle avversità biotiche (Lorenzetti et al., 2022; Tous-Fandos et al., 2025).

Chiaramente le tecniche di diversificazione fin qui trattate singolarmente possono essere combinate tra loro, massimizzandone i benefici attraverso virtuose sinergie che possono realizzarsi tra i diversi elementi del sistema culturale (Tamburini et al., 2020) previo, tuttavia, un opportuno adattamento della strategia gestionale in funzione delle caratteristiche pedo-climatiche e socio-economiche specifiche.

L'importanza del germoplasma nel mantenimento della biodiversità nell'agroecosistema

Nel contesto del Mediterraneo, l'Italia detiene un invidiabile primato di agro-biodiversità per molte delle più importanti colture ad uso alimentare e tale ricchezza di germoplasma è riconducibile solo in parte a fattori di natura fisico-geografica. La ricchezza varietale è, infatti, principalmente legata a fattori storici ed antropici, invasioni e dominazioni, economia produttiva e rurale, religione, lingua, viabilità e trasporti, usi e tradizioni locali. È opportuno sottolineare che 'una varietà locale di una coltura che si riproduce per seme o per via vegetativa è una popolazione variabile, che è identificabile e usualmente ha un nome locale. Non è stata oggetto di miglioramento genetico formale, è caratterizzata da un adattamento specifico alle condizioni ambientali di un'area di coltivazione (tollerante a stress biotici e abiotici di quell'area) ed è strettamente associata agli usi, alle conoscenze, alle abitudini, ai dialetti e alle ricorrenze di una popolazione che sviluppa e continua la sua coltivazione' (Marino et al., 2012).

L'enorme ricchezza di varietà locali è però andata progressivamente riducendosi con l'avvento dell'agricoltura intensiva: i produttori agricoli si sono via via orientati verso l'uso di un numero limitato di varietà di piante, selezionate per crescere più velocemente, produrre di più, ottenere prodotti dalle caratteristiche gradite alle esigenze del mercato. Questa tendenza ha certamente consentito il progresso tecnologico dell'agricoltura, permettendo l'aumento del reddito degli agricoltori, ma ha portato con sé, tra le conseguenze più significative, la perdita di diversità genetica. Di conseguenza, le varietà locali, ben adattate al loro ambiente di coltivazione, sono state progressivamente ed inesorabilmente sostituite da nuove varietà ed ibridi, che permettono elevate produzioni, una lunga conservabilità ed una maggiore idoneità ad essere trasportate a lunga distanza. Al fine di aumentare la diffusione (e la coltivazione) delle varietà locali, la Regione Sicilia ha introdotto una norma sull'agroecologia (Legge regionale 29 luglio 2021, n. 21) che definisce come 'agro-ecologica' e quindi eleggibile dei benefici di premialità nell'ambito delle risorse del Piano di Sviluppo Rurale (PSR), l'azienda che 'qualora presenti un ordinamento delle colture erbacee od ortive, destina almeno il 20% della propria superficie aziendale alla coltivazione di varietà autoctone'. La promozione delle varietà locali (autoctone) passa, innanzitutto, dalla possibilità di mettere a disposizione delle aziende il germoplasma da coltivare al fine di potersi affermare come azienda agro-ecologica. In tal senso, un interessante esempio di azione concreta riguarda i progetti integrati 'Biodiversità delle Specie Orticole pugliesi – BiodiverSO' (PSR Puglia 2007-2013 e 2014-2022) finalizzati a ridurre significativamente il tasso di erosione della biodiversità delle specie orticole della Puglia attraverso azioni di recupero, caratterizzazione, conservazione e registrazione delle varietà locali (Renna et al., 2018) nei Repertori e Registri regionali delle Risorse genetiche autoctone di interesse agrario e alimentare (Regione Puglia, 2025) e nell'Anagrafe Nazionale della biodiversità di interesse agricolo e alimentare (MASAF, 2025). Tuttavia, questi strumenti di registrazione non sono adatti alla commercializzazione delle sementi poiché, per la maggior parte delle specie orticole, è

possibile commercializzare esclusivamente sementi di varietà ammesse nel Catalogo Comune delle

varietà di specie di piante di interesse agrario (Decreto legislativo 20/2021). Le varietà locali, di contro, manifestano una rilevante variabilità dei caratteri morfologici al punto da non permettere, solitamente, il soddisfacimento del criterio di uniformità previsto per l'ammissione nel Catalogo Comune. Sarebbe quindi auspicabile intraprendere un percorso di valorizzazione delle varietà locali in grado di sfruttare gli strumenti legislativi attualmente poco utilizzati a livello nazionale e Comunitario. In tale contesto, le varietà locali potrebbero essere commercializzate come varietà da conservazione e/o varietà amatoriali, ai sensi della Direttiva 98/95/CE (Didonna et al., 2024), nonché a seguito di notifica Ministeriale come Materiale Eterogeneo Biologico ai sensi del Regolamento UE 2018/848. Parallelamente alla possibilità di ricorrere a sistemi sementieri diversificati, la promozione e quindi la valorizzazione delle varietà locali passa anche attraverso la ricerca scientifica, in grado di dimostrare specifiche peculiarità di tali espressioni di agro-biodiversità. Di seguito sono riportati due esempi inerenti a varietà locali pugliesi di pomodoro e melone.

Il pomodoro (*Solanum lycopersimum* L.) è suscettibile ad un gran numero di virus con effetti più o meno gravi sia sulla produzione, sia sulla qualità del prodotto. Gran parte di questi virus sono



Figura 2: Bacche di 'Pomodoro di Manduria'

trasmessi da insetti tra cui, molto attive, sono diverse specie di afidi, aleurodidi e tripidi. Poiché non è possibile una lotta diretta contro i virus, tra le possibili strategie vi è quella della lotta indiretta attraverso il controllo dei loro vettori che è tradizionalmente condotta con ampio ricorso ad insetticidi. La resistenza genetica potrebbe rappresentare una valida alternativa ma pochi sono i casi in cui geni di resistenza sono stati trasferiti con successo in varietà commerciali di pomodoro. Il Tomato spotted wilt virus (TSWV) è considerato uno dei virus più dannosi per il pomodoro su cui provoca una malattia nota come bronzatura che spesso uccide le piante. Il virus è trasmesso da tripidi dei generi *Frankliniella* e *Thrips* il cui controllo, anche con insetticidi, è reso difficoltoso dal fatto che tali insetti spesso colonizzano i fiori. L'industria sementiera ha proposto varietà commerciali di pomodoro esprimenti il gene Sw5 e, per questo, resistenti ai ceppi "comuni" TSWV. Tuttavia, dopo un iniziale successo, tale resistenza è stata rapidamente erosa dalla emergenza di ceppi del virus capaci di superarla e definiti, per questo, resistance-breaking (TSWV-SRB). Il 'Pomodoro di Manduria' è un'antica varietà locale di pomodoro con bacca piccola a forma di fiaschetto (Fig. 2), tradizionalmente coltivata in asciutto e per questo utilizzata come pomodoro da serbo. Nel complesso, si tratta di una pianta piccola, dotata di eccezionali caratteristiche di rusticità. Alcuni autori (Spanò et al., 2020) hanno dimostrato che tale varietà presenta livelli utili di tolleranza anche alle infezioni di TSWV-SRB e che tale caratteristica viene esaltata nel momento in cui il pomodorino mandurese è impiegato come portainnesto di varietà commerciali di pomodoro: in pratica le caratteristiche di tolleranza proprie del 'Pomodoro di Manduria' vengono trasferite anche al nastro (Spanò et al., 2020).

Un altro esempio riguarda 'Barattiere', una varietà locale di melone (*Cucumis melo* L.) molto diffusa in Puglia. I suoi frutti (Fig. 3) sono consumati allo stadio immaturo, freschi e crudi, come il cetriolo. Sono caratterizzati dall'essere rinfrescanti e rispetto al cetriolo risultano più croccanti e più digeribili,

oltre ad avere un alto contenuto in potassio e zuccheri e contenuto di sodio piuttosto basso (Renna et al., 2020). Da alcuni anni anche in Puglia è arrivato il Tomato leaf curl New Delhi virus (ToLCNDV),



Figura 3: frutti di “Barattiere”.

un virus particolarmente dannoso su cucurbitacee coltivate in pieno campo e in ambiente protetto, dove può causare perdite di produzione prossime al 100%. Ad oggi sono state individuate resistenze genetiche al ToLCNDV in zucca (*Cucurbita moschata* Duch.) e (*Luffa cylindrica* (L.) Roem) ma al momento non sono disponibili varietà commerciali resistenti. Per questa ragione l'innesto erbaceo potrebbe fornire una soluzione più rapida e flessibile al fine di trasmettere livelli utili di tolleranza al virus a varietà suscettibili di interesse commerciale.

In un recente studio (Mastrochirico et al., 2023) diverse specie e varietà di cucurbitacee (tra cui Barattiere) sono state inoculate con un ToLCNDV isolato in Puglia per valutare lo sviluppo dei sintomi della malattia e l'accumulo di DNA virale nelle piante. Sulla base dei sintomi della malattia sviluppati, le piante sono state classificate come tolleranti, moderatamente tolleranti, moderatamente suscettibili e suscettibili. Tra le varietà più tolleranti al ToLCNDV, Barattiere non ha mostrato sintomi di malattia contenuti e ha fatto registrare livelli molto bassi di accumulo di DNA virale; per questo motivo e per le sue caratteristiche morfologiche, che si prestano bene all'innesto, il barattiere è stato individuato come portainnesto al fine di trasmettere livelli utili di tolleranza alle varietà di interesse commerciale suscettibili al ToLCNDV.

L'importanza della sostanza organica nel terreno

Va ricordato che la produzione primaria è l'unica attività dell'uomo in grado di fissare CO₂ e quindi potenzialmente di mitigare gli effetti dell'emissione di GHG, a titolo di esempio un ettaro di oliveto, in Puglia, presenta un bilancio netto di scambi gassosi fogliari (net ecosystem exchange) di 12-13 Mg C anno⁻¹ (Nardino et al., 2013). Inoltre se la fertilizzazione è gestita con fertilizzanti organici, la quantità di C incorporata nel terreno aumenta le capacità di sequestro del C e le potenzialità di mitigazione delle colture arboree. Non solo, studi condotti su pesco (Baldi et al., 2018) dimostrano come, nel lungo periodo, il ricorso ad ammendanti compostati ottenuti dalla raccolta differenziata delle utenze domestiche e dalla gestione del verde urbano, distribuiti annualmente ed interrati, consenta di aumentare la sostanza organica nel suolo del 30% in più rispetto alla quota somministrata. In altre parole per 100 kg di C distribuito continuamente per 14 anni, se ne ritrovano nel suolo 130 kg, evidenziando una capacità di auto produzione ed accumulo della sostanza organica, in un circolo virtuoso, che permette allo stesso tempo di risparmiare fertilizzante minerale e sequestrare CO₂. Il ricorso a fertilizzanti organici ottenuti dal riciclaggio degli scarti domestici e dell'industria agro-alimentari, permette l'istaurarsi di una economia circolare funzionale al risparmio di emissioni dovute

al trasporto. Dal confronto della leaf cycle assesment (LCA) tra una tonnellata di urea e una di

compost, si stima un consumo di 2,8 t CO₂ per l'urea (Shi et al., 2020), contro una media di 0,13 t CO₂ per il compost (Serafini et al., 2023). Tali valori riportati ad unità di N risultano simili, tuttavia nel caso dell'ammendante compostato misto le emissioni dovute al trasporto della materia prima sono ineluttabili e indipendenti dall'utilizzo del materiale, a causa della necessità di ritiro nella gestione dei rifiuti urbani, ad opera del servizio ecologico. Inoltre bisogna sottolineare che riportare il beneficio del compost al solo quantitativo di N è riduttivo, in quanto nel compost sono presenti tutti i nutrienti necessari e benefici alle colture agrarie, in particolare, una tonnellata di compost contiene oltre a circa 20-25 kg di N, 20 kg di K, 6 di P, ecc. (Baldi et al., 2018), senza contare il 30% di sostanza organica, il cui effetto benefico è difficile da quantificare in termini economici.

Tabella 1. Bilancio di 14 anni di C nell'ecosistema pescheto

TRATTAMENTO	C _{somministrato} (t ha ⁻¹)	C _{t14} albero (t ha ⁻¹)	ΔC _{t14} suolo (t ha ⁻¹)	ΔC _{t14} ecosistema (t ha ⁻¹)
Controllo	0	10.6 b	-2.5 b	8.1 b
Minerale	0	13.5 a	1.8 b	15.3 b
Compost 5 t ha ⁻¹	21	10.8 b	16.3 b	27.1 b
Compost 10 t ha ⁻¹	42	13.3 a	54.8 a	68.1 a
Significativtà	-	*	***	***

Conclusioni

L'approccio One Health si persegue con la gestione sostenibile degli agroecosistemi, che include la massima attenzione all'introduzione di gestioni agronomiche in grado di limitare l'LCA della coltura e nel contempo di aumentare la fissazione di CO₂ da parte dell'agro-ecosistema. Questo risultati possono essere perseguiti attraverso: 1) l'aumento della sostanza organica del terreno, che migliora la resilienza a stress biotici ed abiotici della coltura; 2) la copertura continua del suolo che evita lisciviazioni, erosioni e contribuisce a fissare C; 3) la sostituzione, ove possibile dei fertilizzanti chimici con quelli organici ottenuti da riciclaggio di scarti domestici e agro-alimentari prodotti localmente, nell'ottica di un'economia circolare volta alla riduzione dell'LCA del prodotto; 4) il mantenimento della biodiversità finalizzato alla gestione preventiva dei patogeni, dei fitofagi e delle infestanti attraverso il ricorso alla diversificazione colturale (es. sovesci, consociazioni, *multiple cropping*); 5) il recupero del germoplasma locale tollerante a patogeni e parassiti. Il benessere delle persone degli animali, del suolo e dell'ambiente passa quindi attraverso una rivisitazione della gestione dell'azienda agraria, non più vista come un generatore infinito di prodotti, ma come un sistema da proteggere e da rigenerare ad ogni ciclo produttivo con pratiche innovative che richiedono approfondite conoscenze e applicazioni delle più appropriate tecnologie.

Ringraziamenti

PRIN 22 LEG-ITA "Innovative approaches to determine grain legume yield and yield stability in Italian cropping systems" (2022MR7KJ9), finanziato dall'Unione Europea tramite programma NextGenerationEU Missione 4, componente 1, PRIN 22 PNRR ECO-DRESS "ECOsystem services enhancement in DiveRsifiEd Soybean-based Systems" (P2022WY7NH), finanziato dall'Unione Europea via il programma Next-Generation EU - componente M4C2, investimento 1.1. Regione Emilia Romagna LR 28/98 – and Hera SpA Bologna, Caviro, SpA Faenza, Aimag Carpi per aver fornito il compost.

Bibliografia

Altieri M.A., 1999. The ecological role of biodiversity in agroecosystems. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 74:1-3, 19-31, [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(99\)00028-6](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(99)00028-6)

- Baldi E., Cavani L., Margon A., Quartieri M., Sorrenti G., Marzadori C., Toselli M., 2018. Effect of compost application on the dynamics of carbon in a nectarine orchard ecosystem, *Science of the Total Environment*, 637–638: 918–925.
- Brooker, R. W., Pakeman, R. J., Adam, E., Banfield-Zanin, J. A., Bertelsen, I., Bickler, C., ... Karley, A. J. (2024). Positive effects of intercrop yields in farms from across Europe depend on rainfall, crop composition, and management. *Agronomy for Sustainable Development*, 44(4), 35.
- Caporali, F., Paolini, R., Campiglia, E. (1987). La consociazione fra piante erbacee. *Nota I. Basi biologiche e vantaggi produttivi*. *Rivista di Agronomia* (21): 3-17.
- Cerrutti, N., Cadeddu, N., Carpezat, J., Clerget, S., Geloën, M., Jamet, D., ... Cadoux, S. (2024). Reducing insecticide use in winter oilseed rape by in-field to landscape-scale agroecological pest management. *OCL*, 31, 22.
- Chabert, S., Eeraerts, M., DeVetter, L.W. et al., (2024). Intraspecific crop diversity for enhanced crop pollination success. A review. *Agron. Sustain. Dev.* 44, 50. <https://doi.org/10.1007/s13593-024-00984-2>
- Didonna A., Bocci R., Renna M., Santamaria P. (2024). The Conservation Varieties Regime: Its Past, Present and Future in the Protection and Commercialisation of Vegetable Landraces in Europe. *Horticulturae*, 10(8), 877.
- Fendrich, A. N., Matthews, F., Van Eynde, E., Carozzi, M., Li, Z., d'Andrimont, R., Lugato, E., Martin, P., Ciaï, P., Panagos, P. (2023). From regional to parcel scale: A high-resolution map of cover crops across Europe combining satellite data with statistical surveys. *The Science of the total environment*, 873, 162300. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.162300>
- Gardarin, A., Celette, F., Naudin, C. et al. (2022). Intercropping with service crops provides multiple services in temperate arable systems: a review. *Agron. Sustain. Dev.* 42, 39. <https://doi.org/10.1007/s13593-022-00771-x>
- Gerber, J. S., Ray, D. K., Makowski, D., Butler, E. E., Mueller, N. D., West, P. C., ... & Sloat, L. (2024). Global spatially explicit yield gap time trends reveal regions at risk of future crop yield stagnation. *Nature Food*, 5(2), 125-135.
- Kawasaki, K. (2019). Two Harvests Are Better than One: Double Cropping as a Strategy for Climate Change Adaptation. *Am. J. Agric. Econ.* 101(1): 172–192. doi: <https://doi.org/10.1093/ajae/aay051>.
- Letourneau, D. K., Armbrrecht, I., Rivera, B. S., Lerma, J. M., Carmona, E. J., Daza, M. C., ... & Trujillo, A. R. (2011). Does plant diversity benefit agroecosystems? A synthetic review. *Ecological applications*, 21(1), 9-21.
- Lorenzetti, E., Carlesi, S., & Barberi, P. (2022). Mixtures of commercial lentil cultivars show inconsistent results on agronomic parameters but positive effects on yield stability. *Agronomy*, 12(9), 2107.
- Mackenzie J.S., Jeggo M. (2019). The One Health approach—Why is it so important? *Trop. Med. Infect. Dis.*, 4, 88; doi:10.3390/tropicalmed4020088.
- Marino M., Bianchi P.G., Bocci R., Bravi R., Dalla Ragione I., Di Matteo A., Fideghelli C., Fontana M., Macchia M., Maggioni L., Negri V., Pignone D., Porfiri O., Schneider A., Sottile F., Vazzana C. (2012). Linee guida per la conservazione e la caratterizzazione della biodiversità vegetale, animale e microbica di interesse per l'agricoltura. <https://www.reterurale.it/flex/cm/pages/ServeBLOB.php/L/IT/IDPagina/9580>
- Martin, A., Isaac M. (2015). Plant functional traits in agroecosystems: A blueprint for research. *J. Appl. Ecol.* 52: n/a-n/a. doi: 10.1111/1365-2664.12526.
- Martin-Guay, M. O., Paquette, A., Dupras, J., Rivest, D. (2018). The new green revolution: sustainable intensification of agriculture by intercropping. *Science of the Total Environment*, 615, 767-772.
- MASAF – Ministero dell'Agricoltura, della Sovranità Alimentare e delle Foreste, 2025. Anagrafe nazionale della biodiversità di interesse agricolo e alimentare. <https://www.masaf.gov.it/agrobiodiversita>
- Mastrochirico M., Spanò R., Mascia T. (2023). Grafting to Manage Infections of the Emerging Tomato Leaf Curl New Delhi Virus in Cucurbits. *Plants*, 12, 37. <https://doi.org/10.3390/plants12010037>.
- Medda, S.; Fadda, A.; Mulas, M. (2022). Influence of Climate Change on Metabolism and Biological Characteristics in Perennial Woody Fruit Crops in the Mediterranean Environment. *Horticulturae*, 8, 273. <https://doi.org/10.3390/horticulturae8040273>
- Messéan, A., Viguier, L., Paresys, L., Aubertot, J.L., Canali, S., Iannetta, P., Justes, E., Karley, A., Keillor, B., Kemper, L., Muel, F., Pancino, B., Stilmant, D., Watson, C., Willer, H., Zornoza, H. (2021). Enabling crop diversification to support transitions toward more sustainable European agrifood systems. *Front. Agr. Sci. Eng.*, 8(3): 474–480 <https://doi.org/10.15302/J-FASE-2021406>
- Nardino M., Pernice F., Rossi F., Georgiadis T., Facini O., Motisi A., Drago A. (2013). Annual and monthly carbon balance in an intensively managed Mediterranean olive orchard. *Photosynthetica*, 51(1), 63-74. doi: 10.1007/s11099-012-0079-6
- Qiu, T., Y. Shi, J. Peñuelas, J. Liu, Q. Cui, J. Sardans, F. Zhou, L. Xia, W. Yan, S. Zhao, S. Peng, J. Jian, Q. He, W. Zhang, M. Huang, W. Tan, L. Fang (2024). Optimizing cover crop practices as a sustainable solution for global agroecosystem services. *Nat. Commun.* 15(1): 10617. doi: 10.1038/s41467-024-54536-z.
- Ramirez-Villegas, J., Khoury, C. K., Achicanoy, H. A., Diaz, M. V., Mendez, A. C., Sosa, C. C., ... Zavala, C. (2022). State of ex situ conservation of landrace groups of 25 major crops. *Nature Plants*, 8(5), 491-499.
- Regione Puglia (2025). Registro regionale delle risorse genetiche autoctone, minacciate di erosione genetica o a rischio di estinzione, di interesse agrario, forestale e zootecnico. <https://filiereagroalimentari.regione.puglia.it/agrobiodiversita/C3%A0-registro-regionale>
- Renna M., Montesano F., Signore A., Gonnella M., Santamaria P. (2018). BiodiverSO: A Case Study of Integrated Project to Preserve the Biodiversity of Vegetable Crops in Puglia (Southern Italy). *Agricoltura*, 8(8), 128.
- Renna M., D'Imperio M., Gonnella M., Parente A., Santamaria P., Serio F. (2020). Barattiere: An Italian Local Variety of Cucumis melo L. with Quality Traits between Melon and Cucumber. *Plants*, 9, 578.
- Sapkota, T.B., Mazzoncini, M., Barberi, P., Antichi, D. and Silvestri, N. (2012). Fifteen years of no till increase soil organic matter, microbial biomass and arthropod diversity in cover crop-based arable cropping systems. *Agron. Sustain. Dev.* 32: 853–863.
- Serafini L.F., Feliciano M., Rodrigues M.A., Gonçalves A. (2023). Systematic Review and Meta-Analysis on the Use of LCA to Assess the Environmental Impacts of the Composting Process. *Sustainability*, 15, 1394. <https://doi.org/10.3390/su15021394>
- Shi L., Liu L., Yang B., Sheng G., Xu T. (2020). Evaluation of industrial urea energy consumption (EC) based on life cycle assessment (LCA). *Sustainability*, 12, 3793; doi:10.3390/su12093793
- Spanò R., Ferrara M., Montemurro C., Mulè G., Gallitelli G., Mascia T. (2020). Grafting alters tomato transcriptome and enhances tolerance to an airborne virus infection. *Scientific Reports*, 10, 2538. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-59421-5>
- Su, Y., Zhang, W.P., Zhao, J.H. et al. (2025). Cultivar mixtures increase stability and productivity over time through asynchrony and complementarity. *Agron. Sustain. Dev.* 45, 20. <https://doi.org/10.1007/s13593-025-01014-5>
- Tamburini, G., R. Bommarco, T.C. Wanger, C. Kremen, M.G.A. van der Heijden, M. Liebman, and S. Hallin (2020). Agricultural diversification promotes multiple ecosystem services without compromising yield. *Sci. Adv.* 6(45). doi: 10.1126/SCIADV.ABA1715.
- Tous-Fandos, A., Bragg, D., Blanco-Moreno, J.M. et al. (2025). Wheat cultivar mixtures enhance the delivery of agroecosystem services compared to monocultures under contrasted tillage intensities and fertilization. *Agron. Sustain. Dev.* 45, 2. <https://doi.org/10.1007/s13593-024-00996-y>
- Virili A., Marusig D., Delle Vedove G., Marraccini E. (2024). Intercropping chickpea and lentil with buckwheat: effect on weed suppression and legume yield. 18th Congress of the European Society for Agronomy, Rennes, 26-30 August 2024. Available online at: <https://events.institut-agro.fr/event/1/contributions/30/>
- Wezel, A., Herren, B.G., Kerr, R.B., Barrios, E., Rodrigues Gonçalves, A.L., and Sinclair, F. (2020). Agroecological principles and elements and their implications for transitioning to sustainable food systems. A review. *Agron. Sustain. Dev.* 40, 40. <https://doi.org/10.1007/s13593-020-00646-z>

Coniugare conoscenza e innovazione per il ripristino degli equilibri trofici e della salute del sistema suolo-pianta

Celi L.¹, Bonifacio E.¹, Zaccone C.²

¹Dipartimento di Scienze Agrarie, Forestali e Alimentari, Università di Torino

²Dipartimento di Biotecnologie, Università di Verona

Riassunto

La degradazione dei suoli agricoli compromette la produttività, la qualità nutrizionale delle produzioni e la resilienza degli agroecosistemi. La perdita di carbonio organico del suolo, la riduzione della biodiversità e l'alterazione del ciclo dei nutrienti sono processi strettamente interconnessi con la salute delle piante, dell'uomo e degli ecosistemi, secondo il paradigma *One Health*. Questo articolo, strutturato come review di sintesi, analizza i principali meccanismi di sequestro del carbonio nel suolo, l'impatto delle pratiche di gestione agronomica sulla fertilità, il ruolo della rizosfera e dei microrganismi promotori della crescita delle piante, nonché le innovazioni bio-based e i rischi emergenti legati alle microplastiche. L'obiettivo è fornire un quadro integrato di conoscenze e soluzioni per il ripristino degli equilibri trofici nei sistemi suolo-pianta e per la transizione verso un'agricoltura rigenerativa in un'ottica *one health*.

Abstract

The degradation of agricultural soils undermines productivity, the nutritional quality of yields, and the resilience of agroecosystems. The loss of soil organic carbon, the reduction in biodiversity, and the disruption of nutrient cycling are processes closely linked to the health of plants, humans, and ecosystems, in accordance with the One Health paradigm. This article, structured as a synthesis review, examines the main mechanisms of soil carbon sequestration, the impact of agronomic management practices on fertility, the role of the rhizosphere and plant growth-promoting microorganisms, as well as bio-based innovations and emerging risks associated with microplastics. The aim is to provide an integrated overview of knowledge and solutions for restoring trophic balances in soil-plant systems and supporting the transition towards regenerative agriculture within a One Health framework.

Keywords: *soil health; carbon sequestration; nutrient cycling; rhizosphere; One Health; sustainable agriculture*

Introduzione

Il suolo rappresenta una risorsa non rinnovabile fondamentale per la vita sulla Terra ed è alla base della produzione alimentare, della regolazione dei cicli biogeochimici e della mitigazione dei cambiamenti climatici. Tuttavia, l'intensificazione agricola, l'urbanizzazione, l'inquinamento e il cambiamento climatico hanno determinato un progressivo degrado dei suoli in termini di funzionalità, spesso accompagnato da riduzione della sostanza organica, perdita di biodiversità funzionale e contaminazione. Questa degradazione si riflette negativamente sulla salute delle colture e sulla qualità degli alimenti, contribuendo non solo a produrre alimenti di minor qualità ma anche a diffuse carenze nutrizionali in vaste zone del pianeta.

In tale contesto, il paradigma *One Health* evidenzia l'interconnessione tra la salute del suolo e delle piante e quella dell'essere umano. Il ripristino della funzionalità dei sistemi suolo-pianta richiede l'integrazione di conoscenze sui processi fondamentali che avvengono nel suolo con le innovazioni agronomiche e tecnologiche orientate a una maggiore sostenibilità del sistema. La salute del suolo può essere definita come «la capacità continua del suolo di funzionare come un ecosistema vivente che sostiene piante, animali ed esseri umani» (Lehman et al., 2020). Essa si riflette nello stato fisico, chimico e biologico del suolo e nelle comunità di organismi del suolo sostenute dalla sostanza organica. In effetti, la componente biologica e la sostanza organica sono fondamentali per la salute del suolo e per il sequestro del carbonio, per i cicli degli elementi che forniscono alle colture macro

e micronutrienti, per ridurre l'attacco di patogeni e per il mantenimento di buone rese produttive

a fronte di un minore uso di fertilizzanti e di agrofarmaci.

Il presente lavoro è basato sul contributo dei ricercatori e ricercatrici di tre società scientifiche, ossia la Società Italiana di Chimica Agraria (SICA), la Società Italiana di Pedologia (SIPe) e la Società Italiana della Scienza del Suolo (SISS), considerando gli studi sperimentali pubblicati principalmente negli ultimi 10 anni. Particolare attenzione è stata dedicata a contributi relativi a: (i) meccanismi di stabilizzazione del carbonio organico del suolo ed effetti delle tecniche agronomiche sull'accumulo di sostanza organica, (ii) interazioni rizosferiche e microrganismi promotori della crescita delle piante, (iii) impatti delle microplastiche nei sistemi agricoli e sostituzione con soluzioni naturali.

Sequestro del carbonio organico e fertilità del suolo

Il carbonio organico del suolo è un indicatore chiave della salute del suolo e della sua capacità di fornire servizi ecosistemici. Un buon livello di carbonio organico garantisce infatti una buona struttura del suolo, la capacità di ritenzione idrica e la disponibilità di nutrienti, rafforzando il legame tra sequestro del carbonio e fertilità. Tuttavia, molti suoli presentano livelli di carbonio molto bassi, addirittura al di sotto della soglia di fertilità (0,9 %). Per aumentare la sostanza organica è necessario conoscere quelli che sono i processi di stabilizzazione del carbonio che prevedono meccanismi di protezione fisica, attraverso l'occlusione negli aggregati, stabilizzazione chimica attraverso l'associazione con i minerali, e recalcitranza biochimica relativa alla presenza intrinseca di componenti resistenti alla trasformazione microbica. La capacità di accumulo del carbonio è inoltre dipendente da diverse proprietà del suolo, dalle condizioni climatiche e dalla gestione agronomica.

Tra le tecniche agronomiche, l'aggiunta di carbonio esogeno al suolo, tramite ammendanti organici, reflui zootecnici e/o biochar, risulta quella più efficace, migliorando la salute del suolo e la produttività delle colture (Figura 1). Boiloiun et al. (2023) in una metanalisi evidenziano che il biochar ha un forte potenziale di mitigazione climatica grazie ai suoi effetti duraturi, ma la sua efficacia varia in base alle proprietà e quantità applicate, e la produzione su larga scala può essere limitata dalla disponibilità di biomassa o dalla competizione con l'alimentazione animale.

