



Associazione
Italiana
Società
Scientifiche
Agrarie

ISBN: 978-88-945925-5-9

I QUADERNI DI AISSA

ASSOCIAZIONE ITALIANA SOCIETÀ SCIENTIFICHE AGRARIE

Atti del XXI Convegno AISSA

Le scienze Agrarie nelle sfide globali

Firenze, 15-16 febbraio 2024

Volume 7, 2025

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: 978-88-945925-5-9

Copyright: Associazione Italiana delle Società Scientifiche Agrarie – AISSA, 2025

I QUADERNI DI



AISSA



ASSOCIAZIONE ITALIANA SOCIETÀ SCIENTIFICHE AGRARIE

Atti del XXI Convegno AISSA

Le scienze Agrarie nelle sfide globali

Firenze, 15-16 febbraio 2024

Volume 7, 2025

a cura di:

Enrico Marone e Massimo Tagliavini



Associazione
Italiana
Società
Scientifiche
Agrarie



ALMA MATER STUDIORUM
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA
DIPARTIMENTO DI
SCIENZE E TECNOLOGIE AGRO-ALIMENTARI



ergo consulting srl.



Conferenza Nazionale
per la Didattica Universitaria di
AGRARIA

Indice

| | |
|--|----|
| <i>Relazione introduttiva: L'agricoltura e le sfide globali: il panorama nazionale e internazionale</i> Vincenzini M. | 1 |
| <i>Il sistema suolo nelle sfide globali</i> Corti G., Celi L., Bonifacio E. | 8 |
| <i>Il Futuro della Zootecnia: Un Viaggio tra Sostenibilità, Innovazione e Benessere Animale</i> Rosati A. | 23 |
| <i>Approcci innovativi per la resilienza e la sostenibilità della produzione di alimenti e bevande</i> Spinelli S. e Adessi A. | 28 |
| <i>Complexity and Uncertainty: Agricultural Economics in the Face of Global Challenges</i> Martino G., Romano D. | 34 |
| <i>Cambiamenti climatici e foreste: effetti, adattamento e mitigazione</i> Travaglini D., Chirici G., Marchi E. | 51 |
| <i>Approcci genetici per migliorare la tolleranza allo stress da alte temperature</i> Barone A.M., Macciotta N.P.P. | 58 |
| <i>Smart agriculture per l'adattamento ai cambiamenti climatici</i> Tarolli P. | 71 |
| <i>Difesa delle colture nell'ottica del cambiamento climatico</i> Mugnai L., Sacchetti P., Torrini G. | 79 |
| <i>Sistemi colturali di pieno campo e in serra: misure di adattamento e mitigazione alle emergenze geopolitiche e climatiche</i> Dichio B., Incrocci L., Roggero P.P. | 89 |

Relazione introduttiva L'agricoltura e le sfide globali: il panorama nazionale e internazionale

Vincenzini M.

Presidente dell'Accademia dei Georgofili

Quando si parla di “sfide globali” per l'agricoltura, il pensiero corre subito all'Agenda 2030 per lo sviluppo sostenibile, approvata dall'Assemblea Generale delle Nazioni Unite nel settembre 2015, al termine di quasi tre decenni di incontri e conferenze a livello mondiale che hanno fatto seguito all'adozione, da parte della stessa Assemblea, del rapporto dall'emblematico titolo “Il futuro di tutti noi”, meglio conosciuto come “Rapporto Brundtland”.

Per realizzare l'ambizioso programma dell'Agenda furono fissati 17 obiettivi (Sustainable Development Goals - SDGs) e 169 traguardi, tutti sottoposti a monitoraggio periodico per la verifica dei livelli di attuazione.

Nell'ambito di questa “Agenda 2030”, l'attività agricola nella sua complessa articolazione, quindi non solo produzione di cibo, occupa una posizione di assoluto rilievo, venendo chiamata direttamente o indirettamente in causa per il raggiungimento di quasi tutti gli obiettivi.

Di quanto deliberato in sede ONU, la Commissione dell'Unione Europea ha giustamente preso atto e se ne è fatta carico, decidendo di intervenire con forza per imprimere alla propria economia una direzione di maggiore sostenibilità, declinata nelle sue tre dimensioni: ambientale, economica e sociale. Così, alla fine del 2019, la Presidente della Commissione europea, Ursula von der Leyen, ha annunciato il piano denominato **Green Deal**, centrato sulla sostenibilità e sul benessere dei cittadini e con il quale la Ue si è prefissata l'ambizioso obiettivo di diventare il primo continente a impatto climatico zero entro il 2050.

Prendendo atto che siamo ormai giunti a metà del percorso che ci condurrà al 2030, appare quanto mai opportuno che ci si interroghi sullo stato dell'arte dell'Agenda, in termini di situazione globale, comunitaria e nazionale. Al riguardo, davvero numerosi sono i rapporti pubblicati nel 2023 da parte di Enti ed Istituzioni internazionali e nazionali per descrivere il punto cui siamo giunti a 8 anni dalla sottoscrizione dell'Agenda 2030 (1).

Non pretendo certo di riassumere le migliaia pagine dei documenti segnalati, ma la loro corposità rende ragione della complessità del quadro di riferimento.

Brevemente, richiamerò solo pochi aspetti.

Nel suo rapporto sullo stato dei 17 obiettivi per lo sviluppo sostenibile, il Segretario generale dell'ONU, Antonio Guterres, ha illustrato la situazione attuale: seppure incompleto per alcune lacune in termini di copertura geografica, il quadro che ne emerge è assolutamente deludente, con tutti gli obiettivi in deciso ritardo sulla tabella di marcia, sebbene siano stati compiuti progressi nel miglioramento dei dati per il monitoraggio degli Obiettivi, con il numero di indicatori inclusi nel database globale degli SDGs in aumento da 115 nel 2016 a 225 nel 2022. Altro aspetto preoccupante, sempre sottolineato da Guterres, è determinato dalla constatazione che, per 9 dei 17 Goals, solo circa la metà dei 193 Paesi firmatari l'Agenda-2030 dispone di dati internazionalmente confrontabili a partire dal 2015 e solamente il 21% dei Paesi mette a disposizione dati inerenti il Goal 13 (lotta al cambiamento climatico). L'evidente e

grave ritardo ha spinto lo stesso Guterres a dichiarare che *è giunto il momento di suonare l'allarme. A metà del nostro cammino verso il 2030, gli SDGs sono in profonda difficoltà.*

In Italia, la situazione, esaurientemente analizzata dal Rapporto ASVIS 2023, non si discosta da quella descritta dal rapporto ONU, tanto che Enrico Giovannini, portavoce di ASVIS, ha testualmente dichiarato: *Il Rapporto mostra chiaramente come in questi otto anni l'Italia non abbia scelto in modo convinto e deciso l'Agenda 2030 come mappa per realizzare uno sviluppo pienamente sostenibile sul piano ambientale, sociale, economico e istituzionale. Ciò non vuol dire che non si siano fatti passi avanti in vari campi, ma, al di là di scelte errate, quello che è mancato è stato un impegno esplicito, corale e coerente da parte di tutta la società, di tutto il mondo delle imprese e di tutte le forze politiche che si sono alternate alla guida del Governo per trasformare il nostro Paese all'insegna della sostenibilità. Il risultato di tale non-scelta è quello sopra descritto ed è sotto gli occhi di tutti.* Parole chiare, come si addicono ad un uomo di scienza e sulle quali dovremmo riflettere tutti perché tutti siamo chiamati in causa dall'analisi di Giovannini: *quello che è mancato è stato un impegno esplicito, corale e coerente da parte di tutta la società.*

I motivi del perché siamo globalmente fuori strada nel percorso verso i 17 Goals dell'Agenda sono stati oggetto di analisi anche da parte della "2023 Agriresearch Conference", tenutasi a Bruxelles la scorsa estate, che è giunta ad evidenziarne cinque: 1) Disuguaglianze, conflitti e cambiamenti climatici; 2) Investimenti finanziari insufficienti in ricerca e innovazione; 3) Necessità di una difesa coerente dell'agricoltura e del suolo nei forum internazionali: gli agricoltori non sufficientemente ricompensati e riconosciuti per i loro servizi; 4) Debolezze nel mostrare i costi dell'inazione, ad esempio per quanto riguarda la fertilità del suolo o la riduzione delle disuguaglianze; 5) Complessità e mancanza di visibilità. In ogni caso, pur riconoscendo che gli SDGs sono un impianto adeguato ad affrontare le sfide globali, regionali e locali, la Conferenza ha rilevato la necessità di investire maggiormente nella diffusione e condivisione della conoscenza, in modo che gli agricoltori dell'Unione europea abbiano accesso agli strumenti giusti.

In merito al motivo che identifica la complessità degli obiettivi da conseguire e la mancanza di visibilità degli stessi come elementi concorrenti a determinare il fuori rotta verso il 2030, è da ritenere oggettivamente difficile rendere "visibili" obiettivi per la cui valutazione del livello raggiunto rispetto alla meta viene impiegata una moltitudine di misurazioni statistiche. Se da un lato la numerosità delle misurazioni consente una più precisa valutazione, dall'altro, almeno a mio parere, tende a creare una fitta ragnatela di dati che rischiano di creare una sorta di cortina fumogena di fronte all'obiettivo, impedendone la visibilità all'opinione pubblica. Solo per dare qualche numero, nell'ultimo rapporto ISTAT sullo stato dei 17 SDGs in Italia, le misure statistiche utilizzate sono state 372, di cui 342 uniche (ovvero, associate ad un unico Goal), connesse ai 139 indicatori del set proposto dall'*Inter Agency and Expert Group on SDGs* (UN-IAEG-SDGs) per il monitoraggio a livello globale degli avanzamenti dell'Agenda 2030. Quindi, mediamente oltre 20 misure statistiche per ciascun Goal.

In ogni caso, la mancanza di visibilità degli SDGs è anche supportata dai dati riguardanti l'opinione pubblica nazionale: secondo l'ultimo rapporto ASVIS, infatti, solo il 40% della popolazione conosce il significato corretto della parola "sostenibilità", valore percentuale stabile da alcuni anni, dopo un significativo aumento nel periodo immediatamente successivo alla sottoscrizione dell'Agenda 2030. Ma l'aspetto che denota chiaramente un difetto di comunicazione è quello relativo all'importanza attribuita ai diversi Goals: sempre secondo il rapporto ASVIS, solo il 19% della popolazione indica correttamente l'importanza paritaria tra

i diversi obiettivi, mentre la restante parte si distribuisce sugli altri obiettivi. L'obiettivo decisamente più importante per l'opinione pubblica italiana, con il 28% delle indicazioni, è quello della lotta ai cambiamenti climatici (SDG 13). A titolo puramente indicativo, il cambiamento climatico si classifica al settimo posto tra le 18 preoccupazioni globali nel sondaggio Ipsos *What Worries the World*, condivisa dal 17% della popolazione totale. Eppure, numerosi sono gli Enti e gli Istituti internazionali che divulgano, dandone ampio risalto, dati preoccupanti sull'accumulo di gas clima-alteranti nell'atmosfera (la CO₂ ha per la prima volta superato la soglia delle 420 ppm nell'estate 2022) o sulle anomalie termiche registrate specialmente nell'ultimo biennio a livello globale anche in aree non direttamente associabili all'effetto del Niño.

Anche l'IPCC, nel suo ultimo rapporto annuale sul cambiamento climatico, sottolinea la gravità della situazione, che avrà un impatto fortemente negativo sull'agricoltura, in termini di produzione e produttività, sia sulle coltivazioni che sugli allevamenti animali.

Il nostro "Piano Nazionale di Adattamento ai Cambiamenti Climatici" prevede che gli agrosistemi saranno soggetti a variazioni in termini di durata del ciclo fenologico, produttività e potenziale spostamento degli areali di coltivazione tipici (verso nord e quote più elevate), con risposte differenti in intensità e segnale a seconda della specie e delle aree geografiche di riferimento. In generale, le colture risentiranno dell'incremento di temperatura riducendo la lunghezza del ciclo di crescita, con conseguente minore accumulo di biomassa e quindi riduzione della resa. L'aumento di temperatura costituirà fattore di rischio anche per il bestiame allevato, con conseguenze che potranno riguardare il benessere e la produttività. Inoltre, a questi effetti diretti, si aggiungeranno gli effetti indiretti che i cambiamenti climatici potranno avere, ad esempio sugli alimenti (contaminazione da micotossine, qualità e disponibilità) e sulle dinamiche ecologiche e biologiche dei patogeni e dei loro vettori. In definitiva, il Piano prevede che i cambiamenti climatici possano determinare profonde alterazioni del paesaggio e della sua morfologia, che si possono manifestare come conseguenze dirette degli eventi estremi, in termini di danni e perdite irreversibili di paesaggi e di edifici storici, ma anche indirette, attraverso gli impatti sugli ecosistemi, sulle risorse naturali e sui sistemi economici.

Tali previsioni sono perfettamente in linea con le prospettive per l'agricoltura delineate sia dalla UE che dalla OECD-FAO: la crescita della produttività agricola sarà messa a dura prova dalle pressioni provenienti dai cambiamenti climatici e dagli impatti sulle principali risorse naturali come acqua e suolo; un abbassamento dei rendimenti potrebbe portare a uno spostamento delle zone agro-climatiche verso nord, influenzando la tipologia delle colture; la quantità di terreni agricoli e forestali dell'UE rimarranno invariati da qui al 2035, ma ci saranno variazioni in termini di ripartizione. In definitiva, il cambiamento climatico renderà più volatile la competitività dell'UE sui mercati globali.

Ma a rendere il quadro possibilmente ancora più complesso, alla fine del 2023 è stato pubblicato per la prima volta il rapporto FAO *The State of Food and Agriculture*, secondo cui la trasformazione dei sistemi alimentari nella direzione di una maggiore efficienza, inclusività, resilienza e sostenibilità è un progetto globale essenziale per la realizzazione dell'Agenda 2030. Secondo il rapporto, i sistemi alimentari sono indispensabili, ma sono caratterizzati da "costi occulti", da portare alla luce e misurare per meglio indirizzare le strategie di sviluppo sostenibile. Il documento FAO presenta anche una stima contabile dei costi effettivi (*True Cost Accounting*, TCA) dei sistemi alimentari sulle società, gli esseri umani e l'ambiente, prendendo in esame 154 Paesi e ripartendo i costi secondo tre voci principali: Ambiente, Società, Salute. In base a tale stima, i costi occulti globali (escluse le filiere non-alimentari della produzione

primaria) ammonterebbero a 12,7 trilioni di dollari (anno 2020), di cui: il 73% attribuibile a costi sanitari derivanti da perdite di produttività indotte da modelli alimentari scorretti e il 20% riconducibile a costi ambientali, soprattutto gas-serra. Per l'Italia, la stima dei costi occulti sarebbe pari all'8% del PIL. Preso atto della dimensione dei costi occulti, la FAO, a conclusione del rapporto, esorta i governi a utilizzare la contabilità dei costi reali per trasformare i sistemi alimentari e affrontare la crisi climatica, la povertà, la disuguaglianza e la sicurezza alimentare, prevedendo adeguati finanziamenti, possibilmente attraverso incentivi che abbiano impatto su tre specifiche aree: *Agrifood supply chain*, *Food consumption* e *General services*. La FAO ha anche annunciato che l'edizione del 2024 sarà concentrata su valutazioni mirate e approfondite per identificare i modi migliori per mitigare i costi occulti.

In verità, in tema di trasformazione dei sistemi alimentari, anche la UE, con l'EXPO di Milano (2015) e il programma *Horizon 2020*, ha intrapreso una serie di iniziative, oggi incluse nel programma *Horizon Europe* e rappresentate da 11 percorsi R&I per realizzare una transizione verso sistemi alimentari sostenibili, sani ed inclusivi, individuando anche i co-benefici che ne potrebbero derivare in 4 ambiti prioritari: Nutrizione, Clima, Circolarità e Comunità. L'undicesimo percorso, denominato *Zero-Pollution Food Systems*, è stato avviato nel 2023 e prevede sostanziosi finanziamenti per le attività di ricerca e innovazione mirate a comprendere più approfonditamente la natura e l'entità dell'inquinamento ambientale dipendente dai sistemi alimentari.

Il quadro fin qui descritto, seppure in modo necessariamente conciso, dovrebbe essere sufficiente a fornire almeno un'idea della estrema complessità delle sfide che l'agricoltura, in tutta la sua articolata dimensione, dovrà affrontare nel suo cammino verso gli obiettivi dell'Agenda 2030.

Con tali prospettive, come si stanno muovendo Accademia dei Georgofili e AISSA?

Le due Istituzioni hanno una stretta comunanza di scopi: entrambe operano nell'ampio ambito dell'agricoltura; entrambe promuovono l'acquisizione di nuove conoscenze e seminano conoscenza a favore di tutte le parti interessate al progresso dell'agricoltura.

AdG opera attraverso i suoi *seminatori*, ovvero tutti gli oltre 1100 Accademici che disinteressatamente mettono a disposizione la loro competenza; AISSA opera attraverso i membri, molti dei quali anche Georgofili, delle 22 Società scientifiche aderenti all'Associazione nazionale. Logico, quindi, che entrambe le Istituzioni siano coinvolte fortemente nel percorso che dovrebbe condurre al conseguimento di quello sviluppo sostenibile globale previsto con la sottoscrizione unanime, in sede ONU, dell'Agenda 2030. Le pubblicazioni "*Intensificazione sostenibile*", curata da AISSA, e "*L'Accademia per il post-Covid*", curata dai Georgofili, entrambe disponibili nei rispettivi siti *web* istituzionali, costituiscono, a mio parere, due ottimi esempi dell'impegno profuso dalle due Istituzioni. Queste, per la verità, non sono le sole ad impegnarsi nel trasferimento delle nuove acquisizioni scientifiche: il CREA, ad esempio, nel 2023, ha prodotto un articolato documento in cui, attraverso schede informative, ha messo a fuoco alcune delle principali misure di adattamento ai cambiamenti climatici, raggruppandole in 8 gruppi omogenei per similitudine della pratica di adattamento, con una valutazione dei costi-benefici: 1. Gestione del suolo; 2. Ammendanti e fertilizzanti; 3. Tecniche agronomiche; 4. Protezione delle colture; 5. Gestione delle risorse idriche; 6. Ingegneria, digitalizzazione e formazione; 7. Tecniche innovative di allevamento e benessere animale; 8. Tecniche di vinificazione.

Purtroppo, gli sforzi di divulgazione scientifica e di trasferimento tecnologico messi in atto non hanno prodotto il risultato sperato. Infatti, il Rapporto 2023 sull'agroalimentare

italiano prodotto da ISMEA registra una situazione deludente per l'agricoltura nazionale: nell'ultimo decennio, la produzione agricola in volume ha avuto un andamento decrescente per le coltivazioni (-4% nel 2022 rispetto al 2012), mentre per il settore zootecnico non sono state registrate variazioni di rilievo; in valore, la produzione agricola italiana è passata al terzo posto in UE, dopo Francia e Germania; solo per vino, ortofrutta e carni avicole il tasso di approvvigionamento è $\geq 100\%$. La produzione dell'industria alimentare ha, invece, mostrato una dinamica positiva, ma l'Italia figura al terzo posto in UE, superata dai due Paesi sopra ricordati.

A determinare tale situazione, concorrono vari fattori, tra i quali appaiono determinanti le caratteristiche strutturali delle aziende agricole, l'età e il livello di formazione dei capi-azienda. In effetti, secondo una elaborazione del prof. Frisio su dati Eurostat-2020, presentata in occasione del convegno tenuto lo scorso 21 novembre in Accademia con la collaborazione di FIDAF, il 73% delle aziende italiane ha una Dimensione Economica inferiore ai 25.000€, copre una SAU totale pari a oltre il 24% della SAU nazionale, ha una SAU aziendale media di soli 3,6 *ha* e, complessivamente, rappresenta una produzione standard di appena il 9,3% sul totale. A puro titolo di confronto, le grandi aziende professionali, aventi una Dimensione Economica superiore ai 250.000€ e coprenti la stessa percentuale di SAU nazionale (24%), rappresentano una produzione standard pari al 55% sul totale, calcolato pari a 56,615 Miliardi di Euro.

Relativamente alle caratteristiche dei capi-azienda, il Rapporto 2023 sull'agroalimentare italiano prodotto da ISMEA ci ricorda che il 42,6% dei conduttori ha un'età superiore ai 65 anni, contro una media europea del 33,2%. Inoltre, la quota di capi-azienda italiani con competenze agronomiche specifiche, seppure in crescita rispetto al 4% del 2010, è appena del 7%, contro una media del 10% nell'UE, del 19% in Germania e addirittura del 38% in Francia.

A complicare ulteriormente la situazione, interviene anche la fragilità del territorio nazionale. Più esplicitamente, i territori, tutti i territori, hanno una loro intrinseca fragilità e quelli più fragili richiederebbero la piena consapevolezza da parte delle comunità che vi lavorano e vi risiedono e una approfondita ed aggiornata conoscenza della situazione da parte dei decisori politici. L'*Atlante dei dati ambientali*, pubblicato quest'anno per la prima volta da ISPRA, fornisce, attraverso rappresentazioni cartografiche, grafici, tabelle e testi, una preziosa panoramica dello stato dell'intero territorio nazionale. L'Atlante, ad esempio, ci ricorda testualmente che *secondo i dati del 2020, si stima che ricadano in aree potenzialmente inondabili per uno scenario medio di pericolosità (P2) l'11,8% delle famiglie, il 13,4 % di imprese e il 16,5% di beni culturali, con conseguente impatto economico e sociale rilevante a livello nazionale*. Quello che può succedere, e purtroppo è successo, in aree che ricadono in aree potenzialmente inondabili per uno scenario di pericolosità alta (P3) appartiene alla cronaca recente.

La sommatoria dei soli pochi fattori sopra menzionati non può non aver avuto effetto anche sulla nostra capacità di reggere il passo di altri Paesi sulla strada dello sviluppo sostenibile, ed infatti il Rapporto Eurostat 2023 certifica che l'Italia è in ritardo rispetto alla media UE per gran parte degli SDGs, con l'eccezione del Goal n.12 (Consumo e produzione responsabili), che vede l'agricoltura e tutti noi impegnati a conseguire una gestione sostenibile delle risorse naturali. Notazione assai positiva e incoraggiante per il futuro.

In ogni caso, come frequentemente si legge nei vari rapporti pubblicati lo scorso anno, ricerca e innovazione sono e ancor più saranno fondamentali per la transizione verso

un'agricoltura orientata al futuro, capace di conseguire una maggiore produttività, nel rispetto della sostenibilità economica, ambientale e sociale.

Tuttavia, almeno secondo il mio parere, ricerca e innovazione, da sole, non saranno sufficienti a farci recuperare il ritardo accumulato, a livello globale e locale, nell'attuazione dell'Agenda 2030. Ricordando l'analisi di Giovannini riportata nella parte iniziale di questa relazione "...è mancato un impegno esplicito, corale e coerente di tutta la società, di tutto il mondo delle imprese e di tutte le forze politiche...", sarebbe necessario che la politica prestasse maggiore attenzione alla Scienza e investisse di più nella diffusione della conoscenza, ma sarebbe anche necessario che la Scienza si impegnasse di più nel coinvolgere la società civile, spiegando con semplicità il significato dei propri risultati. Al riguardo, mi trovo perfettamente in sintonia con quanto scritto qualche tempo fa dalla Senatrice Prof.ssa Elena Cattaneo: *"Gli scienziati sono abituati ad affrontare, scomporre, analizzare e ricomporre cose molto complicate; producono dati condivisi, ripetibili, basati su solide evidenze. Metodi e dati affidabili sono ineludibili. Ma, oggi, tutto ciò non è sufficiente. I risultati della scienza vanno costantemente spiegati, accompagnati e presidiati contro manipolazioni, mode e pregiudizi antiscientifici. Gli studiosi devono essere percepiti come una risorsa per la società. Le resistenze sociali verso le innovazioni scientifiche si attenuano quando migliora il rapporto di fiducia tra cittadini e istituzioni scientifiche"*.

Parole chiare, quelle della Senatrice Cattaneo, e messaggio che i Georgofili, tradizionalmente liberi da ogni condizionamento di natura politica o ideologica, mettono in pratica fin dalla nascita della loro Accademia, sempre fedeli al loro storico motto *"Prosperitati Publicae Augendae"*.

Bibliografia di riferimento

- Alleanza Italiana per lo Sviluppo Sostenibile (ASViS) "L'Italia e gli Obiettivi di Sviluppo sostenibili" (https://asvis.it/public/asvis2/files/Rapporto_ASViS/Rapporto_ASViS_2023/RapportoASViS_2023_final.pdf)
- Centro di Ricerca Politiche e Bioeconomia (CREA) "I cambiamenti climatici in agricoltura. Una valutazione costi-benefici delle misure di adattamento" (<https://www.crea.gov.it/web/politiche-e-bioeconomia/-/i-cambiamenti-climatici-in-agricoltura-dal-crea-una-valutazione-costi-benefici-delle-misure-di-adattamento>)
- European Commission "2023 Agriresearch Conference" (https://agriculture.ec.europa.eu/document/download/f9780498-caf9-4773-bf7f-cab5613f4b7a_en?filename=agriresearch-2023-conference-report_en.pdf)
- European Commission "FOOD 2030 Research and Innovation" (<https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/abbb2634-9001-11ee-8aa6-01aa75ed71a1/language-en>)
- EU "Agricultural Outlook 2023-2032" (https://agriculture.ec.europa.eu/document/download/a353812c-733e-4ee9-aed6-43f8f44ca7f4_en?filename=agricultural-outlook-2023-report_en_0.pdf)
- Eurostat EU "Key figures on the European Food Chain 2023" (<https://ec.europa.eu/eurostat/documents/15216629/18054337/KS-FK-23-001-EN-N.pdf/048e130f-79fa-e870-6c46-d80c9408620b?version=7.0&t=1707290893751>)
- Eurostat EU "Sustainable development in the European Union" (<https://ec.europa.eu/eurostat/documents/15234730/16817772/KS-04-23-184-EN-N.pdf/845a1782-998d-a767-b097-f22ebe93d422?version=1.0&t=1684844648985>)
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) "The state of Food Security and Nutrition in the World", (<https://www.fao.org/3/cc3017en/cc3017en.pdf>)
- FAO "The Impact of disasters on Agriculture and Food Security" (<https://www.fao.org/3/cc7900en/cc7900en.pdf>)
- FAO "The State of Food and Agriculture 2023" (<https://www.fao.org/3/cc7724en/cc7724en.pdf>)
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) "Climate Change 2023" (https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/report/IPCC_AR6_SYR_SPM.pdf)
- Istituto di servizi per il mercato agricolo alimentare (ISMEA) "Rapporto sull'agroalimentare italiano" (<https://www.ismea.it/flex/cm/pages/ServeBLOB.php/L/TT/IDPagina/12542>)
- Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale (ISPRA) "Atlante dei Dati Ambientali 2023" (<https://www.isprambiente.gov.it/files2023/pubblicazioni/pubblicazioni-di-pregio/atlan-te-dei-dati-ambientali-versione-digitale-01-2.pdf>)
- Istituto Nazionale di Statistica (ISTAT) "Rapporto SDGs 2023" (<https://www.istat.it/storage/rapporti-tematici/sdgs/2023/Rapporto-SDGs-2023.pdf>)
- Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica (MASE) "Strategia nazionale per lo sviluppo sostenibile" (https://www.mase.gov.it/sites/default/files/archivio/allegati/sviluppo_sostenibile/SNSvS_2022.pdf)
- MASE "Piano Nazionale di Adattamento ai Cambiamenti Climatici" (https://www.mase.gov.it/sites/default/files/PNACC_DOCUMENTO_DI_PIANO.pdf)
- MIT Technology Review "The Green Future Index 2023" (<https://www.finance-for-impact.com/uploads/publications/green-future-index/GFI23report.pdf>)
- OECD-FAO "Agricultural Outlook 2023-2032" (<https://www.oecd-ilibrary.org/deliver/08801ab7-en.pdf?itemId=/content/publication/08801ab7-en&mimeType=pdf>)

Sustainable Development Network “Sustainable Development Report 2023”
(<https://s3.amazonaws.com/sustainabledevelopmentreport/2023/sustainable-development-report-2023.pdf>)
United Nations (ONU) “The Sustainable Development Goals Report 2023” (<https://unstats.un.org/sdgs/report/2023/The-Sustainable-Development-Goals-Report-2023.pdf>)
United Nations (ONU) “Broken Record Emissions Gap Report 2023”
(<https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/43922/EGR2023.pdf?sequence=3&isAllowed=y>)
World Meteorological organization (WMO) “Provisional State of the Global Climate 2023”
(<https://wmo.int/sites/default/files/2023-11/WMO%20Provisional%20State%20of%20the%20Global%20Climate%202023.pdf>)

Il sistema suolo nelle sfide globali

Corti G.¹, Celi L.², Bonifacio E.³.