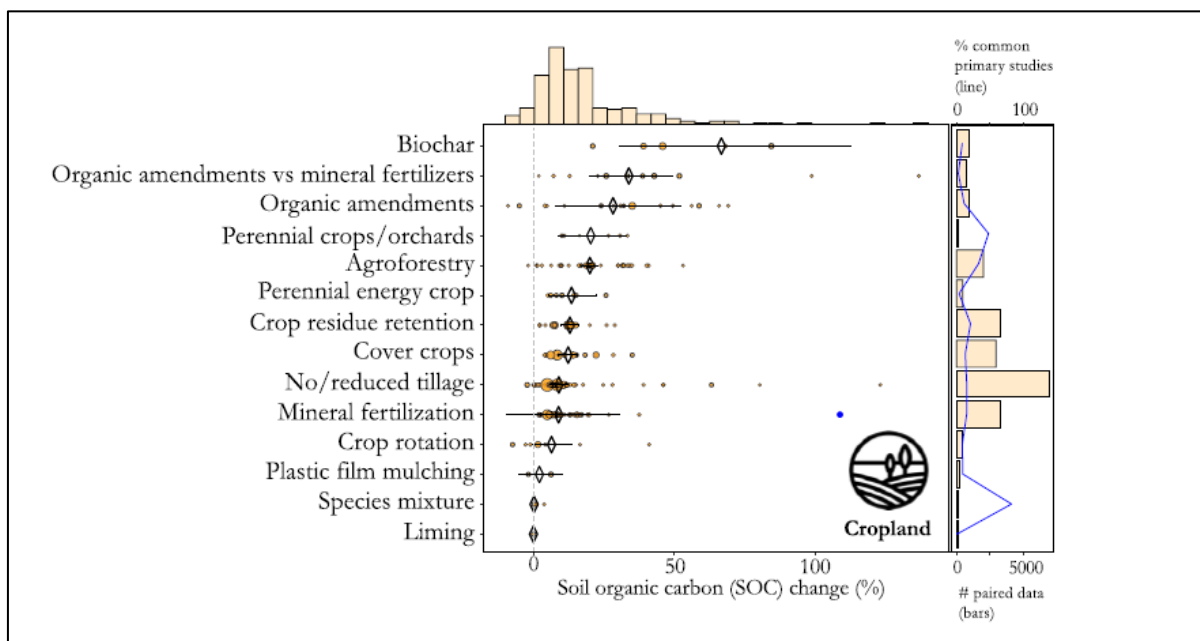


Figura 1. Variazione dello stock di C in seguito a diverse tecniche agronomiche (adattato da Boiloiun et al. 2023)

Le lavorazioni meccaniche hanno anch'esse un impatto importante sugli stock di C e sulle dinamiche della sostanza organica del suolo. Passare a pratiche no-tillage riduce il disturbo

fisico del suolo, favorendo processi di aggregazione con un effetto benefico reciproco nel prolungare il tempo di turnover degli aggregati e, di conseguenza, della sostanza organica. Sistemi di minima lavorazione o semina su sodo tendono a preservare meglio la struttura del suolo e a limitare la mineralizzazione accelerata del carbonio, favorendo l'accumulo di frazioni organiche stabilizzate per interazione chimica con la fase minerale del suolo (Six et al., 2002; Cerli et al., 2012). Molto importante è considerare il binomio tempo-intensità di lavorazione per valutare la velocità di degradazione della sostanza organica e la permanenza delle frazioni organiche più labili (*fPOM*) nel suolo (Figura 2). Studi comparativi indicano che gli effetti positivi delle pratiche conservative come l'impiego di colture di copertura sono fortemente dipendenti dal tipo di suolo su cui vengono utilizzate (Bonifacio et al., 2024).

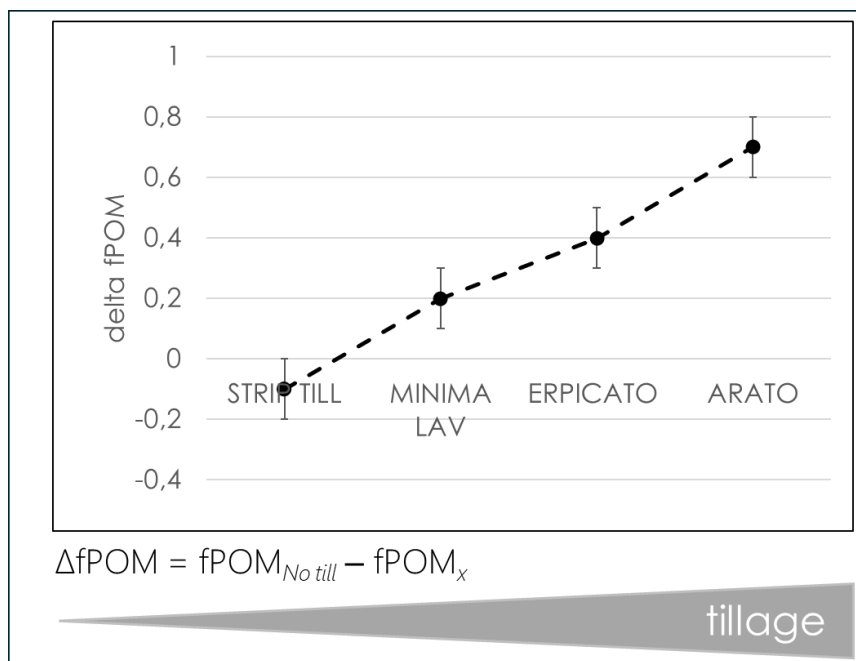


Figura 2. Effetto dell'intensità di lavorazione sulla perdita della frazione organica più labile (*fPOM*) (dati personali, Celi).

Le colture di copertura o cover crops che si intercalano tra le colture principali possono costituire un'importante fonte di carbonio in termini di biomassa vegetale. La produzione continua di essudati radicali, seppur possa contribuire allo stock di carbonio organico del suolo solo in misura minore, supporta la vita del suolo. Rotazioni diversificate e mix di cover crops aumentano la diversità del suolo, creando comunità più complesse e resilienti di organismi, che contribuiscono a un maggiore *biocycling* degli elementi nutritivi e a una maggiore attività biologica. L'apporto di biomassa vegetale incrementa il contenuto di carbonio organico e favorisce un aumento temporaneo della disponibilità di azoto e fosforo. Tuttavia, l'entità di tali effetti dipende dalla specie utilizzata, dal rapporto C/N dei residui e dalle modalità di gestione. In sistemi colturali complessi, come la risicoltura, le colture di copertura contribuiscono a un equilibrio dinamico tra accumulo e mineralizzazione del carbonio, migliorando l'efficienza d'uso dei fertilizzanti e riducendone l'applicazione anche del 20-30% della dose consigliata (Litzano-Toledo et al., 2022). L'effetto è più evidente rispetto all'uso di cover crops in colture aerobiche come il frumento o il mais. Poesio et al. (2025) hanno infatti mostrato in una rotazione frumento-mais di 10 anni che cover crops e no-tillage non aumentano necessariamente lo stock totale di carbonio organico del suolo fino a 60 cm di profondità, ma modificano la distribuzione e la forma del carbonio organico lungo il profilo del suolo. I sistemi con cover crops favoriscono l'accumulo di SOC in forme più labili e strutturalmente protette nello strato superficiale, mentre una quota rilevante di carbonio (oltre la metà) è comunque immagazzinata negli strati più profondi, indipendentemente dal sistema di gestione.

In questo contesto, molto importante è anche valutare gli effetti del cambiamento climatico

stesso sull'accumulo di carbonio. Boiloiun et al. (2023) riportano un impatto positivo significativo sulla variazione del carbonio, con un effetto medio del +4,6%. Questo effetto può essere probabilmente associato alla presenza dell'arricchimento di CO₂ nella maggior parte delle combinazioni esaminate. Al contrario, Díaz-Martínez et al. (2024) concludono che il cambiamento climatico e l'aridificazione in corso potrebbero comportare perdite di carbonio impreviste nelle zone aride di tutto il pianeta, e che il ruolo protettivo dei minerali potrebbe non attenuare tale processo. Tuttavia, i dati disponibili sugli effetti diretti individuali e combinati del cambiamento climatico sul carbonio organico sono ancora molto limitati. Sono quindi necessari ulteriori studi per comprendere meglio tali effetti, in particolare nei diversi usi del suolo e in differenti condizioni climatiche e tipi di suolo. Ciò permetterebbe di affinare la comprensione dei meccanismi che controllano la dinamica del carbonio organico e di sviluppare proiezioni più accurate delle sue variazioni in risposta al cambiamento climatico globale.

In particolare, è necessario comprendere meglio la risposta delle diverse frazioni di carbonio organico agli effetti del cambiamento climatico, inclusi i vari fattori che influenzano i tassi di decomposizione della sostanza organica. Ad esempio, il cambiamento climatico influisce simultaneamente sugli input di carbonio organico attraverso la produzione di biomassa vegetale e sulla decomposizione del carbonio organico: il riscaldamento può aumentare la biomassa vegetale, ma può anche accelerarne la decomposizione; livelli elevati di CO₂ possono stimolare la crescita delle piante, mentre si prevede abbiano un effetto minimo sulla decomposizione del carbonio organico del suolo.

D'altra parte, i risultati indicano che gli effetti indiretti associati al cambiamento climatico, come gli incendi boschivi o la riduzione della copertura nevosa, possono avere un impatto più rilevante sul carbonio organico del suolo rispetto agli effetti diretti. Tuttavia, i dati disponibili sono scarsi e i risultati attuali dovrebbero essere confermati da ulteriori studi sperimentali. Nel caso degli incendi boschivi, inoltre l'elevata variabilità di tutte le condizioni che ne determinano la severità rendono i risultati degli studi di campo difficilmente trasferibili ad altre situazioni. In condizioni maggiormente controllate, come nel caso del fuoco prescritto, Gamba et al. (2025) non hanno evidenziato danni al suolo e alle piante né diminuzioni dello stock di carbonio del suolo, quando la pratica è ben gestita.

Rizosfera, nanotecnologie, microrganismi benefici e biostimolanti

La rizosfera è un ambiente notevolmente dinamico, in cui interagiscono radici, microrganismi e cicli dei nutrienti. Recentemente ci si è focalizzati sull'aumentare le interazioni all'interfaccia suolo-pianta-microbioma al fine di ottimizzare l'efficacia dei fertilizzanti e dei prodotti per la protezione della pianta, limitando al contempo la dispersione e la contaminazione di zone di suolo non interessate dalle radici. Favorire l'attività rizosferica significa aumentare la salute del sistema suolo-pianta con importanti implicazioni per la salvaguardia dell'intero ecosistema.

In questo contesto, largo impiego hanno trovato le nanotecnologie, che offrono un potenziale trasformativo per la gestione dei nutrienti in agricoltura attraverso nanofertilizzanti e sistemi nano-delivery, capaci di migliorare la disponibilità, l'assorbimento e l'efficienza d'uso dei nutrienti. I nanofertilizzanti sono quindi progettati per migliorare il rilascio e la disponibilità dei nutrienti alle piante grazie a un'elevata superficie specifica e a meccanismi di rilascio controllato. Rispetto ai fertilizzanti tradizionali, i nanofertilizzanti aumentano l'efficienza di uso dei nutrienti e riducono le perdite dovute a volatilizzazione e lisciviazione, sincronizzando il rilascio con la richiesta fisiologica delle colture. Permettono un rilascio controllato dei nutrienti, prolungando la disponibilità nel tempo e migliorando l'assorbimento da parte delle radici o tramite via fogliare. Possono essere applicati sia al suolo sia come spray fogliari, aumentando la flessibilità agronomica. Uno studio su mais ha mostrato che l'applicazione di nanofertilizzanti a 40 mg/L migliora significativamente la crescita

vegetativa, la resa in granella e il peso del seme, rispetto ai trattamenti convenzionali.

Trattamenti con nanoparticelle di ossidi di zinco e altri micronutrienti aumentano il contenuto di N, P, K, Fe e Zn nelle foglie e nella granella di mais, migliorando l'efficienza nutrizionale. L'uso di fertilizzanti nano-incapsulati ha mostrato un aumento del 20–30% dell'efficienza d'uso dei nutrienti e una maggiore resa rispetto ai fertilizzanti tradizionali in colture cerealicole e orticole.

In alcuni casi, l'efficienza nutrizionale può essere migliorata fino al 30–50% con dosi di fertilizzanti significativamente inferiori, mantenendo o superando i livelli di resa ottenuti con fertilizzanti convenzionali, grazie alla maggiore biodisponibilità e controllo del rilascio, portando a una migliore salute dell'ecosistema. Oltre alla resa, le nanotecnologie stanno emergendo come strategia per la biofortificazione delle piante con micronutrienti essenziali come Fe, Zn e Se, favorendo l'accumulo di micronutrienti negli organi edibili delle piante e contribuendo alla qualità nutrizionale dell'alimento. Questa strategia è particolarmente rilevante per combattere le carenze di micronutrienti, migliorando la composizione nutrizionale delle produzioni agricole senza compromettere l'ambiente.

Si è posta molta attenzione anche su microrganismi con effetti benefici, come ad esempio i microrganismi promotori della crescita delle piante (PGPM), che migliorano l'assorbimento dei nutrienti attraverso la fissazione biologica dell'azoto, la solubilizzazione del fosforo, la produzione di fitormoni e altri processi. Faddetta et al (2023) ad es. hanno analizzato un gruppo di actinobatteri con tratti di promozione della crescita delle piante (Plant Growth-Promoting Traits) con l'obiettivo di sviluppare biofertilizzanti innovativi e sostenibili. In particolare, tre ceppi di actinobatteri — *Streptomyces violaceoruber*, *Streptomyces coelicolor* e *Kocuria rhizophila* — sono stati caratterizzati per caratteristiche come la produzione di acido indol-3-acetico (auxina), la solubilizzazione del fosfato, la fissazione dell'azoto e la tolleranza a stress salino e siccità. L'analisi metabolomica ha rivelato un vasto insieme di metaboliti bioattivi, inclusi antibiotici e siderofori, e prove sperimentali hanno mostrato che il trattamento dei semi di pomodoro con questi batteri migliora l'indice di germinazione e la crescita delle piantine, supportando l'uso di tali microrganismi come biofertilizzanti eco-compatibili nell'agricoltura sostenibile.

Mauceri et al. (2024) utilizzano un approccio omico integrato per investigare le vie molecolari attivate nel pomodoro dalla già citata *Kocuria rhizophila*. Tramite analisi trascrittomica, proteomica e metabolomica, gli autori hanno identificato numerosi percorsi metabolici e di regolazione genica, tra cui l'organizzazione della parete cellulare, il metabolismo degli amminoacidi e dei lipidi, e la modulazione del profilo di metilazione del DNA dopo l'inoculazione del microrganismo. Anche classi di metaboliti come amminoacidi, monosaccaridi e intermedi del ciclo dell'acido tricarbossilico sono risultate fortemente modulate, indicando che l'interazione pianta-batterio influenza profondamente il metabolismo energetico e la crescita della coltura.

Innovazioni bio-based e microplastiche

Per garantire la salute del suolo è necessario ridurre la presenza di microplastiche nell'ambiente e nel suolo. Ad oggi non è possibile quantificare e prevedere l'impatto e le conseguenze negative delle microplastiche sulla salute degli agrosistemi. L'accumulo di microplastiche nei suoli agricoli costituisce una minaccia emergente, con effetti negativi sulla struttura del suolo, sulla funzionalità radicale e potenzialmente sulla catena alimentare. Ceccanti et al. (2024) hanno analizzato gli effetti delle microplastiche di polietilene (PE-MPs) sulla fisiologia delle piante di fragola e sulla qualità dei frutti. Le piante sono state coltivate in suolo naturale contenente microplastiche di diversa dimensione e concentrazione. I risultati mostrano che le microplastiche più grandi e alla concentrazione più elevata causano gli effetti più negativi, riducendo l'assimilazione di CO₂ per limitazioni stomatiche e aumentando lo stress ossidativo a livello radicale. Sebbene la biomassa totale delle piante non risulti significativamente alterata, la qualità dei frutti è fortemente compromessa, con riduzioni rilevanti di peso, solidi solubili e contenuto di antociani. Nel complesso, lo studio evidenzia che le microplastiche nel suolo possono alterare la funzionalità radicale e i processi fisiologici della pianta, con

conseguenze negative sulla qualità nutrizionale e commerciale dei frutti, sottolineando il potenziale

rischio per i sistemi agricoli.

Diventa quindi fondamentale trovare soluzioni alternative all'uso delle plastiche in agricoltura. Lo sviluppo di film pacciamanti bio-based arricchiti con nutrienti rappresenta un'importante innovazione per ridurre l'impatto ambientale dell'agricoltura. Questi materiali mostrano elevata biodegradabilità e rilascio controllato di nutrienti, contribuendo alla sostenibilità dei sistemi colturali.

Conclusioni

Il ripristino della salute dei sistemi suolo-pianta richiede un approccio integrato che combini pratiche di gestione conservativa, innovazioni biologiche e sviluppo di materiali sostenibili. Il paradigma *One Health* fornisce un quadro concettuale efficace per affrontare le sfide legate alla degradazione del suolo, al cambiamento climatico e alla sicurezza alimentare. Sistemi che guardano alla salute del sistema suolo-pianta devono individuare strategie per prevenire gli eventi estremi, aumentare lo stock di carbonio del suolo, favorire un equilibrato ciclo dei nutrienti, gestire le malerbe e le patologie delle piante, garantendo al contempo elevata produttività e prodotti agroalimentari salubri e funzionali. Investire nella salute del suolo significa quindi garantire la resilienza dei sistemi agricoli e la salute delle generazioni future.

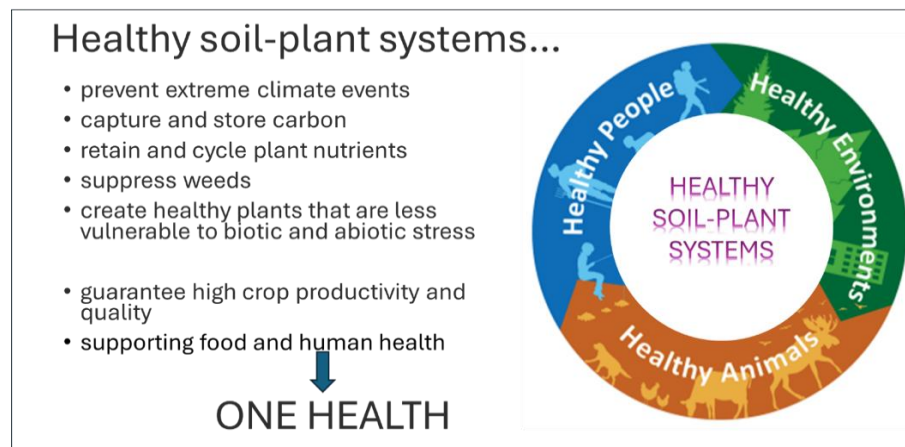


Figura 3. Schema concettuale degli effetti di sistemi suolo-pianta salubri sulla salute dell'essere umano in una visione One Health

Bibliografia

- Beillouin, D., et al. (2023). Global meta-analysis of soil organic carbon sequestration. *Nature Communications* 14, 3700.
- Bonifacio, E., et al. (2024). Soil and management effects on aggregation and organic matter dynamics in vineyards. *Soil and Tillage Research* 240, 106077.
- Ceccanti, B., et al. (2024). Polyethylene microplastics alter root functionality and affect strawberry plant physiology and fruit quality traits. *Journal of Hazardous Materials* 470, 134164.
- Cerli, C., et al. (2012). No-tillage and soil organic carbon stabilization in agricultural soils. *Soil Science Society of America Journal* 76, 430–439.
- Díaz-Martínez, P., et al. (2024). Vulnerability of mineral-associated soil organic carbon to climate across global drylands. *Nature Climate Change* 14, 976–982.
- Faddetta, T., et al. (2023). Bioactive metabolite survey of actinobacteria showing plant growth promoting traits to develop novel biofertilizers. *Metabolites* 13, 374.
- Gamba R. et al., 2025. Prescribed burning has negligible effects on the plant-soil system in *Pinus sylvestris* L. forests of the European Alps. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-97239-1>.
- Lehmann, J., et al. (2020). Soil health and ecosystem services. *Nature Reviews Earth & Environment* 1, 659–674.
- Litzano-Toledo, L., et al. (2022). Cover crops and nutrient cycling in rice-based systems. *Agronomy Journal* 114, 2780–2793.
- Mauceri, A., et al. (2024). Integrated omics approach reveals the molecular pathways activated in tomato by *Kocuria rhizophila*. *Plant Physiology and Biochemistry* 210, 108609.
- Poesio, M., et al. (2025). Effects of cover crops and no-tillage on soil organic carbon distribution in wheat–maize rotations. *Soil & Tillage Research* 212, 105321.
- Six, J., et al. (2002). Stabilization mechanisms of soil organic matter. *Plant and Soil* 241, 155–176.

Il contributo di entomologia e malerbologia per la sostenibilità delle produzioni

Vidotto F.¹, Giunti G.², Zappalà L.³

¹Dipartimento di Scienze Agrarie, Forestali e Alimentari, Università degli Studi di Torino

²Dipartimento di Farmacia, Università degli Studi di Salerno

³Dipartimento di Agricoltura, Alimentazione e Ambiente, Università di Catania

Riassunto

La difesa delle colture da infestanti e artropodi sta attraversando una forte innovazione, spinta dalla diminuzione dei prodotti fitosanitari disponibili, che stimola la ricerca di alternative. Oltre al perfezionamento di tecniche consolidate, si studiano nuovi approcci: tecnologie di *precision farming*, uso di rapporti ecologici tra specie (*cover crop*, *banker plants*), manipolazione comportamentale (biotremologia), sostanze erbicide e insetticide di origine vegetale, nuove formulazioni (nanoformulati) e tecniche di miglioramento genetico (varietà resistenti, RNAi).

Ogni metodo offre vantaggi ma anche criticità, richiedendo integrazione e valutazioni accurate sugli effetti sull'agroecosistema. Secondo un approccio *one health*, diventano essenziali multidisciplinarietà, professionalità, formazione e divulgazione.

Abstract

The protection of crops from weeds and arthropods is undergoing significant innovation, driven by the decline in available pesticides, which is stimulating the search for alternatives. In addition to refining established techniques, new approaches are being studied: precision farming technologies, the use of ecological relationships between species (cover crops, banker plants), behavioural manipulation (biotremology), plant-based herbicides and insecticides, new formulations (nanoformulations) and genetic improvement techniques (resistant varieties, RNAi).

Each method offers advantages but also critical issues, requiring integration and accurate assessments of the effects on the agroecosystem. According to a one health approach, multidisciplinary, professionalism, training and dissemination become essential.

Keywords: *insects, weeds, Integrated Pest Management (IPM), climate change impacts, pesticide resistance, innovative crop protection technology*

Introduzione

La difesa delle colture dagli artropodi e dalle piante infestanti, pur con notevoli differenze legate al tipo di organismi che devono essere gestiti e alle tecniche di lotta impiegate, presenta alcuni elementi in comune per quanto riguarda le principali criticità che devono essere affrontate e i relativi impatti. Un elemento che influenza trasversalmente tutta la difesa dalle avversità biotiche è il cambiamento climatico (CC) in atto. Sia gli artropodi dannosi che le piante infestanti sono generalmente favoriti dal CC, e in particolare dall'aumento delle temperature medie e della concentrazione atmosferica della CO₂. Nel caso delle malerbe, è dimostrato come l'aumento della concentrazione di CO₂ determini generalmente un aumento della capacità competitiva, superiore a quello che lo stesso CC induce nelle colture (Hager, 2016; Peters *et al.*, 2014). Ad essere particolarmente favorite sono soprattutto le specie perennanti, in quanto ad elevate concentrazioni di CO₂ queste allocano una maggiore quantità di biomassa negli organi vegetativi di moltiplicazione quali radici, tuberi, rizomi (Rogers *et al.*, 2008; Ziska *et al.*, 2004). Anche l'aumento di temperatura ha effetti importanti sulle malerbe: tra i fenomeni da segnalare vi è un minore effetto di vernalizzazione indotto dalle temperature invernali più miti e un anticipo delle emergenze primaverili delle plantule. Nel caso degli insetti, si ritiene che a livello globale l'aumento di CO₂ abbia effetti per lo più negativi, soprattutto sui fitofagi, perché, provocando una "diluizione dei nutrienti", determina una riduzione della qualità nutrizionale dei tessuti vegetali (Hamann, Denney *et al.*, 2021; Vidal *et al.*, 2025). Tuttavia, questo fenomeno si può a sua volta tradurre in un aumento compensativo del consumo di materiale vegetale, determinando quindi un maggior danno visibile sulla coltura

(Hamann, Blevins *et al.*, 2021) ed un aumento dei fitofagi polifagi (Welti e Kaspari, 2024). Temperature più elevate tendono in media ad aumentare la pressione dei fitofagi: oltre ad un aumento del consumo di vegetali, gli insetti tendono ad avere cicli più brevi e quindi produrre più generazioni all'anno (Hamann, Blevins *et al.*, 2021).

Strettamente connesso con il CC vi è la diffusione di specie esotiche invasive, sia tra i vegetali che tra gli artropodi. Nel primo caso, diverse piante infestanti che si sono diffuse in ampi territori, interessando sia aree agricole che contesti extra-agricoli, sono state introdotte volontariamente dall'uomo nei secoli scorsi prevalentemente a scopo ornamentale. In ambito più strettamente agricolo, tuttavia, specie esotiche annuali di notevole importanza sono state per lo più introdotte in modo accidentale. Negli ultimi decenni, il fenomeno ha interessato un numero relativamente limitato di specie, sebbene il CC sia ritenuto responsabile dell'aumento della diffusione di specie esotiche che da alcuni secoli si erano naturalizzate nei nostri ambienti ma che non avevano ancora manifestato carattere di invasività, come ad esempio *Sicyos angulatus* L. (Montagnani *et al.*, 2018). Nel caso degli insetti, l'introduzione nel nostro Paese di specie esotiche in grado di determinare impatti significativi in agricoltura avviene con maggiore frequenza rispetto a quanto avviene per le piante. Basti pensare, ad esempio, a specie quali *Drosophila suzukii* Matsumura (Diptera: Drosophilidae), segnalata inizialmente in Trentino nel 2009 (Cini *et al.*, 2014, 2012), ad *Halyomorpha halys* (Stål) (Hemiptera: Pentatomidae), segnalata nel 2012 in Emilia-Romagna (Bariselli *et al.*, 2016) e a *Popillia japonica* Newman (Coleoptera: Scarabaeidae), comparsa per la prima volta nella valle del Ticino nel 2014 (Gotta *et al.*, 2023). Per tutte queste specie, la spinta globalizzazione e il conseguente aumento dei commerci sono alla base della loro comparsa in nuovi areali. L'espansione dei loro areali di diffusione è inoltre favorita dall'aumento delle temperature e molte delle previsioni condotte usando modelli matematici indicano ulteriori future espansioni in molte aree temperate (Pulighe *et al.*, 2025; Sario *et al.*, 2023; Stoeckli *et al.*, 2020).

Un'altra forte criticità è rappresentata dalla diffusione di casi di resistenza a erbicidi e, in misura minore, a insetticidi. Mentre nel secondo caso il fenomeno risulta mediamente più contenuto, nel caso degli erbicidi la resistenza è diventato un problema in grado di condizionare in modo significativo la gestione delle infestanti in vari sistemi colturali di grande rilevanza. La comparsa di resistenze agli erbicidi è determinata da diversi fattori, tra cui: elevata specificità dei meccanismi di azione, ridotto numero di meccanismi di azione disponibili, elevata semplificazione di alcuni sistemi colturali caratterizzati da frequente omosuccessione (es. riso, mais), nei quali vi è una ridotta rotazione di erbicidi, uso degli stessi meccanismi di azione su superfici molto ampie (Délye *et al.*, 2013; Powles e Yu, 2010). In Italia, la resistenza agli erbicidi interessa almeno 23 specie di piante infestanti e almeno quattro meccanismi di azione, con diversi casi di resistenza multipla a più meccanismi di azione (Campagna e Fabbri, 2025; GIRE®, 2025).

Le resistenze sono strettamente legate ad un'altra importante criticità della difesa da piante infestanti e artropodi, ovvero la riduzione del numero di sostanze attive disponibili. Nel corso degli ultimi anni, infatti, sono state ritirate dal mercato numerose molecole fondamentali per il diserbo di importanti colture, mentre la comparsa di nuove sostanze attive è stata estremamente limitata. In particolare, negli ultimi 30 circa non sono stati introdotti nuovi meccanismi di azione, rendendo il diserbo sempre più complesso. La riduzione di sostanze attive è conseguente all'applicazione di normative Europee sempre più stringenti relativamente all'impatto sull'uomo, sugli organismi non bersaglio e, più in generale, nei confronti dell'ambiente.

La riduzione degli impatti delle attività agricole nei confronti dell'ambiente, in particolare, è da considerarsi un obiettivo prioritario e consolidato. Nel nostro paese, la sensibilità per la salvaguardia dell'ambiente ha stimolato la ricerca di soluzioni integrate a ridotto impatto sin dagli anni '70 del secolo scorso e la comparsa dei primi disciplinari di produzione integrata negli anni '80. Da allora, la produzione integrata ha guadagnato sempre maggiore importanza, consolidandosi come sistema produttivo riconosciuto e inserito in un quadro normativo vincolante a livello europeo.

Parallelamente, vi è stato un aumento della consapevolezza del valore di una serie di servizi forniti dall'ambiente (servizi ecosistemici), oltre a quelli di fornitura di derrate alimentari. Molte aziende agricole hanno diversificato le proprie entrate economiche sfruttando programmi regionali ed europei finalizzati, ad esempio, ad aumentare la biodiversità vegetale e animale presente all'interno delle proprie aziende. Se da un lato questa evoluzione è da ritenersi imprescindibile e positiva, dall'altro essa determina un aumento della complessità della gestione delle colture e della difesa in particolare, richiedendo l'integrazione fra prevenzione agronomica, monitoraggio, uso di pratiche agroecologiche, risorse biologiche, chimiche e biotecnologiche, nonché l'uso di tecniche di agricoltura di precisione e di altre soluzioni innovative.

Esempi di soluzioni innovative per la gestione delle malerbe

All'interno del complesso sistema di criticità che caratterizza la difesa dalle malerbe, possono essere identificate alcune possibili soluzioni innovative, molte delle quali già adottate in modo significativo. Fra queste si segnalano: i) agricoltura di precisione; ii) *cover crop*; iii) nuove formulazioni; iv) estratti da matrici organiche; v) metodi genetici.

Agricoltura di precisione

Nel caso delle malerbe, le possibilità offerte dall'agricoltura di precisione (o *precision farming*, PF) sono molteplici e possono essere sintetizzate in due principali approcci distinti, ma a loro volta integrabili. Il primo approccio si basa su interventi di tipo *sito-specifico*, ovvero effettuati solo dove le malerbe sono presenti. Il secondo ha come obiettivo effettuare interventi nel momento più opportuno, ovvero quando si prevede di ottenere la massima efficacia. I due approcci, pertanto, si basano sostanzialmente sui concetti di spazio e di tempo.

Le piante infestanti presentano una variabilità della distribuzione spaziale elevata, che è in genere maggiormente apprezzabile in appezzamenti di grandi dimensioni (Gerhards e Christensen, 2003). Potendo tenere conto di questa variabilità, attraverso la modulazione delle azioni di lotta, gli interventi di tipo *sito-specifico* presentano grandi potenzialità. Tuttavia, essi richiedono la conoscenza della effettiva presenza/assenza delle infestanti nei diversi punti dell'appezzamento. L'ottenimento di questa informazione costituisce attualmente il limite principale alla gestione sito-specifica delle malerbe, in ragione delle difficoltà nello sviluppo di tecnologie in grado di riconoscere in modalità strumentale la presenza di infestanti in diversi contesti (es. su suolo nudo, in presenza della coltura, ecc.). Negli ultimi anni, tuttavia, accanto ad approcci già affermati in altri ambiti, quali ad esempio l'uso di indici di vigore (es. NDVI, NDRE) si stanno sviluppando algoritmi sempre più potenti abbinati a sensori di tipo *imaging* in grado di riconoscere le infestanti utilizzando immagini RGB. Sono già diffusi a livello commerciale numerosi sensori *non-imaging* applicabili a bordo macchina, prevalentemente spettrometrici, in grado di guidare, ad esempio, l'apertura e la chiusura degli ugelli di una barra irroratrice in caso di presenza di vegetazione. Questi sensori sono utilizzabili attualmente soprattutto in assenza della coltura, ad esempio per la terminazione della falsa semina, oppure per trattamenti localizzati nell'interfila delle colture a file distanziate (es. sensori WeedSeeker®, WeedIt®). Oltre a queste applicazioni, sono già disponibili diverse tipologie di macchine sarchiatrici in grado di operare selettivamente lungo la fila, evitando di danneggiare le piante della coltura. Anche nelle sarchiatrici tradizionali, l'uso di sensoristica e di algoritmi in grado di riconoscere la posizione delle singole file, permettendo un rapido spostamento degli organi lavoranti in funzione della presenza della coltura, consentono un significativo aumento delle velocità operative, della superficie e della tempestività di intervento. Applicazioni sito-specifiche possono determinare, rispetto al trattamento eseguito a pieno campo, una riduzione della quantità di erbicidi applicata che può raggiungere e, potenzialmente, superare il 50% (Dammer e Wartenberg, 2007). In una recente sperimentazione condotta in ambiente di risaia in provincia di Pavia, è stata verificata la possibilità

di utilizzare immagini multispettrali acquisite con drone al termine del periodo di falsa semina per generare mappe di prescrizione con le quali effettuare il trattamento di terminazione con erbicidi, prima della semina del riso. In funzione della presenza di malerbe, è stato possibile ridurre la superficie trattata sino a circa il 25%, con una conseguente analogo riduzione delle quantità di erbicidi impiegati (Vidotto e Rognoni, 2022).

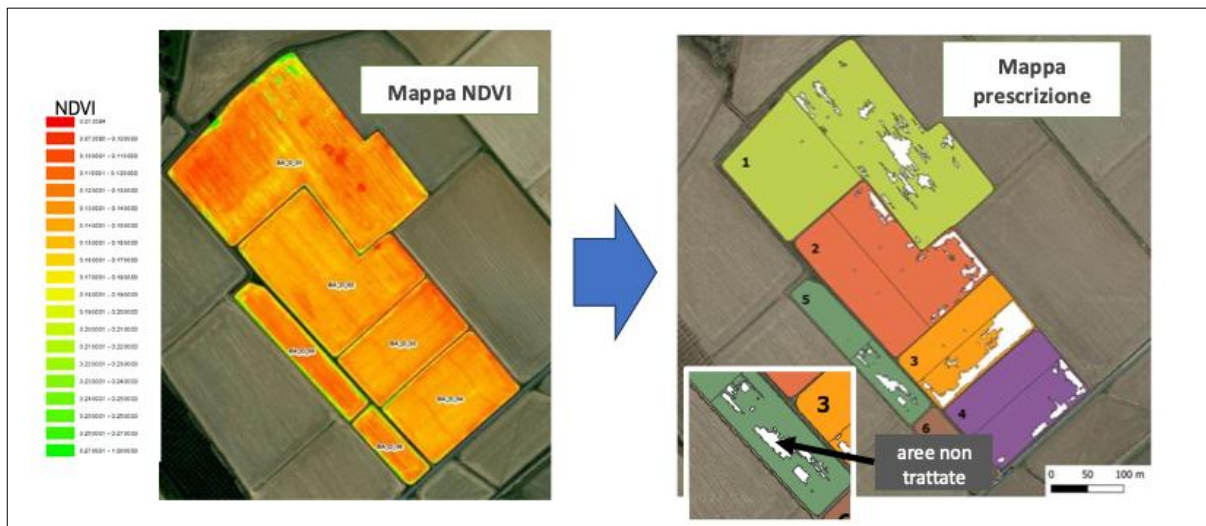


Figura 1. Esempio di uso di mappe di vigore (NDVI) per ottenere mappe di prescrizione per la terminazione della falsa semina prima della semina del riso. Nella mappa a destra, ogni campo è stato suddiviso in un'area trattata in modo ordinario su tutta la superficie e in un'area nella quale le aree da trattare superavano un determinato valore di NDVI, indicatore di una maggiore presenza di infestanti (da Vidotto e Rognoni, 2022, modificato).

Un importante aspetto della biologia delle piante infestanti che può fortemente condizionare la loro gestione è l'epoca di emergenza. Il momento ottimale in cui effettuare i trattamenti di controllo in post-emergenza è, di fatto, un compromesso fra l'esigenza di intervenire sufficientemente presto in modo da avere infestanti nei primi stadi di sviluppo e sufficientemente tardi in modo da intervenire sul maggior numero di piante emerse, limitando al massimo eventuali emergenze successive. Entrambi questi elementi sono potenzialmente prevedibili sviluppando specifici modelli, da integrare eventualmente in DSS (*decision support systems*). Rispetto ad altre avversità biotiche, tuttavia, questo tipo di modellistica ha trovato sinora applicazioni modeste in ambito malerbologico, a causa di numerosi fattori, tra cui la diversificata ed estremamente variabile composizione delle comunità di infestanti, il tipo di suolo, la difficoltà di prevedere l'effetto degli eventi di disturbo (es. le lavorazioni del terreno). Uno dei pochi esempi di modelli di emergenza è rappresentato dal modello AlertInf, sviluppato dall'Università di Padova, che utilizza un approccio idro-termico alla modellizzazione delle emergenze. Il modello è attualmente disponibile per la Regione Veneto su un discreto numero di infestanti (Masin *et al.*, 2010, 2012; Šoštarčić *et al.*, 2021).

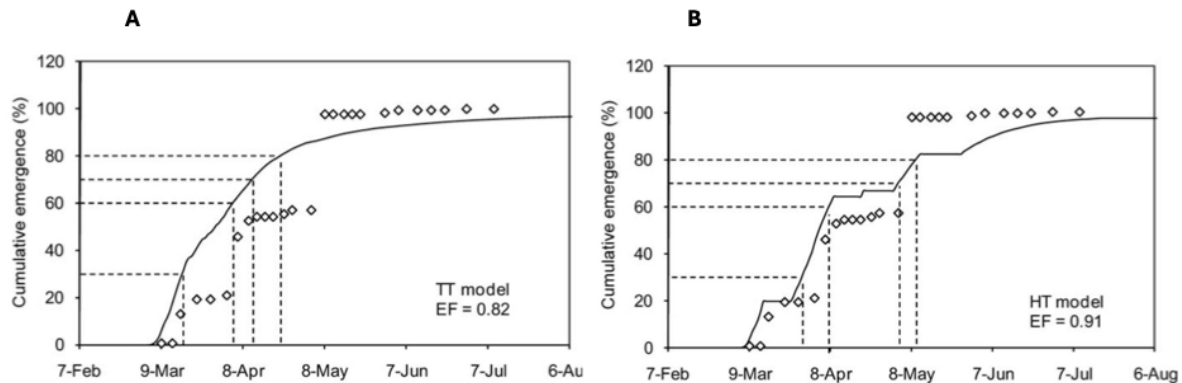


Figura 2. Previsione attraverso modelli delle emergenze di *Abutilon theophrasti* Medik. (linea continua) ed osservazioni reali in campo (indicatori a rombo). In A il modello utilizzato è basato esclusivamente sulla somma termica (modello termico). In B il modello utilizza anche informazioni su contenuto idrico del suolo (modello idrotermico; da Masin *et al.*, 2010, modificato).

Cover crop

Le colture di copertura, oltre a presentare una serie di altri vantaggi sul piano agronomico ed ambientale, sono in grado di esercitare un significativo effetto competitivo nei confronti delle infestanti nel periodo intercolturale, limitando gli apporti di semi di malerbe alla banca semi del suolo. Oltre a questo vantaggio, le *cover crop* possono trovare utilizzo anche con modalità alternative al loro impiego come coltura intercalare. Nel caso del riso in produzione biologica, ad esempio, da diversi anni viene praticata la cosiddetta tecnica della *pacciamatura verde*. Essa consiste nel seminare una coltura di copertura in autunno (per lo più costituita da una miscela di graminacee e di leguminose) cui segue in primavera, con la *cover* ancora in piedi, la semina a spaglio del riso. Immediatamente dopo la semina, la *cover crop* viene terminata con rullatura o con trinciatura e subito dopo si procede alla sommersione della camera di risaia. Nei giorni seguenti, si instaura un processo fermentativo intenso, durante il quale il riso riesce tuttavia a germinare, mentre si riducono significativamente le emergenze delle infestanti. L'azione erbicida sembra essere svolta soprattutto dall'effetto fisico di pacciamatura operato dalla biomassa della *cover crop*, anche se alcune sostanze prodotte durante la fermentazione (ad esempio acido acetico) possono svolgere una parziale azione complementare (Fogliatto *et al.*, 2021; Masserano *et al.*, 2022; Papandrea *et al.*, 2025). Altre applicazioni di tecniche analoghe, basate sulla creazione di un *dead mulch* attraverso la terminazione di colture di copertura si sono dimostrate di notevole interesse anche in altri sistemi colturali (Antichi *et al.*, 2022). Più recentemente, si sta dimostrando interessante l'utilizzo di colture di copertura in consociazione con mais, soia o altre colture, al fine di realizzare un cosiddetto *living mulch* in grado di limitare lo sviluppo delle malerbe senza esercitare eccessiva competizione nei confronti delle infestanti (Verdi *et al.*, 2024). Sebbene la tecnica non risulti ancora pienamente sviluppata, i primi risultati sembrano essere incoraggianti, ma occorre ancora chiarire gli effetti sul consumo idrico ed è necessaria la messa a punto di una adeguata strategia di concimazione.

Nuove formulazioni

Come già descritto, la disponibilità di sostanze attive ad azione erbicida è in graduale riduzione. Per cercare di mantenere elevati livelli di efficacia con le molecole attualmente impiegabili, limitando il più possibile il loro impatto ambientale, tutti i grandi produttori stanno investendo importanti risorse nello sviluppo di nuove formulazioni. Per migliorare il profilo ambientale delle nuove formulazioni, consentendo di ottenere una "vita utile" del formulato commerciale più lunga possibile, vengono in particolare considerati co-formulanti a ridotta tossicità. Uno dei settori in forte espansione è lo sviluppo dei cosiddetti *nanopesticidi*, ovvero formulati costituiti da nanoparticelle (NP), dette anche *nanocarrier*, contenenti la sostanza attiva e disperse in una sospensione colloidale. In alcuni casi è la stessa sostanza attiva ad essere presente in forma di nanoparticella, ma in molti casi vengono

utilizzati *nanocarrier* sui quali la sostanza attiva viene adsorbita o comunque immobilizzata con tecniche diverse. L'uso di formulazioni "nano" può presentare in alcuni casi vantaggi in termini di efficacia, maggiore persistenza della sostanza attiva oppure minore impatto ambientale a causa, ad esempio, della riduzione della volatilità e/o del trasporto nella matrice suolo. In un'ottica di ridurre l'impatto ambientale delle formulazioni, risultano particolarmente interessanti *nanocarrier* costituiti da materiali naturali o comunque a ridotta tossicità (Kusumavathi *et al.*, 2025; La Iacona *et al.*, 2025). Tra le diverse tipologie di *nanocarrier* risultano interessanti soprattutto quelli a base minerale e in particolare le nano-argille. Queste presentano il grande vantaggio di avere una tossicità intrinseca praticamente nulla e di essere reperibili in grandi quantità a prezzi contenuti. Le nano-argille possono richiedere l'applicazione di un *coating* di protezione per migliorare le dinamiche di rilascio della sostanza attiva. Interessanti risultati sono stati ottenuti in Italia con una nanoformulazione dell'erbicida dicamba, nella quale la sostanza attiva è stata adsorbita su un tipo di montmorillonite, successivamente ricoperta da un *coating* di carbossimetilcellulosa (CMC). Con questa formulazione sono stati ottenuti risultati di efficacia sulle malerbe confrontabili con un formulato commerciale di riferimento, ma con una riduzione delle perdite per volatilizzazione e della mobilità dell'erbicida nel suolo (Granetto *et al.*, 2022).

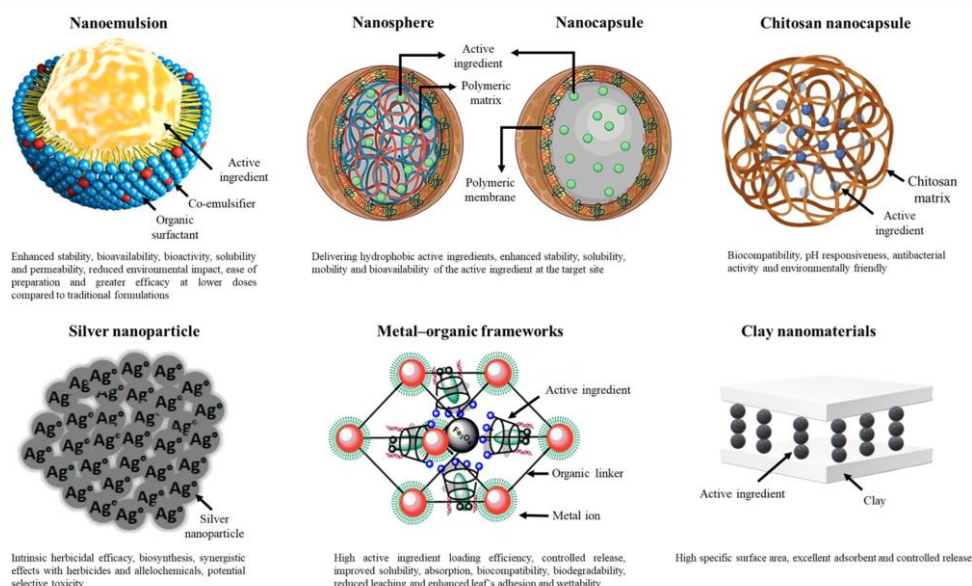


Figura 3. Principali strutture di nanoerbicidi e bionanoerbicidi (La Iacona *et al.*, 2025).

Estratti da matrici organiche

La caratteristica di alcune piante di inibire lo sviluppo di altre piante attraverso la produzione di sostanze di varia natura è nota da molto tempo e viene indicata con il termine generico di *allelopatia*. Nel corso dei decenni, sono stati condotti numerosi studi sulle possibili applicazioni dell'allelopatia per la gestione delle infestanti e nella produzione di "bioerbicidi" che possono potenzialmente offrire il vantaggio di una maggiore sicurezza ambientale. Tuttavia, le applicazioni realmente significative sono ancora relativamente limitate, a causa di una serie di fattori intrinseci che ne riducono fortemente le potenzialità, come la biodegradazione e il fatto che il tipo e la concentrazione delle sostanze allelopatiche rilasciate dipendano sia dalla pianta sia dalle condizioni ambientali, spesso difficili da controllare (Scavo e Mauromicale, 2021). Inoltre, sebbene la breve permanenza delle sostanze allelopatiche sia positiva dal punto di vista ecotossicologico, spesso la loro persistenza è eccessivamente limitata, considerato che un erbicida deve mantenere un'efficacia sufficiente nel tempo per risultare realmente utile (Kostina-Bednarz *et al.*, 2023; Motmainna *et al.*, 2021).

Un ambito interessante per la ricerca di soluzioni alternative al diserbo chimico è lo studio dell'effetto erbicida di estratti ottenuti a partire da materiali di scarto, quali ad esempio sottoprodotti della lavorazione industriale di materiale vegetale. Anche in questo caso valgono i limiti già indicati. Tuttavia, merita rilevare che attualmente sono allo studio tecniche innovative di estrazione a più ridotto impatto ambientale rispetto all'uso di solventi organici, come ad esempio l'uso di estrazione in acqua sub-critica (*sub-critical water extraction*, SWE), tecnica che permette di ottenere elevati livelli di estrazione di alcuni composti con potenziale allelopatico (es. polifenoli) e che può essere abbinata ad altre tecniche fisiche, come ad esempio l'uso di ultrasuoni, per aumentarne ulteriormente l'efficienza di estrazione (Cravotto *et al.*, 2022). In alcuni studi recenti, è stata avviata la valutazione dell'efficacia erbicida di estratti di sottoprodotti della lavorazione del caffè e di tralci di vite (Beltramo *et al.*, 2024)

Metodi genetici

Vi sono diversi tratti funzionali delle colture che potenzialmente possono essere sfruttati nel miglioramento genetico finalizzato ad aumentare la tolleranza nei confronti della competizione da parte delle malerbe. Tra queste si possono citare lo sviluppo radicale, la rapidità di emergenza, la capacità di determinare un rapido ricoprimento del suolo, la produzione di sostanze allelopatiche. Sebbene siano stati fatti vari tentativi di miglioramento genetico relativamente a questi caratteri, nel corso degli ultimi decenni la ricerca si è comunque principalmente concentrata sullo sviluppo di varietà resistenti ad erbicidi che altrimenti non sarebbero selettivi per la coltura. Un classico esempio è lo sviluppo di varietà OGM di mais e soia resistenti a glifosate (tecnologia RoundupReady®), che hanno rivoluzionato, semplificandola, la gestione delle infestanti in queste due colture in vaste aree del mondo, in particolare nel nord e sud America (Nandula, 2019). Nel contesto europeo, di fatto, non è ammessa la coltivazione di varietà OGM, ma è possibile l'impiego di varietà non transgeniche che siano state modificate con tecniche di mutagenesi classica (es. EMS, radiazioni). In Italia, il riso è la coltura per la quale è disponibile il maggior numero di varietà modificate per la resistenza ad erbicidi. Queste varietà, coltivate su una parte significativa della superficie a riso, devono il loro successo soprattutto al fatto che in questa coltura una delle infestanti-chiave è il riso crodo, ovvero una forma selvatica del riso coltivato, con il quale condivide buona parte delle caratteristiche fisiologiche, inclusa la sensibilità agli erbicidi. Non sono pertanto disponibili (almeno sino ad oggi) erbicidi selettivi in grado di controllare il riso crodo senza danneggiare il riso coltivato. Per il controllo del riso crodo (e di altre infestanti importanti) possono essere impiegate varietà tolleranti all'inibitore dell'ALS imazamox (sistema Clearfield®), affiancate da varietà ibride tolleranti allo stesso erbicida (sistema FullPage®), oppure varietà tolleranti agli inibitori dell'ACCasi ciclossidim (sistema Provisia®) e quizalofop-p-ethyl (sistema MaxAce®). Tutte e tre le molecole non sono selettive nei confronti delle varietà convenzionali. Le varietà Clearfield® (nell'uso indicate con la sigla CL), che hanno permesso per la prima volta il controllo in post-emergenza del riso crodo, hanno fatto registrare una rapida diffusione sin dalla loro introduzione nel 2006. Queste tecnologie hanno permesso un notevole miglioramento della gestione delle malerbe in risaia e costituiscono attualmente uno degli ambiti nei quali si stanno investendo più risorse. Pur presentando indubbi vantaggi, questo approccio non è però privo di rischi, in quanto l'uso ripetuto degli stessi erbicidi comporta un aumento della possibilità di selezionare popolazioni di infestanti resistenti. Già alcuni anni dopo l'introduzione di varietà CL in Italia, sono state individuate numerose popolazioni di riso crodo resistenti all'imazamox (Scarabel *et al.*, 2012), che tuttavia possono essere controllate ricorrendo a varietà resistenti ad erbicidi inibitori dell'ACCasi (sistemi Provisia e MaxAce).

Esempi di soluzioni innovative per la gestione degli insetti

Esempi di soluzioni innovative si possono individuare nelle seguenti strategie di gestione dell'entomofauna. Il **Controllo biologico classico** pur essendo una tecnica con più di un secolo di storia, che consiste nell'introduzione deliberata nelle aree di nuova infestazione di agenti ausiliari coevoluiti (entomofagi o entomo-patogeni) con i relativi ospiti (Stenberg et al., 2021), è nelle ultime decenni oggetto di modifiche di approccio e valutazione. La tecnica è infatti passata, dal momento del suo avvio a fine del 1800 con l'introduzione in California dall'Australia del Coleottero Coccinellide *Rodolia* (= *Novius*) *cardinalis* (Mulsant) per il controllo del Monophlebidae *Icerya purchasi* (Maskell) (seguito poi nel 1901 dall'introduzione dello stesso predatore in Italia a opera di A. Berlese), poi seguita da molte altre introduzioni in quella che è stata definita da Heimpel e Cock (2018) "Era dei benefici". Agli inizi degli anni '80 del secolo scorso le giustificate preoccupazioni sulla perdita di biodiversità e sulla sua protezione hanno dato avvio alla cosiddetta "Era dei rischi" che ha comportato una riduzione delle introduzioni, l'avvio degli studi sui rischi nonché lo sviluppo di modelli per la valutazione degli stessi. Questa fase, che in Italia si è addirittura tradotta in un blocco totale delle introduzioni si è trasformata nell'Era attuale che è quella dell'"equilibrio rischi-benefici" caratterizzata da un numero intermedio di introduzioni, più valutazioni post-rilascio e lo sviluppo di modelli di valutazione rischi/benefici.

Grazie al DPR 102 del 2019 e al Decreto del Ministero dell'ambiente del 2020 che stabilisce i criteri per l'immissione sul territorio italiano di specie alloctone e completa il quadro normativo per l'introduzione di specie alloctone per il controllo biologico come nel caso della recente introduzione del parassitoide *Ganaspis kimorum* (Buffington) (Hymenoptera: Figitidae) per il controllo biologico del moscerino dei piccoli frutti (Fellin et al., 2023). Questo parassitoide inizialmente descritto come *Ganaspis brasiliensis* (Ihering) comprendeva diversi gruppi genetici, tra i quali i gruppi G1 e G3 ora riconosciuti come due specie distinte, rispettivamente *G. kimorum* e *Ganaspis lupini* (Buffington) (Sosa-Calvo et al., 2024). Sebbene le due specie risultino quasi indistinguibili a livello morfologico, *G. lupini* ha una gamma di ospiti ampia ed è quindi meno adatto al controllo biologico classico di *D. suzukii* rispetto a *G. kimorum* che presenta un elevato grado di specificità (Stahl et al., 2024). Nell'ambito del **controllo biologico aumentativo** le specie allevate e rilasciate non variano molto (Van Lenteren, 2012), tuttavia numerosi sono gli studi negli ultimi anni sugli effetti migliorativi di fonti alimentari addizionali quali prede alternative, sostanze zuccherine derivate da fitomizi o da piante (*banker plants* e/o consociazioni), sia durante le fasi di allevamento che dopo il rilascio in campo (Urbaneja-Bernat et al., 2024). Altre ricerche riguardano: (i) la selezione di predatori resistenti a prodotti fitosanitari in un quadro di IPM (Balanza et al., 2021) o (ii) la definizione di modelli di simulazione dei rilasci (Rakesh et al., 2025), e (iii) prove di rilasci meccanizzati di entomofagi per agevolare la dispersione, per accrescere l'uniformità di distribuzione, per il trattamento di ampi comprensori e/o di zone difficili da raggiungere in altro modo (Moretti e Schmidt-Jeffris, 2025).

Nell'ambito del **controllo biologico conservativo** o della valorizzazione dell'aumentativo, numerosi sono gli studi che riguardano l'impiego di piante compagne o più in generale di biodiversità funzionale, che fornendo risorse trofiche, ospiti alternativi e siti di rifugio, migliorano i servizi ecosistemici di biocontrollo (Tooker et al., 2020). Nell'ambito del **controllo microbiologico**, fatte salvo alcune eccezioni, sono ancora abbastanza limitati i formulati commerciali a base di microrganismi entomopatogeni. La ricerca di nuovi ceppi o specie entomopatogene è sempre attiva e potrà essere supportata anche da un nuovo regolamento europeo (Reg. EC 2022/1438) che rende più semplice il percorso autorizzativo di formulati a base di microrganismi. Tra le più interessanti prospettive va citato l'impiego di funghi promotori della crescita e funghi entomopatogeni endofiti per stimolare le difese della pianta (Panwar e Szczepaniec, 2024). Rimanendo nell'ambito del controllo microbico, interessanti risultati sono stati registrati a seguito dell'uso combinato di microrganismi agenti di biocontrollo e bioinsetticidi a base di *Bacillus thuringiensis*. Inoltre, interessanti prospettive si aprono con il controllo simbiotico che ha applicazioni diverse a seconda

del meccanismo di simbiosi su cui interviene. Come nel caso del controllo della cimice asiatica, *H. halys*, tramite eliminazione del batterio simbiote *Candidatus pantoea carbeki* utilizzando prodotti ad effetto battericida (Gonella *et al.*, 2019). Questo approccio prevede l'impiego di sostanze antibatteriche sulle uova di cimice asiatica al fine di impedire la trasmissione dei simbionti alla generazione successiva e quindi determinare la riduzione della popolazione del fitofago. Difatti, questi batteri sono trasmessi dalla madre alla progenie sulla superficie esterna del corion delle uova e sono essenziali per la crescita, lo sviluppo e la sopravvivenza dell'insetto, poiché le cimici prive di simbionti mostrano solitamente una ridotta sopravvivenza e fitness anche in pieno campo (Dho *et al.*, 2025). I trattamenti di questo tipo risultano inoltre compatibili con tecniche di controllo biologico classico (Orrù *et al.*, 2023). Nell'ambito delle sostanze insetticide di origine naturale alcune di origine microbiologica e vegetale sono ormai di consolidato utilizzo mentre molto numerosi sono gli studi su vari estratti e oli essenziali, alcuni **estratti vegetali** anche derivanti da scarti di lavorazione (scarti del caffè o di potatura verde) con il valore aggiunto del riuso di sostanze altrimenti da smaltire. Tutto ciò è testimoniato da una tendenza sempre in crescita delle pubblicazioni sui cosiddetti "botanicals" sia in termini di effetti target (Isman e Norris, 2024) che non target (Giunti *et al.*, 2022), ma purtroppo scarsamente accompagnati da successive applicazioni commerciali (Giunti *et al.*, 2023). In questo contesto l'impiego di formulazioni innovative e di nano-tecnologie sembra una strategia promettente per implementare l'efficacia, così come la selettività, e al contempo garantirne un'applicabilità in contesti operativi (Modafferi *et al.*, 2024).

Altri strumenti nella gestione sostenibile dei parassiti sono i feromoni con un uso ormai consolidato in alcuni contesti produttivi e su alcuni fitofagi anche grazie a miglioramenti tecnologici (come ad esempio i diffusori tramite aerosol). Non tutti gli insetti comunicano con segnali chimici ma alcuni lo fanno con segnali fisici come le onde vibrazionali (Nieri *et al.*, 2021) come nel caso delle cicaline (Hemiptera Auchenorrhyncha), motivo per cui diverse sono le applicazioni ancora a livello sperimentale di vigneti vibrazionali che simulando il segnale interferiscono con il normale comportamento di questi dannosi insetti vettori. Passando a livello molecolare, numerose sono gli studi sulla tecnica dell'RNA interferente ma con criticità di applicazione che stanno nelle modalità di somministrazione e nei percorsi registrativi (Germing *et al.*, 2025).

Il trend delle introduzioni di esotici ci sottopone nuove e continue sfide; è importante la rinnovata possibilità di attuare programmi di controllo biologico classico; sono indispensabili sforzi multidisciplinari per formulare e registrare biopesticidi promettenti; la sostenibilità della difesa e poi della produzione passa dalla formazione continua dei tecnici. E come scriveva Rachel Carson (1962) "Esiste una varietà davvero straordinaria di alternative al controllo chimico degli insetti. Alcune sono già in uso e hanno ottenuto un successo brillante. Altre sono in fase di test di laboratorio. Altre ancora sono poco più che idee nella mente di scienziati fantasiosi, in attesa dell'opportunità di metterle alla prova".

Conclusioni

La difesa delle colture da piante infestanti ed artropodi sta vivendo un periodo di profonda innovazione, sotto la spinta di numerosi fattori. La riduzione del numero di prodotti fitosanitari disponibili, pur costituendo un problema di grande rilievo nell'immediato per la difesa delle colture, è di forte stimolo per la ricerca di soluzioni alternative. Accanto al perfezionamento di tecniche già consolidate, la ricerca sta esplorando nuovi approcci che spaziano dall'uso delle tecnologie di *precision farming*, a tecniche che sfruttano i rapporti ecologici tra le specie (es. *cover crop*, *banker plants*), alla manipolazione comportamentale (es. biotremologia), all'impiego di sostanze erbicide e insetticide di origine vegetale, allo sviluppo di nuove formulazioni (es. nanoformulati) all'utilizzo di tecniche di miglioramento genetico (es. varietà resistenti agli erbicidi, RNAi). Ogni tecnica presenta vantaggi effettivi e potenzialità che meritano di essere esplorate. Nessuna di esse, tuttavia, è priva di aspetti negativi e in alcuni casi un loro utilizzo indiscriminato può portare allo sviluppo di condizioni di ulteriore criticità. Per questo motivo, è indispensabile una integrazione spinta fra le tecniche ed una

attenta analisi degli effetti che queste hanno non solo sugli organismi target principali, ma anche sulle altre possibili avversità biotiche e, più in generale, sull'agroecosistema, secondo un approccio *one health* che prevede un aumento della multidisciplinarietà e della professionalità di tutti i soggetti coinvolti. In questo contesto, diventano sempre più cruciali azioni di formazione e divulgazione.