¹ D3A, CREA Agricoltura e Ambiente - Università Politecnica delle Marche

² DISAFA - Università degli Studi di Torino

³ DISAFA - Università degli Studi di Torino

Riassunto

Il suolo è sottoposto oggi più che mai a sfide globali che mettono in crisi le proprietà e la capacità di fornire servizi ecosistemici, primo tra tutti la produzione di cibo in quantità e qualità adeguate alla crescente popolazione mondiale. In questo lavoro sono riportate le principali sfide cogenti ed emergenti ad oggi individuate, ma sono messe in rilievo anche una serie di debolezze del sistema socio-economico generale che inevitabilmente incidono negativamente sulla salute del suolo e, di conseguenza, sulla sua produzione e capacità di fornire acqua pulita.

Abstract

Today more than ever, soil is subjected to global challenges that undermine its properties and ability to provide ecosystem services, first and foremost the production of food in quantities and quality adequate for the growing world population. This work reports the main binding and emerging challenges identified to date, but also highlights a series of weaknesses in the general socio-economic system that inevitably impact negatively on the soil health and, consequently, on production and ability to supply clean water.

Keywords: sicurezza alimentare, sicurezza idrica, biodiversità del suolo, land grabbing, antibiotico-resistenza

Introduzione

Il suolo è sempre più sottoposto a fenomeni di degrado in tutto il mondo. A livello mondiale, si stima che 15-16 milioni di km², vale a dire 1/3 della superficie agricola utilizzata (SAU), siano degradati (Glosolan-FAO, 2022). Nell'Europa-27, che può godere di circa 1,57 milioni di km² di SAU, la situazione è addirittura peggiore, con 2/3 di questa superficie considerati da moderatamente a estremamente degradati (Eurostat, 2022). Infine l'Italia, dove il 75% della SAU (94.500 km²) è moderatamente-estremamente degradato (Unione Europea, 2024).

Questa situazione generalizzata a livello planetario indica la scarsa attenzione che fino a poco tempo fa è stata rivolta al suolo e alla sua cura, nonostante la continua crescita demografica e, di conseguenza, la sempre maggiore necessità di cibo, fibre e altre materie utili.

La sfida che si rende necessario intraprendere a livello globale è quindi quella di rigenerare e curare il suolo, così da renderlo produttivo secondo le attese che l'intera comunità internazionale si pone: fame zero entro il 2030 (United Nations, 2015). Questo ambizioso traguardo può essere raggiunto se scienziati e portatori di interesse si rendono sempre più consapevoli della fragilità del suolo e delle sfide globali che, direttamente o indirettamente, impattano sul suolo. Le sfide che vedono coinvolto il suolo sono rappresentate da macrotematiche che possiamo suddividere in due gruppi:

- cogenti – sicurezza alimentare, disponibilità di acqua di buona qualità, sociologia pedoclimatica, mantenimento della biodiversità del suolo;

- emergenti – *land grabbing*, geni resistenti agli antibiotici, uso del suolo a scopo energetico.

Lo scopo del lavoro è quello di illustrarle senza pretesa di essere esaustivi, producendo approfondimenti su alcune di queste.

Sicurezza alimentare

Le ultime stime della FAO indicano che nel 2021 la fame ha interessato tra 702 e 828 milioni di persone, con un peggioramento rispetto al decennio precedente (FAO, 2021). Questo indica quanto delicato sia il problema della sicurezza alimentare a livello globale. Le aree più soggette a fame e malnutrizione sono diffuse, con diversa intensità, in tutti i continenti e sono concentrate soprattutto nelle zone intertropicali, che sono spesso anche quelle politicamente più deboli (Figura 1). Di fatto, sono anche quelle con i suoli meno fertili e più vulnerabili al degrado a causa delle condizioni climatiche e di un uso del suolo disarmonico rispetto alle condizioni climatiche.

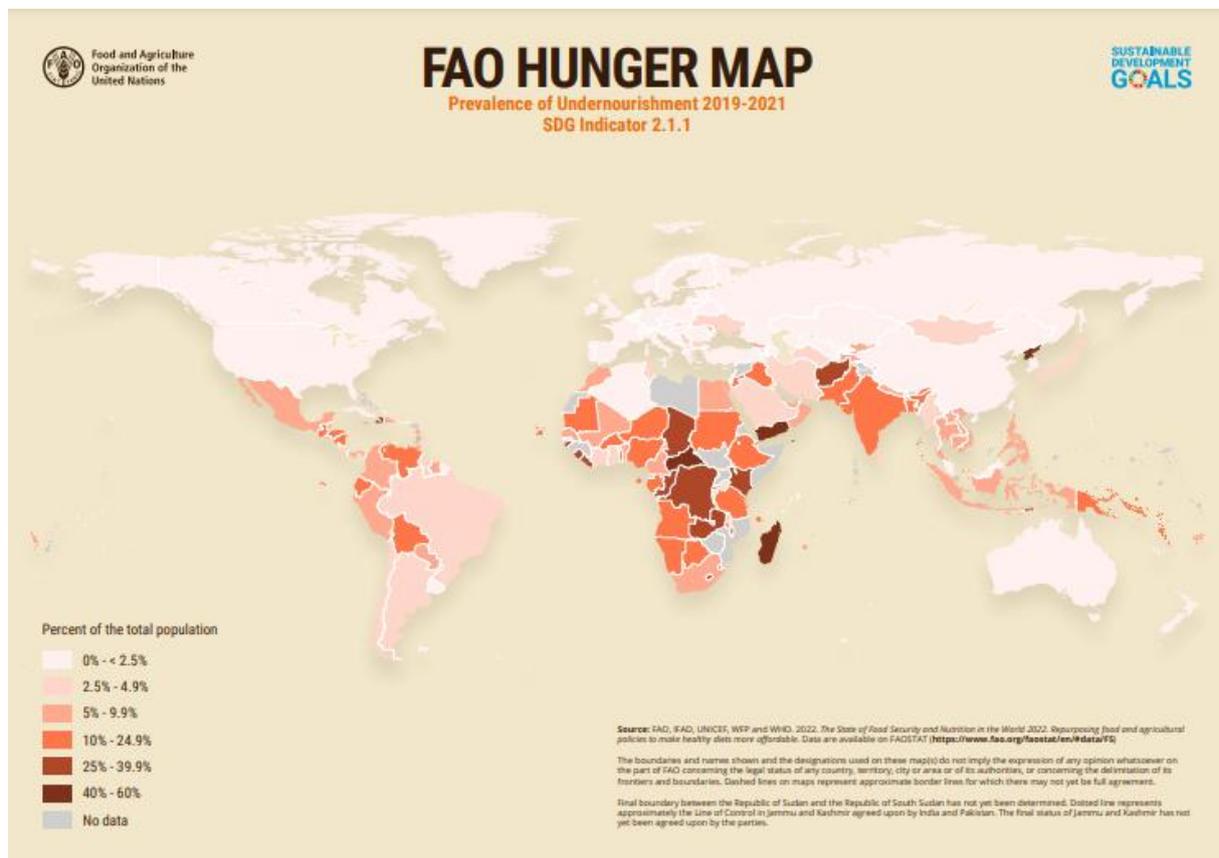


Figura 1. Mappa delle aree del mondo soggette a fame. FAO (2021)

Nel 2015, l'ONU aveva lanciato i 17 obiettivi per lo sviluppo sostenibile (Figura 2), il secondo dei quali è proprio la lotta alla fame. Obiettivo che va di pari passo con la difesa e il miglioramento del suolo. Non a caso la FAO aiuta i governi e i partner a elaborare politiche e programmi per porre fine alla fame e a promuovere la sicurezza alimentare e l'agricoltura sostenibile, ma l'obiettivo di sconfiggere la fame non potrà mai essere raggiunto e, soprattutto,

non potrà raggiungersi in maniera sostenibile se non agiamo contro A) consumo di suolo, B) erosione, C) inquinamento del suolo, D) impoverimento di nutrienti, E) salinizzazione.



Figura 2. I 17 obiettivi ritenuti indispensabili per uno sviluppo sostenibile. ONU 2030 Agenda (2015).

A. Consumo di suolo. Guardando al panorama italiano, il consumo di suolo è del tutto fuori controllo (Figura 3), in parte a causa dell'elevata densità di popolazione e allo sviluppo economico; ma il motivo più importante rimane ancora oggi l'insieme di speculazioni che ruotano attorno all'edificazione, inclusa quella regolata dalle organizzazioni criminali.

B. Erosione. Nell'Europa comunitaria, circa 1.3 milioni di km² di suolo sono soggetti a erosione idrica e il 20% del territorio perde più di 10 tonnellate di suolo all'anno (Figura 4). Da sottolineare che l'erosione di 1 mm di suolo equivale alla rimozione annuale di 10 tonnellate di suolo per ha e che, fino a questo livello di intensità, è considerata accettabile; purtroppo, in molte aree italiane si perdono anche 150-180 ton/ha/anno.

In Europa, i paesi più colpiti sono quelli del Mediterraneo, per questioni climatiche, geomorfologiche, di erodibilità del suolo e di gestione. Il 30% dei suoli Italiani è a rischio di erosione potenziale, con perdite superiori a 10 ton/ha/anno. E, dato ancor più grave, rispetto agli anni '50 del secolo scorso, abbiamo perso il 35% della ritenzione idrica totale a livello nazionale (i suoli contengono il 35% in meno di acqua). I suoli con la minor ritenzione idrica sono quelli più impoveriti di sostanza organica, più prone all'erosione, meno fertili e con meno acqua disponibile. L'erosione rappresenta un circolo vizioso: con un'erosione superiore al

limite tollerabile, non potremo mai ottenere un miglioramento della qualità dei suoli – e se la qualità dei suoli di versante diminuisce, aumenta l’erosione.

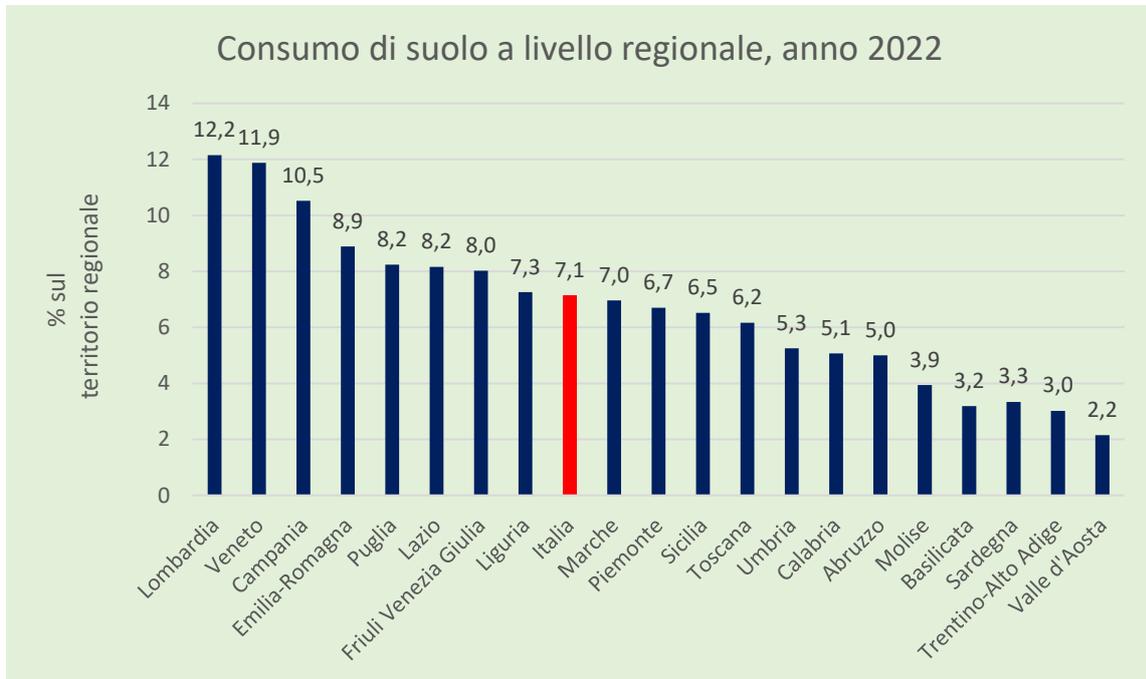


Figura 3. Consumo di suolo nelle regioni italiane all’anno 2022. Elaborazione su dati ISPRA (2022)

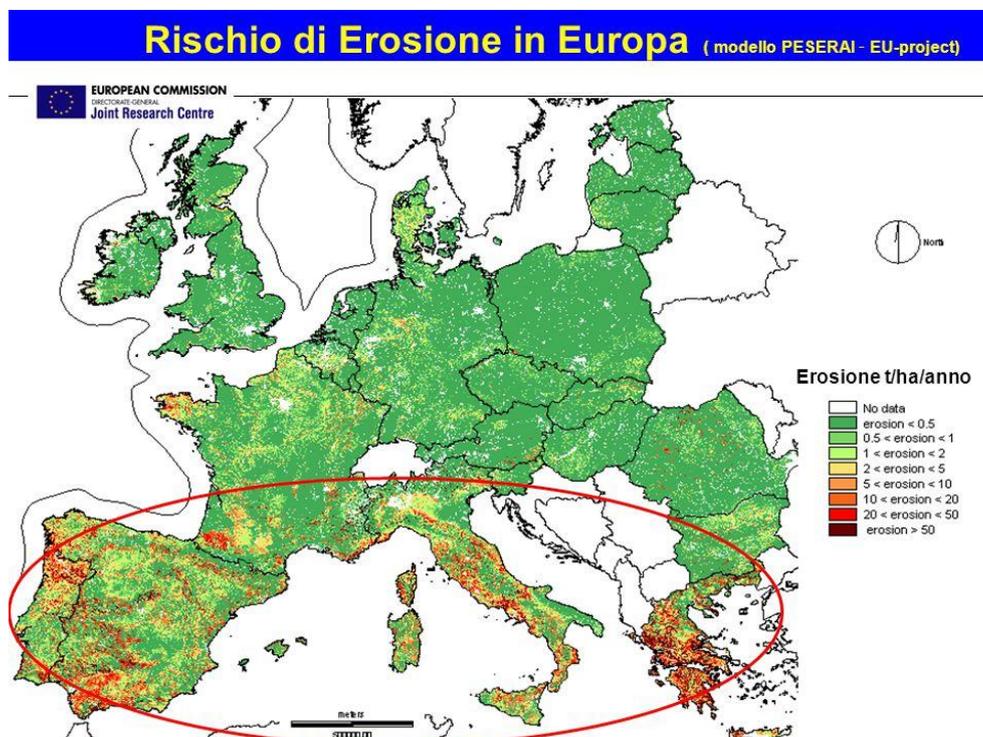


Figura 4. Mappa del rischio erosivo in Europa secondo il modello Pesera. European Commission, Joint Research Centre

C. Inquinamento del suolo. L'inquinamento del suolo è una delle piaghe che affliggono i suoli di tutto il mondo, ed è in grado di provocare una riduzione del 15-20% della produzione di derrate a livello mondiale (FAO-UNEP, 2021, su base di rapporti della Global Soil Partnership). La gran parte delle responsabilità nella riduzione della produzione è attribuita ai prodotti fitosanitari (soprattutto nel terzo mondo) ma, in varie aree del pianeta, la contaminazione è causata anche da idrocarburi policiclici aromatici (PAHs), fenoli e clorofenoli, medicinali a uso medico e veterinario, antibiotici, diossine e furani, radionuclidi, plastiche e esplosivi. Il capitolo degli esplosivi, sinora poco considerato, è invece estremamente importante, almeno a giudicare dalla Figura 5 e dal lavoro di Cary et al. (2021), la quale mostra come i casi non siano limitati alle ovvie aree di conflitto.