Bibliografia

- Antichi D., Carlesi S., Mazzoncini M., Bárberi P. 2022. Targeted timing of hairy vetch cover crop termination with roller crimper can eliminate glyphosate requirements in no-till sunflower. *Agronomy for Sustainable Development*, 42 (5): 87. doi:10.1007/s13593-022-00815-2
- Balanza V., Mendoza J.E., Cifuentes D., Bielza, P. 2021. Selection for resistance to pyrethroids in the predator *Orius laevigatus*. *Pest Management Science*, 77(5):2539-2546. <https://doi.org/10.1002/ps.6288>
- Bariselli M., Bugiani R., Maistrello L. 2016. Distribution and damage caused by *Halyomorpha halys* in Italy. *EPP0 Bulletin*, 46 (2): 332–334. doi:10.1111/epp.12289
- Beltramo A., Papandrea G., Bennani Z., Cravotto G., Di Furia I., Vidotto F., Fogliatto S. 2024. Evaluation of herbicidal potential of extracts from pruning leftovers and food processing by products. In M. Bindi, G. Di Miceli & A. Maggio (A c. Di), *Proceedings of the 53rd Conference of the Italian Society of Agronomy* (pp. 104–105). Matera, Italy: Società Italiana di Agronomia (SIA). Recuperato da <https://siagr.it/download/53-convegno-sia-matera-2024/>
- Campagna G., Fabbri M. 2025. Come gestire le resistenze agli erbicidi nei cereali vernini. *L'INFORMATORE AGRARIO*, 81 (5): 39–44.
- Carson R. 1962. Silent spring. *Houghton Mifflin Company*. 368pp.
- Cini A., Anfora G., Escudero-Colomar L.A., Grassi A., Santosuosso U., Seljak G., Papini A. 2014. Tracking the invasion of the alien fruit pest *Drosophila suzukii* in Europe. *Journal of Pest Science*, 87 (4): 559–566. doi:10.1007/s10340-014-0617-z
- Cini A., Ioratti C., Anfora G. 2012. A review of the invasion of *Drosophila suzukii* in Europe and a draft research agenda for integrated pest management. *Bulletin of Insectology*, 65 (1): 149–160.
- Cravotto C., Grillo G., Binello A., Gallina L., Olivares-Vicente M., Herranz-López M., ... Cravotto G. 2022. Bioactive Antioxidant Compounds from Chestnut Peels through Semi-Industrial Subcritical Water Extraction. *Antioxidants*, 11 (5): 988. doi:10.3390/antiox11050988
- Dammer K.-H., Wartenberg G. 2007. Sensor-based weed detection and application of variable herbicide rates in real time. *Crop Protection*, 26 (3): 270–277. doi:10.1016/j.cropro.2005.08.018
- Délye C., Jasieniuk M., Le Corre V. 2013. Deciphering the evolution of herbicide resistance in weeds. *Trends in Genetics*, 29 (11): 649–658. doi:10.1016/j.tig.2013.06.001
- Dho M., Gonella E., Alma, A. 2025. Field evaluation of symbiont-targeted control of *Halyomorpha halys* in hazelnut crop. *Crop Protection*, 187: 106952. doi: 10.1016/j.cropro.2024.106952
- Fellin L., Grassi A., Puppato S., Saggi A., Anfora G., Ioriatti C., Rossi-Stacconi, M. V. 2023. First report on classical biological control releases of the larval parasitoid *Ganaspis brasiliensis* against *Drosophila suzukii* in northern Italy. *BioControl*, 68(1): 1-12. <https://doi.org/10.1007/s10526-022-10174-2>
- Fogliatto S., Patrucco L., Moretti B., Milan M., Vidotto F. 2021. Cover crops as green mulching for weed management in rice. *Italian Journal of Agronomy*, 16 (4): 1850. doi:10.4081/ija.2021.1850
- Gerhards R., Christensen S. 2003. Real-time weed detection, decision making and patch spraying in maize, sugarbeet, winter wheat and winter barley. *Weed Research*, 43 (6): 385–392. doi:10.1046/j.1365-3180.2003.00349.x
- Germing, K., Andrea Diaz Navarrete, C.A.D., Schiermeyer, A., Hommen, U., Zühl, L., Eilebrecht, S., Eilebrecht, E. 2025. Crop protection by RNA interference: a review of recent approaches, current state of developments and use as of 2013. *Environmental Sciences Europe*, 37 (1), art. no. 15. DOI: 10.1186/s12302-025-01052-6
- GIRE®. 2025. Gruppo Italiano di lavoro sulla Resistenza agli Erbicidi. Banca dati sulla resistenza agli erbicidi in Italia. Recuperato 2 dicembre 2025, da <http://gire.ipsp.cnr.it/index.php>
- Giunti G., Benelli G., Palmeri V., Laudani F., Ricupero M., Ricciardi R., ... Campolo O. 2022. Non-target effects of essential oil-based biopesticides for crop protection: Impact on natural enemies, pollinators, and soil invertebrates. *Biological Control*, 176: 105071. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2022.105071>
- Giunti G., Campolo O., Laudani F., Palmeri, V. Spinozzi, E. Bonacucina, G., ... Benelli, G. 2023. Essential oil-based nano-insecticides: ecological costs and commercial potential. In *Development and commercialization of biopesticides* (pp. 375-402). *Academic Press*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-95290-3.00002-9>
- Gotta P., Ciampitti M., Cavagna B., Bosio G., Gilioli G., Alma A., ... Marianelli L. 2023. *Popillia japonica* – Italian outbreak management. *Frontiers in Insect Science*, 3: 1175138. doi:10.3389/finsc.2023.1175138
- Granetto M., Serpella L., Fogliatto S., Re L., Bianco C., Vidotto F., Tosco T. 2022. Natural clay and biopolymer-based nanopesticides to control the environmental spread of a soluble herbicide. *Science of The Total Environment*, 806: 151199. doi:10.1016/j.scitotenv.2021.151199
- Hager H.A. 2016. Effects of elevated CO2 on photosynthetic traits of native and invasive C3 and C4 grasses, 13.
- Hamann E., Blevins C., Franks S.J., Jameel M.I., Anderson J.T. 2021. Climate change alters plant–herbivore interactions. *New Phytologist*, 229 (4): 1894–1910. doi:10.1111/nph.17036
- Hamann E., Denney D., Day S., Lombardi E., Jameel M.I., MacTavish R., Anderson J.T. 2021. Review: Plant eco-evolutionary responses to climate change: Emerging directions. *Plant Science*, 304: 110737. doi:10.1016/j.plantsci.2020.110737
- Heimpel G.E., Cock M.J.W. 2018. Shifting paradigms in the history of classical biological control. *BioControl*, 63 (1), pp. 27 – 37. DOI: 10.1007/s10526-017-9841-9
- Isman M. B., Norris E. J. 2024. Bioinsecticide synergy: The good, the bad and the unknown. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 42: 100583. <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2024.100583>
- Kostina-Bednarz M., Plonka J., Barchanska H. 2023. Allelopathy as a source of bioherbicides: challenges and prospects for sustainable agriculture. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 22 (2): 471–504. doi:10.1007/s11157-023-09656-1
- Kusumavathi K., Rautaray S.K., Sarkar S., Dash S., Sahoo T.R., Swain S.K., Sethi D. 2025. Nano-herbicides a sustainable strategy for weed control. *Plant Nano Biology*, 11: 100132. doi:10.1016/j.plana.2024.100132
- La Iacona M., Scavo A., Lombardo S., Mauromicale G. 2025. The Exploitation of Nanotechnology in Herbicides and Bioherbicides: A Novel Approach for Sustainable Weed Management. *Agronomy*, 15 (1): 228. doi:10.3390/agronomy15010228
- Masin R., Loddo D., Benvenuti S., Otto S., Zanin G. 2012. Modeling Weed Emergence in Italian Maize Fields. *Weed Science*, 60 (2): 254–259. doi:10.1614/WS-D-11-00124.1
- Masin R., Loddo D., Benvenuti S., Zuin M.C., Macchia M., Zanin G. 2010. Temperature and Water Potential as Parameters for Modeling Weed Emergence in Central-Northern Italy. *Weed Science*, 58 (3): 216–222. doi:10.1614/WS-D-09-00066.1

- Masserano G., Moretti B., Bertora C., Vidotto F., Monaco S., Vocino F., ... Sacco D. 2022. Acetic acid disturbs rice germination and post-germination under controlled conditions mimicking green mulching in flooded paddy. *Italian Journal of Agronomy*, 17 (1): 1926. doi:10.4081/ija.2022.1926
- Modafferi A., Giunti G., Benelli G., Campolo O. 2024. Ecological costs of botanical nano-insecticides. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 42: 100579. <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2024.100579>.
- Montagnani C., Gentili R., Citterio S. 2018. *Sicyos angulatus*. In F. Bisi, C. Montagnani, E. Cardarelli, R. Manenti, S. Trasforini, R. Gentili, ... A. Martinoli, *Strategia di azione e degli interventi per il controllo e la gestione delle specie alloctone in Regione Lombardia* (Regione Lombardia)
- Moretti E., Schmidt-Jeffris R.A. 2025. Evaluation of drone and ground releases of *Cryptolaemus montrouzieri* for mealybug (*Pseudococcus maritimus*) control in apples. *Biological Control*, 207: 105805. doi:10.1016/j.biocontrol.2025.105805
- Motmainna Mst., Shukor B A., Md. Kamal Uddin J., Binti Asib N., Mominul Islam A., Hasan M. 2021. Assessment of allelopathic compounds to develop new natural herbicides : A review. *Allelopathy Journal*, 52 (1): 21–40. doi:10.26651/allelo.j/2021-52-1-1305
- Nandula V.K. 2019. Herbicide Resistance Traits in Maize and Soybean: Current Status and Future Outlook. *Plants*, 8 (9): 337. doi:10.3390/plants8090337
- Nieri R., Anfora G., Mazzoni V., Rossi-Stacconi M.V. (2021) Semiochemicals, semiophysicals and their integration for the development of innovative multi-modal systems for agricultural pests' monitoring and control. *Entomologia Generalis*, 42(2): 167-183. doi: 10.1127/entomologia/2021/1236
- Panwar N., Szczepaniak A. 2024. Endophytic entomopathogenic fungi as biological control agents of insect pests. *Pest Management Science*, 80(12): 6033-6040. <https://doi.org/10.1002/ps.8322>
- Papandrea G., Fogliatto S., Palo F.D., Vidotto F. 2025. Green mulching of cover crops in rice: effects on weed germination and emergence. *Advances in Weed Science*, 43e020250037. doi:10.51694/AdvWeedSci/2025;43:00037
- Peters K., Breitsamer L., Gerowitt B. 2014. Impact of climate change on weeds in agriculture: a review. *Agronomy for Sustainable Development*, 34 (4): 707–721. doi:10.1007/s13593-014-0245-2
- Powles S.B., Yu Q. 2010. Evolution in Action: Plants Resistant to Herbicides. *Annual Review of Plant Biology*, 61 (1): 317–347. doi:10.1146/annurev-arplant-042809-112119
- Pulighe G., Lupia F., Manente V. 2025. Climate-Driven Invasion Risks of Japanese Beetle (*Popillia japonica* Newman) in Europe Predicted Through Species Distribution Modelling. *Agriculture*, 15 (7): 684. doi:10.3390/agriculture15070684
- Rakesh V., Karthik R., Chandana C. R., Jayanth B. V., Ajith S. 2025. Unravelling the role of simulation modelling techniques (SMTs) in insect pest management. *Pest Management Science*, ps70378. doi: /10.1002/ps.70378
- Rogers H.H., Runion G.B., Prior S.A., Price A.J., Torbert H.A., Gjerstad D.H. 2008. Effects of Elevated Atmospheric CO₂ on Invasive Plants: Comparison of Purple and Yellow Nutsedge (*Cyperus rotundus* L. and *C. esculentus* L.). *Journal of Environmental Quality*, 37 (2): 395–400. doi:10.2134/jeq2007.0155
- Sario S., Melo-Ferreira J., Santos C. 2023. Winter Is (Not) Coming: Is Climate Change Helping *Drosophila suzukii* Overwintering? *Biology*, 12 (7): 907. doi:10.3390/biology12070907
- Scarabel L., Cenghialta C., Manuello D., Sattin M. 2012. Monitoring and management of Imidazolinone-resistant red rice (*Oryza sativa* L., var. *sylvatica*) in Clearfield® Italian paddy rice. *Agronomy*, 2 (4): 371–383. doi:10.3390/agronomy2040371
- Scavo A., Mauromicale G. 2021. Crop Allelopathy for Sustainable Weed Management in Agroecosystems: Knowing the Present with a View to the Future. *Agronomy*, 11 (11): 2104. doi:10.3390/agronomy11112104
- Sosa-Calvo J., Forshage M., Buffington M. L. 2024. Circumscription of the *Ganaspis brasiliensis* (Hering, 1905) species complex (Hymenoptera, Figitidae), and the description of two new species parasitizing the spotted wing drosophila, *Drosophila suzukii* Matsumura, 1931 (Diptera, Drosophilidae). *Journal of Hymenoptera Research*, 97, 441-470. doi: 10.3897/jhr.97.118567
- Šoštarić V., Masin R., Loddo D., Svečnjak Z., Rubinić V., Šćepanović M. 2021. Predicting the Emergence of *Echinochloa crus-galli* (L.) P. Beauv. in Maize Crop in Croatia with Hydrothermal Model. *Agronomy*, 11 (10): 2072. doi:10.3390/agronomy11102072
- Stahl J. M., Wang X., Abram P. K., Biondi A., Buffington M. L., Hoelmer K. A., et al. 2024. *Ganaspis kimorum* (Hymenoptera: Figitidae), a promising parasitoid for biological control of *Drosophila suzukii* (Diptera: Drosophilidae). *Journal of Integrated Pest Management*, 15(1), 44. doi: 10.1093/jipm/pmae036
- Stoeckli S., Felber R., Haye T. 2020. Current distribution and voltinism of the brown marmorated stink bug, *Halyomorpha halys*, in Switzerland and its response to climate change using a high-resolution CLIMEX model. *International Journal of Biometeorology*, 64 (12): 2019–2032. doi:10.1007/s00484-020-01992-z
- Tooker J. F., O'Neal M. E., Rodriguez-Saona C. 2020. Balancing disturbance and conservation in agroecosystems to improve biological control. *Annual review of entomology*, 65(1): 81-100. doi: 10.1146/annurev-ento-011019-025143
- Urbaneja-Bernat P., Tena A., Rodriguez-Saona C. 2024. Editorial overview: Parasites/parasitoids/biological control (2024)—research advances on plant-derived food sources in biological control. *Current opinion in insect science*, 65 (101248): 1-3. doi: 10.1016/j.cois.2024.101248
- Verdi L., Mancini M., Pathan S.I., Pietramellara G., Orlandini S., Dalla Marta A. 2024. Intercropping of legumes and cereals: a strategy to support food production and improve the resources use of agricultural systems. In M. Bindi & G. Di Miceli (A c. Di), *Proceedings of the 53rd Conference of the Italian Society of Agronomy* (pp. 260–261). Matera, Italy: Società Italiana di Agronomia (SIA). Recuperato da <https://siagr.it/download/53-convegno-sia-matera-2024/>
- Van Lenteren J.C. 2012. The state of commercial augmentative biological control: plenty of natural enemies, but a frustrating lack of uptake. *BioControl*, 57(1): 1-20. doi:10.1007/s10526-011-9395-1
- Vidal M.C., Abarca M., Backe K., Curé A.E., Finke D.L., Koltz A.M., ... Murphy S.M. 2025. What do we know about insect responses to global change? A review of meta-analyses on global change drivers. *Insect Conservation and Diversity*, 18 (6): 900–916. doi:10.1111/icad.12845
- Vidotto F., Rognoni G.L. 2022, novembre 28. Valutazione dell'impiego del diserbo di precisione nei trattamenti di pre-semina in risaia. Recuperato 7 dicembre 2025, da https://www.enterisi.it/servizi/gestionedocumentale/ricerca_fase03.aspx?ID=102929
- Welti E.A., Kaspari M. 2024. Elevated CO₂, nutrition dilution, and shifts in Earth's insect abundance. *Current Opinion in Insect Science*, 65: 101255. doi:10.1016/j.cois.2024.101255
- Ziska L.H., Faulkner S., Lydon J. 2004. Changes in biomass and root:shoot ratio of field-grown Canada thistle (*Cirsium arvense*), a noxious, invasive weed, with elevated CO₂ : implications for control with glyphosate. *Weed Science*, 52 (4): 584–588. doi:10.1614/WS-03-161R

Verso un Futuro Sostenibile: la Transizione del Sistema Alimentare

Galgano F¹., Zotta T¹.

¹ Dipartimento di Scienze Agrarie, Forestali, Alimentari, Ambientali (DAFE.), Università degli Studi della Basilicata

Riassunto

La crescente pressione demografica, il cambiamento climatico, l'aumento delle malattie cronico-degenerative e il manifestarsi di pandemie attestano la necessità di ripensare i sistemi agro-alimentari con un approccio olistico. Il sistema attuale genera circa un terzo delle emissioni globali di gas serra, oltre ai costi nascosti sanitari e ambientali stimati attorno ai 10–15 bilioni di euro all'anno. L'approccio One Health riconosce le interconnessioni indivisibili tra salute umana, animale e ambientale: una chiave per guidare la transizione verso sistemi alimentari sostenibili e resilienti che possano ridurre lo spreco alimentare.

Abstract

Growing demographic pressure, climate change, increasing chronic-degenerative diseases and the emergence of pandemics all point to the need to rethink the global food systems with an holistic approach. The current system generates about one third of global greenhouse gas emissions, as well as hidden health and environmental costs estimated at EUR 10-15 billion per year. The One Health approach recognises the indivisible interconnections between human, animal and environmental health: a key for guiding the transition to sustainable and resilient food systems that can reduce food waste.

Keywords: *food safety, food security, food transition, microbial biodiversity, sustainability*

Introduzione

Promuovere sistemi agroalimentari più equi, sani e sostenibili richiede l'adozione di processi innovativi e tecnologie avanzate che intervengano lungo l'intera filiera, dalla produzione al consumo, supportando politiche che facilitino la transizione verso modelli sostenibili. La qualità, l'innovazione, la sostenibilità e l'etica sono pilastri fondamentali del settore agroalimentare, e devono essere integrati in ogni fase della filiera per garantire un sistema alimentare sano e giusto. Questi temi, in costante evoluzione, rappresentano una sfida cruciale a cui i ricercatori e gli operatori del settore sono chiamati a dare un contributo decisivo. Tali tematiche sono finalizzate a migliorare non solo la salute umana e animale, ma anche a promuovere il cambiamento verso un consumo consapevole e a garantire un sistema alimentare più sostenibile, attraverso la riduzione e valorizzazione degli sprechi e l'adozione di tecnologie a basso impatto ambientale, proteggendo così il pianeta.

L'approccio One Health rappresenta una modalità innovativa nell'affrontare le prossime sfide della salute globale. Questa visione dà il via a un importante cambio di paradigma, e sottolinea quanto l'interconnessione tra la salute umana, quella animale e quella dell'ambiente sia fondamentale.

Sostenibilità e spreco alimentare

Il concetto di «sostenibilità» ha assunto un'importanza cruciale in tutti i settori industriali, particolarmente nel settore alimentare; l'industria food, infatti, ha un impatto significativo sull'ambiente, sulla società e sull'economia. In Europa il tema della sostenibilità ambientale è in continua evoluzione, con l'obiettivo di promuovere un modello alimentare più equo, sano e rispettoso dell'ambiente. Tale finalità richiede lo sviluppo di nuovi prodotti, nuovi impianti di produzione, processi innovativi e tecnologie avanzate che intervengano lungo l'intera filiera agro-alimentare, dalla produzione al consumo, che seguono i principi dell'approccio "One Health", supportando politiche che facilitino la transizione verso un sistema alimentare sostenibile.

Diverse sono le strategie europee finalizzate a promuovere la sostenibilità, tra cui:

- ✓ **Green Deal Europeo:** un insieme di iniziative politiche volte a raggiungere la neutralità climatica entro il 2050, con un focus sulla transizione verso un sistema alimentare sostenibile.
- ✓ **Strategia "Farm to Fork":** una strategia volta a rendere il sistema alimentare europeo più sostenibile, riducendo l'uso di pesticidi e fertilizzanti chimici, promuovendo l'agricoltura biologica e riducendo gli sprechi alimentari.
- ✓ **Etichettatura ambientale:** l'obbligo di fornire informazioni chiare e trasparenti sull'impatto ambientale dei prodotti alimentari, al fine di guidare i consumatori verso scelte più sostenibili. (https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_it).
La promozione di un'alimentazione sostenibile mediante **la nuova doppia piramide della salute e del clima** si ispira al concetto di «One Health» per connettere cultura alimentare, salute delle persone, degli animali e del pianeta.

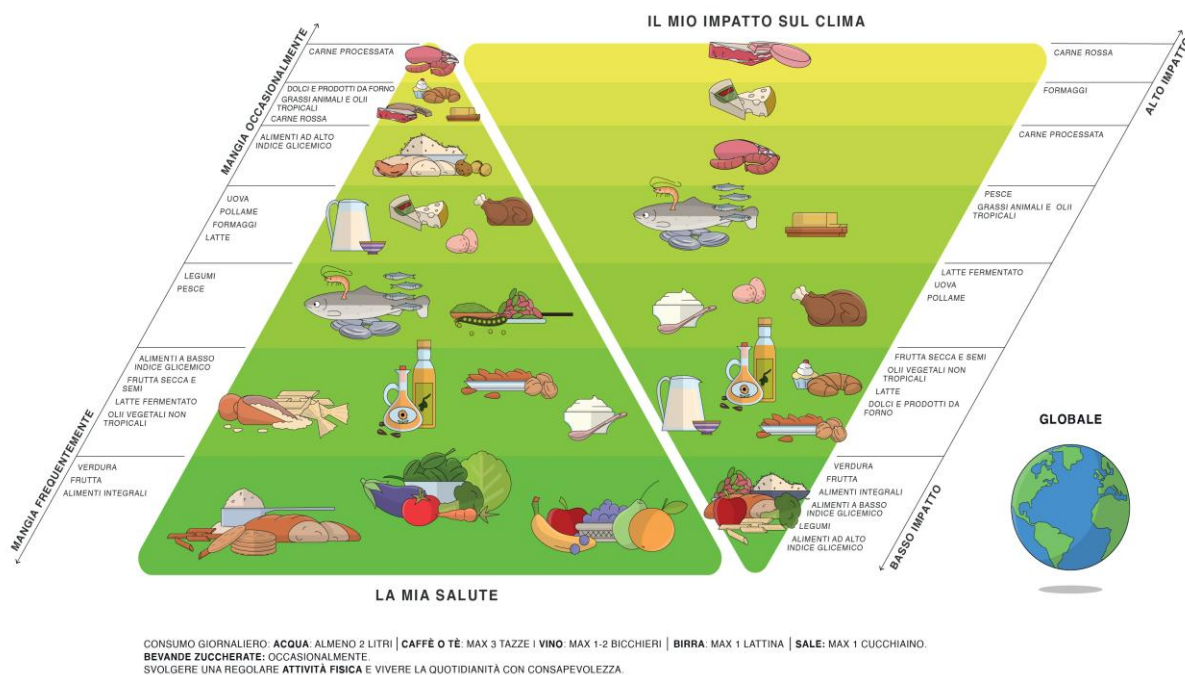


Figura.1. Modello della Doppia Piramide Alimentare

La Doppia Piramide si propone come uno strumento per contribuire **alla transizione verso diete sane e sostenibili**. Una dieta sostenibile è un “codice per un consumo migliore e consapevole”. **Mediante una dieta varia ed equilibrata possiamo migliorare la nostra salute, la nostra longevità e il nostro benessere, riducendo al contempo la nostra impronta di carbonio** (<https://www.barillacfn.com/it/publicazioni/one-health-un-nuovo-approccio-al-cibo/>). Le scelte alimentari sane e sostenibili possono essere praticate ovunque, rispettando le tradizioni culinarie locali e la preferenza individuale, stimolando la varietà e la diversità in tutto il mondo. Se consumati con la giusta frequenza e in porzioni di dimensioni adeguate, tutti gli alimenti possono far parte di una dieta sana e sostenibile. Nel complesso, gli alimenti che andrebbero consumati più spesso per la nostra salute sono generalmente anche quelli con un basso impatto climatico (Garcia et al., 2020). La strada verso un'alimentazione sostenibile comprende indubbiamente la lotta contro lo spreco alimentare. Secondo l'Osservatorio Waste Watcher International dell'Università di Bologna, in occasione della Giornata nazionale di Prevenzione dello spreco alimentare del 5 febbraio 2025, 1,6 miliardi sono le tonnellate di cibo sprecato ogni anno secondo i dati FAO del 2023 sono, pari ad 1/3 del cibo prodotto a livello mondiale. Nel 2024, lo spreco alimentare in Italia ha registrato un incremento preoccupante, con un aumento del 46% rispetto al 2023. L'Italia è il terzo Paese d'Europa per scarti, con 146 kg/ pro-capite, un dato al di sopra della media Ue. Le nostre case rappresentano la principale fonte di spreco alimentare (principalmente frutta fresca,

verdure e pane fresco). Nella ristorazione, buona parte degli sprechi è legata al cibo avanzato nel piatto e che viene gettato. Secondo un sondaggio, solo il 15,5% degli italiani chiede di portare a casa quello che avanza nel piatto (Figura 2).

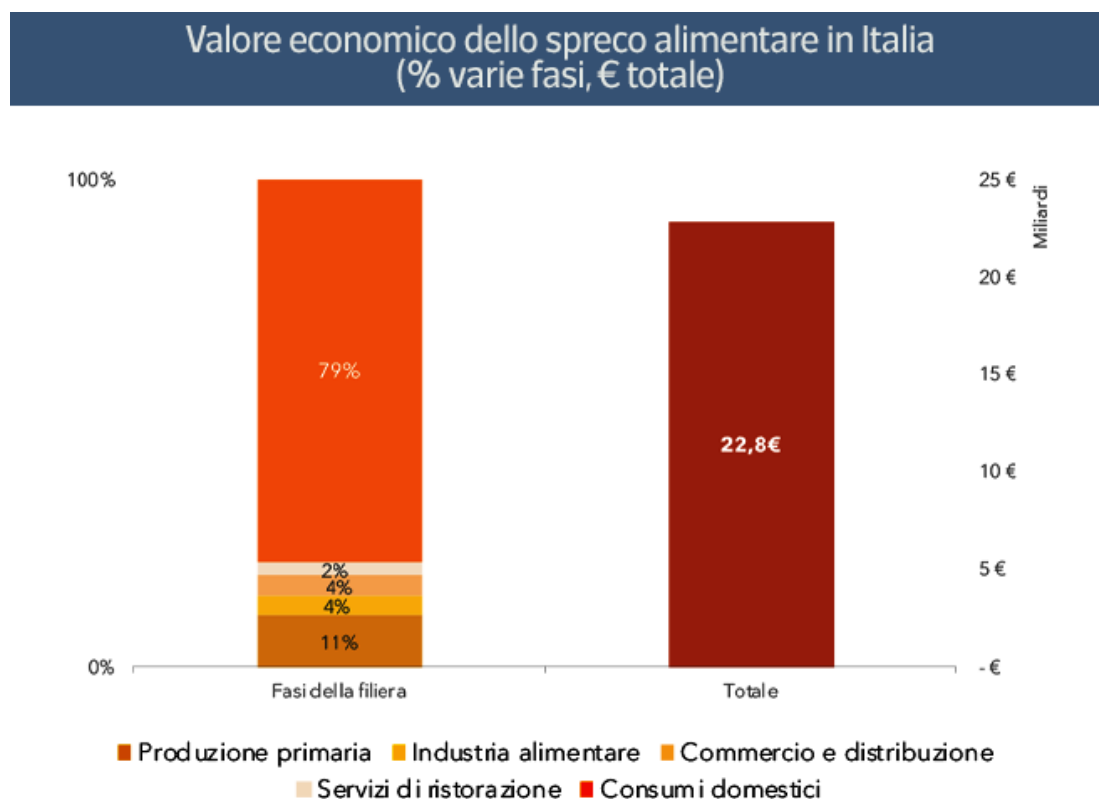
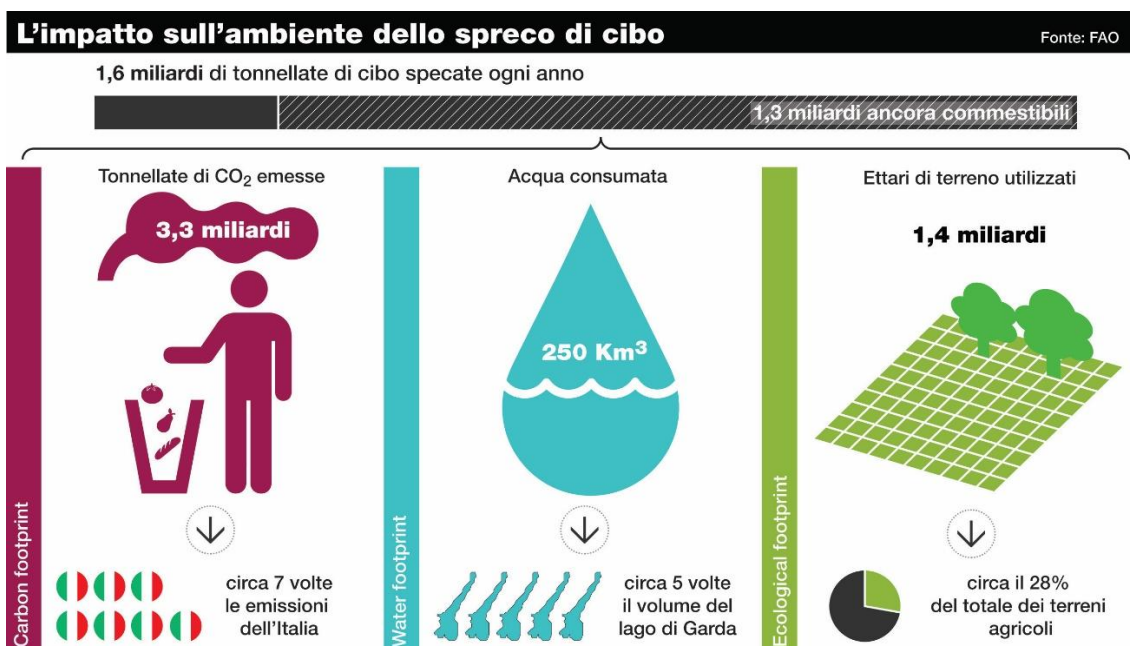


Figura 2. Rappresentazione grafica della scala di valore aggiunto delle diverse categorie di prodotti ottenibili da scarti, sottoprodotti e surplus delle filiere agroalimentari.

Lo spreco alimentare non costituisce solo un problema etico, ma provoca anche grandi danni economici ed enormi danni ambientali. Le stime suggeriscono che l'8-10% delle emissioni globali di gas serra (Green House Gas, GHG) sono associate al cibo che non viene consumato (Figura 3).



STIMA FAO 2023

Figura 3. Stima dati FAO 2023 circa l’impatto sull’ambiente dello spreco di cibo.

La riduzione dello spreco alimentare rappresenta dunque una priorità sia ambientale che economica. Intervenire su questo fronte significa risparmiare risorse, ridurre le emissioni di gas serra e combattere la fame nel mondo.

Le strategie finalizzate alla riduzione degli sprechi per tendere allo “**0 waste**” riguardano:

- il cambio delle strategie di acquisto e di consumo; a livello domestico è importante fare la lista della spesa basata su ciò serve davvero, controllando le scadenze ed evitando acquisti eccessivi, soprattutto di prodotti deperibili;
- l’introduzione di nuove norme che permettano una più facile distribuzione delle eccedenze o del cibo vicino alla scadenza negli scaffali dei supermercati, fino a concretizzare sempre di più l’abitudine di portare a casa quello che avanza al ristorante. L’uso di app e piattaforme antispreco, quali ad esempio “Too good to go” permettono di vendere a prezzi scontato prodotti invenduti;
- la promozione di ulteriori attività educative, a partire dalle scuole, e interventi comportamentali che ne modifichino le abitudini, migliorandone al contempo la comprensione delle conseguenze dello spreco alimentare sull’intero sistema, oltre a incentivarne l’utilizzo dei sottoprodotti, con un approccio integrato al «Risk Management»;
- la previsione a livello sistemico e politico di incentivi fiscali per la donazione del cibo e legislazioni che premiano le imprese che donano anziché buttare;
- il miglioramento della filiera logistica, con investimenti per evitare perdite post-raccolta e durante il trasporto;
- l’adozione di tecnologie a supporto, quali ad esempio etichette intelligenti, indicatori di freschezza o QR code per informazioni dettagliate sui prodotti alimentari, intelligenza artificiale per la gestione degli stock nei supermercati e nella GDO per prevedere la domanda, blockchain per la tracciabilità al fine di garantire trasparenza e ottimizzazione delle filiere agro-alimentari, implementazione di sistemi digitali per il monitoraggio delle scadenze (Moraes et al., 2021; Papargyropoulou et al., 2014).

Alla luce di questa situazione le imprese alimentari si trovano a dover affrontare nuove sfide e adattare i propri processi produttivi e le proprie strategie aziendali per rispondere in modo incalzante alle crescenti esigenze di sostenibilità, riguardanti:

- l'approvvigionamento delle materie prime: la scelta di materie prime provenienti da filiere sostenibili e certificate, che garantiscano il rispetto dell'ambiente e dei diritti dei lavoratori.
- i processi produttivi: l'adozione di tecnologie e processi produttivi a basso impatto ambientale, che consentano di ridurre il consumo di energia, acqua e risorse naturali.
- la logistica e distribuzione: l'ottimizzazione dei trasporti e della distribuzione dei prodotti alimentari, al fine di ridurre le emissioni di CO₂ e gli sprechi.
- il packaging: l'utilizzo di materiali di imballaggio eco-compatibili e riciclabili, che riducano l'impatto ambientale dei prodotti.
- la gestione dei rifiuti: la riduzione, il riciclo e il recupero dei rifiuti prodotti durante le attività industriali.

Sottoprodotti e scarti vengono generati in tutte le filiere agro-alimentari, a tutti i livelli (produzione primaria, lavorazione delle materie prime, trasformazione delle materie prime in alimenti e bevande, distribuzione, vendita e conservazione a livello casalingo). Tra le categorie di scarti vanno infatti considerati non solo i sottoprodotti, ma anche eventuali eccedenze, prodotti difettati o non rispondenti agli standard di produzione, nonché prodotti che hanno superato la data di scadenza.

La ricerca a supporto delle imprese alimentari suggerisce opzioni più sane e sostenibili, nell'ottica di un approccio olistico che tuteli la salute umana, animale e ambientale, quali la formulazione di nuovi ingredienti ed alimenti, ottenuti da sottoprodotti, nuove soluzioni di packaging e shelf-life per la riduzione degli scarti alimentari, strategie per la valorizzazione ed il riuso dei prodotti alimentari, tematiche affrontate anche nel corso di un Convegno organizzato dalla SISTAL a Bari nel 2024, dal titolo "Transizione verso un sistema alimentare sostenibile".

Nell'ottica di valorizzare gli scarti che diventano sottoprodotti se riutilizzati in ambito alimentare, la ricerca è orientata dunque da tempo verso l'individuazione di possibilità innovative per convertirli in risorse, ottenendo nuovi prodotti aventi valore aggiunto, col duplice obiettivo di creare nuovi mercati e di incrementare la sostenibilità economica, ambientale e sociale dell'intero comparto agroalimentare, utilizzando per il loro recupero anche sistemi di estrazione sostenibili "green", che contribuiscono ulteriormente a rendere sostenibile il processo, quali ad esempio i DES (Sportiello et al. 2023).

Al giorno d'oggi, i solventi eutettici profondi (DES) rappresentano una promettente classe di solventi "green" che suscitano una notevole attenzione come alternative ai solventi organici convenzionali. A differenza di molti solventi tradizionali, che presentano problemi di volatilità, infiammabilità, tossicità e persistenza ambientale, i DES offrono un profilo più sostenibile (Smith et al., 2014). I vantaggi principali derivano dalla loro composizione unica: I DES si formano tipicamente mescolando un donatore di legami idrogeno (HBD) e un accettore di legami idrogeno (HBA), il che porta a forti interazioni intermolecolari non covalenti e a una significativa depressione del punto di fusione della miscela risultante rispetto ai suoi componenti (Sportiello et al., 2023).

Tra i sottoprodotti delle filiere agroalimentari si ritrovano ad esempio scarti della lavorazione di frutta e di vegetali (bucce e scarti di pomodoro e patata, scarti dell'estrazione dei succhi, pannelli proteici da semi oleaginosi), quale ad esempio, l'Okara, ossia la polpa residua ricavata dal processo di produzione degli oli e/o delle bevande vegetali, utilizzata secca o umida, aggiunta all'impasto in sostituzione alla farina di frumento in percentuali comprese tra il 10% e il 20% per la fortificazione dei biscotti con composti bioattivi e minerali ed arricchimento in fibre e proteine (Lee et al., 2020; Korkach et al., 2023). Il riutilizzo di sottoprodotti alimentari come ingredienti per la formulazione di nuovi alimenti introduce il concetto di "upcycling", inteso come reimpiego migliorativo dei sottoprodotti alimentari, che consente di apportare un valore aggiunto al prodotto finale dal punto di vista nutrizionale, salutistico o tecnologico (Rakesh e Mahendran 2024).

L'etichettatura dei prodotti alimentari deve garantire la trasparenza delle informazioni al consumatore, al fine di renderlo consapevole di ciò che acquista (Fantozzi e Garattini, 2025).

L'85% dei consumatori non è a conoscenza dell'utilizzo dei sottoprodotti alimentari per la formulazione di nuovi alimenti. Sensibilizzare i consumatori su tematiche ambientali e legate alla sostenibilità e garantire un'etichettatura chiara e completa di informazioni, sono i principali strumenti per avvicinare i consumatori all'acquisto di prodotti riciclati (Grasso & Asioli, 2020).

La fascia tra i 50 e i 75 anni è la più scettica, perché teme che l'utilizzo di sottoprodotti alimentari possa influire negativamente sull'accettabilità di questi prodotti.

A livello di informazioni sul prodotto aggiuntive rispetto a quelle cogenti, su tematiche ambientali o di utilizzo di sottoprodotti nella formulazione di nuovi alimenti, esistono delle certificazioni che fanno riferimento alle etichette ESG (Environmental, Social, and Governance): si tratta di certificazioni o dichiarazioni sui prodotti che indicano il rispetto di criteri legati alla sostenibilità ambientale (E), responsabilità sociale (S) e gestione aziendale etica (G) o di standard certificativi di terza parte "Upcycled Certified" per regolamentare la produzione di alimenti riciclati e valorizzare l'up-cycling di sottoprodotti alimentari, ideati da **Renewal Mill** insieme ad altre start-up (<https://tinyurl.com/yyj4jc62>). L'assenza di una Regolamentazione chiara e specifica in tema di reimpiego di sottoprodotti alimentari crea perplessità tra i produttori, che sono poco incentivati nell'utilizzo di sottoprodotti per lo sviluppo di nuovi alimenti, inducendoli così a scegliere alternative diverse per il riutilizzo dei sottoprodotti. Attualmente infatti la quasi totalità di scarti, sottoprodotti e surplus è trattata come rifiuto, generando spesso problemi ambientali e di smaltimento incontrollato, o in parte riutilizzata nella produzione di compost, biogas/bioetanolo, e nell'industria mangimistica.

Conclusioni

Il sistema alimentare è in continua evoluzione e per affrontare le sfide future è necessario un approccio "One Health" integrato tra le tecnologie e le biotecnologie che deve essere multidisciplinare (conoscenze basate su più discipline), interdisciplinare (relazione tra le varie discipline), transdisciplinare (integrazione delle varie conoscenze per superare i confini).

Il riciclo e la valorizzazione degli scarti rappresentano sicuramente opportunità strategiche per affrontare gli ingenti problemi legati alla sostenibilità delle produzioni agroalimentari, la scarsità di risorse rinnovabili, l'inquinamento ambientale e i cambiamenti climatici. Andrebbe peraltro affrontato il tema legislativo circa l'informazione da fornire in etichetta ai consumatori sull'uso di ingredienti derivanti da sottoprodotti. Rimane indubbiamente un pilastro fondamentale la sicurezza alimentare per la formulazione di alimenti salutistici e sostenibili.

Bibliografia

- Arrieta E.M., Aguiar S. (2023). Healthy diets for sustainable food systems: a narrative review. *Environmental Science Advances* 2, 2023, 684-694.
- Fantozzi P., Garattini S. (2025). Product labels and advertising: are consumers protected or misled?. *2025. Italian Journal of Food Science*, 37-1-15.
- Garcia S.N., Osburn B.I., Jay-Russell M.T. (2020). One Health for Food Safety, Food Security, and Sustainable Food Production. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 4, 4-14.
- Grasso, S. & Asioli, D. (2020). Consumer preferences for upcycled ingredients: A case study with biscuits. *Food Quality and Preference*, 84, 103951.
- Korkach, H., Kotuzaki, O., Breitenmoser, L., Behner, D., Hugi, C., Krusir, G. (2023). Innovative technology of biscuit production based on the use of secondary products of soybean processing. *Journal of Chemistry and Technologies*, 31(1), 128-139.
- Lee, D. P. S., Gan, A. X., Kim, J. E. (2020). Incorporation of biovalorised okara in biscuits: Improvements of nutritional, antioxidant, physical, and sensory properties. *LWT – Food and Science Technology*, 134, 109902.
- Moraes N.V., Lermen F.H., Moraes, N.V., Lermen F. H., M.E.S. Echeveste. (2021). A systematic literature review on food waste/loss prevention and minimization methods. *Journal of Environmental Management*, 286, 11268.
- Papargyropoulou, E., Lozano, R., Steinberger J. K., Wright N., Zaini bin Ujang (2014). The food waste hierarchy as a framework for the management of food surplus and food waste. *Journal of Cleaner Production*, 76, 106-115.
- Rakesh, B., Mahendran, R. (2024). Upcycling of food waste and food loss – A sustainable approach in the food sector", *Trends in Food Science and Technology*, 143, p.104274.
- Smith, E. L., Abbott, A. P., & Ryder, K. J. (2014). Deep Eutectic Solvents (DESs) and Their Applications. *Chemical Reviews*, 114(23), 11060-11082.
- Sportiello, L., Favati, F., Condelli, N., Di Cairano M., Caruso M.C., Simonato B., Tolve, R., Galgano, F. (2023). Hydrophobic deep eutectic solvents in the food sector: Focus on their use for the extraction of bioactive compounds. *Food Chemistry*, 405, 134703

Contributo integrato del miglioramento genetico e delle tecnologie agro-alimentari per cereali più salutari e sostenibili: il caso dell'acrilammide

Masci S.¹, Messia M.C.²

¹DAFNE, Università degli Studi della Tuscia, Viterbo – SIGA, Società Italiana di Genetica Agraria

²Dipartimento di Agricoltura Ambiente e Alimenti, Università degli Studi del Molise, Campobasso – AISTEC, Associazione Italiana di Scienza e Tecnologia dei Cereali

Riassunto

L'acrilammide è un contaminante chimico che si forma naturalmente durante il trattamento termico a cui sono sottoposti molti alimenti. Dal 2002, istituzioni mondiali competenti in materia di sicurezza alimentare hanno promosso attività volte ad aggiornare le conoscenze per una rivalutazione del rischio di questo contaminante di processo. L'Autorità europea per la sicurezza alimentare (EFSA) ha stabilito nel 2015 che la presenza di acrilammide negli alimenti aumenta il rischio di sviluppare un cancro in qualsiasi fascia d'età della popolazione. Il Regolamento (UE) 2017/2158 della Commissione stabilisce misure di mitigazione raccomandate per l'industria alimentare e livelli di riferimento per ridurre la presenza di acrilammide negli alimenti e, di conseguenza, i suoi effetti nocivi sulla popolazione. L'adozione di pratiche agronomiche idonee, la scelta di materie prime/ingredienti a ridotto contenuto di precursori dell'acrilammide, ottenibili anche attraverso processi di miglioramento genetico, l'utilizzo di coadiuvanti tecnologici e/o l'attuazione di modifiche a processi di trasformazione, fino ad interventi post processo possono costituire metodi efficaci per attenuare la formazione di acrilammide.

Abstract

Acrylamide is a chemical contaminant that is formed naturally during the heat treatment of many foods. Since 2002, food safety institutions worldwide have promoted activities aimed at updating knowledge to re-evaluate the risk assessment of this process contaminant. In 2015, the European Food Safety Authority (EFSA) found that the presence of acrylamide in food increases the risk of cancer in all age groups of the population. Commission Regulation (EU) 2017/2158 sets out recommended reduction measures for the food industry and reference values to reduce the presence of acrylamide in food and consequently its harmful effects on the population. The application of appropriate agronomic practices, the choice of raw materials/ingredients with a lower content of acrylamide precursors, which can be obtained by plant breeding procedures, the use of technological adjuvants and/or the implementation of changes in processing operations up to post-processing interventions can be effective methods to reduce the formation of acrylamide.

Keywords: *Asparagine, Acrylamide, Classical and Innovative Breeding, Asparagine Synthetase*

Introduzione

I trattamenti termici sono frequentemente utilizzati nella produzione alimentare per ottenere prodotti sicuri, con una conservabilità prolungata, con migliorate proprietà sensoriali e appetibilità, oltre ad ampliare la gamma di sapori, aromi e consistenze degli stessi. È noto che il riscaldamento disattiva enzimi, distrugge microrganismi e riduce l'attività dell'acqua degli alimenti, permettendo di allungarne la stabilità nel tempo.

La preoccupazione principale derivante dai trattamenti termici è dovuta alla formazione di composti che non sono naturalmente presenti negli alimenti, ma che possono svilupparsi durante i processi di riscaldamento e che producono effetti nocivi, quali effetti mutageni, cancerogeni e/o citotossici. Uno dei composti che desta attenzione è l'acrilammide.

L'acrilammide (Figura 1) è un composto organico a basso peso molecolare, incolore e senza odore, altamente solubile in acqua. Si riscontra nei prodotti amidacei cotti (es. cereali, patate e caffè), e si forma durante le trasformazioni industriali che prevedono temperature superiori a 120°C e condizioni di bassa umidità (Matthäus & Haase, 2016).

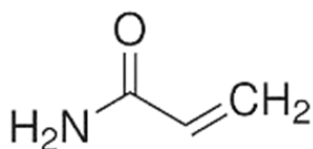


Figura 1. Acrilammide

L'Agenzia Internazionale per la Ricerca sul Cancro nel 1994, la definisce come "probabile cancerogeno per l'uomo" (Gruppo 2A) sostenendo l'ipotesi che per gli animali esposti a certe dosi potrebbe dimostrarsi genotossica e neurotossica (IARC, 1994).

Solo nel 2002 un gruppo di ricercatori svedesi (Tareke et al., 2002) dimostrò la presenza di acrilammide anche in prodotti alimentari cotti, indicando come la sua formazione risultasse temperatura dipendente. Sebbene le vie di sintesi possano essere diverse, l'ipotesi più acclarata è che negli alimenti l'acrilammide si formi dalla reazione tra gli zuccheri riducenti e l'aminoacido asparagina attraverso la reazione di Maillard (Perera et al., 2021) (Figura 2). Asparagina e zuccheri riducenti sono quindi i promotori della formazione di acrilammide per cui diventano gli elementi da controllare per evitare l'avanzamento della reazione di Maillard e quindi lo sviluppo di acrilammide.

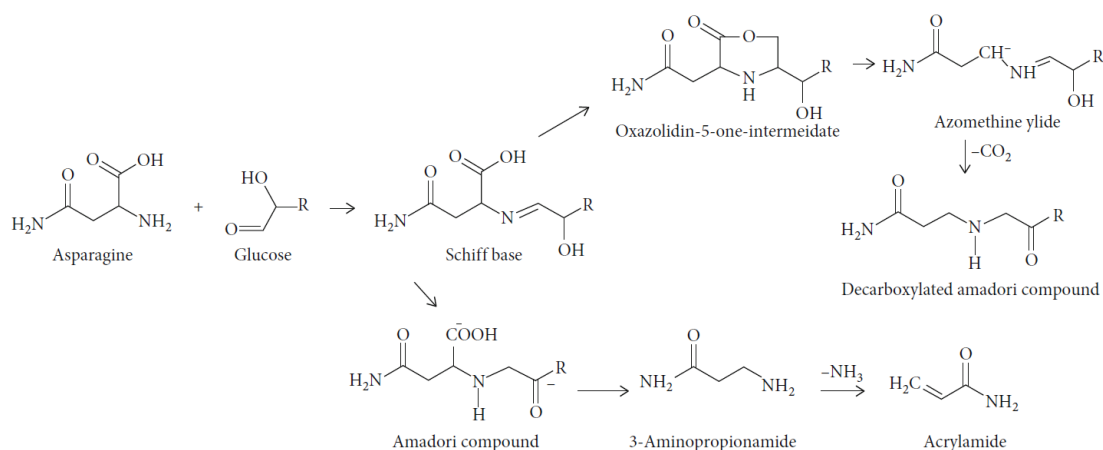


Figura 2. Principale via di formazione dell'acrilammide negli alimenti (Perera et al., 2021)

L'asparagina può decomporsi termicamente mediante deaminazione e decarbossilazione, ma quando è presente una fonte carbonilica, la resa di acrilammide dall'asparagina è molto più elevata; il che spiega l'elevata concentrazione di acrilammide rilevata negli alimenti ricchi di zuccheri riducenti e asparagina libera come patate fritte e prodotti da forno (Mottram et al., 2002; Weisshaar & Gutsche, 2002; Yaylayan et al., 2003).

Effetti fisiologici dell'assunzione di acrilammide

Dalla scoperta dell'acrilammide negli alimenti, numerosi studi hanno iniziato a esplorare il potenziale cancerogeno negli esseri umani.

A livello metabolico l'assunzione di acrilammide porta ad un'alta probabilità di sviluppare mutazioni geniche. Nell'uomo e negli animali, l'acrilammide viene metabolizzata da un enzima noto come CYP2E1 in un metabolita epossido, la glicidammide, che è la causa più probabile delle mutazioni geniche (Ghanayem et al., 2005).

La possibilità di sviluppare mutazioni geniche e tumori è estesa a tutta la popolazione, ma la fascia più esposta è rappresentata dall'infanzia. Considerando il rapporto tra l'assunzione di acrilammide, la quantità limite che può essere assorbita durante il giorno e il peso corporeo, i bambini si trovano nella condizione di assumere maggiormente prodotti con acrilammide che, in relazione al

loro ridotto peso corporeo, può rappresentare un problema maggiore. Sebbene sia stato dimostrato che l'acrilammide abbia effetti cancerogeni sia nei modelli di roditori maschi che femmine, numerosi studi non hanno riportato alcuna associazione statisticamente significativa tra l'assunzione alimentare di acrilammide e vari tumori negli esseri umani, ad esempio cancro al pancreas, alla prostata, al seno, alle ovaie e all'endometrio (Virk et al., 2014).

Gli effetti neurotossici dell'acrilammide sono gli unici effetti che si sono dimostrati dannosi per gli esseri umani tramite esposizione professionale (LoPachin, 2004). I segni clinici della neurotossicità dell'acrilammide sono neuropatie periferiche come intorpidimento e formicolio degli arti superiori e inferiori. L'EFSA ha preso in esame gli effetti nocivi sul sistema nervoso che, però, non sono stati ritenuti motivo di preoccupazione.

Misure di attenuazione

In generale, se una sostanza è genotossica e può danneggiare il DNA, qualsiasi livello di esposizione è tale da determinare una situazione di rischio. Quindi non è possibile definire una dose giornaliera tollerabile di acrilammide per l'uomo. Si ragiona, pertanto, in termini di ALARA.

ALARA è un acronimo del concetto "As Low As Reasonably Achievable" ossia: *l'Operatore del Settore Alimentare (OSA) dovrebbe adottare le misure appropriate per ridurre al minimo la presenza di un dato contaminante in un prodotto finale, tenendo conto non solo del rischio esistente, ma anche di altre legittime considerazioni, come ad esempio i potenziali rischi derivanti da altri contaminanti, le proprietà organolettiche, la qualità del prodotto finito, la fattibilità e l'efficacia dei controlli.*

Nel 2015 FoodDrinkEurope, organo rappresentativo dell'industria alimentare e delle bevande in Europa (<https://www.fooddrinkurope.eu/>), pubblica un documento (toolbox), aggiornato nel 2019, in cui, tenendo conto di quanto riportato circa la tossicità dell'acrilammide nei documenti redatti dalla FAO (WHO/FAO, 2002) e dall'EFSA (EFSA, 2015), traccia delle linee guida e le misure che possono essere attuate nei diversi settori dell'industria alimentare per arrivare a contenere/mitigare il contenuto di acrilammide nei prodotti alimentari (FoodDrink Europe, 2019). Tali indicazioni si rivelano molto utili all'OSA per contribuire alla riduzione di detto contaminante nei prodotti alimentari.

È con il Reg. UE 2017/2158 che vengono "istituite le misure di attenuazione e i livelli di riferimento per la riduzione della presenza di acrilammide negli alimenti" e si evidenziano livelli diversi di acrilammide passando da una categoria di prodotto all'altro (Figura 3). I livelli di riferimento sono indicatori di risultati da utilizzare per verificare l'efficacia delle misure di attenuazione e si basano sull'esperienza e sull'occorrenza del contaminante in grandi categorie di alimenti. Essi dovrebbero essere fissati al livello più basso ragionevolmente raggiungibile con l'applicazione di tutte le misure di attenuazione pertinenti ossia si deve scendere nello specifico in relazione all'alimento che si sta considerando, per cui la patatina frita non è uguale al cereale da colazione. Il Reg. UE 2019/1888 sul monitoraggio della presenza di acrilammide in determinati alimenti riporta un elenco non esaustivo degli alimenti su cui è opportuno effettuare annualmente indagini che attestano il contenuto del contaminante anche in relazione alle misure di attenuazione previste dal Reg. UE 2017/2158. Degli alimenti in elenco quelli da attenzionare maggiormente per il contenuto di acrilammide come diretta conseguenza del trattamento tecnologico di cottura, frittura o tostatura subito, sono le patate (fritte, chips ecc.), il caffè e i suoi sucedanei, ma anche diversi prodotti a base di cereali (cereali da colazione, biscotti ecc.) ed i prodotti destinati alla prima infanzia vista l'età ed il peso corporeo dei soggetti a cui sono destinati.

I livelli di riferimento per la presenza di acrilammide nei prodotti alimentari di cui all'articolo 1, paragrafo 1, sono i seguenti:

Alimento	Livello di riferimento [µg/kg]
Patate fritte a bastoncino pronte per il consumo	500
Patatine (chips) a base di patate fresche e a base di pasta di patate	750
Cracker a base di patate	
Altri prodotti a base di pasta di patate	
Pane morbido	
a) Pane a base di frumento	50
b) Pane morbido diverso dal pane a base di frumento	100
Cerali per la prima colazione (escluso il porridge)	
— prodotti a base di crusca e cereali integrali, cereali soffiati	300
— prodotti a base di frumento e segale ⁽¹⁾	300
— prodotti a base di granturco, avena, spelta, orzo e riso ⁽¹⁾	150
Biscotti e cialde	350
Cracker esclusi i cracker a base di patate	400
Pane croccante	350
Pane con spezie (panpepato)	800
Prodotti simili agli altri prodotti di questa categoria	300
Caffè torrefatto	400
Caffè (solubile) istantaneo	850
Sucedanei del caffè	
a) succedanei del caffè contenenti esclusivamente cereali	500
b) succedanei del caffè costituiti da una miscela di cereali e cicoria	⁽²⁾
c) succedanei del caffè contenenti esclusivamente cicoria	4 000
Alimenti per la prima infanzia, alimenti trasformati a base di cereali destinati ai lattanti e ai bambini nella prima infanzia, esclusi biscotti e fette biscottate ⁽³⁾	40
Biscotti e fette biscottate destinate ai lattanti e ai bambini nella prima infanzia ⁽³⁾	150

⁽¹⁾ Cereali non integrali e/o non a base di crusca. Il cereale presente nella quantità maggiore determina la categoria.

⁽²⁾ Il livello di riferimento da applicare ai succedanei del caffè costituiti da una miscela di cereali e cicoria prende in considerazione la proporzione relativa di questi ingredienti nel prodotto finale.

⁽³⁾ Secondo la definizione del regolamento (UE) n. 609/2013.

Figura 3. Livelli di riferimento di acrilammide nei prodotti alimentari (Reg. UE 2017/2158).

Fattori che influenzano la formazione di acrilammide negli alimenti

I fattori che incidono sulla formazione di acrilammide sono diversi: agronomici, tipologia di ingrediente/materia prima, formulazione, tipo di processo utilizzato per ottenere il prodotto finito (tra cui anche la preparazione casalinga). Tra i fattori agronomici troviamo: la varietà e la genetica del materiale utilizzato, le condizioni di crescita, le pratiche agronomiche, l'epoca di raccolta e le condizioni di conservazione. Tra i fattori di processo troviamo: tipologia di ingrediente/materia prima, le dimensioni del prodotto, il tipo di pretrattamento e di trattamento termico adottato, tempi e temperature, oltre a pH e umidità.

A titolo di esempio si riportano alcune misure che possono essere attuate durante la lavorazione di prodotti a base di cereali. Ricordiamo che tali prodotti quando sono sottoposti ad una fase di cottura subiscono un innalzamento di temperatura (nei prodotti da forno si raggiungono temperature più elevate di 200 °C, per la pizza 450°C) tale da favorire la formazione di acrilammide:

- nella definizione della formulazione di un prodotto a base di cereali possono entrare in gioco tanti fattori, il livello di asparagina e di zuccheri riducenti si rivela l'elemento chiave per contenere lo sviluppo di acrilammide durante il processo di cottura.

Utile si è rivelato l'utilizzo di sfarinati a ridotto contenuto di asparagina, sfarinati raffinati anziché integrali oppure la sostituzione di sfarinati di frumento o segale (naturalmente più ricca di asparagina) con farine di mais o di riso, naturalmente più povere di asparagina.

Sebbene siano noti i vantaggi fisiologici legati al consumo di prodotti integrali, l'asparagina è per lo più localizzata nei foglietti esterni dei tegumenti della cariosside dei cereali (la crusca), quindi adottando una macinazione integrale o effettuando operazioni di ricombinazione utili ad avere sfarinati integrali, si preserva asparagina e quindi si favorisce la

possibilità che durante il processo di trasformazione si formi acrilammide in modo più rilevante. Attuando una decorticazione pre-macinazione è possibile rimuovere in modo graduale percentuali crescenti dei tegumenti esterni della cariosside e quindi disporre di uno sfarinato a ridotto contenuto di asparagina. Ricerche che hanno visto la collaborazione tra l'Università del Molise, l'Università della Tuscia e l'Università di Torino hanno dimostrato che oltre ad agire a livello di campo, adottando idonee pratiche agronomiche (Oddy et al, 2023) e/o coltivando granella a ridotto contenuto di asparagina, effettuando opportune ricombinazioni di frazioni di macinazione di grano tenero è possibile ottenere sfarinati a diverso grado di raffinazione con basso contenuto di asparagina anche partendo da granella ad alto contenuto di asparagina. Specificamente, è possibile ridurre la quantità di asparagina libera utilizzando genotipi in cui i geni codificanti per l'asparagina sintetasi che sono espressi nella cariosside (geni *TaASN2*) siano, almeno in parte, silenziati. Ciò può essere perseguito sia attraverso lo screening della variabilità naturale (Oddy et al, 2021, Tafuri et al, 2023), che di quella indotta attraverso mutagenesi classica (Sestili et al, in preparazione) o mutagenesi con le Nuove Tecnologie Genomiche (NGT), anche note come Tecnologie di Evoluzione Assistita (TEA) (Raffan et al, 2021, 2023)

- La riduzione del contenuto di asparagina presente negli sfarinati di cereali può essere ottenuta anche facendo uso dell'enzima asparaginasi che ha la capacità di convertire l'asparagina in acido aspartico, forma non utile per reagire con lo zucchero riducente e portare alla formazione di acrilammide.
- Nella produzione di prodotti da forno, prolungare il tempo di lievitazione può andare ad incidere in modo positivo sulla riduzione della concentrazione dei precursori della acrilammide. Sostanzialmente i lieviti vanno a consumare amminoacidi e zuccheri utili per l'innescio e la progressione della reazione di Maillard. Se si attua la lievitazione combinando batteri lattici e lievito di birra è possibile ridurre di 10 volte il contenuto dei reattanti (zuccheri ed asparagina) e quindi il valore di acrilammide nel prodotto finito.
- Temperatura e tempi di riscaldamento adottati durante il processo tecnologico sono le condizioni che garantiscono la consistenza del prodotto, ma anche la stabilità nel tempo e l'igienicità del prodotto alimentare. Cotture a temperature più basse, allungamento dei tempi di lavorazione e ridotto tempo di esposizione al caldo, possono aiutare nel contenimento della formazione di acrilammide.

Conclusioni

La riduzione della presenza di acrilammide negli alimenti rappresenta una sfida cruciale per garantire la sicurezza alimentare senza compromettere la qualità tecnologica e sensoriale dei prodotti. Il caso dei cereali, in particolare quelli destinati alla panificazione e alla prima infanzia, evidenzia quanto sia importante un approccio integrato che coinvolga l'intera filiera, dalla coltivazione alla trasformazione industriale.

Le strategie per mitigare la formazione di acrilammide si articolano su più livelli. A monte, l'impiego di varietà di cereali con contenuto ridotto di asparagina, ottenute mediante miglioramento genetico classico o innovativo, risulta un'opzione promettente e sostenibile. In particolare, l'identificazione e il silenziamento parziale dei geni *TaASN2*, codificanti per l'asparagina sintetasi nella cariosside, ha mostrato efficacia nella riduzione del precursore principale dell'acrilammide nei prodotti trasformati.

Parallelamente, interventi tecnologici mirati, come l'uso dell'enzima asparaginasi, la selezione di sfarinati a basso contenuto di asparagina, l'ottimizzazione dei processi di lievitazione e la modulazione dei parametri di cottura, possono contribuire significativamente al contenimento del contaminante. L'adozione del principio ALARA (As Low As Reasonably Achievable) guida queste azioni, tenendo conto del rischio per la salute pubblica ma anche della fattibilità tecnica ed economica per l'industria alimentare.

In definitiva, l'integrazione tra miglioramento genetico, pratiche agronomiche sostenibili e

innovazione tecnologica costituisce la chiave per sviluppare cereali più sicuri, in grado di coniugare esigenze di salute pubblica, sostenibilità ambientale e qualità alimentare.

Bibliografia

- EFSA. 2015. EFSA panel on contaminants in the food chain (CONTAM) - Scientific Opinion on acrylamide in food. The EFSA Journal, 13(6), 4104.
- FoodDrinkEurope 2019. Acrylamide Toolbox 2019.
https://www.fooddrinkurope.eu/uploads/publications_documents/FoodDrinkEurope_Acrylamide_Toolbox_2019.pdf
- Ghanayem B.I., McDaniel L.P., Churchwell M.I., Twaddle N.C., Snyder R., Fennell T.R., et al. 2005. Role of CYP2E1 in the epoxidation of acrylamide to glycidamide and formation of DNA and hemoglobin adducts. *Toxicological Science* 88(2):311–8.
- IARC. 1994. IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans. Some Industrial Chemicals. Lyon, France.
- LoPachin R.M. 2004. The changing view of acrylamide neurotoxicity. *Neurotoxicology* 25(4):617–30.
- Matthaus B., Haase, N. U. 2016. Acrylamide in ready-to-eat foods. In: *Food Hygiene and Toxicology in Ready-to-Eat Foods*. Academic press, Elsevier, pp. 353-382.
- Mottram D.S., Wedzicha B.L., Dodson A.T. 2002. Food chemistry: acrylamide is formed in the Maillard reaction. *Nature* 419:448–9.
- Oddy, J., Alarcón-Reverte, R., Wilkinson, M et al. 2021. Reduced free asparagine in wheat grain resulting from a natural deletion of TaASN-B2: investigating and exploiting diversity in the asparagine synthetase gene family to improve wheat quality. *BMC Plant Biol* 21, 302.
- Oddy, J., Elmore, J. S., & Halford, N. G., 2023. Accounting for environmental variation in the free asparagine content of wheat grain. *Journal of Food Composition and Analysis*, 120, 105333.
- Perera D. N., Hewavitharana, G. G., Navaratne, S. B. 2021. Comprehensive study on the acrylamide content of high thermally processed foods. *BioMed Research International*, 1-13.
- Raffan, S., Sparks, C., Huttly, A., Hyde, L., Martignago, D., Mead, A., Hanley, S. J., Wilkinson, P. A., Barker, G., Edwards, K. J., Curtis, T. Y., Usher, S., Kosik, O., & Halford, N. G, 2021. Wheat with greatly reduced accumulation of free asparagine in the grain, produced by CRISPR/Cas9 editing of asparagine synthetase gene TaASN2. *Plant Biotechnology Journal*, 19(8), 1602-1613.
- Raffan, S., Oddy, J., Mead, A., Barker, G., Curtis, T., Usher, S., Burt, C., & Halford, N. G., 2023. Field assessment of genome-edited, low asparagine wheat: Europe's first CRISPR wheat field trial. *Plant Biotechnology Journal*, 21(6), 1097-1099.
- Regulation 2017/2158 of 20 November 2017 establishing mitigation measures and benchmark levels for the reduction of the presence of acrylamide in food.
- Tafari, A., Zuccaro, M., Ravaglia, S., Pirona, R., Masci, S., Sestili, F., Lafiandra, D., Ceriotti, A., & Baldoni, E., 2022. Exploring Variability of Free Asparagine Content in the Grain of Bread Wheat (*Triticum aestivum* L.) Varieties Cultivated in Italy to Reduce Acrylamide-Forming Potential. *Plants*, 12(6), 1349.
- Tareke E., Rydberg P., Karlsson P., Eriksson S., Tornqvist M. 2002. Analysis of acrylamide, a carcinogen formed in heated foodstuffs. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 50(17):4998–5006.
- Virk-Baker M.K., Nagy T.R., Barnes S., Groopman J. 2014. Dietary acrylamide and human cancer: a systematic review of literature. *Nutrition and Cancer* 66(5):774–90.
- Weisshaar, R., Gutsche, B. 2002. Formation of acrylamide in heated potato products-model experiments pointing to asparagine as precursor. *Deutsche Lebensmittel-Randschau*, 98, 397-400.
- WHO/FAO. 2002. Health Implications of Acrylamide in Food. Geneva: World Health Organization.
- Yaylayan V. A., Wnorowski, A., & Perez-Locas, C. (2003). Why asparagine needs carbohydrates to generate acrylamide. *Journal of Agriculture and Food Chemistry*, 51, 1753-1757.