Figura 5. Aree finora ad oggi investigate dove risultano contaminazioni del suolo da esplosivi. Da Cary et al. (2021). I differenti colori indicano gli autori che hanno studiato i siti e sono riportati nella citazione.

D. Impoverimento di nutrienti. L'impoverimento di nutrienti ha differenti origini, naturali e antropiche. Tra i suoli più deprivati abbiamo quelli con tessiture sabbiose e quelli delle aree tropicali. Riguardo l'impoverimento, oltre a quello di azoto preoccupano anche quelli di fosforo e di potassio (Figura 6, Ballabio et al., 2019). Negli ultimi anni ha guadagnato sempre più interesse il fosforo. Il motivo è, ovviamente, la sua elevata fissazione sulle superfici dei minerali del suolo che lo rende poco disponibile per le colture, ma anche la messa in luce di fenomeni di

- mobilizzazione/immobilizzazione in funzione del rapporto C/P (Figura 7a);
- strategie della pianta per aumentare la disponibilità di P, con essudazione radicale e microbica di acidi organici, enzimi e polifenoli (Figura 7b) (Celi et al., 2023).

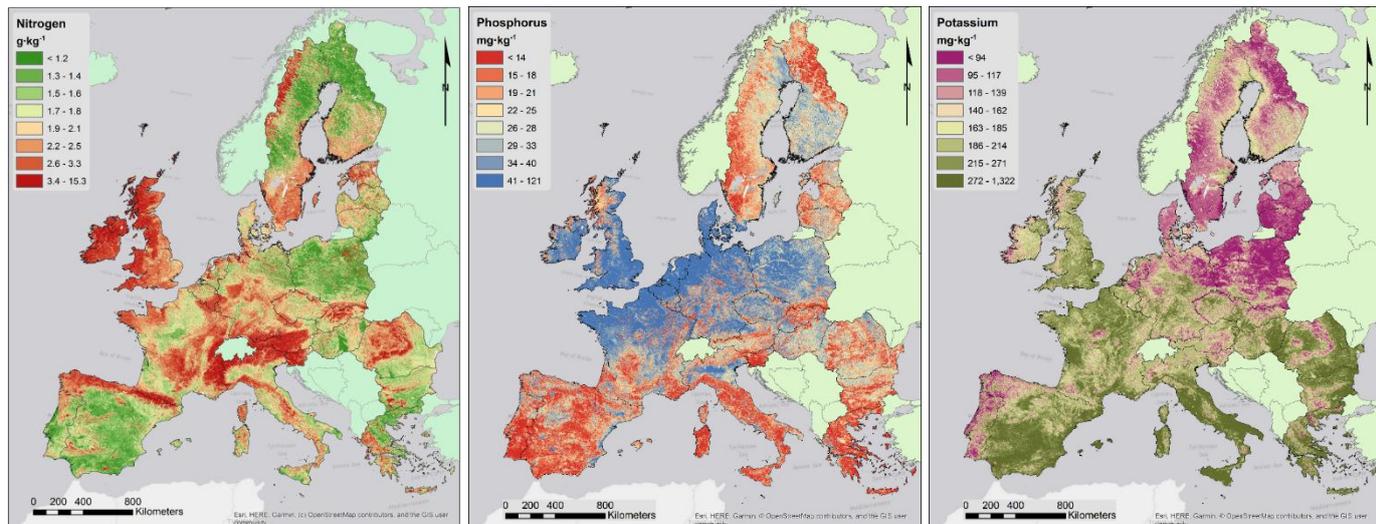


Figura 6. Mappe relative alle carenze di azoto, fosforo e potassio in Europa. Da Ballabio et al. (2019).

L'efficienza dell'assorbimento di P è massima nei paesi più poveri, dove la produzione è bassa. L'efficienza ha un andamento a U nei paesi a media economia: è diminuita quando sono aumentate le produzioni (il che ha comportato accumulo di P nel suolo per alcuni decenni), dopo di che è ri-aumentata con l'aumento delle produzioni (Figura 8) (Zou et al., 2022). Nei paesi a più elevato reddito, l'efficienza dell'assorbimento di P era bassa negli anni '60 e '70 del secolo scorso, quando le produzioni sono aumentate grazie alle laute concimazioni che hanno accumulato P nel suolo; poi, l'efficienza è aumentata con le produzioni grazie alla quantità di P accumulato nel suolo.

E. Salinizzazione. La salinizzazione è una delle minacce del suolo che si sta diffondendo anche al di fuori di areali tipicamente caldo-aridi. Le aree riportate in Figura 9 sono quelle che rispondono ai seguenti requisiti:

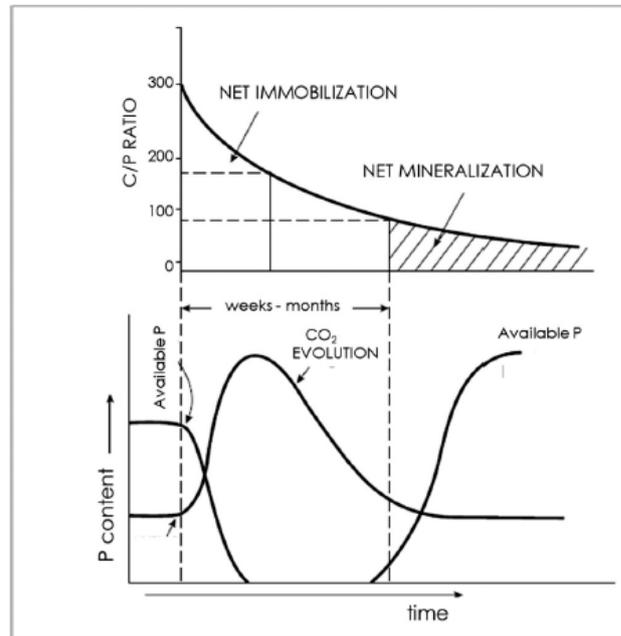
- Conducibilità elettrica >2 dS/m
- Percentuale di sodio scambiabile $>15\%$
- pH > 8.2

I suoli con queste proprietà sono definiti salini e coprono un'estensione di circa 830 milioni di ettari (corrispondente al 6% dei suoli di tutto il mondo), di cui

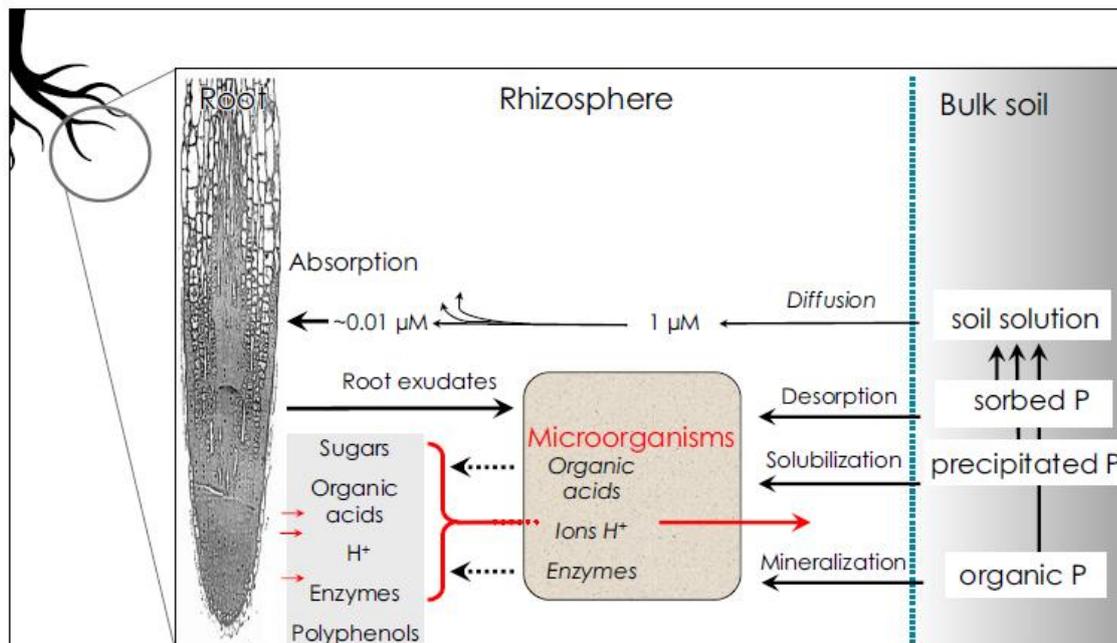
- il 37% si trova in ambienti desertici aridi;
- il 27% si trova in steppe aride, equamente distribuite in ambienti freddi e in ambienti caldi;
- il 36% è distribuito tra zone costiere marine e di laghi salati.

A livello globale, circa il 20% dei suoli coltivati è affetto da eccesso di sali e 600 milioni di persone vivono in zone con suoli salini (Wheeler, 2011).

E' degno di nota il fatto che, dal 1950 al 1990, le necessità di acqua per irrigazione sono più che raddoppiate, con un 300% in più in Africa e un 500% in più in Europa. Di fatto, negli ultimi anni, circa 1,5 milioni di ettari irrigui all'anno vanno incontro a salinizzazione per intrusione del cuneo salino. Un esempio della gravità del fenomeno è il Bangladesh, dove, dal 1990 al 2015, i suoli salini sono passati dall'1 al 33% dei suoli coltivati a causa dell'intrusione del cuneo salino per eccessivo sfruttamento delle acque di falda (Rahman et al., 2018).



7a



7b

Figura 7. Processi di mobilizzazione/immobilizzazione del P nel suolo. Da Celi et al. (2022).

7a. Immobilizzazione/mineralizzazione microbica in funzione delle necessità di C: si ha una immobilizzazione netta di P quando i residui colturali hanno un rapporto C/P > 300, causando una diminuzione di P disponibile nel suolo; si ha una mineralizzazione netta di P quando nel suolo abbiamo un rapporto C/P < 100, cosa che comporta un aumento del P disponibile.

Figura 7b. Processi che controllano la dinamica del P all'interfaccia suolo-pianta: tramite desorbimento, solubilizzazione e mineralizzazione, il fosfato può essere rilasciato dal suolo bulk e diffondere verso zone carenti di P. Piante e microrganismi possono essudare anioni organici, protoni, enzimi e donatori di elettroni per favorire il rilascio di P dal suolo bulk.

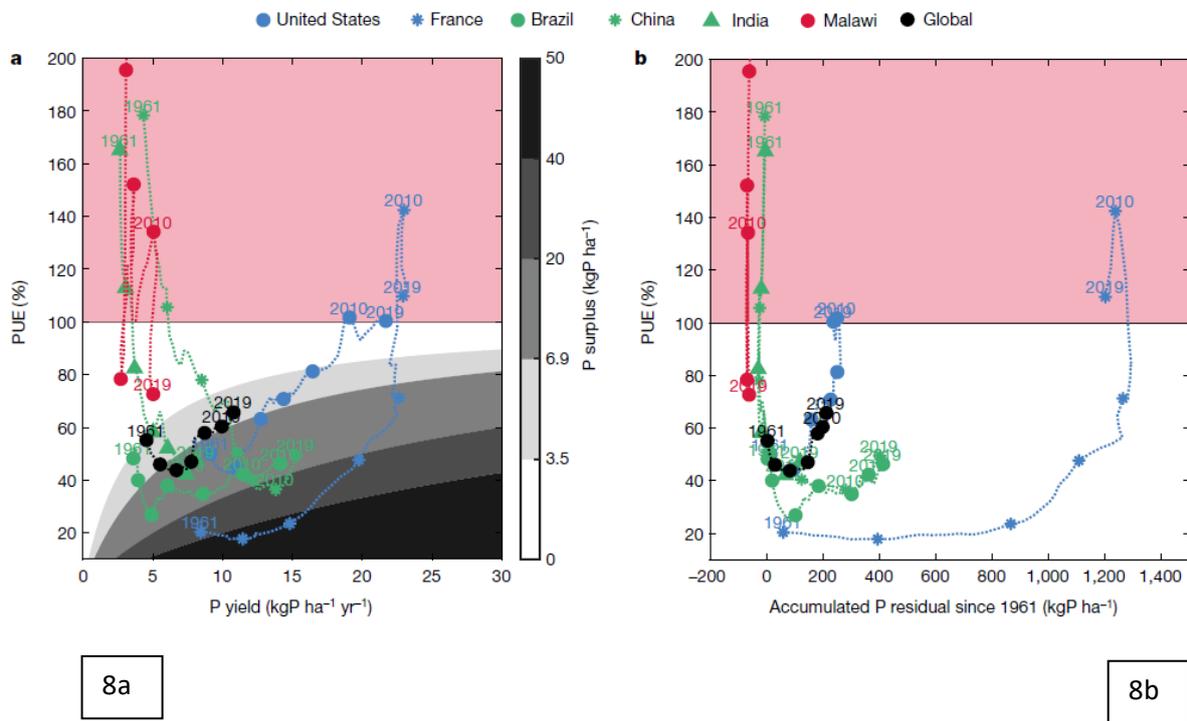


Figura 8. Bilancio storico del P asportato con la produzione e del trend di efficienza dell'uso del P (PUE) dal 1961 al 2019 in vari Paesi. Da Zou et al. (2022).