One Health Approach per lo Sviluppo Rurale Sostenibile: Le Sfide di Ricerca dell'Economia Agraria Italiana

Fabio Boncinelli¹, Mario Cozzi².

¹ Dipartimento di Scienze e Tecnologie Agrarie, Alimentari, Ambientali e Forestali (DAGRI), Università degli studi di Firenze.

² Dipartimento di Scienze Agrarie, Forestali, Alimentari ed Ambientali (DAFE), Università degli Studi della Basilicata.

Riassunto

I sistemi agricoli sostenibili stanno assumendo un ruolo guida nell'affrontare questioni chiave quali i cambiamenti climatici, le malattie zoonotiche e l'insicurezza alimentare, rendendo l'approccio One Health particolarmente attuale. L'agricoltura del XXI secolo deve pertanto confrontarsi con l'impatto dei cambiamenti climatici, l'esaurimento delle risorse naturali e la necessità di nutrire una popolazione in crescita, senza trascurare le conseguenze ambientali derivanti dalle trasformazioni attuate. Il presente articolo analizza le sfide strutturali che caratterizzano l'economia agraria e lo sviluppo rurale italiano attraverso il paradigma dell'approccio One Health, evidenziando come la complessità multidimensionale del sistema rurale richieda strategie di intervento integrate che considerino simultaneamente la salute umana, animale e ambientale. L'analisi empirica, basata su dati Eurostat e ISTAT per il periodo 2014-2024, rivela una crisi strutturale profonda, caratterizzata da frammentazione aziendale, invecchiamento del capitale umano, deficit formativi, sottocapitalizzazione e ritardo tecnologico. Il modello teorico proposto coniuga i capisaldi della letteratura in economia agro-forestale con i più recenti sviluppi della ricerca interdisciplinare, tracciando percorsi innovativi per rilanciare la competitività del settore, individuando strategie per abbattere le barriere all'integrazione. In particolare, vengono esplorate strategie volte a superare i principali ostacoli all'integrazione settoriale — sintesi tra agricoltura, tecnologie digitali, sanità pubblica e politica ambientale — attraverso un approccio coerente di lungo periodo. Questo include: il ruolo delle tecnologie emergenti (precision farming, IoT, intelligenza artificiale) nel favorire pratiche agricole sostenibili e resilienti, in linea con le recenti analisi bibliometriche sull'agricoltura digitale; l'importanza della partecipazione delle comunità locali, in quanto attori chiave e presidi territoriali capaci di promuovere processi di sostenibilità e tracciabilità lungo le filiere; la dimensione del policymaking strategico, inteso come governance coordinata tra attori pubblici, privati e scientifici, capace di promuovere innovazione, coesione territoriale e resilienza ambientale. Pertanto, il quadro teorico delineato favorisce un approccio integrato, orientato all'innovazione, al rafforzamento delle capacità locali e alla governance multisettoriale — elementi imprescindibili per garantire la transizione verde-digitale del settore agro-forestale in chiave One Health. Infine, ma non per questo meno importante, i profili formativi e di ricerca del SSD AGR/01 (Economia ed Estimo Rurale) rappresentano il contesto disciplinare ideale per promuovere analisi economiche, valutazioni e strumenti di stima atti a supportare politiche e modelli imprenditoriali in chiave One Health, integrando sostenibilità, governance ambientale e innovazione territoriale

Abstract

Sustainable agricultural systems are taking on a leading role in addressing key issues such as climate change, zoonotic diseases, and food insecurity, making the One Health approach particularly relevant. Twenty-first-century agriculture must therefore contend with the impact of climate change, the depletion of natural resources, and the need to feed a growing population, while not neglecting the environmental consequences arising from these transformations. This paper analyses the structural challenges characterising the Italian agricultural economy and rural development through the lens of the One Health approach, highlighting how the multidimensional complexity of the rural system necessitates integrated intervention strategies that simultaneously consider human, animal, and environmental health. The empirical analysis, based on Eurostat and ISTAT data for the period 2014–2024, reveals a deep structural crisis, marked by farm fragmentation, an ageing workforce, training deficits, undercapitalisation, and technological lag. The theoretical model proposed combines the cornerstones of the agri-forestry economics literature with the latest developments in interdisciplinary research, outlining innovative pathways to revitalise the sector's competitiveness by identifying strategies to overcome barriers to integration. In particular, strategies are explored to address the main obstacles to sectoral

integration—namely, the synthesis between agriculture, digital technologies, public health, and environmental policy—through a coherent long-term approach. This includes: the role of emerging technologies (precision farming, IoT, artificial intelligence) in fostering sustainable and resilient agricultural practices, in line with recent bibliometric analyses on digital agriculture; the importance of local community participation, as key stakeholders and territorial stewards capable of promoting sustainability and traceability processes along supply chains; and the dimension of strategic policymaking, understood as coordinated governance between public, private, and scientific actors, able to promote innovation, territorial cohesion, and environmental resilience.

Therefore, the theoretical framework outlined supports an integrated approach focused on innovation, strengthening local capacities, and multisectoral governance—essential elements for ensuring the green-digital transition of the agri-forestry sector in a One Health perspective.

Finally, and by no means least, the educational and research profiles of SSD AGR/01 (Rural Economics and Appraisal) represent the ideal disciplinary context for promoting economic analyses, assessments, and appraisal tools to support policies and entrepreneurial models from a One Health perspective, integrating sustainability, environmental governance, and territorial innovation.

Keywords: *Sustainable Agriculture, One Health Approach, Rural Development, Digital Innovation.*

Introduzione: Il Paradigma della Complessità Sistemica nell'Economia Agraria

La crescente complessità delle sfide che caratterizzano il sistema rurale contemporaneo ha portato la comunità scientifica internazionale a riconsiderare i paradigmi tradizionali di analisi settoriale che sembrano essere diventate inadeguate di fronte all'emergere di problematiche sistemiche che richiedono una visione olistica e interdisciplinare (Marsden and Morley, 2014; Zhu et al., 2025; Siankwilimba et al. 2025). Il settore primario e di produzione alimentare deve far fronte ai molteplici cambiamenti sociali, economici, ambientali, demografici e tecnologici. Per questo occorre esplorare approcci analitici e di design di politica economica che possono tener conto di questa complessità.

L'approccio One Health, originariamente sviluppato nel campo della sanità pubblica veterinaria (Zinsstag et al., 2011), rappresenta un framework concettuale particolarmente promettente per l'analisi dei sistemi agroalimentari in quanto riconosce esplicitamente le interconnessioni tra salute umana, animale e ambientale e potenzialmente riesce a cogliere la complessità dei problemi di sviluppo rurale. Nel contesto dell'economia agraria italiana, questo paradigma assume particolare rilevanza considerando le specificità strutturali del nostro sistema produttivo (Altamore L. et al, 2024;) e la multidimensionalità delle sfide emergenti.

Tuttavia, nonostante i significativi progressi nella teoria economica agricola, permane un divario considerevole tra l'innovazione concettuale sviluppata dalla ricerca accademica e la sua traduzione in politiche e pratiche operative efficaci. Questo gap tra teoria e applicazione diventa particolarmente evidente quando si osservano le persistenti criticità strutturali del settore agricolo nazionale, che sembrano resistere agli approcci tradizionali di intervento settoriale. Un elemento particolarmente critico nell'applicazione dell'approccio One Health allo sviluppo rurale riguarda la qualità della vita nelle aree marginali, in particolare quelle rurali, soggette a spopolamento selettivo. Studi recenti, inclusi quelli all'interno dello Spoke 7 del progetto Agritech (Centro Nazionale CN2), evidenziano una correlazione diretta tra deterioramento della qualità della vita e l'emigrazione dei segmenti più dinamici della popolazione — in particolare giovani e, più in generale, individui con maggiore scolarizzazione — risorse umane di cui il settore agricolo ha bisogno per affrontare le sfide della modernizzazione e dell'innovazione.

La perdita di capitale umano qualificato, noto come “brain drain” rurale, alimenta un circolo vizioso in cui l'emigrazione riduce capacità imprenditoriale e innovazione locale, aggravando le criticità strutturali del sistema agricolo locale e, a cascata, nazionale. Contestualmente, le aree rurali diventano sempre meno attrattive, impoverendo ulteriormente le comunità residui. Questa dinamica non è esclusiva dell'Italia: ricerche su aree montane e marginali (come le valli alpine) confermano che la migrazione di laureati impoverisce il tessuto territoriale escludendo competenze chiave necessarie alla rigenerazione locale (Ferrario and Martin, 2014). Una revisione sistematica di buona parte della letteratura sul tema evidenzia come politiche orientate a trattenere o attrarre capitale umano siano centrali per promuovere la coesione territoriale e lo sviluppo sostenibile (Loras-Gimeno et al., 2025).

In questo contesto, l'adozione dell'approccio One Health acquista un significato strategico più ampio: non si limita a preservare la salute degli ecosistemi, ma mira anche a garantire condizioni di vita dignitose, opportunità occupazionali e servizi nelle aree rurali, elementi fondamentali per contrastare la desertificazione demografica e economica.

L'economia agraria italiana, pur mantenendo una posizione di rilievo nel panorama europeo come terza potenza per produzione agricola e quasi prima per valore aggiunto, manifesta segnali crescenti di difficoltà strutturale che richiedono un'analisi approfondita delle cause sistemiche e l'identificazione di strategie innovative di intervento. La persistente instabilità del valore aggiunto agricolo riflette non solo la vulnerabilità del settore agli shock esterni, ma anche l'inadeguatezza dei modelli organizzativi e produttivi rispetto alle sfide contemporanee.

Framework Teorico e Metodologico

L'adozione dell'approccio One Health negli studi di economia agraria rappresenta un'evoluzione nello studio dei sistemi agroalimentari. Questo framework teorico permette di analizzare le interdipendenze complesse tra dimensioni produttive, ambientali e sociali del sistema agricolo, allargando la tradizionale separazione disciplinare che ha caratterizzato la ricerca dei sistemi economici agricoli per decenni.

Dal punto di vista metodologico, l'approccio proposto combina un'analisi quantitativa basata su indicatori consolidati, come quelli ricavati dal Farm Structure Survey di Eurostat¹ e dai conti economici nazionali ISTAT per il periodo 2014–2024, con una lettura qualitativa dei fenomeni, che valorizza le specificità/criticità territoriali e socio-economiche italiane. Questo modello ibrido consente di collegare le dinamiche macroeconomiche (trend strutturali, evoluzione delle imprese agricole, sostegno della PAC) con le microdinamiche aziendali e territoriali (profilo sociale, capitale umano, adesione all'innovazione).

L'adozione di un orizzonte temporale decennale permette di identificare trend strutturali e distinguerli dalle fluttuazioni cicliche, fornendo una base solida per l'interpretazione dei fenomeni osservati.

La Crisi Strutturale del Sistema Agricolo Italiano: Evidenze Empiriche

L'analisi delle variazioni percentuali annuali del valore aggiunto agricolo per il periodo 2014-2023 (Figura 1) rivela un quadro di instabilità cronica che distingue negativamente l'Italia rispetto ai principali partner europei. I dati ISTAT mostrano una volatilità significativa, con picchi positivi nel 2015 (+5%) e nel 2022 (+2,5%), alternati a periodi di contrazione marcata, particolarmente evidenti nel 2017 (-3,2%) e nel 2020 (-4,5%).

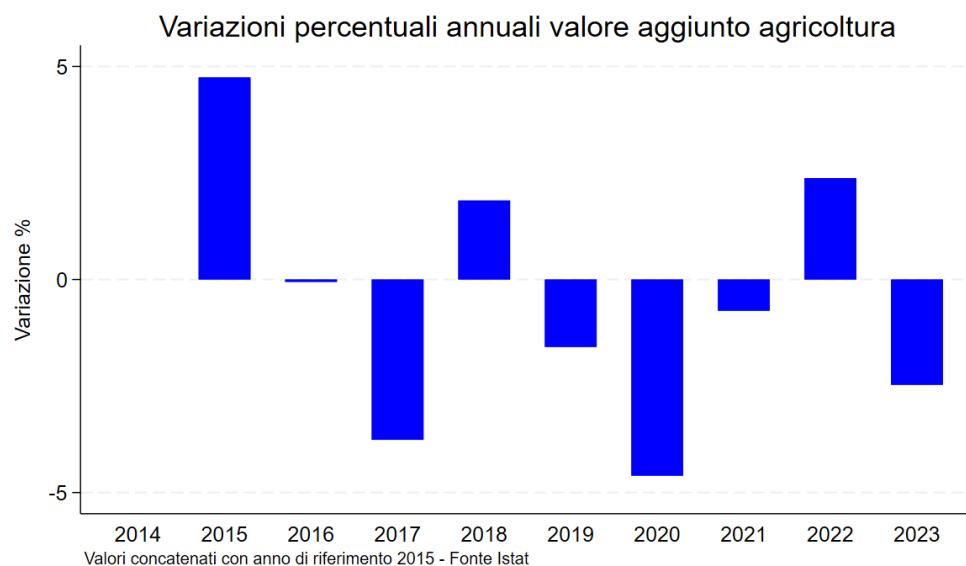


Figura 1 Analisi delle variazioni percentuali annuali del valore aggiunto agricolo per il periodo 2014-2023

Questa volatilità riflette non solo la maggiore esposizione del settore agricolo italiano agli shock climatici ed economici, ma anche debolezze strutturali profonde nel sistema produttivo nazionale. Il confronto con paesi come Germania e Francia evidenzia come l'agricoltura italiana sia caratterizzata da una maggiore vulnerabilità alle crisi sistemiche e da una minore capacità di resilienza strutturale.

¹https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Farm_structure_survey_%E2%80%93_survey_coverage

La ripresa parziale registrata nel 2022 e i dati preliminari positivi per il 2024 (+3,5% per la sola branca agricoltura) non possono mascherare la tendenza di lungo periodo verso una progressiva erosione della competitività relativa dell'agricoltura italiana. Questi andamenti ciclici riflettono l'assenza di una strategia sistemica di sviluppo settoriale capace di affrontare le sfide strutturali identificate dalla ricerca internazionale. La struttura dimensionale delle imprese agricole italiane rappresenta uno dei fattori più critici per la competitività del settore. L'analisi dei dati Eurostat sulla distribuzione per classi di Superficie Agricola Utilizzata (Figura 2) evidenzia come il 40% delle aziende agricole italiane operi su superfici inferiori ai 2 ettari, dato che colloca l'Italia tra i paesi europei con la maggiore frammentazione aziendale, insieme alla Spagna. Questa configurazione strutturale genera è causa di una serie di problematiche che limitano l'efficienza sistemica del settore. La frammentazione aziendale si traduce infatti in difficoltà di accesso al credito, in limitazioni nelle possibilità di adozione di tecnologie innovative, e in una riduzione del potere contrattuale nelle filiere agroalimentari. Il confronto con realtà caratterizzate da maggiore concentrazione dimensionale, come Paesi Bassi, Francia e Germania, evidenzia come le economie di scala rappresentino un fattore determinante per la sostenibilità economica delle imprese agricole nell'attuale contesto competitivo globale. La frammentazione aziendale non costituisce semplicemente un problema di efficienza produttiva, ma limita strutturalmente la capacità di innovazione e adattamento del sistema agricolo nazionale.

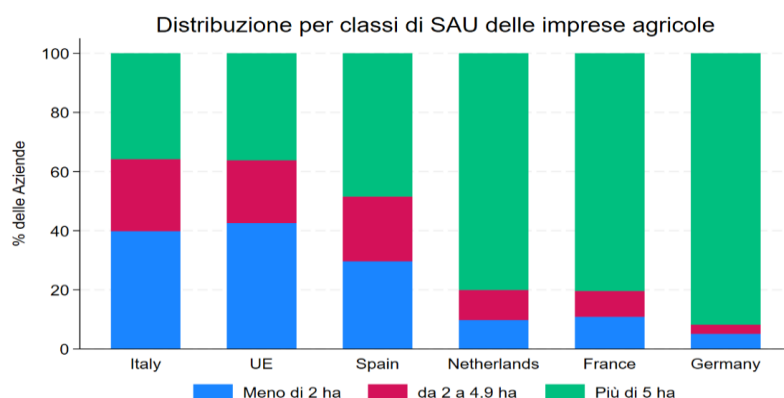


Figura 2. Distribuzione SAU imprese agricole

La distribuzione per classi di età dei conduttori agricoli rivela un fenomeno di invecchiamento particolarmente accentuato nel contesto italiano. I dati Eurostat mostrano che oltre il 40% dei conduttori agricoli italiani supera i 65 anni, configurando la struttura per età più sbilanciata verso le classi anziane tra i principali paesi agricoli europei.

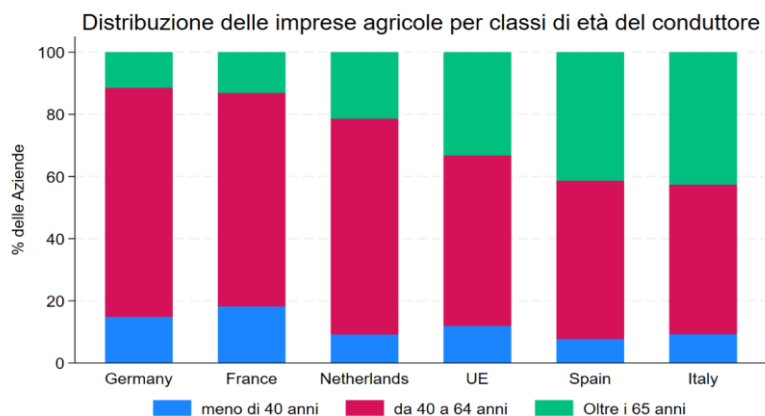


Figura 3. Distribuzione delle imprese agricole per classi di età del conduttore

Questo fenomeno non rappresenta semplicemente una questione demografica, ma ha implicazioni profonde per le dinamiche di innovazione e investimento del settore. L'invecchiamento dei conduttori agricoli si traduce infatti ad una minore disponibilità agli investimenti di lungo periodo, limitando la capacità di modernizzazione

tecnologica e organizzativa delle imprese agricole. La scarsa attrattività del settore per le giovani generazioni riflette non solo le difficoltà economiche strutturali dell'agricoltura italiana, ma anche l'inadeguatezza delle politiche di sostegno al ricambio generazionale implementate a livello nazionale ed europeo. Il problema del ricambio generazionale in agricoltura assume dimensioni sistemiche che richiedono interventi coordinati a livello di politiche educative, creditizie e fiscali. Anche in questo caso l'innovazione tecnologica può giocare un ruolo per esempio rendendo meno faticosi o meno noiose talune lavorazioni agricole.

L'analisi dei livelli di formazione dei conduttori agricoli italiani, basata sui dati della Farm Structure Survey di Eurostat, rivela uno dei deficit più profondi del sistema agricolo nazionale. La quota di aziende gestite da conduttori con formazione agricola completa (Full agricultural training) si attesta su livelli drammaticamente inferiori rispetto agli standard europei, con particolare divario rispetto a paesi come i Paesi Bassi che mostrano oltre il 60% di conduttori con formazione specialistica.

Questo gap formativo riflette un divario più profondo nella capacità di comprensione e gestione delle complessità tecniche, economiche e ambientali che caratterizzano l'agricoltura contemporanea. La formazione specialistica costituisce infatti un prerequisito essenziale per l'adozione efficace delle tecnologie digitali e delle pratiche sostenibili richieste dal contesto competitivo attuale. Le attuali tecnologie a disposizione come intelligenza artificiale, agricoltura di precisione, digitalizzazione, big data, droni e dati telerilevati, richiedono competenze e conoscenze tecnologiche avanzate. La sola esperienza difficilmente riesce a colmare lacune sulle competenze dei lavoratori.

La letteratura internazionale ha ampiamente documentato (Dillon et al., 2016; Fintineru e Madsen, 2013) la correlazione positiva tra livello di formazione dei conduttori e performance aziendali in termini di produttività, redditività e sostenibilità ambientale. Nel contesto italiano, il deficit formativo costituisce quindi un vincolo strutturale per l'adozione di pratiche innovative e per l'integrazione efficace nelle filiere agroalimentari moderne.

L'evoluzione dell'intensità del capitale nel settore agricolo italiano (Figura 4), misurata attraverso il rapporto tra asset fissi netti per ora lavorata, evidenzia una tendenza negativa che distingue l'Italia dai principali competitor europei. I dati Eurostat mostrano che dal 2014 al 2024, l'indice di intensità del capitale (base 2015=100) ha subito una contrazione significativa, passando da 100 a circa 90, in controtendenza rispetto alla Germania che ha registrato incrementi superiori al 10% nello stesso periodo. Il confronto europeo evidenzia come la sottocapitalizzazione rappresenti uno dei fattori esplicativi principali del gap di produttività dell'agricoltura italiana rispetto ai benchmark continentali. Questo fenomeno appare particolarmente accentuato nelle regioni meridionali, contribuendo ad accentuare i divari territoriali di competitività all'interno del sistema nazionale.

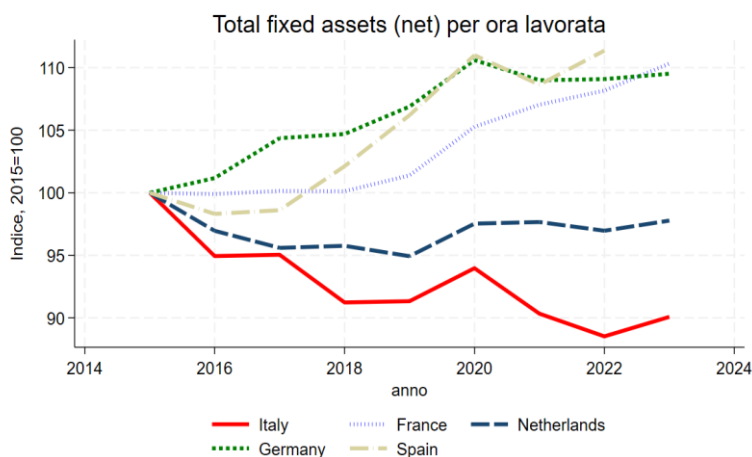


Figura 4. Total fixed assets pe ora lavorativa

Questa dinamica riflette un circolo vizioso di sotto investimento che caratterizza il settore agricolo italiano. La combinazione di bassa redditività, difficoltà di accesso al credito e orientamento di breve periodo degli operatori si traduce in una progressiva obsolescenza del capitale produttivo, limitando ulteriormente la competitività delle imprese e la loro capacità di generare risorse per investimenti futuri.

L'analisi degli investimenti in asset tecnologici, basato sui dati Eurostat per tipologia di investimento bene

(Figura 5), rivela un quadro preoccupante di ritardo dell'Italia nell'adozione delle tecnologie digitali innovative. Nei settori strategici come computer hardware, software e database, equipaggiamenti ICT e ricerca e sviluppo, l'Italia mostra tendenze stagnanti o declinanti, in netto contrasto con Francia e Germania che hanno mantenuto percorsi di crescita sostenuta. Questo ritardo tecnologico ha implicazioni che trascendono la semplice modernizzazione dei processi produttivi. L'agricoltura di precisione, l'Internet of Things applicato all'agricoltura, i sistemi di supporto decisionale basati su big data e l'automazione rappresentano infatti strumenti indispensabili per affrontare le sfide della sostenibilità ambientale e della competitività economica nel contesto globale contemporaneo. Nel settore della ricerca e sviluppo, i dati evidenziano un divario particolarmente significativo. Mentre Francia e Germania hanno mantenuto livelli di investimento in R&D rispettivamente intorno ai 3 e 2 miliardi di euro, l'Italia si attesta su valori significativamente inferiori, evidenziando una carenza sistemica nella capacità di innovazione del settore che limita le prospettive di sviluppo di lungo periodo.

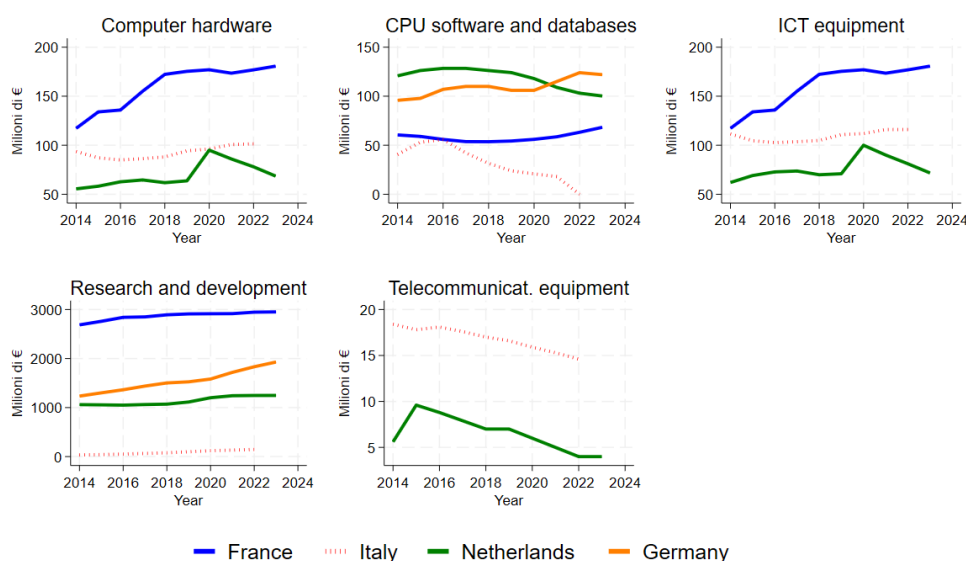


Figura 5. dati Eurostat per tipologia di investimento bene.

La produttività del lavoro rappresenta forse l'indicatore di maggiore rilievo della crisi strutturale che attraversa l'agricoltura italiana. I dati Eurostat sulla produttività reale del lavoro per ora lavorata (indice 2015=100) riportati in Figura 6 mostrano, dal 2014 al 2024, un andamento sostanzialmente stagnante, attestandosi su valori inferiori a quelli registrati nella decade precedente. Questa tendenza contrasta drammaticamente con la performance di paesi come Germania e l'Unione Europea nel suo complesso, che hanno registrato incrementi significativi della produttività nel medesimo periodo. La Germania ha raggiunto livelli superiori al 140% rispetto al 2015, mentre l'UE nel suo complesso si attesta intorno al 115%, evidenziando come l'Italia sia rimasta sostanzialmente ferma in un contesto di progresso generale. La stagnazione della produttività italiana non è un fenomeno isolato, ma rappresenta la risultante di tutti i fattori critici precedentemente analizzati: la frammentazione aziendale, l'invecchiamento del capitale umano, il deficit formativo, la sottocapitalizzazione e il ritardo tecnologico. Questi elementi si combinano in una dinamica sistemica che limita la capacità del settore di generare valore aggiunto e di remunerare adeguatamente i fattori produttivi.

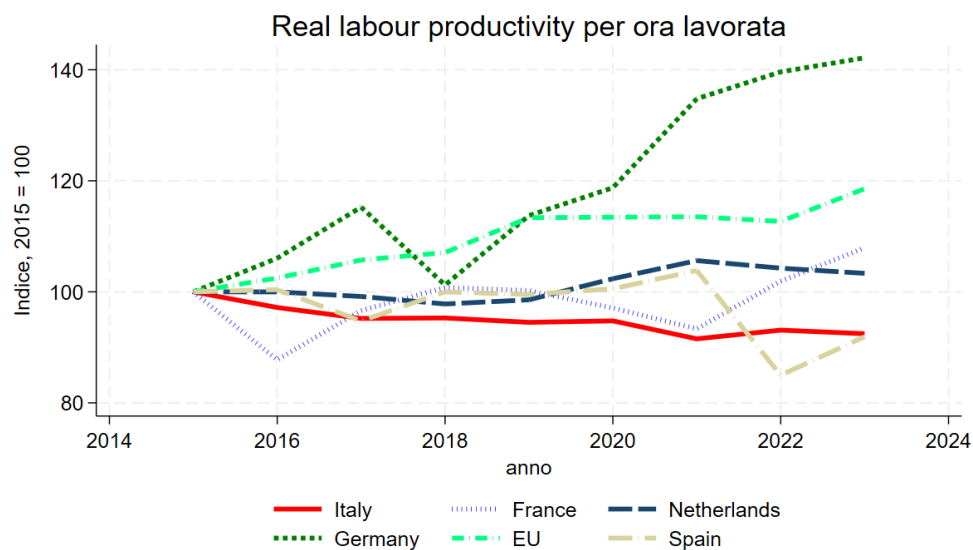


Figura 6. dati Eurostat sulla produttività reale del lavoro per ora lavorata (indice 2015=100).

Infine, i dati sulla redditività dei fattori di produzione (Figura 7), misurata attraverso il Real factor income per ULA (Indicatore A), confermano questa diagnosi. Con circa 33.000 euro per ULA, l'Italia si colloca significativamente al di sotto di paesi come Paesi Bassi (52.000 euro) e Germania (42.000 euro), evidenziando come la bassa produttività si traduca direttamente in una minore capacità di remunerazione dei fattori produttivi e, conseguentemente, in una ridotta attrattività del settore per investimenti e risorse umane qualificate.

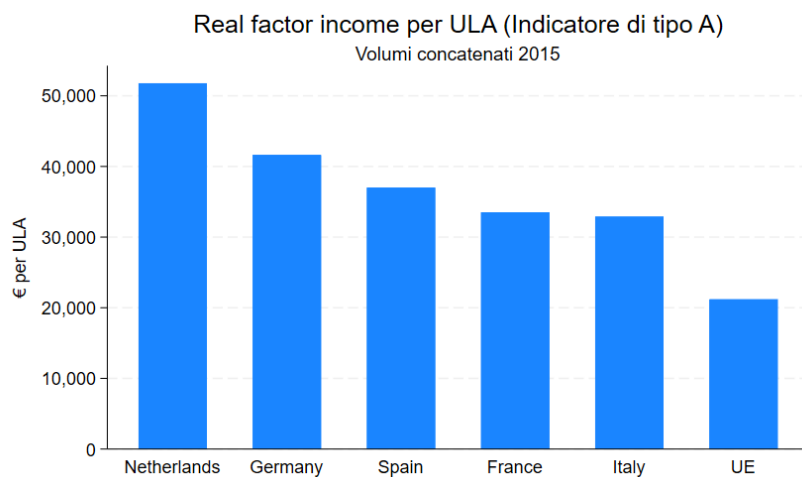


Figura 7. dati sulla redditività dei fattori di produzione.