8a. Confronto tra PUE e P asportato con la produzione in alcuni Paesi.

8b. Confronto tra PUE e P residuale accumulato in alcuni Paesi. I dati per i Paesi a basso, medio e alto reddito sono rispettivamente in blue, verde e rosso. L'area in rosa indica l'assorbimento di P dal suolo.



Figura 9. Mappa dei suoli affetti da salinità nel mondo. FAO (2024).

Oltre a contrastare questi processi di degradazione, è necessario favorire la produzione e l'accesso a fertilizzanti calibrati con il tipo di suolo. L'uso di concimi di sintesi, per quanto soggetto a critiche, rimane il sistema più efficace per ottenere produzioni economicamente sostenibili. Tuttavia, sia la produzione che il costo creano gravi dipendenze tra paesi produttori e paesi consumatori.

La produzione di concimi azotati come il nitrato di ammonio e l'urea si basa sulla sintesi di ammoniaca, ottenuta a partire da azoto atmosferico. In Italia, colpa anche dell'assenza di una politica industriale, è rimasto solo un impianto di produzione di ammoniaca, a Ferrara, con una produzione potenziale di 600.000 ton/anno, insignificante rispetto alla produzione mondiale (Figura 10). Ciò significa che dipendiamo dall'estero per la stragrande maggioranza di concimi azotati di sintesi. In Africa, la produzione di ammoniaca è estremamente ridotta. Soprattutto nell'Africa Sub-sahariana, tutti i concimi sono importati e il costo è simile a quello dei Paesi europei, a volte maggiore per i costi di trasporto, ed è un costo esorbitante per le popolazioni rurali. Solo le aziende a capitale straniero possono permettersi l'acquisto di concimi, per produrre cibo che i lavoratori non possono permettersi. Questo significa che non sarà possibile aumentare sensibilmente la produzione di cibo utile alle popolazioni dei Paesi dell'Africa sub-sahariana, dove la demografia è in continua crescita.

Per il fosforo, si aggiunge un ulteriore problema, legato al fatto che i concimi fosfatici derivano dall'estrazione mineraria di giacimenti concentrati soprattutto in Nord Africa (71%; USGS, 2022), mentre sono prodotti in Cina, Stati Uniti e Russia (83% della produzione mondiale annuale), creando una notevole dipendenza socio-economica tra paesi produttori e paesi consumatori.

Disponibilità di acqua di buona qualità

Anche questo punto è tra i 17 obiettivi per lo sviluppo sostenibile, perché senza accesso a acqua pulita non c'è qualità della vita, non c'è pace. In Tabella 1 sono riportati i principali comparti terrestri contenenti acqua. L'acqua presente nel suolo, l'unica davvero disponibile e in quantità per l'umanità, dipende dal coefficiente di infiltrazione, che a sua volta dipende dalla tessitura e struttura del suolo. La ricarica del suolo e delle falde superficiali, oltre che dalle proprietà del suolo, dipende anche dalla superficie che offriamo all'acqua per potersi infiltrare. Vi è un generale accordo che una distribuzione

1/3 suoli forestali - 1/3 suoli agrari - 1/3 aree naturali
possa assolvere al compito, purché le superfici impermeabilizzate non siano eccessive.

| | | |
|-----------------------------|----------------------------------|--------|
| Totale pianeta Terra | 1360 milioni di km ³ | |
| Oceani e mari | 1320 milioni di km ³ | 97,05% |
| Ghiaccio (poli e ghiacciai) | 26 milioni di km ³ | 1,92% |
| Sottosuolo (nelle rocce) | 8,5 milioni di km ³ | 0,62% |
| Laghi e fiumi | 0,25 milioni di km ³ | 0,02% |
| Atmosfera | 0,013 milioni di km ³ | 0,001% |
| Suolo | 5,2 milioni di km ³ | 0,38% |

Tabella 1. Comparti in cui è presente l'acqua sulla Terra.

Questo per avere acqua immagazzinata nel suolo; dopo di che, per averla anche pulita, è necessario mantenere il suolo in salute, concetto questo ancora in divenire ma che può essere declinato con la sua capacità di mantenere biodiversità e produzione senza andare incontro a degrado. Ecco il motivo che spiega perché dobbiamo preservare i suoli forestali e agrari, azzerare l'inquinamento, ripristinare, recuperare.

Ma, in un mondo di oltre 8 miliardi di persone, per compensare al fabbisogno idrico in agricoltura è necessario aumentare la circolarità e il riciclo di acque reflue. In molti Paesi, l'uso di acqua riciclata trattata è ormai una consuetudine. In Italia, invece, stenta ancora a farsi largo. Acque reflue di origine urbana o industriale possono essere trattate tramite numerosi processi

messi a punto in funzione dell'utilizzo: riuso urbano (lavaggio strade; irrigazione parchi, giardini, aiuole), riuso agricolo (irrigazione delle colture), riuso ambientale (ricarica di falde; soccorso estivo per torrenti), riuso industriale (intramural e extramural), riuso per acqua potabile (da distillazione o da osmosi inversa).

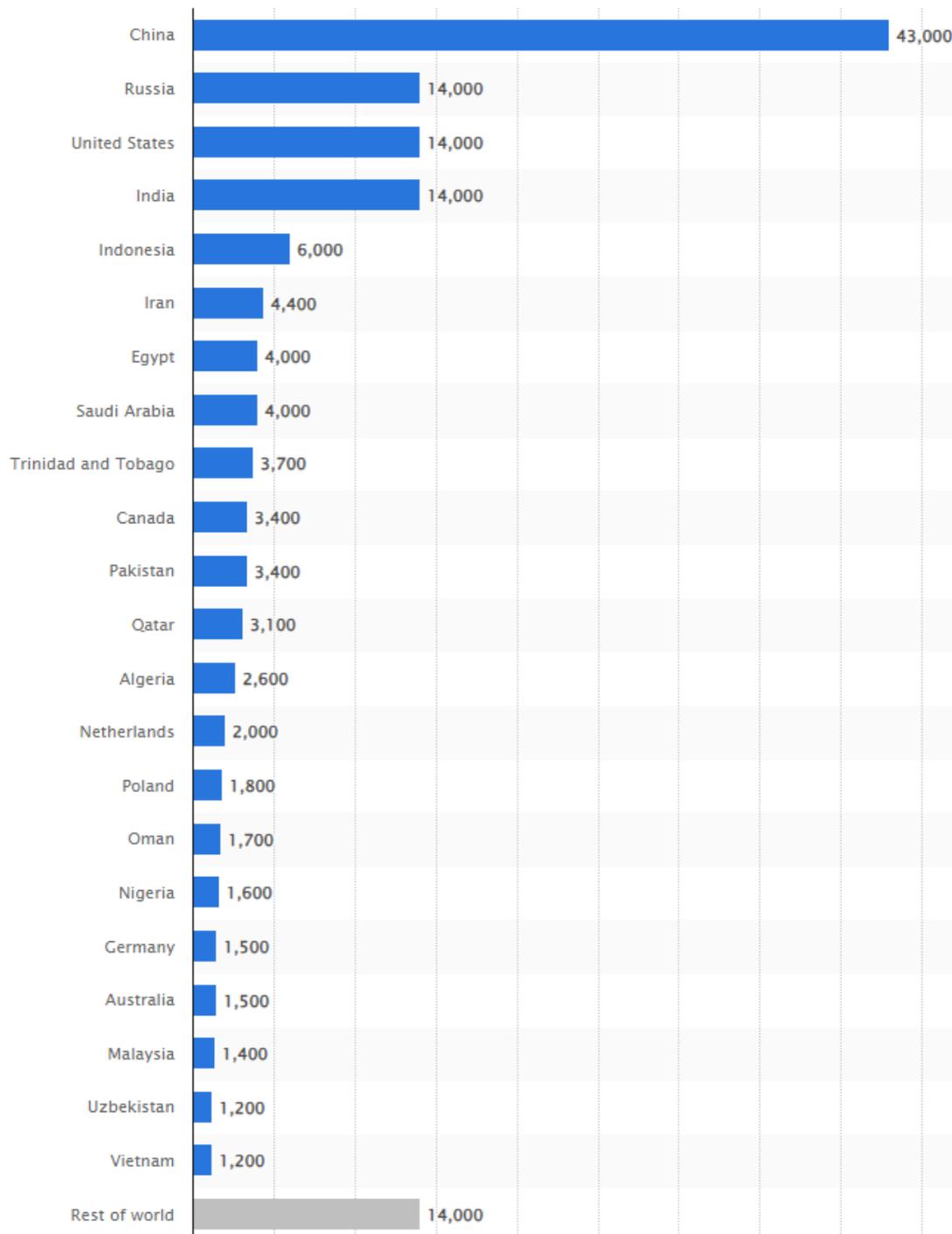


Figura 10. Produzione mondiale di ammoniaca. Elaborazione su dati STATISTA (2024).

Il problema dell'approvvigionamento idrico in alcuni paesi è così grave che si produce acqua potabile per desalinizzazione di acqua marina. Nel 2018 erano in uso 18.426 impianti di desalinizzazione in 150 paesi del mondo, con una produzione di acqua pulita di quasi 32 miliardi di m³ all'anno, sufficiente per i fabbisogni di 300 milioni di persone (Alexander, 2022). Già oggi, metà della popolazione mondiale (circa 4 miliardi di persone) vive in aree sottoposte a stress idrico, indicando che la desalinizzazione di acqua marina non potrà essere l'unica soluzione praticabile. I principali problemi alla sua diffusione sono: *i*) sono necessari 3 kWh per ogni m³ di acqua prodotta; quindi, la produzione di 32 miliardi di m³ consuma circa 100 TWh, equivalenti a una decina di reattori nucleari di ultima generazione; *ii*) per ogni m³ di acqua desalinizzata si producono circa 35 kg di sale secco, doppia quantità se il residuo è una salamoia. La quantità di sale prodotta annualmente dagli impianti di desalinizzazione pone enormi problemi per il suo smaltimento.

Che si parli di Paesi sottoposti a crisi idrica o di Paesi con minori problemi di approvvigionamento idrico (e, quindi, rispettivamente, di acqua di uso civile prodotta da desalinizzazione o da potabilizzazione di acqua dolce), è diventato indispensabile trattare le acque reflue per qualunque uso non civile se ne voglia fare. Prendiamo il caso di due Paesi: Italia ed Emirati Arabi Uniti (Tabella 2). Negli Emirati Arabi Uniti non esiste una sorgente di acqua dolce, né un fiume o un torrente o un lago permanenti. Per questo motivo, a fronte di una seppure non eccessiva popolazione, ma con una bassissima piovosità media annua e un consumo idrico pro-capite elevato, sono necessari 2,6 miliardi di m³ di acqua all'anno, interamente ottenuti da desalinizzazione. Visto lo sforzo per ottenere acqua per uso civile, il 27% dell'acqua prodotta è trattata e riciclata a scopo irriguo. Grazie a questo, negli Emirati Arabi Uniti si è iniziato a coltivare il deserto nelle aree prossime alle città per produrre cibo, con l'intento di raddoppiare la produzione interna, oggi al 15%. Il tutto con acque reflue trattate, recuperando così anche elementi nutritivi provenienti dalle deiezioni umane.

| | Italia | Emirati Arabi Uniti |
|------------------------------------|--|--|
| Popolazione | ≈ 60 milioni | ≈ 12 milioni |
| Piovosità media annua | 830 mm | 90 mm |
| Consumo di acqua pro-capite/giorno | 220 litri | 500 litri |
| Consumo di acqua annuo | 26 miliardi di m ³ | 2,2 miliardi di m ³ |
| Prelievo | 33 miliardi di m ³ | - |
| Produzione | 0,29 miliardi di m ³ * | 2,6 miliardi di m ³ |
| Perdite | 7 miliardi di m ³ | 0,4 miliardi di m ³ |
| Acqua riciclata | (21% del prelievo) 2,6 miliardi di m ³ | (15% della produzione) 0,6 miliardi di m ³ |
| | (8% del prelievo) | (27% della produzione) |

*prodotti da 12 impianti di piccola taglia.

Tabella 2. Confronto dell'impronta idrica tra Italia e Emirati Arabi Uniti. Dati da Utilitalia, ISTAT, Legambiente, United Arab Emirates Trade Administration.

Ma ci sono anche altri motivi legati alla necessità di rendere disponibile l'acqua: le guerre. Negli ultimi 4500 anni ci sono stati un totale di 1298 conflitti dovuti

all'approvvigionamenti idrico (Figura 11); di questi, 1050 si sono avuti solo dall'anno 2000 a oggi e per gran parte si sono verificati in Africa e Asia.

Sociologia pedoclimatica

Negli ultimi tempi, la presenza e l'accumulo di sostanza organica nel suolo hanno assunto particolare importanza per gli equilibri gassosi tra suolo e atmosfera che vedono coinvolti i cicli del C e dell'N, e per l'influenza che questi hanno nella regolazione del clima a livello globale.

Una cattiva gestione del suolo, però, non ha solo ripercussioni sul ciclo del C e dell'N, ma anche sulle produzioni, soprattutto se il suolo non è adeguatamente gestito con sistemi agricoli armonizzati al pedoclima vigente nell'area. Se mettiamo insieme la variazione dei regimi termici e pluviometrici, il degrado del suolo dovuto a più cause, e la conseguente sofferenza per fame, carenza idrica e povertà, si possono spiegare molte delle rotte migratorie in arrivo verso i paesi con situazione politica ed economica più stabile (Figura 12).

Mantenimento della biodiversità del suolo

Il mantenimento della biodiversità dei suoli non è solo un elemento con il quale valutare la salute del suolo, ma è anche un possibile serbatoio di molecole utili all'umanità.



Figura 11. Conflitti per l'accaparramento di acqua dal 2500 A.C. a oggi. Fonte: Pacific Institute (2024).

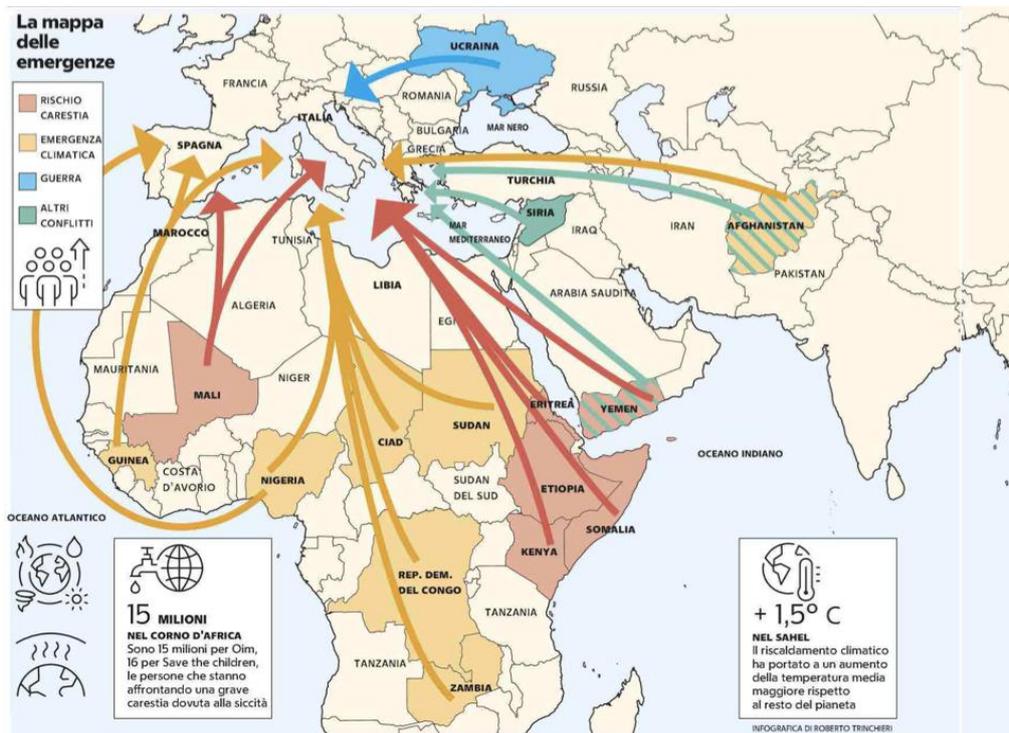


Figura 12. Mappa delle migrazioni dettate dalle emergenze. Fonte: Associazione Carta di Roma (2022).

Lo studio delle relazioni tra suolo e salute umana ha fatto progressi enormi negli ultimi 15-20 anni (carenze o eccessi di elementi fisiologicamente attivi, per esempio), ma molte cose erano già state messe in luce. Ad esempio, alcune molecole utili per la salute umana sono state rinvenute e inizialmente prodotte a partire da specie microbiche del suolo:

Streptomycina – Albert Schatz la ricavò da suoli paludosi della Florida nel 1943;

Ciclosporina – Hans Peter Frey la isolò dal fungo *Tolypocladium inflatum* trovato in suoli della Norvegia nel 1969;

Rapamicina – Georges Nogrady la isolò nel 1972 dal batterio *Streptomyces hygroscopicus* rinvenuto nei suoli dell'Isola di Pasqua (Rapa Nui).

Potrebbe essere sufficiente solo questo per convincere che la biodiversità del suolo è un bene planetario da preservare!

Tra le macro-tematiche emergenti che impattano sul suolo abbiamo

Land grabbing

Le terre “accaparrate” in tutto il mondo a oggi sono 91,7 milioni di ettari. Come si vede in Figura 13, quattro dei cinque maggiori paesi investitori nel *land grabbing* appartengono ai paesi del G7, mentre il quinto è la Svizzera. Invece, i cinque paesi maggiormente oggetto di *land grabbing* sono in sud America, Oceania e Europa. Un fenomeno che le guerre possono solo amplificare a causa della competizione tra blocchi geopolitici a discapito delle comunità native.



Figura 13. Rapporto “I padroni della Terra. Rapporto sull’accaparramento della terra 2022: conseguenze sui diritti umani, ambiente e migrazioni”. Focsiv – Federazione degli Organismi Cristiani Servizio Internazionale Volontariato.

Geni resistenti agli antibiotici

La resistenza agli antibiotici nei suoli agrari rappresenta una minaccia silenziosa e una battaglia da affrontare per la salubrità ambientale e dell’uomo. Benché molti studi siano ancora necessari per comprendere i meccanismi e minimizzare il rischio e gli effetti della resistenza agli antibiotici (Ondon et al., 2021), è stato dimostrato che il processo di digestione anaerobica non garantisce la completa rimozione degli antibiotici e dei geni di resistenza agli antibiotici da letame e liquame. L’impiego di letame contenente antibiotici veterinari, anche se digestato, minaccia pertanto l’ecologia microbica del suolo, suggerendo la necessità di trattamenti preventivi per migliorare l’efficienza dei trattamenti anaerobi prima della distribuzione in campo (Gurmessa et al., 2020).

Uso del suolo a scopo energetico

E’ questo un tema che vede visioni contrapposte. Riportiamo come esempio due differenti posizioni:

Luca Marchisio, Responsabile strategia di sistema di Terna: «*La presenza dei pannelli sul terreno agricolo consente di ridurre lo stress termico delle colture dovuto al forte irraggiamento solare nelle ore più calde, cosa che permette di creare un migliore microclima, riducendo l’evaporazione dell’acqua innescando un ciclo virtuoso: i pannelli proteggono le coltivazioni dall’eccesso di calore e, la presenza delle piante agisce raffreddando la superficie dei pannelli degli impianti fotovoltaici producendo maggiore energia.*»

Moscatelli et al. (2022): dopo sette anni dall'installazione dei pannelli sono state riscontrate proprietà fisiche, chimiche e biologiche differenziate a strisce e una fertilità distribuita a macchie.

Difficile dire chi abbia più ragione. Significa che c'è bisogno di più ricerca e maggiori sforzi anche dal punto di vista tecnico per minimizzare i problemi riscontrati.

Conclusioni

Tra sfide cogenti e sfide emergenti, il suolo corre gravi rischi di non riuscire a fornire tutti i servizi ecosistemici necessari all'umanità e che da sempre erano a sua disposizione. Con una popolazione che arriverà a oltre 10 miliardi tra 25-30 anni, la produzione di cibo e la possibilità di fornire acqua di qualità almeno nelle regioni del pianeta a maggiore piovosità sono tra le sfide più importanti da affrontare. Ma avremo anche maggior bisogno di materie prime e un ambiente più salubre. Tutto questo lo si può ottenere armonizzando le colture e lo sfruttamento delle superfici forestali alle condizioni pedoclimatiche e alle proprietà del suolo.

Bibliografia

- Alexander C.L., 2022. Electrochemistry in action – water desalination. The Electrochemical Society Interface 31, 60. <https://iopscience.iop.org/article/10.1149/2.F11224IF/pdf>
- Associazione Carta di Roma, 2022. La mappa delle emergenze. <https://www.cartadiroma.org/news/in-evidenza/arrivano-i-profughi-del-clima-scappano-dal-caldo-e-dalla-sete/>
- Ballabio C., Lugato E., Fernandez-Ugalde O., Orgiazzi A., Jones A., Borrelli P., Montanarella L., Panagos P., 2019. Mapping LUCAS topsoil chemical properties at European scale using Gaussian process regression. Geoderma 355, 113912. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.113912>
- Cary T.J., Rylott E.L., Zhang L., Routsong R.M., Palazzo A.J., Strand S.E., Bruce N.C., 2021. Field trial demonstrating phytoremediation of the military explosive RDX by XplA/XplB-expressing switchgrass. Nature Biotechnology 39, 1216.
- Celi L., Martin M., Barberis E., 2023. Phosphorus in soil. Encyclopedia of Soils in the Environment, Second Edition, pp. V2-152-V2-166.
- FAO, 2024. The World Map of Salt Affected Soils. <https://www.fao.org/soils-portal/data-hub/soil-maps-and-databases/global-map-of-salt-affected-soils/en/>
- Focsiv (Federazione degli Organismi Cristiani Servizio Internazionale Volontariato), 2022. I padroni della Terra. Rapporto sull'accaparramento della terra 2022: conseguenze sui diritti umani, ambiente e migrazioni. <https://www.focsiv.it/wp-content/uploads/2022/06/LG2020-5ED-21.06.2022-WEB.pdf>
- Gurmessia B., Foppa Pedretti E., Cocco S., Cardelli V., Corti G., 2020. Manure anaerobic digestion effects and the role of pre- and post-treatments on veterinary antibiotics and antibiotic resistance genes removal efficiency. Science of the total Environment 721, 137532. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137532>
- ISPRA, 2022. Rapporto Nazionale “Consumo di suolo, dinamiche territoriali e servizi ecosistemici. Edizione 2022”. <https://www.isprambiente.gov.it/it/archivio/eventi/2022/07/presentazione-del-rapporto-nazionale-201cconsumo-di-suolo-dinamiche-territoriali-e-servizi-ecosistemici-edizione-2022201d>
- Moscatelli M.C., Marabottini R., Massaccesi L., Marinari S., 2022. Soil properties changes after seven years of ground mounted photovoltaic panels in Central Italy coastal area. Geoderma Regional 29, e00500. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2022.e00500>
- Ondon B.S., Li S., Zhou Q., Li F., 2021. Sources of Antibiotic Resistance Bacteria (ARB) and Antibiotic Resistance Genes (ARG) in the soil: A review of the spreading mechanism and human health risks. Reviews of Environmental Contamination and Toxicology 256, 121-153. https://doi.org/10.1007/398_2020_60
- ONU 2030 Agenda, 2015. The 17 Goals. Department of Economic and Social Affairs. <https://sdgs.un.org/goals>
- Pacific Institute, 2024. Water Conflict Chronology. <https://pacinst.org/water-conflict-chronology/>
- Zou T., Zhang X., Davidson E.A., 2021. Global trends of cropland phosphorus use and sustainability challenges. Nature 611, 81-87. https://doi.org/10.1007/398_2020_60

Il Futuro della Zootecnia: Un Viaggio tra Sostenibilità, Innovazione e Benessere Animale

Rosati A.

EAAP – Federazione Europea di Zootecnia

Immaginiamo un giorno in cui ogni prodotto animale – dal latte alla carne – che troviamo sulla nostra tavola, e sulle tavole di tutti gli abitanti di questo pianeta, sarà creato in un ambiente che rispetti sia il benessere degli animali sia l'ambiente. Questo scenario, che oggi ci sembra così lontano, è in realtà al centro della sfida che la zootecnia moderna si trova a dover affrontare. Con una popolazione mondiale in costante crescita e risorse sempre più limitate, è ormai necessario ed essenziale ripensare i metodi di allevamento per renderli non solo più produttivi, ma anche più responsabili. Bisogna quindi esplorare come la zootecnia si stia evolvendo, spinta dalla ricerca e dalle nuove tecnologie, verso un futuro sostenibile e consapevole.

Il significato della zootecnia oggi e nel futuro

L'idea di allevamento sostenibile è molto più di un semplice obiettivo. È una visione che abbraccia l'efficienza nella produzione di prodotti animali di alta qualità, rispettando l'ambiente e migliorando la qualità della vita degli allevatori, dei loro collaboratori e delle comunità locali. In poche parole, un allevamento sostenibile aspira a soddisfare non solo la domanda di mercato, ma anche la responsabilità etica verso le risorse naturali e gli animali che contribuiscono alla nostra alimentazione.

Proiettandoci verso un futuro non lontano come potrebbe essere il 2050, ci dobbiamo immaginare un settore zootecnico trasformato. La visione è quella di un allevamento che bilanci perfettamente le necessità del pianeta, della società e degli animali stessi. Questo futuro punta a un'alimentazione di qualità, sicura, ottenuta rispettando la biodiversità e le risorse limitate del nostro pianeta. Non si tratta più solo di produrre quanto necessario per rispondere ad una umanità in crescita e con una dieta sempre più portata ad essere "occidentale", cioè ricca di proteine di origine animale, ma di produrre in modo che ogni goccia di latte o ogni grammo di carne sia il frutto di pratiche responsabili, consapevoli e armonizzate con l'ambiente.

Un altro concetto di sostenibilità zootecnica cui purtroppo spesso si dimentica di dare la giusta considerazione è la sostenibilità economica. Si tratta quindi di riflettere che l'allevamento zootecnico oltre che sostenibile per gli aspetti ambientali, etici e sociali, deve anche pensare di fornire all'allevatore e agli operatori del settore un reddito che renda sostenibile la pratica allevatoria. Altrimenti tutto il resto non avrà molto senso.

Le sfide che ci attendono

Ogni grande progetto ha ostacoli da superare. Come già detto, la zootecnia del futuro si confronta con sfide cruciali, che vanno dal benessere degli animali all'impatto ambientale. Garantire agli animali allevati condizioni di vita rispettose è infatti solo uno dei punti. Limitare le emissioni di gas serra, preservare la salute e la biodiversità, e mantenere la sostenibilità economica degli allevamenti sono altrettanti importanti tasselli di un puzzle complesso. Per risolverlo, la zootecnia dovrà integrare innovazioni come la genetica avanzata e la biotecnologia, che permettono di migliorare la qualità genetica degli animali, la loro

produttività e, di conseguenza, l'intero ciclo produttivo nel rispetto del benessere e dell'ambiente.

C'è un'altra parte del nostro futuro alimentare che ha iniziato a prendere forma: le fonti alternative di proteine. Con la crescita della domanda di cibo, diventano sempre più centrali le alternative come le proteine vegetali, le proteine da insetti e persino la carne coltivata in laboratorio. Non sappiamo se queste saranno strade percorribili, però queste ed altre soluzioni potrebbero alleggerire la pressione sui tradizionali sistemi di allevamento e aprire nuove possibilità alimentari. In un mondo che dovrà nutrire oltre nove miliardi di persone, ogni possibilità di diversificazione alimentare con un minore impatto ambientale sarà un vantaggio per il pianeta.