Nonostante le criticità strutturali indicate, il sistema agricolo italiano evidenzia alcuni punti di forza distintivi che, unitamente alla riduzione dei divari sopra indicati, possono costituire leve strategiche per il rilancio competitivo del settore. In particolare, la straordinaria diversità agroecologica e la qualità riconosciuta delle produzioni rappresentano asset fondamentali per lo sviluppo di filiere ad alto valore aggiunto. Nello specifico: Diversità agroecologica e biodiversità culturale: L'Italia è caratterizzata da una varietà di ambienti pedoclimatici che favoriscono la produzione di una gamma ampia di prodotti agricoli, molti dei quali legati a tradizioni locali e pratiche agroalimentari sostenibili. Secondo il Ministero dell'Agricoltura, il Paese vanta oltre 300 prodotti DOP, IGP e STG, posizionandosi ai vertici europei per numero di riconoscimenti di qualità. Capacità di adattamento territoriale: In molte aree marginali, come le zone montane e collinari, si osservano esperienze virtuose di agricoltura rigenerativa, agroecologia e agricoltura sociale, che coniugano sostenibilità ambientale, inclusione sociale e valorizzazione del capitale naturale.

La valorizzazione della diversità e della qualità delle filiere agrifood italiane si inserisce perfettamente nel

paradigma One Health, contribuendo simultaneamente alla salute umana, animale e ambientale. In particolare:

Salute umana: Le produzioni locali di alta qualità, spesso legate a regimi alimentari tradizionali come la dieta mediterranea, promuovono stili di vita sani e riducono l'incidenza di malattie cronico-degenerative. La promozione di alimenti freschi, non ultra-processati e tracciabili ha un impatto diretto sulla salute pubblica.

Salute animale: Le pratiche zootecniche tradizionali e a basso impatto, come l'allevamento estensivo e il pascolo rotazionale, riducono l'uso di antibiotici e migliorano il benessere animale, contribuendo alla mitigazione del rischio di zoonosi.

Salute ambientale: Le filiere locali, corte e tracciabili, riducono l'impronta ecologica del sistema agroalimentare, favorendo la conservazione della biodiversità, la riduzione delle emissioni e il mantenimento dei servizi ecosistemici.

Verso l'Implementazione dell'Approccio One Health

L'implementazione sistematica dell'approccio One Health nell'economia agroalimentare italiana non rappresenta solo un'opportunità teorica, ma anche una necessità strategica per mantenere un vantaggio competitivo rispetto ad altre nazioni europee. In un settore caratterizzato da vulnerabilità strutturale e crescente esposizione ai cambiamenti climatici, il paradigma One Health contribuisce a superare la tradizionale frammentazione disciplinare promuovendo una visione integrata che valorizza le connessioni tra salute pubblica, sostenibilità ambientale e resilienza dei prodotti.

L'integrazione delle politiche settoriali può contribuire a colmare il divario europeo, come dimostrano la nuova Politica agricola comune (PAC 2023-2027), il Green Deal europeo e il Piano nazionale di ripresa e resilienza (PNRR). La Commissione Europea ha proposto nel 2020 la strategia "Dal produttore al consumatore", che propone un modello di sviluppo agroalimentare che rispecchia i principi del One Health, promuovendo la sostenibilità lungo l'intera filiera, dalla produzione alla distribuzione. Tuttavia, l'Italia ha ancora molta strada da fare nell'adozione delle tecnologie digitali e nella formazione del suo personale, come dimostrano i rapporti di Eurostat e ISTAT.

Per rendere il sistema primario più resiliente ai cambiamenti climatici, dobbiamo ripensare il modo in cui coltiviamo e il modo in cui ci organizziamo. In questo senso, il quadro One Health è utile per creare strategie adattive basate sulla diversità culturale, sulla gestione sostenibile delle risorse e sull'uso di tecnologie predittive. Progetti come "AgriTech National Center"² e "VIVA Sustainable Wine"³ dimostrano che combinare ricerca scientifica, innovazione tecnologica e governance locale può rendere i sistemi di produzione più forti e più capaci di affrontare gli shock ambientali.

La letteratura recente (Marsden & Morley, 2014; Zinsstag et al., 2011; Gimeno et al., 2025) sottolinea la necessità di creare indicatori multidimensionali di sostenibilità che tengano conto non solo della produttività economica ma anche degli impatti sociali e ambientali. In Italia, i biodistretti e i laboratori viventi rurali stanno sperimentando modelli di governance partecipativa che coinvolgono le comunità locali nella progettazione di soluzioni in grado di resistere ai cambiamenti. Questi modelli possono contribuire a rendere il sistema agricolo nazionale più adattabile se sono supportati dalle giuste politiche pubbliche e da investimenti mirati. Possono anche aiutare con una transizione verde-digitale in linea con gli obiettivi di One Health.

In definitiva, l'approccio One Health non è solo un quadro teorico per analizzare i sistemi agroalimentari; è anche uno strumento pratico per affrontare i problemi strutturali e legati al clima che affliggono il settore primario italiano. Perché funzioni, scienziati, responsabili politici e attori locali devono collaborare per costruire un'agricoltura più sostenibile, inclusiva e resiliente.

Conclusioni e Direzioni di Ricerca Future

L'analisi mostra che il settore agricolo italiano si trova nel mezzo di una crisi strutturale multidimensionale che non può essere risolta con gli strumenti settoriali tradizionali. La frammentazione delle imprese, l'invecchiamento del capitale umano, la mancanza di formazione, la mancanza di capitale e il divario tecnologico sono tutte parti connesse di una dinamica sistemica che rende più difficile per il settore primario creare valore, innovare e adattarsi alle sfide globali. In questo contesto, l'approccio One Health non è solo un modello teorico, ma anche una piattaforma operativa per la rigenerazione del sistema agroalimentare italiano. La prospettiva One Health aiuta a superare il conflitto tra obiettivi economici e ambientali promuovendo una visione integrata che tenga conto simultaneamente della salute degli ecosistemi, della qualità della vita nelle

² <https://agritechcenter.it/it/>;

³ <https://www.mase.gov.it/portale/the-program-viva-sustainable-wine/>;

aree rurali e della sostenibilità delle industrie produttive. L'adozione di modelli agroalimentari sostenibili e resilienti è essenziale per garantire la sicurezza alimentare e la coesione territoriale di fronte alla crescente instabilità climatica e geopolitica, secondo recenti pubblicazioni dell'OCSE-FAO (2025 and 2021).

Le future direzioni di ricerca si concentreranno sullo sviluppo di modelli economici integrati in grado di valutare le interdipendenze tra le dimensioni produttiva, ambientale e sociale. In particolare, sarà necessario sviluppare strumenti analitici che consentano di misurare l'efficacia delle politiche di sviluppo rurale in Chiave One Health, tenendo conto delle dinamiche locali e della specificità territoriale. Le aree di ricerca prioritarie includono la definizione di indicatori di sostenibilità, la modellazione delle interazioni del capitale umano, l'innovazione e la resilienza, e l'analisi di sistemi alternativi di produzione agricola e alimentare.

Un ruolo chiave sarà svolto dal settore scientifico-disciplinare AGR/01, che, grazie alla sua vocazione multidisciplinare, può contribuire in modo significativo allo sviluppo di nuovi paradigmi analitici e di intervento. Per sostenere la capacità di innovazione del sistema agricolo, sarà essenziale la collaborazione universitaria, sia nella ricerca che negli affari territoriali, e attraverso iniziative europee come Horizon Europe, LIFE e PRIMA. In sostanza, la complessità della campagna italiana, in termini di geografia, struttura sociale, salute ambientale e specializzazione economica, offre strategie di intervento che possono essere utilizzate per indagare e gestire questa complessità. L'approccio One Health fornisce una risposta teorica e metodologica adeguata, promuovendo una visione organica dello sviluppo rurale sostenibile e contribuendo a definire un nuovo modello agricolo europeo resiliente, inclusivo e incentrato sulla salute globale.

Bibliografia

- Altamore, L.; Chinnici, P.; Bacarella, S.; Chironi, S.; Ingrassia, M. Current Framework of Italian Agriculture and Changes between the 2010 and 2020 Censuses. *Agriculture* 2024, 14, 1603. <https://doi.org/10.3390/agriculture14091603>.
- Commissione Europea. (2020). *From Farm to Fork Strategy*. Bruxelles: European Commission.
- Dillon, E. J., Hennessy, T., & Cullinan, J. (2015). The Role of Agricultural Education and Extension in Influencing Best Practice for Managing Mastitis in Dairy Cattle. *The Journal of Agricultural Education and Extension*, 22(3);
- Eurostat. (2024). *Farm Structure Survey*. Database online: <https://ec.europa.eu/eurostat>
- FAO. (2019). *The State of Food and Agriculture 2019. Moving forward on food loss and waste reduction*. Roma: Food and Agriculture Organization.
- Ferrario, E., Martin P., (2014). Should I stay or should I go? Alpine brain drain and brain gain: the reasons behind the choices of young mountain people. *Revue de géographie alpine*. 102-4. 10.4000/rga.2381.
- Fintineru, G., & Madsen, O. (2013). Farmers' education And Farm Productivity. Evidence From Denmark And From Romania. *Agrolife Scientific Journal*, 2(1).
- ISTAT. (2024). *Conti economici nazionali*. Database online: <https://www.istat.it>
- Loras-Gimeno, D., Díaz-Lanchas, J, Gómez-Bengoechea, G., (2025). Rural depopulation in the 21st century: A systematic review of policy assessments. *Regional Science Policy & Practice*. 17. 100176. 10.1016/j.rspp.2025.100176.
- Marsden, T., & Morley, A. (Eds.). (2014). *Sustainable food systems: building a new paradigm*. Routledge.
- OECD/FAO (2025), *OECD-FAO Agricultural Outlook 2025-2034*, OECD Publishing, Paris/FAO, Rome, <https://doi.org/10.1787/601276cd-en>.
- OECD/FAO (2021), *OECD-FAO Agricultural Outlook 2021-2030*, OECD Publishing, Paris, <https://doi.org/10.1787/19428846-en>.
- OECD. (2021). *Making Better Policies for Food Systems*. Paris: OECD Publishing.
- Siankwilimba, E., Hiddlestone-Mumford, J., Hoque, M.E., Hang'ombe, B.M., Mumba, C., Hasimuna, O.J., et al. (2023) Sustainability of Agriculture Extension Services in the Face of COVID-19: A Study on Gender-Specific Market Systems. *Cogent Food & Agriculture*, 9, Article 2284231.
- WHO, FAO, OIE. (2019). *Taking a Multisectoral, One Health Approach: A Tripartite Guide to Addressing Zoonotic Diseases in Countries*. Geneva/Rome/Paris: World Health Organization, Food and Agriculture Organization, World Organisation for Animal Health.
- Zhu, F., Ying, B. & Xiang, C. (2025). "Advancements in rural resilience research over the past two decades and its significance for sustainable development". *Discover Sustainability*, 6:145.
- Zinsstag, J., Schelling, E., Waltner-Toews, D., & Tanner, M. (2011). From "one medicine" to "one health" and systemic approaches to health and well-being. *Preventive veterinary medicine*, 101(3-4), 148-156.

Nuove tecnologie ed avanzamenti scientifici nella gestione integrata di territorio, ambiente e paesaggio rurale: sfide e opportunità nell'era "One Health"

Picuno P.¹, Becciolini V.², Conti L.², D'Urso P.R.³, Cinardi G.³, Finzi A.⁴, Fumagalli N.⁴, Mattia A.², Mautone A.⁴, Parlato M.⁵, Pezzuolo A.⁵, Rossi G.², Senes G.⁴, Arcidiacono C.³

¹Dipartimento di Scienze Agrarie, Forestali, Alimentari ed Ambientali (DAFE), Università degli Studi della Basilicata

²Dipartimento di Scienze e Tecnologie Agrarie, Alimentari, Ambientali e Forestali (DAGRI), Università degli studi di Firenze

³Dipartimento di Agricoltura Alimentazione e Ambiente (Di3A), Università degli Studi di Catania

⁴Dipartimento di Scienze Agrarie e Ambientali (DiSAA), Università degli Studi di Milano

⁵Dipartimento di Territorio e Sistemi Agro-Forestali (TESAF), Università degli Studi di Padova

Riassunto

L'Ingegneria Agraria e dei Biosistemi svolge un ruolo determinante nell'implementazione della strategia "One Health", grazie al significativo apporto di conoscenze in tema di soluzioni tecnologiche, in grado di tutelare la salute degli esseri umani in maniera olistica, congiuntamente cioè a quella di tutti gli organismi viventi, vegetali ed animali, nel più generale contesto dell'ambiente circostante. L'Ingegneria Agraria e dei Biosistemi infatti contribuisce alla sostenibilità e alla resilienza dei sistemi alimentari ed alla salute e al benessere di animali e vegetali, ottimizzando i sistemi di lavorazione, confezionamento e conservazione degli alimenti, nonché garantendo un approvvigionamento alimentare stabile alla nutrizione umana. Le tecnologie di agricoltura di precisione – come, ad esempio, trattori guidati da GPS; monitoraggio colturale tramite droni; pianificazione delle attività tramite GIS/DSS/LIM; ecc. – contribuiscono infatti a ridurre l'uso eccessivo di fertilizzanti e pesticidi, proteggendo così l'ambiente e la salute degli agricoltori e dei consumatori. La progettazione avanzata di sistemi di allevamento vegetale ed animale – tramite tecniche BIM – è poi in grado di ottimizzare le produzioni vegetali ed animali che avvengono in spazi confinati, in cui controllo ambientale, biosicurezza e miglioramento dell'alimentazione animale, contribuiscono significativamente alla protezione dell'ambiente. Ulteriori sistemi di gestione dell'acqua e dei rifiuti, salute del suolo e mitigazione dell'inquinamento atmosferico nella produzione agricola su larga scala, contribuiscono infine a creare e mantenere sistemi alimentari produttivi, efficienti e sicuri per ogni essere vivente, oltre che sostenibili nel contesto territoriale, ambientale e paesaggistico.

Abstract

Agricultural and Biosystems Engineering is one of the main pillars of the "One Health" strategy, thanks to its significant contribution of knowledge on technological solutions capable of protecting the health of humans, plants and animals, in the broader context of the surrounding environment. It contributes indeed to sustainability and resilience of food systems and to the health and well-being of animals and plants, optimizing food processing, packaging and storage systems, as well as ensuring a stable food supply to human nutrition. Precision farming technologies — as GPS-guided tractors; crop monitoring through drones; activity planning using GIS/DSS/LIM; etc. — help reducing the excessive use of agrochemicals, thus protecting the environment and the health of farmers and consumers. In particular, advanced design of plant and animal farming systems — using BIM techniques — can optimize plant and animal production in confined airspaces, where environmental control, biosecurity, and improved animal nutrition, contribute significantly to environmental protection. Water and waste management systems, soil health and air pollution mitigation in large-scale agricultural production, may ultimately contribute to creating and maintaining productive, efficient and safe food systems for all living beings, while reducing the environmental footprint of agriculture on the broader territorial, environmental and landscape context.

Keywords: Agricultural engineering, Farm buildings, Agroforestry land, Environmental footprint, Rural landscape.

Introduzione

L'Ingegneria Agraria e dei Biosistemi contribuisce con svariati e significativi contributi all'avanzamento scientifico ed all'implementazione di tecnologie innovative in un approccio "One Health", in cui salute e ambiente si fondono, per uno sviluppo sostenibile integrale. Tali contributi vengono offerti in tema di promozione di pratiche agricole eco-compatibili e miglioramento degli impatti su salute umana ed ambiente, stimolo all'innovazione nel settore agro-alimentare, preservazione della biodiversità e valorizzazione delle

tradizioni locali, in un più generale contesto inteso alla gestione integrata di territorio, ambiente e paesaggio rurale. I principali temi di ricerca scientifica, di sviluppo sperimentale e supporto al trasferimento di tecnologie innovative risultano pertanto:

-) Impiego di sistemi di irrigazione in grado di ottimizzare l'uso dell'acqua e dei nutrienti, con riduzione del conseguente impatto ambientale.

-) Soluzioni per la gestione ed il controllo del deflusso delle acque meteoriche, in grado di ridurre il trasporto di inquinanti, compresi agenti patogeni e sostanze chimiche, nei corpi idrici, e preservare al contempo le zone ripariali/umide, in grado di filtrare naturalmente gli inquinanti e ridurre la diffusione di organismi che causano malattie.

-) Sistemi di trattamento delle acque reflue, in grado di ridurre al minimo il rilascio di agenti patogeni e inquinanti nei bacini idrici, riducendo così il rischio di malattie trasmesse dall'acqua, che colpiscono uomini e animali.

-) Sviluppo di macchinari dotati di sensori e tecnologia GPS, in grado di implementare tecniche di Agricoltura di Precisione, che consentono un'applicazione puntuale di fertilizzanti e pesticidi, minimizzando la diffusione di sostanze chimiche nocive nell'ambiente e riducendo i rischi per la salute umana e animale, contribuendo così a produzioni alimentari più sicure.

-) Sviluppo di macchinari in grado di gestire l'applicazione del letame animale in modo preciso, in grado di ridurre il rischio di dilavamento e di conseguente contaminazione delle acque.

-) Analisi delle condizioni di impiego di macchinari agricoli ed impianti agro-alimentari in condizioni di sicurezza per gli operatori, così da scongiurare gli inaccettabili tassi tuttora registrati in materia di infortuni – anche gravi, con frequenti tragici decessi – per i lavoratori del settore agricolo ed agro-alimentare.

-) Soluzioni di stoccaggio efficienti, come le strutture a temperatura controllata, in grado di controllare il deterioramento dei prodotti agro-alimentari e lo sviluppo di agenti patogeni, dannosi per la salute umana.

-) Sviluppo di sistemi per la raccolta e la movimentazione meccanizzata, in grado di ridurre le perdite post-raccolta e minimizzare i rischi di contaminazione, assicurando che i consumatori ricevano alimenti più sicuri.

-) Progettazione, anche con l'impiego di tecniche BIM – *Building Information Modeling* - dei fabbricati agricoli e dei relativi sistemi di controllo delle caratteristiche microclimatiche all'interno dei volumi confinati, destinati alle produzioni animali/vegetali, con specifica attenzione verso le condizioni di igiene e salubrità dell'aria per gli operatori, nonché delle più generali conseguenze sulla qualità delle produzioni destinate all'alimentazione umana.

-) Analisi del rilascio di macro-, micro- e nano-plastiche dai materiali plastici (tradizionali o biodegradabili) impiegati in agricoltura - per pacciamatura, copertura di tunnel/serre/tendoni, irrigazione, *ecc.* – all'interno dei suoli agricoli, con pericoloso pregiudizio della loro fertilità nel tempo e migrazione di plastiche all'interno della catena alimentare umana (Picuno P., 2018).

-) Impiego di materiali *bio-based* per la realizzazione di elementi dell'involucro edilizio, che incorporino elementi naturali di scarto derivanti dalle attività agricole, in modo da contribuire ad un'edilizia rurale più sostenibile, inclusiva ed esteticamente pregevole – anche nell'ottica della *New Bauhaus Initiative* Europea - ed al recupero di risorse materiali, in un'ottica di Economia Circolare.

-) Impiego di Soluzioni Basate sulla Natura (*Nature-Based Solutions* – NBS) per applicazioni in architettura ed edilizia, incluse tecniche che impiegano elementi viventi - quali i “tetti verdi”, le “pareti verdi”, *ecc.* - intese a fornire migliore *comfort* abitativo, contribuendo al contempo a ridurre i consumi energetici e le corrispondenti emissioni di gas climalteranti in atmosfera (Senes et al., 2022);

-) Valorizzazione dei dati derivanti dall'osservazione della Terra, ai fini dell'analisi, rappresentazione, pianificazione e gestione del territorio ed ambiente rurale, anche mediante strumenti informatici GIS (*Geographical Information Systems*), DSS (*Decision Support Systems*), LIM (*Landscape Information Modeling* - Picuno et al., 2022), *ecc.*, in grado di consentire anche l'impiego di soluzioni a ridotto impatto ambientale, quali le infrastrutture verdi, i servizi ecosistemici, *ecc.* (Fumagalli et al. 2025, Senes et al., 2023a).

-) Approfondimenti del concetto di Paesaggio rurale, quale elemento capace di fornire un contributo significativo al benessere umano, anche in virtù di potenziali soluzioni in grado di valorizzarne l'effetto terapeutico - es., “*Healing Gardens*” (Giardini curativi), “*Forest Therapy*”, *ecc.*

Nel presente articolo, al fine di individuare il ruolo sull'approccio «*One Health*» delle Costruzioni Rurali, vengono in particolare evidenziate le tre principali componenti che determinano effetti diversi su territorio, ambiente e paesaggio rurale, tenuti insieme dal ruolo fondamentale esercitato dal fabbricato, immaginato in qualità di membrana di separazione tra un volume confinato interno e lo spazio esterno:

-) Microclima interno al fabbricato rurale;

-) Involucro edilizio, relative soluzioni architettoniche e materiali costruttivi;
-) Rapporti con territorio, ambiente e paesaggio agroforestale circostante.

Microclima interno al fabbricato rurale

Il microclima interno ad un ambiente confinato svolge un ruolo essenziale nell'assicurare condizioni di benessere ad animali e vegetali, garantendo nel contempo condizioni di sicurezza, igiene e salubrità degli operatori.

Il Microclima interno coinvolge i seguenti campi di analisi, con ripercussioni più o meno dirette sulla salute umana:

-) Sicurezza dei lavoratori
-) Igiene e salubrità degli operatori
-) Salute mentale degli operatori
-) Esposizione a livelli di concentrazione inaccettabili di inquinanti e/o prodotti fitosanitari
-) Risparmio energetico e conseguente impatto ambientale

L'analisi delle condizioni ambientali all'interno dell'ambiente protetto comprende il controllo dei principali parametri del benessere vegetale/animale, che devono comunque essere coerenti con le condizioni di salute e salubrità dei lavoratori che – a differenza di svariate altre tipologie produttive – devono assistere gli organismi viventi per tutta la giornata e nel corso dell'intero anno. Tali parametri sono:

- Temperatura
- Umidità relativa
- Velocità dell'aria
- Gas (CO₂, NH₃, H₂S, CH₄, N₂O, *etc.*)
- Polveri
- Luce
- Rumore

I dispositivi che di conseguenza possono venire impiegati ed ottimizzati affinché venga tutelato l'approccio «*One Health*» sono:

-) Sistemi di monitoraggio e impianti di regolazione dei principali parametri ambientali
-) Sistemi di impiego di fonti energetiche alternative e conseguente risparmio

Le sostanze dannose per l'uomo, per gli animali e per l'ambiente, quali il metano (CH₄), il protossido di azoto (N₂O), l'ammoniaca (NH₃), l'anidride carbonica (CO₂), l'idrogeno solforato (H₂S) e le polveri sottili (PM₁₀ e PM_{2.5}), possono essere rilevate con successo in diverse tipologie di strutture dedicate all'allevamento intensivo, ad esempio dei suini e dei bovini da latte. I monitoraggi riescono a restituire gli andamenti delle concentrazioni di gas e polveri, mettendo in luce momenti della giornata o dell'anno in funzione della stagione, ma anche zone della stalla, che presentano condizioni ottimali oppure potenzialmente critiche per la salute degli animali o degli operatori (Aarnink & Wagemans 2017; Costa 2017; Mautone et al., 2024; Tugnolo et al., 2022). In ambito scientifico la tecnica comunemente utilizzata per il monitoraggio della concentrazione di gas nelle stalle prevede l'utilizzo di analizzatori infrarossi, il cui principio di funzionamento si basa sull'assorbimento della radiazione elettromagnetica a lunghezze d'onda specifiche da parte di molecole gassose. Tra questi, gli analizzatori basati sulla spettroscopia fotoacustica (PAS) o sulla spettroscopia a trasformata di Fourier (FTIR) (D'Urso et al. 2025a). Si registra un crescente utilizzo anche di analizzatori basati sulla spettroscopia laser, come i QUE-PAS, gli analizzatori a diodo sintonizzabile (TDLAS) e gli analizzatori OA-ICOS e CRDS. Tuttavia, stanno emergendo sistemi di misurazione multigas basati su sensori elettrochimici o a infrarosso non-dispersivo (NDIR), che seppur caratterizzati da minor accuratezza e sensibilità, hanno un costo più accessibile, un utilizzo più semplice, consentono di monitorare contemporaneamente più punti in continuo e permettono di controllare in tempo reale le misure essendo parte di un sistema Internet of Things - IoT (Pigni et al. 2021; Mautone et al., 2024; Provolo et al., 2025, Merlini et al., 2025, D'Urso et al., 2025b). I sistemi per il monitoraggio dei gas sono generalmente integrati con sistemi per l'acquisizione dei parametri climatici. Alcuni esempi dell'applicazione del sistema appena descritto in porcilaie e stalle per bovine da latte sono riportati in figura 1.

Il monitoraggio dei gas, del particolato atmosferico e dei parametri microclimatici rappresenta un aspetto centrale nella valutazione della qualità dell'aria ed è pienamente in linea con i principi della zootecnia di precisione (PLF). Le tecnologie PLF, infatti, consentono un controllo continuo e automatizzato del benessere e della salute degli animali, della produttività e dell'impatto ambientale in tempo reale (Berckmans, 2007). Ne

consegue che il monitoraggio della qualità dell'aria è una componente importante tra le tecnologie PLF, che può aiutare gli allevatori ad aumentare la produzione zootecnica e la qualità della produzione in modo sostenibile (Tullo et al., 2019).



Figura 1 – Applicazione in porcaia (foto a sinistra) e stalla per bovine da latte (foto a destra) di una centralina multi-sensore per il monitoraggio in continuo della qualità dell'aria.

Infatti, i sistemi di monitoraggio consentono una caratterizzazione accurata della qualità dell'aria all'interno degli allevamenti, sulla base di diversi fattori, tra cui le caratteristiche costruttive (ad esempio, stalle con involucro aperto che favoriscono la ventilazione naturale, oppure con involucro chiuso, e tipologia di pavimentazione), le modalità di gestione del microclima (ad esempio, impianti di ventilazione meccanizzata, sistemi di raffrescamento tramite doccette, utilizzo di tende per la regolazione del flusso d'aria interno all'edificio) e le pratiche di gestione degli animali (numero di mungiture, tipologia di dieta, pulizia delle deiezioni).

È importante sottolineare che le soluzioni costruttive e gestionali sono fortemente condizionate dal contesto climatico in cui gli allevamenti sono realizzati. Ad esempio, negli allevamenti di bovine da latte situati in aree a clima mediterraneo, le stalle presentano generalmente involucri aperti, in cui la ventilazione naturale è integrata con sistemi meccanici. La gestione, inoltre, è orientata in modo prioritario alla riduzione dello stress da caldo, anche mediante l'impiego di impianti di bagnatura delle vacche da latte (D'Urso et al., 2024).

Gli studi presenti in letteratura evidenziano come le caratteristiche costruttive, la composizione della mandria e le modalità di gestione influenzino la produzione di gas, determinando significative differenze nelle emissioni tra gli allevamenti localizzati nel bacino mediterraneo e quelli situati nel Nord Europa, dove le diverse condizioni climatiche incidono in modo rilevante sulla progettazione e sulla gestione aziendale.

La qualità dell'aria può subire un peggioramento in presenza di una scarsa ventilazione interna alla stalla (dovuta a deficit costruttivi delle strutture di stabulazione o alla chiusura delle aperture verso l'esterno, soprattutto nei periodi freddi); in contesti in cui la rimozione delle deiezioni dalla stalla viene svolta poco frequentemente; durante le operazioni di rimozione delle deiezioni dalla pavimentazione della stalla o dalle fosse sottostanti le pavimentazioni fessurate (con effetti più evidenti se le deiezioni hanno avuto una permanenza maggiore); nei momenti in cui c'è un'intensa attività animale (soprattutto durante la distribuzione dell'alimentazione).

I sistemi di monitoraggio sono in grado di rilevare variazioni di breve durata delle concentrazioni di gas e polveri e identificare le zone in cui possono determinarsi condizioni di potenziale rischio ambientale. Inoltre, trasmettendo i dati in tempo reale, tali sistemi possono fornire allerte anticipate aumentando la rapidità di interventi correttivi, ma anche supportare la pianificazione dell'introduzione di adeguate tecniche di mitigazione.

La disponibilità di misure in continuo offre anche la possibilità di approfondire meglio l'andamento delle emissioni verso l'ambiente, riuscendo a comprendere meglio l'entità dell'impatto ambientale che si origina dalle stalle in funzione delle stagioni e dell'andamento meteorologico (Philippe et al., 2011; Guarino et al., 2003; Blanes-Vidal et al., 2008; D'Urso et al., 2025a; D'Urso et al., 2023).

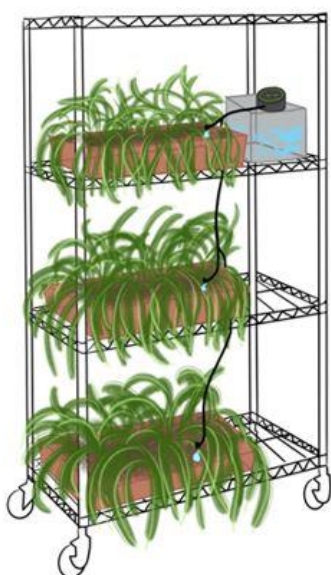
La gestione efficace del microclima interno ai fabbricati rurali richiede l'adozione di strategie innovative

che non solo mirino a controllare i parametri ambientali, ma che riescano a mitigare le emissioni di gas. Le strategie di mitigazione maggiormente diffuse includono:

- la gestione degli animali, ad esempio modifiche della dieta o l'introduzione della terza mungitura;
- l'impiego di soluzioni costruttive, come pavimentazioni specializzate, ventilazione naturale o meccanica;
- la gestione della stalla e delle deiezioni, comprendente tecniche di pulizia dei pavimenti, acidificazione e l'attivazione di sistemi di raffrescamento.

Recentemente la ricerca scientifica sta sviluppando soluzioni sostenibili, quali ad esempio l'impiego di pareti verdi per la riduzione delle polveri sottili (Finocchiaro et al., 2025) (Figura 2) o la bio-acidificazione dei liquami per la riduzione dell' NH_3 , mediante l'utilizzo di sottoprodotti della lavorazione del caffè e applicando metodologie che valutano la sostenibilità di tali strategie anche a livello territoriale (Cinardi et al., 2025), evidenziando che la valorizzazione dei sottoprodotti dell'agro-industria può ridurre l'impatto ambientale del trasporto quando l'industria si trova entro un raggio di 75 km dall'allevamento.

Green wall design



In-field measurement campaign



Figura 2 - Schema di progettazione di una parete verde mobile per il monitoraggio delle polveri sottili in una stalla per bovine da latte.

Recentemente ha riscosso interesse nella comunità scientifica anche il monitoraggio degli inquinanti nell'ambiente circostante la stalla. Questo approccio può fornire informazioni sulla loro dispersione al di fuori dell'edificio zootecnico. In particolare, come tecnica complementare ai tradizionali rilevatori a terra (Burgués & Marco 2020; Roldán et al. 2015), ha trovato applicazione l'utilizzo di velivoli a pilotaggio remoto (figura 3), anche se la loro applicazione per la valutazione delle emissioni in agricoltura, in particolare nei sistemi di allevamento, è ancora in fase pionieristica (Ma et al., 2024). I droni utilizzati sono equipaggiati con sistemi per il campionamento di aria, successivamente analizzata mediante gascromatografia (Vinković et al. 2022), oppure con piattaforme multi-sensore a basso costo (Finzi et al., 2024), e prevedono la definizione di specifici protocolli di misurazione a garanzia dell'affidabilità dei dati raccolti. Indipendentemente dalla modalità di misurazione delle concentrazioni degli inquinanti nei pressi delle strutture di stabulazione, sia a terra mediante punti fissi, sia in volo mediante sensori mobili, l'applicazione di appropriati modelli di dispersione atmosferica può consentire di stimare i flussi di emissione dalle sorgenti e di generare mappe di dispersione dei gas, sia a breve che a lungo raggio (Mattia et al., 2025). L'impiego di tali modelli, già ampiamente validato in ambito colturale, richiede tuttavia particolare attenzione quando applicato ai complessi aziendali zootecnici, caratterizzati da una molteplicità di fonti emissive e dalla presenza di ostacoli ai flussi d'aria (ad es. edifici, alberi e arbusti).