Ma c'è anche una nuova consapevolezza che anima la visione della zootecnia sostenibile: l'etica. La società sta chiedendo con sempre più forza che gli animali siano trattati con rispetto, e la zootecnia di domani non potrà ignorare questo cambiamento. Con il benessere animale come priorità, ogni allevamento dovrà rispettare standard etici che riflettano la sensibilità delle nuove generazioni, impegnate per un mondo più giusto e più rispettoso di ogni forma di vita.

Le innovazioni tecnologiche ci stanno già avvicinando a un modello di allevamento più efficiente e sostenibile. Con la zootecnia di precisione, i dati e i monitoraggi permettono di ottimizzare ogni aspetto della vita degli animali: dall'alimentazione al benessere. Non solo. La collaborazione globale tra paesi, supportata dalla tecnologia, dovrà offrire soluzioni condivise per ridurre la pressione sulle risorse naturali e favorire una maggiore equità alimentare.

Il Mercato, Società, Demografia e Tecnologia: Chi Sta Guidando il Cambiamento?

La crescente domanda di cibo sta già spingendo il mercato a adattarsi a nuove necessità. Con una popolazione in crescita e una maggiore sensibilità ambientale, il mercato si dovrà concentrare su alimenti di qualità, prodotti in modo sostenibile per rispondere alle nuove esigenze globali.

Avendo puntato come futuro all'anno il 2050, è facile prevedere che per quell'anno il mercato alimentare subirà cambiamenti significativi, guidati da diversi trend e sfide globali. I principali fattori includono la crescita demografica, poiché con una popolazione mondiale prevista di quasi dieci miliardi, la domanda di cibo aumenterà notevolmente, richiedendo una maggiore efficienza nella produzione e innovazioni per soddisfare i bisogni in modo sostenibile. Dobbiamo anche considerare quali paesi cresceranno come numero di abitanti per comprendere anche l'impatto delle relative abitudini alimentari. Secondo le Nazioni Unite, fino al 2050 ci aspettiamo che la metà della crescita popolazione mondiale avverrà in solo nove nazioni: l'India, la Nigeria, la Repubblica Democratica del Congo, il Pakistan, l'Etiopia, la Tanzania, gli USA, l'Uganda e l'Indonesia, in ordine secondo l'attesa contribuzione alla crescita totale. Come si può ben vedere da questo elenco di paesi l'Africa continuerà ad avere un alto tasso di crescita della popolazione, da oggi al 2050 più di 25 paesi africano avranno la loro popolazione raddoppiata

Non solo ma l'aumento delle temperature con eventi meteorologici estremi, quindi il cambiamento climatico ormai in atto, e risorse naturali limitate metteranno alla prova le pratiche agricole tradizionali, spingendo verso colture più resistenti, agricoltura adattiva e tecniche di produzione sostenibili.

Un fattore molto importante che va considerato è quello delle diete in evoluzione degli abitanti del pianeta terra. In occidente grazie ad una maggiore consapevolezza sui temi della salute e dell'ambiente, i consumatori non si prevede che aumenteranno il consumo di carne odierno, né si ritiene che lo ridurranno, magari per orientarsi verso alimenti a base vegetale, biologici e fonti proteiche alternative. Nel cambiamento della domanda futura di mercato è molto più importante quello che accadrà nelle aree più popolate del globo, ovvero una maggiore richiesta di proteine di origine animale come forma di miglioramento sociale oltre che la strada verso una dieta migliore. In Cina, per esempio, tra il 1960 e il 2012, il consumo di carne da parte dei cinesi – che sono circa un miliardo e 400 milioni – è passato da 4 a 58 chili all'anno per persona. Si consuma prevalentemente pollame e a seguire suini (i cinesi sono i più importanti consumatori di carne di maiale al mondo e anche tra i primi produttori), ovini e bovini. Il percorso della Cina è quello intrapreso da molti altri paesi che allo stesso modo hanno avuto uno sviluppo economico importante. E si presume che lo stesso accadrà in molte delle rimanenti aree economicamente depresse del globo, massimamente in Africa. La necessità di garantire la sicurezza alimentare e la fornitura di proteine di origine animale in queste nuove aree, dovrà essere fatto necessariamente riducendo i danni ambientali tramite la promozione delle politiche e pratiche che privilegino la produzione sostenibile e la conservazione delle risorse. Queste dinamiche trasformeranno l'industria alimentare, richiedendo approcci più efficienti, resilienti e sostenibili nella produzione e distribuzione.

Quindi entro il 2050, non sarà però solo questione di quantità: i consumatori chiederanno alimenti di qualità, soprattutto di origine animale, prodotti in modo sostenibile e sicuro. Cambiare il mercato significa anche rispondere alle abitudini alimentari in evoluzione, influenzate dalla consapevolezza ambientale e dalla scelta di ridurre gli sprechi.

È necessario che con la popolazione mondiale in crescita e con il cambiamento delle diete, la produzione zootecnica dovrà crescere di pari passo. Tuttavia, mantenere un equilibrio tra produzione e rispetto dell'ambiente diventa ogni giorno più complesso. Le stime parlano chiaro: la domanda di latte, carne e uova aumenterà in modo esponenziale. Si stima infatti che nel 2050 si produrranno a livello globale 1043 milioni di tonnellate di **latte** a partire dagli attuali 937 milioni di tonnellate. Per quanto riguarda la carne, la produzione globale crescerà in percentuale molto di più (30% circa), si produrranno infatti 465 milioni di tonnellate di **carne** dai 357 milioni di tonnellate attuali. Anche le uova cresceranno, i dati dimostrano che nel 2030 si produrranno 95 milioni, dagli attuali 93, di tonnellate di **uova**. Riuscire a rispondere a queste esigenze di crescita senza sovraccaricare il pianeta sarà la sfida più grande.

In questo viaggio verso la sostenibilità, l'economia e la tecnologia si trovano a braccetto. La domanda economica guida lo sviluppo, ma è solo grazie alla tecnologia che è possibile trovare risposte a domande sempre più urgenti. L'innovazione si presenta così come il filo conduttore tra il mondo zootecnico e le esigenze economiche, con nuove soluzioni per aumentare la produzione e ridurre l'impatto ecologico.

L'intelligenza artificiale (IA) rappresenta forse la rivoluzione più recente e promettente. Applicata alla zootecnia, l'IA è in grado di raccogliere, analizzare e utilizzare enormi quantità di dati in tempo reale per migliorare la gestione degli allevamenti. Iniziative come il progetto "Dairy Brain" dell'Università del Wisconsin (USA) mostrano come la tecnologia possa trasformare il settore, rendendo possibile una gestione che sarebbe impensabile senza l'ausilio dell'IA.

La Ricerca: Una Scienza in Evoluzione

La ricerca scientifica nel campo della zootecnia sta quindi cambiando volto. Il metodo sperimentale è affiancato dalle tecnologie di intelligenza artificiale, che guidano nuovi modelli di indagine e scoperta. Questo approccio innovativo mette in luce il ruolo dei dati e dell'apprendimento automatico, aprendo la strada a scoperte che ridefiniscono il nostro rapporto con la natura.

La ricerca grazie all'IA, come dimostrato con il progetto Alphafold per la modellazione delle proteine, sta già offrendo risultati impensabili solo qualche anno fa. La capacità di comprendere strutture complesse come quelle proteiche è un passo decisivo verso nuove conoscenze, che possono essere applicate anche alla zootecnia, migliorando la qualità e l'efficienza della produzione.

Alla fine di questa analisi, appare chiaro che la zootecnia si trova in una fase di transizione profonda. Il futuro del settore sarà un delicato intreccio tra sostenibilità, innovazione e rispetto per gli animali. Solo un impegno globale, che unisca scienza, tecnologia ed etica, potrà garantire una produzione alimentare in grado di nutrire il pianeta senza comprometterne le risorse.

Lettere suggerite:

1. Alexandratos, N., & Bruinsma, J. (2012). *World agriculture towards 2030/2050: The 2012 revision*. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
2. Bailey, R., Froggatt, A., & Wellesley, L. (2014). *Livestock—Climate Change's Forgotten Sector: Global Public Opinion on Meat and Dairy Consumption*. Chatham House Report.
3. Banhazi, T. M., Lehr, H., Black, J. L., et al. (2012). Precision livestock farming: Tools and concepts. *Animal Frontiers*, 2(4), 6-12.
4. Berckmans, D. (2017). General introduction to precision livestock farming. *Animal Frontiers*, 7(1), 6-11.
5. Bolyen, E., & Rideout, J. R. (2019). Moving toward a plant-based diet to improve health and sustainability. *Nutrition Reviews*, 77(9), 585-600.
6. Bodirsky, B. L., Dietrich, J. P., & Rolinski, S. (2015). Global food demand scenarios for the 21st century. *PLOS ONE*, 10(11), e0139201.
7. Fraser, D. (2008). Understanding animal welfare. *Acta Veterinaria Scandinavica*, 50(1), S1.
8. Gerber, P. J., Steinfeld, H., Henderson, B., et al. (2013). Tackling climate change through livestock: A global assessment of emissions and mitigation opportunities. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
9. Godfray, H. C. J., Beddington, J. R., Crute, I. R., et al. (2010). Food security: The challenge of feeding 9 billion people. *Science*, 327(5967), 812-818.
10. Herrero, M., Thornton, P. K., Gerber, P., & Reid, R. S. (2009). Livestock, livelihoods and the environment: Understanding the trade-offs. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 1(2), 111-120.
11. Hobbs, J., & Young, L. (2020). Artificial intelligence in precision livestock farming: Data collection, analysis, and decision-making. *Computers in Agriculture*, 10(1), 25-37.
12. Hristov, A. N., Oh, J., Firkins, J. L., et al. (2013). Mitigation of methane and nitrous oxide emissions from animal operations: A review of enteric and manure sources. *Journal of Animal Science*, 91(11), 5045-5069.
13. Jumper, J., Evans, R., Pritzel, A., et al. (2021). Highly accurate protein structure prediction with AlphaFold. *Nature*, 596(7873), 583-589.
14. Kamilaris, A., & Prenafeta-Boldú, F. X. (2018). Deep learning in agriculture: A survey. *Computers and Electronics in Agriculture*, 147, 70-90.
15. Montaldo, H. H., & Pelcastre-Castañeda, A. (2020). Genomic selection and precision livestock farming for sustainable animal breeding. *Frontiers in Genetics*, 11, 972.
16. Ohl, F., & van der Staay, F. J. (2012). Animal welfare: At the interface between science and society. *The Veterinary Journal*, 192(1), 13-19.
17. Parodi, A., Leip, A., De Boer, I. J. M., et al. (2018). The potential of alternative protein sources to improve the sustainability and resilience of the global food system. *Environmental Research Letters*, 13(2), 025002.
18. Post, M. J. (2012). Cultured meat from stem cells: Challenges and prospects. *Meat Science*, 92(3), 297-301.
19. Scholten, M. C., De Boer, I. J. M., & Gremmen, B. (2013). Livestock farming with care: Towards sustainable production. *NJAS - Wageningen Journal of Life Sciences*, 66, 3-5.
20. Senior, A. W., Evans, R., Jumper, J., et al. (2020). Improved protein structure prediction using potentials from deep learning. *Nature*, 577(7792), 706-710.
21. Smith, P., Bustamante, M., Ahammad, H., et al. (2014). Agriculture, forestry and other land use (AFOLU). In *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change* (pp. 811-922). IPCC.
22. Springmann, M., Godfray, H. C. J., Rayner, M., & Scarborough, P. (2016). Analysis and valuation of the health and climate change co-benefits of dietary change. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 113(15), 4146-4151.
23. Tilman, D., & Clark, M. (2014). Global diets link environmental sustainability and human health. *Nature*, 515(7528), 518-522.

24. Van Eenennaam, A. L., & Young, A. E. (2018). *Gene editing in livestock: Progress and challenges. Annual Review of Animal Biosciences*, 6(1), 225-246.

Approcci innovativi per la resilienza e la sostenibilità della produzione di alimenti e bevande

Spinelli S. e Adessi A.

DAGRI - Università degli Studi di Firenze

Riassunto

Questo contributo esplora due tematiche fondamentali per il futuro del settore alimentare: il contributo delle scienze sensoriali all'innovazione di prodotto e la valorizzazione degli scarti tramite microrganismi. La valorizzazione degli scarti contribuisce alla riduzione dell'impatto ambientale, trasformando i residui agroalimentari in prodotti ad alto valore aggiunto, mentre le scienze sensoriali supportano lo sviluppo di innovazioni di prodotti che siano poi accettate dai consumatori. In risposta alla crescente domanda di alimenti salutari, l'industria alimentare deve sviluppare soluzioni anche "su misura", utilizzando approcci come la co-creazione. La collaborazione tra industria, istituzioni e ricerca è cruciale per promuovere la sostenibilità e migliorare il benessere dei consumatori.

Abstract

This contribution explores two fundamental themes for the future of the food sector: the contribution of sensory sciences to product innovation and the valorization of waste through microorganisms. The valorisation of waste contributes to the reduction of environmental impact, transforming agri-food residues into products with high added value, while sensory sciences support the development of product innovations which are then accepted by consumers. In response to the growing demand for healthy foods, the food industry must develop tailor-made solutions, using approaches such as co-creation. Collaboration between industry, institutions and research is crucial to promote sustainability and improve consumer well-being.

Introduzione

Questo contributo combina due ambiti chiave per il futuro del settore alimentare: l'innovazione di prodotto guidata dalle scienze sensoriali e la valorizzazione degli scarti e dei sottoprodotti dell'industria alimentare, tramite microrganismi. Presentati nel contesto della conferenza AISSA 2024, questi temi riflettono strategie per migliorare la sostenibilità, la resilienza e la qualità della produzione alimentare, puntando su soluzioni personalizzate e approcci circolari.

Negli ultimi anni, l'industria alimentare si è trovata di fronte a sfide significative legate alla riduzione degli sprechi e alla crescente domanda di prodotti sostenibili e salutari. Il concetto di economia circolare è diventato centrale, stimolando innovazioni che integrano i principi di recupero e riutilizzo dei materiali lungo tutta la filiera produttiva.