Figura 3 - Monitoraggio delle emissioni gassosi e di particolato in un allevamento di suini. Una centralina multisensore è collocata su un aeromobile a pilotaggio remoto (APR), impiegato per misurare le concentrazioni di inquinanti nei dintorni della porcilaia e delle vasche di stoccaggio dei reflui.

Involucro edilizio e relative soluzioni architettoniche e materiali costruttivi

L'involucro edilizio svolge un ruolo fondamentale nell'assicurare condizioni di ergonomia delle produzioni e salvaguardia di sicurezza e salubrità degli operatori. In tale contesto, risulta determinante l'estensione anche a tali fabbricati l'innovativo approccio, recentemente invalso grazie all'iniziativa «*New European Bauhaus*», nell'implementazione dei tre principi fondamentali di: *Sostenibilità, Inclusione, Estetica*. Tale iniziativa, anche finalizzata a sostenere l'attuazione del *Green Deal* europeo nella Bioeconomia Circolare, è destinata ad essere un solido sostegno per l'industria edile europea, anche promuovendo la condivisione delle conoscenze per quanto riguarda le soluzioni *bio-based* sostenibili – quali, ad esempio, l'uso circolare del legno e di altri materiali naturali, ovvero anche sotto-prodotti o residui dalle attività agricole ed agro-industriali (Picuno P., 2022).

Le scelte sull'involucro edilizio coinvolgono i seguenti campi di analisi, che possono determinare effetti più o meno diretti sulla salute umana:

-) Materiali costruttivi, anche a base di soluzioni per bioedilizia;
-) Materiali riciclabili, che richiedono un pronto recupero post-consumo ed indirizzamento verso forme di riciclaggio (materiale, energetico, chimico, *etc.*) – ad esempio, i materiali plastici impiegati nella protezione delle colture (serre, tunnel, pacciamatura, ecc.)
-) Aspetti architettonici, *layout* interno.

L'analisi delle proprietà dei materiali da costruzione e delle soluzioni progettuali architettoniche per gli edifici agricoli sostiene il settore edile europeo, affrontando la carenza di manodopera e promuovendo soluzioni sostenibili a base naturale. L'Ingegneria Agraria e dei Biosistemi esamina i materiali da costruzione naturali, anche impiegati negli edifici rurali – quali, ad esempio, i mattoni di argilla cruda essiccati al sole (*c.d.*, “*Adobe*”), eventualmente rinforzati con fibre naturali. La ricerca esplora anche la possibilità di alleggerire con materiali naturali gli elementi strutturali convenzionali, come il calcestruzzo, per migliorare la salute dell'agroecosistema e promuovere materiali di bio-edilizia ecologici (Figura 4).

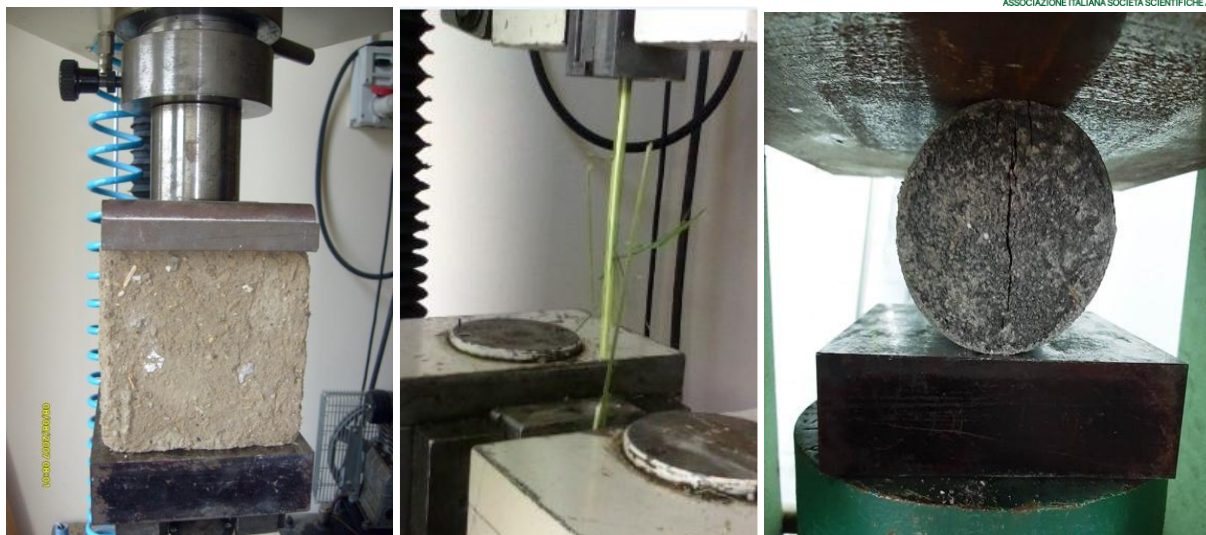


Figura 4 - Prove meccaniche di laboratorio per compressione su mattoni di argilla cruda rinforzati con fibre naturali (paglia/lana - foto a sinistra), per trazione su fibre di *Spartium junceum* (Ginestra – foto al centro), su blocchi in calcestruzzo rinforzati con *Arundo Donax* (per trazione con prova “Brasiliiana” – foto a destra).

La costruzione di componenti isolanti (termici e/o acustici) con materiali naturali - quali paglia, lana, ecc. - può poi migliorare l'efficienza energetica e la sostenibilità ambientale. Materiali di origine biologica, come l'amido di mais, possono poi venire utilizzati in agricoltura per pacciamare il terreno, controllare le infestanti, trattenere l'umidità e migliorare la qualità del suolo. Questi film bio-degradabili contribuiscono alla sostenibilità agricola, riducendo la rimozione e lo smaltimento dei materiali plastici tradizionali.

Le soluzioni basate sulla natura (NBS) utilizzano infine processi naturali per affrontare sfide ambientali, sociali ed economiche, come il rimboschimento e la creazione di zone umide. Le NBS offrono vantaggi quali la mitigazione dei cambiamenti climatici, la conservazione della biodiversità, i servizi ecosistemici, il risparmio energetico e le opportunità economiche.

Il riciclaggio dei rifiuti agricoli comporta infine la conversione di biomasse e materiali plastici agricoli in energia, biocarburanti e fertilizzanti, riducendo i rifiuti e l'impatto ambientale delle produzioni agricole.

Rapporti con territorio, ambiente e paesaggio agroforestale circostante

Il rapporto tra il costruito (componente antropica) ed il circostante ambiente naturale, determina significative ripercussioni sulla qualità della vita, con dirette conseguenze su benessere umano, tutela dell'ambiente naturale, nonché possibili iniziative innovative (quali, ad esempio, lo sviluppo di “*Healing Gardens*” e della cosiddetta “*Forest Therapy*”), decisive per un approccio «*One Health*».

Tali aspetti passano attraverso differenti fasi, quali:

-) Rilievo e Rappresentazione
-) Analisi, Modellizzazione e Valutazione
-) Progettazione
-) Pianificazione tecnica
-) Gestione e Rigenerazione di Territorio, Ambiente e Paesaggio Agro-Forestale

In tale contesto, anche in un approccio «*One Health*», le nuove tecnologie ed avanzamenti scientifici consentono di intervenire con forme di:

-) infrastrutture rurali e verdi
-) energie rinnovabili
-) spazi di transizione urbano-rurale
-) sistema del verde, incluso il verde tecnico
-) pareti verdi/tetti verdi
-) servizi ecosistemici e tutela della Biodiversità.

Il paesaggio viene riconosciuto come elemento fondamentale del patrimonio culturale e naturale d'Europa. Allo stesso modo è un fattore molto importante per la qualità della vita delle popolazioni, in ogni sua declinazione, ed è necessario provvedere alla sua tutela, gestione e pianificazione in ottica di sostenibilità nella sua accezione più ampia e con l'obiettivo di permettere alle popolazioni di godere di paesaggi "di qualità".

In questa prospettiva, l'adozione di soluzioni come pareti e tetti verdi, in ambito sia urbano che zootecnico, rappresenta uno strumento significativo per migliorare l'estetica e la vivibilità degli spazi, svolgendo al contempo funzioni ecologiche e sociali rilevanti. Come riportato da Vitaliano et al. (2024), tali sistemi sfruttano la capacità naturale delle piante di assorbire, filtrare e sequestrare gli inquinanti, fornendo un approccio sostenibile al miglioramento della qualità dell'aria. Le pareti verdi, ad esempio, installate sulle facciate degli edifici, agiscono come veri e propri filtri viventi che intrappolano il particolato e assorbono i gas; quelle attive, dotate di sistemi di ventilazione integrati, amplificano ulteriormente il flusso d'aria attraverso la vegetazione e migliorano così il tasso di cattura degli inquinanti.

In definitiva, sistemi di verde urbano – che comprendono anche alberi, arbusti e siepi – agiscono come barriere e “spugne” naturali, capaci di migliorare la qualità dell'aria e si inseriscono pienamente nella logica della pianificazione sostenibile del paesaggio, contribuendo non solo alla mitigazione degli impatti ambientali, ma anche alla costruzione di un patrimonio urbano più salubre e vivibile (Senes et al., 2023b).

L'analisi territoriale svolta attraverso il GIS consente la costruzione di un sistema di valutazione delle emissioni di origine zootecnica esteso e spazializzato. I risultati di questa analisi evidenziano la distribuzione delle emissioni su scala locale, a partire da emissioni puntali derivanti dalle strutture di allevamento, evidenziando gli effetti su un'ampia area delle azioni dei singoli allevatori. Risulta così possibile identificare le aree in cui sono maggiormente necessarie strategie di mitigazione per ridurre l'impatto sull'ambiente (D'Urso et al., 2025c). Questo approccio potrebbe essere utile per i sistemi di supporto decisionale e offre un valido supporto alle autorità responsabili dell'applicazione della legislazione agroambientale.

Il concetto più ampio di valorizzazione dei sottoprodotti agro-industriali a livello territoriale è cruciale per la sostenibilità ambientale. I processi fermentativi consentono di valorizzare scarti non edibili, trasformando le biomasse residuali in biofertilizzanti e ammendanti per i suoli agricoli, capaci di favorire la crescita delle colture, migliorare la biodisponibilità dei nutrienti e stimolare le difese naturali delle piante. La sostituzione dei fertilizzanti industriali con compost da sottoprodotti agroindustriali, supportata da strumenti GIS per la pianificazione spaziale, riduce gli impatti ambientali a livello regionale e promuove una gestione efficiente e sostenibile dei rifiuti in un'ottica di economia circolare. L'integrazione di queste strategie di valorizzazione dei rifiuti, che mirano a “zero-waste”, riduce l'impronta ambientale complessiva, supportando indirettamente la sostenibilità delle aziende agricole.

La stima della distribuzione potenziale di una specie vegetale sul territorio rappresenta un passaggio fondamentale per valutare la biomassa disponibile. Tale distribuzione può essere ottenuta attraverso strumenti geostatistici e modelli di *machine learning* integrati con l'uso dei GIS (Leanza et al., 2022; Catalano et al., 2023a). Le analisi così ottenute consentono non solo di quantificare il potenziale energetico di un'area in relazione alle biomasse reperibili (Catalano et al., 2024), ma anche di supportare strategie di pianificazione territoriale e scenari di valorizzazione sostenibile delle risorse (Catalano et al., 2023b).

In tale ambito, le applicazioni GIS si configurano come strumenti strategici per l'ottimizzazione dell'intera filiera di valorizzazione dei sottoprodotti agro-industriali. Attraverso modelli dedicati, essi consentono di individuare le aree più idonee per l'installazione di impianti di digestione anaerobica, riducendo al minimo i costi logistici e gli impatti ambientali, grazie alla mappatura accurata delle biomasse disponibili. In questo modo è possibile pianificare una gestione territoriale integrata, che ottimizza la distribuzione delle risorse, la raccolta dei sottoprodotti e la loro trasformazione in un'ottica di sostenibilità ambientale ed economica. In quest'ottica, l'approccio GIS si integra con la prospettiva *One Health*, evidenziando come la gestione intelligente dei sottoprodotti agro-industriali generi benefici non solo ambientali ed economici, ma anche sanitari e sociali. La riduzione delle emissioni nocive, la prevenzione dell'inquinamento delle acque e il miglioramento della qualità del suolo contribuiscono infatti a proteggere la salute umana e animale, rafforzando il legame tra ecosistemi resilienti e benessere collettivo.

Ogni anno nel mondo vengono generati circa un miliardo di tonnellate di co-prodotti, sottoprodotti, residui, scarti e rifiuti agricoli, la cui gestione impropria rappresenta un rischio significativo per l'ambiente, soprattutto nelle aree rurali. Tuttavia, se valorizzati correttamente, questi materiali possono diventare risorse utili per nuovi cicli produttivi, come l'energia, l'edilizia o il *packaging* alimentare. La loro valorizzazione è centrale per la *Circular Economy*, obiettivo chiave del *Green Deal* europeo, che punta a un'economia a rifiuti zero entro il 2025 e a un continente a impatto climatico neutro entro il 2050 (Parlato and Pezzuolo, 2024; Parlato and Porto, 2020). Il corretto impiego dei rifiuti agricoli richiede comunque un approccio strutturato, che comprenda raccolta, stoccaggio, trattamento, trasferimento e utilizzo, supportato da conoscenze, politiche e incentivi

mirati. In questo contesto, il recupero degli scarti nel settore della bioedilizia permette non solo di ridurre la quantità di rifiuti prodotti, ma anche di creare un ciclo produttivo circolare, in cui i materiali di scarto vengono trasformati in componenti costruttivi innovativi. Questa strategia limita l'inquinamento e il consumo di risorse naturali vergini, migliorando la qualità dell'aria e dell'ambiente costruito, riducendo la domanda energetica degli edifici grazie alle proprietà termiche e acustiche dei materiali naturali e sostenendo la salute globale (Parlato & Pezzuolo, 2025). Naturalmente questi nuovi materiali da costruzione oltre alla sostenibilità devono garantire la rispondenza a tutti i requisiti normativi. In Figura 5 è riportato un campione in terra cruda (mix di argilla, limo e sabbia) e sottoprodotto agricolo, "vinacce", sottoposto a caratterizzazione meccanica e fisica.



Figura 5 - Esempio di campione cilindrico in terra cruda e vinacce utilizzato per la caratterizzazione meccanica e fisica

Parallelamente, il riutilizzo dei materiali contribuisce anche alla tutela degli ecosistemi, preservando la biodiversità e riducendo l'erosione del suolo e la contaminazione di aria e acque. In questo quadro, l'Ingegneria Agraria e dei Biosistemi, occupandosi di tutte le categorie di servizi ecosistemici, risulta decisiva nella strategia «*One Health*», integrando salute ambientale, animale e umana. L'integrazione degli scarti nella bioedilizia rappresenta quindi un approccio sostenibile che coniuga benefici ambientali, economici e sociali, offrendo un modello replicabile per una gestione responsabile delle risorse e per la transizione verso economie a basso impatto ambientale.

Nella visione, fatta propria dalla Commissione Europea, le aree non antropizzate si configurano come una vera e propria infrastruttura di supporto alla vita dell'uomo, una matrice verde essenziale per lo sviluppo futuro della società umana, la cosiddetta "infrastruttura verde", cioè una rete di aree naturali e seminaturali pianificata, progettata e gestita in modo da fornire un ampio spettro di servizi ecosistemici, sia in contesto rurale che urbano. La sua caratteristica fondamentale è la "multifunzionalità, cioè la capacità di fornire contemporaneamente e nello stesso luogo diversi "servizi ecosistemici", intesi come "l'insieme dei benefici, diretti ed indiretti, che l'uomo trae dagli ecosistemi" (MEA, 2005).

Ragionare in termini di "infrastruttura verde" consente di investire risorse (economiche e umane) per un obiettivo e raggiungerne, invece, diversi: mitigazione di e adattamento ai cambiamenti climatici, gestione delle acque meteoriche (sia nella quantità che nella qualità), aumento della biodiversità, regolazione di temperatura e umidità in ambiente urbano, mitigazione dell'inquinamento atmosferico, creazione di ambienti più vivibili e a misura umana, miglioramento della salute e del benessere delle persone. Per raggiungere tali obiettivi, però, è necessario approcciarsi con visione strategica e metodi basati sull'evidenza scientifica alla pianificazione, progettazione, gestione e manutenzione di tali sistemi verdi. L'infrastruttura verde, poi, richiede di adottare un approccio sistemico e trasversale, invertendo la logica settoriale e, spesso, marginale relegata al territorio verde (Senes et al., 2025a, Senes et al., 2025b).

Come detto, l'Ingegneria Agraria e dei Biosistemi promuove una visione sistemica in cui, alle diverse scale e ai diversi livelli del processo di pianificazione, progettazione e gestione del territorio verde, le NBS siano sempre considerate come prioritarie, riconoscendone l'importante ruolo nella risposta ai cambiamenti climatici nonché i loro benefici sociali, economici e ambientali, così come sottolineato anche nella "Risoluzione sulle *Nature Based Solutions* per supportare lo Sviluppo Sostenibile" adottata dall'Assemblea delle Nazioni Unite per l'Ambiente (UNEA) nel marzo 2022. In figura 6 sono riportati due recenti realizzazioni sperimentali dove BrianzaAcque sta monitorando l'efficacia delle soluzioni adottate.

I servizi ecosistemici forniti dalla infrastruttura verde possono essere ricondotti a tre grandi categorie: servizi di approvvigionamento (cibo, acqua, materie prime, ecc.), i servizi di regolazione (del clima, del ciclo dell'acqua, degli habitat, ecc.), servizi culturali (paesaggio, attività ricreative e turismo, ecc.). In accordo con il MEA (2005), tutti i servizi ecosistemici contribuiscono, in vario modo, al benessere umano. L'Ingegneria Agraria e dei Biosistemi, occupandosi di tutte le categorie di servizi ecosistemici, risulta strategica nella strategia «*One Health*». In particolare, per quanto riguarda i servizi ecosistemici di regolazione, l'Ingegneria Agraria e dei Biosistemi fornisce un contributo decisivo nello sviluppo delle NBS per la gestione degli eventi estremi legati ai cambiamenti climatici (temperature ed acque meteoriche). I SuDS (*Sustainable Drainage Systems*), ad esempio, vengono pianificati e progettati utilizzando appositi software di modellazione, che tengono conto delle più recenti evidenze scientifiche.

Dal punto di vista dei servizi ecosistemici culturali, lo sviluppo (attraverso la pianificazione e progettazione) di *greenways* e di infrastrutture per la mobilità dolce consentono così alle persone, specie nel territorio rurale, di raggiungere e fruire in modo sostenibile del paesaggio e del capitale naturale, garantendo benessere all'ambiente, alle popolazioni locali e ai visitatori. Infine, la progettazione basata sull'evidenza scientifica di "*healing landscapes*" consente di valorizzare gli effetti sulla salute e sul benessere del contatto con la natura.



Figura 6 – Esempi di NBS per il drenaggio delle acque meteoriche in contesto urbano. Bacino (foto a sinistra) e aiuola (foto a destra) di ritenzione lungo via Matteotti a Bovisio Masciago (MB).

Conclusioni

L'ingegneria agraria e dei biosistemi è un pilastro fondamentale della strategia "*One Health*", in quanto fornisce soluzioni pratiche e tecnologiche che collegano la salute degli esseri umani, degli animali e dell'ambiente. Sebbene il concetto di *One Health* sia spesso discusso in termini di medicina e biologia, è l'applicazione dei principi ingegneristici che spesso rende queste strategie una realtà.

Bibliografia

- Aarnink, A. J. A., & Wagemans, M. J. M. (1997). Ammonia volatilization and dust concentration as affected by ventilation systems in houses for fattening pigs. *Transactions of the ASAE*, 40(4), 1161-1170.
- Berckmans D. 2007. Precision livestock farming. *Computers and Electronics in Agri-culture* 62: 1.
- Blanes-Vidal, V., Hansen, M. N., Pedersen, S., & Rom, H. B. (2008). Emissions of ammonia, methane and nitrous oxide from pig houses and slurry: Effects of rooting material, animal activity and ventilation flow. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 124(3-4), 237-244.
- Burgués, J., Marco, S. (2020). Environmental chemical sensing using small drones: A review. *Science of the total environment*, 748, 141172.
- Catalano, G. A., D'Urso, P. R., Maci, F., & Arcidiacono, C. (2023a). Influence of Parameters in SDM Application on Citrus Presence in Mediterranean Area. *Sustainability*, 15(9), 7656. <https://doi.org/10.3390/su15097656>
- Catalano, G. A., Maci, F., D'Urso, P. R., & Arcidiacono, C. (2023b). GIS and SDM-Based Methodology for Resource Optimisation: Feasibility Study for Citrus in Mediterranean Area. *Agronomy*, 13(2), 549. <https://doi.org/10.3390/agronomy13020549>
- Catalano, G.A., D'Urso, P.R., Arcidiacono, C. (2024). Predicting potential biomass production by geospatial modelling: The case study of citrus in a

- Mediterranean area, Ecological Informatics, Volume 83, 2024, 102848, <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2024.102848>
- Cinardi, G., Vitaliano, S., Fasciana, A., Fragalà, F., La Bella, E., Santoro, L. M., D'Urso, P. R., Baglieri, A., Cascone, G., & Arcidiacono, C. (2025). Preliminary Analysis on Bio-Acidification Using Coffee Torrefaction Waste and Acetic Acid on Animal Manure from a Dairy Farm. *Agriculture*, 15(9), 948. <https://doi.org/10.3390/agriculture15090948>
- Costa, A. (2017). Ammonia concentrations and emissions from finishing pigs reared in different growing rooms. *Journal of environmental quality*, 46(2), 255-260.
- D'Urso, P.R., Arcidiacono, C., Valenti, F., Janke, D., Cascone, G. (2023). Measuring ammonia concentrations by an infrared photo-acoustic multi-gas analyser in an open dairy barn: Repetitions planning strategy. *Computers and Electronics in Agriculture*, Volume 204, 2023, 107509, ISSN 0168-1699, <https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.107509>.
- D'Urso P.R., Arcidiacono C., Cascone G. (2024). Ammonia and greenhouse gas distribution in a dairy barn during warm periods. *Front. Agr. Sci. Eng.*, 2024, 11(3): 428-441 DOI:10.15302/J-FASE-2024542
- D'Urso P.R., Arcidiacono C., Cascone G. (2025a) Gas concentration monitoring techniques by using an infrared photo-acoustic multi-gas analyser and low-cost devices in an open dairy barn. *J Anim Sci Technol* 2025;67(3):651-665. <https://doi.org/10.5187/jast.2024.e33>
- D'Urso, P. R., Finocchiaro, A., Cinardi, G., & Arcidiacono, C. (2025b). In-Field Performance Evaluation of an IoT Monitoring System for Fine Particulate Matter in Livestock Buildings. *Sensors*, 25(16), 4987. <https://doi.org/10.3390/s25164987>
- D'Urso, P.R., Cinardi, G., Arcidiacono, C., Cascone, G. (2025c). Distribution of Gaseous Emissions from Cattle Housing at Regional Level. In: Sartori, L., Tarolli, P., Guerrini, L., Zuecco, G., Pezzuolo, A. (eds) *Biosystems Engineering Promoting Resilience to Climate Change - AIIA 2024 - Mid-Term Conference. MID-TERM AIIA 2024. Lecture Notes in Civil Engineering*, vol 586. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-84212-2_122
- Finocchiaro, A., Vitaliano, S., Cinardi, G., D'Urso, P. R., Cascone, S., & Arcidiacono, C. (2025). Green Wall System to Reduce Particulate Matter in Livestock Housing: Case Study of a Dairy Barn. *Buildings*, 15(13), 2280. <https://doi.org/10.3390/buildings15132280>
- Finzi, A., Mautone, A., Becciolini, V., Mattia, A., Rossi, G., Conti, L., Vitaliano S., D'Urso P. & Arcidiacono, C. (2024). Emission-controlled intensive livestock housing systems for ecological transition: innovative measuring, mitigating and mapping strategies (EMILI). In Book of abstracts Padova 2024 Mid-term Conference (pp. 15-15). Associazione Italiana di Ingegneria Agraria.
- Fumagalli N., Senes G., Ferrario P.S., Corsini D., Brenna L., 2025. "Assessing Ecosystem Services Provided by Rural and Urban Green Areas at Territorial Scale. The Case of the Local Park GruBria (Monza and Milan Provinces, Italy)". *Lecture Notes in Civil Engineering*, 586. DOI: 10.1007/978-3-031-84212-2_138
- Guarino, M., Fabbri C., Navarotto, P., Valli, L., Moscatelli, G., Rossetti, M., and Mazzotta, V. 2003. Ammonia, Methane and Nitrous Oxide Emissions and Particulate Concentrations in Two Different Buildings for Fattening Pigs. *Proceedings of the International Symposium on Gaseous and Odour Emissions from Animal Production Facilities*, no. January: 140-49.
- Leanza, P.M., Valenti, F., D'Urso, P.R., Arcidiacono, C.: A combined MaxEnt and GIS-based methodology to estimate cactus pear biomass distribution: application to an area of southern Italy. *Biofuels Bioprod. Biorefining* 16, 54-67 (2022). ISSN: 1932-104X. <https://doi.org/10.1002/bbb.2304>
- Ma, W., Ji, X., Ding, L., Yang, S. X., Guo, K., & Li, Q. (2024). Automatic monitoring methods for greenhouse and hazardous gases emitted from ruminant production systems: A review. *Sensors*, 24(13), 4423.
- Mattia, A., Merlini, M., Squillace, F., Rossi, G., Conti, L., & Becciolini, V. (2025). Assessment of CO2 emission rate from extended area sources with WindTrax model in a dairy cattle farm. *AGRONOMY RESEARCH*, 1-15. Mautone, A., & Finzi, A. (2024). Air quality monitoring in piggeries through an IoT gas and environmental sensors device. In *Precision Livestock Farming 2024* (pp. 1728-1736). EA-PLF. ISBN: 979-12-210-6736-1
- Mautone, A., & Finzi, A. (2024). Air quality monitoring in piggeries through an IoT gas and environmental sensors device. In *Precision Livestock Farming 2024* (pp. 1728-1736). EA-PLF. ISBN: 979-12-210-6736-1
- MEA - Millennium Ecosystem Assessment. "Ecosystem and Human Well being: A Framework for Assessment". Island Press, 2005
- Merlini, M., Rossi, G., Barbari, M., Becciolini, V., & Mattia, A. (2025). G-eko, monitoring system for decision support in livestock farms using UAV and self-designed control units. *Tesi di dottorato. Università degli Studi di Firenze*.
- Parlato, M.C.M., Pezzuolo, A., 2025. Sustainable Reuse of Traditional Rural Buildings: Review, Conceptual Framework, and Future Research Directions. https://doi.org/10.1007/978-3-031-84212-2_127
- Parlato, M.C.M., Pezzuolo, A., 2024. From Field to Building: Harnessing Bio-Based Building Materials for a Circular Bioeconomy. *Agronomy* 14. <https://doi.org/10.3390/agronomy14092152>
- Parlato, M.C.M., Porto, S.M.C., 2020. Organized framework of main possible applications of sheep wool fibers in building components. *Sustainability* (Switzerland) 12. <https://doi.org/10.3390/su12030761>
- Philippe, F. X., Cabaraux, J. F., & Nicks, B. (2011). Ammonia emissions from pig houses: Influencing factors and mitigation techniques. *Agriculture, ecosystems & environment*, 141(3-4), 245-260.
- Picuno P. (2018). *Agriculture: Polymers in Crop Protection. Encyclopedia of Polymer Applications*, Mishra, M. (Ed.), Vol.1, pp 67-92. Set. Boca Raton: CRC Press.
- Picuno C.A., Godosi Z., Picuno P. (2022). Implementing a landscape information modelling (LIM) tool for planning leisure facilities and landscape protection. *Proceedings of the Conference on: "Public Recreation and Landscape Protection: with the environment hand in hand..."*, Křtiny (Czech Republic), 9-10 May 2022, 186-190.
- Picuno P. (2022). Farm Buildings as Drivers of the Rural Environment. *Frontiers in Built Environment*, 8: 693876. doi: 10.3389/fbuil.2022.693876
- Pigni, A., Tugnolo, A., Beghi, R., Cocetta, G. and Finzi A. 2021. Rapid and Continuous Monitoring of Air Ammonia Concentration in Dairy Milking Parlors. 2021 IEEE International Workshop on Metrology for Agriculture and Forestry, MetroAgriFor – Proc., 167-171.
- Provolo, G., Brandolese, C., Grotto, M., Marinucci, A., Fossati, N., Ferrari, O., Beretta, E., & Riva, E. (2025). An Internet of Things framework for monitoring environmental conditions in livestock housing to improve animal welfare and assess environmental impact. *Animals*, 15(5), 644.
- Roldán, J.J., Joossen, G., Sanz, D., del Cerro, J., Barrientos, A., (2015). Mini-UAV based sensory system for measuring environmental variables in greenhouses. *Sensors* (Switzerland) 15, 3334-3350.
- Senes G., Bonsignori R., 2022. SuDS - Sustainable Drainage Systems. Soluzioni progettuali tipo di infrastrutture verdi per la gestione delle acque meteoriche. *Il Verde Editoriale*, ISBN 9788886569415.
- Senes G., Parretta C., Fumagalli N., Tassinari P., Torreggiani D., 2023. "Soft mobility network for the enhancement and discovery of the rural landscape: definition of a masterplan for Alto Ferrarese (Italy)". *Land*, vol. 12, p. 1-24. Doi: 10.3390/land12030527.
- Senes G., Fumagalli N., Ferrario P.S., Rovelli R., Riva F., Sacchi G., Gamba P., Ruffini G., Redondi G., 2023. "Assessment of the ecosystem services given by rural and urban green areas to preserve high quality territories from land take: the case of the Province of Monza Brianza (Italy)". *Journal of Agricultural Engineering*. Doi: 10.4081/jae.2023.1526
- Senes G., Ferrario P.S., Riva F., Fumagalli N., Corsini D., Donati A., Contestabile L., Fondi S., Rovelli R., 2025. "Active Tourism and Intermodality: Railway Stations as Soft Mobility Hubs-An Assessment Framework for Italy". *Land* 2025, 14(2), 380; Doi: 10.3390/land14020380
- Senes G., Lussana G., Ferrario P.S., Rovelli R., Pedrazzoli A., Corsini D., Fumagalli N., 2025. "How Land-Take Impacts the Provision of Ecosystem Services—The Case of the Province of Monza and Brianza (Italy)". *Land*, 14, 1700. DOI: 10.3390/land14091700
- Tugnolo, A., Beghi, R., Cocetta, G., and Finzi, A. 2022. An Integrated Device for Rapid Analysis of Indoor Air Quality in Farms: The Cases of Milking Parlors and Greenhouses for Baby Leaf Cultivation. *Journal of Cleaner Production* 369 (August): 133401.
- Tullo, E., Finzi, A., & Guarino, M. 2019. Environmental impact of livestock farming and Precision Livestock Farming as a mitigation strategy. *Science*

of the total environment. 650: 2751-2760.

- Vinković, K., Andersen, T., de Vries, M., Kers, B., van Heuven, S., Peters, W., Hensen, A., van den Bulk, P. & Chen, H. (2022). Evaluating the use of an Unmanned Aerial Vehicle (UAV)-based active AirCore system to quantify methane emissions from dairy cows. *Science of The Total Environment*, 831, 154898.
- Vitaliano, S., Cascone, S., & D'Urso, P. R. (2024). Mitigating Built Environment Air Pollution by Green Systems: An In-Depth Review. *Applied Sciences*, 14(15), 6487. <https://doi.org/10.3390/app14156487>.

ISBN: 9788894592566