L'importanza della valorizzazione degli scarti è duplice: da un lato, riduce l'impatto ambientale dei rifiuti; dall'altro, crea nuove opportunità economiche attraverso la produzione di materiali ad alto valore aggiunto. Parallelamente, l'adozione di tecniche sensoriali avanzate favorisce lo sviluppo di prodotti su misura, che rispondono alle esigenze di salute e sostenibilità dei consumatori moderni.

Le scienze sensoriali per lo sviluppo di nuovi prodotti alimentari sostenibili e salutari

Negli ultimi decenni, la crescita delle malattie non trasmissibili (NCD) e la diffusione di carenze nutrizionali ha imposto nuove sfide alla salute pubblica globale. L'industria alimentare, di fronte a queste sfide, deve innovare per offrire prodotti che soddisfino non solo i requisiti nutrizionali, ma che abbiano anche un forte appeal sensoriale e che siano accettate dai

consumatori. La personalizzazione delle soluzioni alimentari, basata sulla comprensione delle preferenze sensoriali individuali, emerge come una strategia promettente di innovazione per affrontare queste sfide.

Necessità di soluzioni su misura

Il Programma Nazionale per la Ricerca 2021-2027 (Ministero dell'Università e della Ricerca, 2020) ha sottolineato l'urgenza di sviluppare soluzioni nutrizionali innovative, salutari, sostenibili e personalizzate per diversi gruppi mirati di consumatori. Questi includono gruppi vulnerabili, come bambini, anziani e persone con condizioni mediche specifiche, nonché gruppi più ampi che cercano di migliorare le loro abitudini alimentari per motivi di salute o sostenibilità.

Questo implica anche la definizione di nuovi modelli di business per ridurre i fattori di rischio per le malattie non trasmissibili (NCD) ridurre le carenze di micronutrienti e la malnutrizione, fornendo ai consumatori una dieta salutare, con idoneo appeal sensoriale, adeguata, sostenibile e personalizzata (*tailor made food*).

L'innovazione nel settore alimentare richiede un approccio che integri molteplici fattori: bisogni funzionali, affettivi, sociali e sensoriali (Christensen & Raynor, 2003; Lundahl, 2012). È cruciale sviluppare modelli su misura che considerino le differenze individuali non solo tra diversi gruppi demografici (es. i bambini, gli adolescenti, le persone in sovrappeso, le persone con obesità, le persone con celiachia, i malati oncologici sottoposti a terapia neoplastica, le persone a rischio di malattie cardiovascolari, le persone a rischio di cancro...), ma anche all'interno di questi gruppi (analisi disaggregata per genere, per fascia di età, per tratti psicologici...).

Inoltre, l'adozione di tecniche partecipative tipiche della Citizen Science come la co-creazione (*co-creation*) consentono di creare prodotti che soddisfino meglio le esigenze specifiche dei consumatori (Vohland et al., 2021). La Citizen Science si riferisce al coinvolgimento attivo del pubblico nella ricerca scientifica, con scienziati e cittadini che collaborano per produrre nuova conoscenza per la società. Tipico dell'approccio della Citizen Science, la co-creazione prevede l'utilizzo di tecniche partecipative per la progettazione di nuovi prodotti o servizi, partendo dalla comprensione dei bisogni e delle esigenze degli utenti, secondo un processo che coinvolge diverse competenze e stakeholder che insieme progettano i nuovi prodotti (Ind & Coates, 2013).

Metodologie e applicazioni

La ricerca alla base di questi progetti utilizza un approccio metodologico robusto, che combina la valutazione delle preferenze sensoriali con l'analisi delle caratteristiche psicologiche e demografiche dei consumatori e le tecniche di co-creazione. I risultati evidenziano come le preferenze alimentari siano influenzate da una combinazione di fattori sensoriali e psicologici, con differenze significative osservate tra diversi gruppi demografici e socioeconomici, e come queste possono essere utilizzate in approcci partecipativi per l'innovazione di prodotto.

Alcuni esempi applicativi dell'approccio descritto sono riportati qui di seguito:

Innovare per le mense scolastiche: il progetto VeggieTwist

Il progetto VeggieTwist rappresenta un esempio concreto di co-creazione con adolescenti per sviluppare piatti a base di legumi destinati alle mense scolastiche (Kokkorou et al., 2025). L'obiettivo del progetto è offrire alternative alimentari che siano non solo sostenibili e nutrienti, ma anche accattivanti dal punto di vista sensoriale. Il coinvolgimento diretto degli

adolescenti nel processo di sviluppo garantisce che i prodotti finali siano in linea con le loro aspettative e preferenze, considerando anche tratti psicologici che costituiscono barriere rispetto all'adozione di comportamenti alimentari più salutari, come la neofobia alimentare, definita come la riluttanza a consumare cibi non familiari (Pliner & Hobden, 1992; Pliner & Loewen, 1997)

Sviluppo di prodotti carnei per flessitariani

Un ulteriore caso studio è quello rappresentato dallo sviluppo di prodotti innovativi a base di carne per flessitariani, un gruppo in crescita che preferisce ridurre il consumo di carne per motivi di salute e/o sostenibilità. Adottando il modello multifattoriale descritto sopra insieme a tecniche di co-creazione, sono stati sviluppati dei prodotti carnei innovativi, progettati per essere facili da preparare, versatili e sensorialmente appaganti, rispondendo alla domanda di alternative alimentari che combinano gusto e sostenibilità (Domenici et al., in press).

La co-creazione con i pazienti oncologici

Un altro aspetto significativo dell'applicazione delle scienze sensoriali per l'innovazione è il coinvolgimento di pazienti oncologici nella co-creazione di pasti e prodotti che possano compensare le alterazioni sensoriali spesso causate dalle terapie oncologiche (Spinelli et al., 2021). Questi sforzi mirano a sviluppare soluzioni alimentari (sia prodotti che piatti per il catering ospedaliero) che migliorino la qualità della vita dei pazienti, aiutandoli a mantenere un'adeguata nutrizione e a sentirsi meglio durante il trattamento.

Implicazioni per l'industria alimentare

Questi risultati hanno implicazioni significative per l'industria alimentare. La capacità di creare prodotti alimentari che siano su-misura e in grado di soddisfare le diverse esigenze dei consumatori rappresenta una leva competitiva importante. Le aziende che investono nella ricerca sensoriale e nella co-creazione con i consumatori possono ottenere un vantaggio significativo nel mercato sempre più competitivo dei prodotti alimentari, con un occhio anche alla riduzione degli scarti.

Impiego di microrganismi per la valorizzazione degli scarti dell'industria alimentare

Situazione attuale in Italia

Nel 2021, l'Italia ha prodotto circa 8,3 milioni di tonnellate di rifiuti organici. Il trattamento di una quota rilevante avviene tramite compostaggio e digestione anaerobica, che sono in espansione. Si prevede infatti che la produzione di biogas entro il 2030 potrebbe portare ad una produzione tra i 600 e gli 800 Mm³ di metano (Centemero 2023). Tuttavia, le tecnologie tradizionali non sono sufficienti per sfruttare appieno il potenziale degli scarti, rendendo necessario un approccio più innovativo e diversificato.

Gli scarti alimentari rappresentano una risorsa sottoutilizzata. Tra i principali sottoprodotti generati vi sono la crusca di grano, le trebbie esauste, i semi di frutta e i residui di lavorazione delle verdure. Questi materiali possono essere trasformati in prodotti ad alto valore aggiunto tramite processi microbici, che sono in grado di convertire le molecole organiche presenti nei residui o nei sottoprodotti della filiera alimentari in prodotti relativi alla produzione di bioplastiche, ammendanti per il suolo, composti bioattivi e bioenergie. La gestione ottimale di questi scarti potrebbe non solo ridurre le emissioni di gas serra ma anche creare nuove opportunità di mercato per l'industria agroalimentare.

Parallelamente, la crescente consapevolezza dei consumatori riguardo alla salute e alla sostenibilità ha reso cruciale lo sviluppo di soluzioni alimentari personalizzate, che siano

nutrienti e rispettose dell'ambiente. In questo contesto, le scienze sensoriali giocano un ruolo chiave nella progettazione di prodotti che soddisfano le preferenze dei consumatori, promuovendo abitudini alimentari più sostenibili. Studi recenti mostrano come la multidisciplinarietà possa migliorare significativamente la qualità e l'attrattiva dei prodotti finali.

Valorizzazione degli scarti tramite microrganismi

Produzione di bioplastiche

Attualmente, le plastiche sono principalmente derivate dall'industria petrolchimica, che ha un impatto significativamente negativo sull'esaurimento delle fonti fossili, sull'inquinamento e sul clima (Monroy e Buitrón, 2020). Negli ultimi anni, numerosi paesi hanno perciò promosso e supportato la ricerca su bioplastiche rinnovabili e biodegradabili (Bhatia et al., 2021). Diversi tipi di biopolimeri sono stati studiati come potenziali sostituti delle plastiche petrolchimiche. Tuttavia, l'uso di materie prime di terza generazione (ovvero residui o scarti), reso possibile grazie ai microrganismi, rappresenta un'applicazione promettente poiché non compete con il cibo per l'uomo o gli alimenti per animali e non richiede terreni coltivabili o acqua dolce (Amadu et al., 2021).

La fermentazione di sottoprodotti agroalimentari, come ad esempio scarti di frutta e verdura (Costa et al. 2021), la sansa di olive (Corneli et al., 2016) o reflui caseari (Carlozzi et al., 2021), consente la sintesi microbiologica di polimeri biodegradabili come i poliidrossialcanoati (PHAs). Questi materiali possono essere utilizzati per sostituire le plastiche tradizionali, contribuendo a ridurre l'inquinamento. Gli sviluppi in questo settore indicano che l'utilizzo su scala industriale è sempre più vicino grazie a processi più efficienti e competitivi in termini di costi.

Bioenergie

Forme di bioenergia come il biogas e il bioetanolo, basati su processi condotti da microrganismi, fanno oramai parte del panorama energetico per il nostro approvvigionamento, e sono oggetto di particolare interesse grazie alla loro capacità di integrare fonti energetiche sostenibili.

Recentemente la ricerca si è rivolta verso la produzione di idrogeno, un vettore energetico energeticamente più efficiente degli attuali combustibili utilizzati. Alcuni microrganismi permettono di produrre idrogeno utilizzando scarti agro-industriali offrendo un'alternativa sostenibile, in linea con i principi dell'economia circolare (Chandrasekhar et al., 2020). Il Bio-H₂ può essere prodotto tramite biofotolisi, fermentazione al buio e fotofermentazione utilizzando microrganismi come microalghe, batteri non fotosintetici e batteri fotosintetici.

I batteri rossi non sulfurei permettono la produzione di idrogeno utilizzando scarti come la crusca di grano o residui di panificazione (Corneli et al., 2016; Adessi et al., 2018). Questa tecnologia è promettente per la generazione di energia rinnovabile e rappresenta un passo avanti verso la transizione energetica.

Sistemi bioelettrochimici (BES)

I sistemi bioelettrochimici (BES) sono dispositivi nei quali è possibile sfruttare la capacità di diversi batteri di utilizzare gli elettrodi come accettori o donatori di elettroni solidi. In un BES, gli elettroni derivanti dall'ossidazione di un substrato organico in condizioni anaerobiche vengono trasferiti a un elettrodo (cioè, l'anodo) e fluiscono attraverso un circuito raggiungendo un altro elettrodo (cioè, il catodo), dove un accettore finale di elettroni viene

ridotto. I sistemi bioelettrochimici possono anche essere sfruttati per l'elettro-fermentazione di effluenti ricchi di substrati organici con la produzione di acidi organici e idrogeno (Roy et al., 2022). Il processo catodico può essere utilizzato per produrre idrogeno e, se accoppiato con l'ossidazione anodica del COD, può ridurre l'energia necessaria per produrre idrogeno rispetto a un processo puramente elettrochimico (Logan e Rabaey, 2012). I batteri rossi sono stati utilizzati sugli elettrodi dei BES. I sistemi bioelettrochimici potrebbero essere sfruttati con successo per ridurre il carico organico delle CW e contemporaneamente produrre idrogeno tramite PNSB al catodo (Grattieri, 2020).

Sfide e opportunità offerte dai microrganismi

Il riutilizzo creativo degli scarti agroalimentari ha portato allo sviluppo di soluzioni innovative, come la trasformazione dei semi esausti di frutta in farine funzionali o l'estrazione di composti bioattivi per applicazioni farmaceutiche, nutraceutiche o cosmetiche. Questi sviluppi evidenziano il potenziale inesplorato di molti sottoprodotti alimentari.

Nei 27 Paesi dell'UE si generano annualmente circa 59 milioni di tonnellate di rifiuti alimentari, ma solo 38 milioni di tonnellate vengono attualmente trattate. Questo lascia un ampio margine di miglioramento nella gestione dei rifiuti. Alcune delle principali sfide includono l'espansione dei residui trattati includendo nuove categorie di scarti e sottoprodotti agroalimentari nei processi di valorizzazione; lo sviluppo di nuovi processi promuovendo innovazioni tecnologiche per ottimizzare la trasformazione degli scarti in prodotti utili; la creazione di nuovi prodotti tra cui materiali per bioplastiche, bioenergie, fertilizzanti e antimicrobici rappresentano alcune delle aree più promettenti.

Conclusioni

La combinazione di valorizzazione degli scarti e il contributo sensoriale all'innovazione di prodotto rappresenta una strategia chiave per affrontare le sfide globali della sostenibilità e dell'economia circolare. Occorre infatti garantire che i nuovi prodotti e ingredienti sviluppati, più sostenibili e salutari, siano accettati dai consumatori. Con il supporto della ricerca e l'adozione di tecnologie avanzate, il settore agroalimentare può contribuire significativamente a ridurre i rifiuti, creare valore economico e migliorare il benessere dei consumatori.

Un approccio integrato e collaborativo tra industria, istituzioni e mondo accademico è essenziale per realizzare il pieno potenziale di queste iniziative, favorendo una transizione verso un futuro più sostenibile e innovativo. In definitiva, la capacità di coniugare innovazione, sostenibilità e attenzione al consumatore rappresenta il pilastro per il successo del settore alimentare del futuro.

Bibliografia

- Adessi, A., Venturi, M., Candelieri, F., Galli, V., Granchi, L., & De Philippis, R. (2018). Bread wastes to energy: sequential lactic and photo-fermentation for hydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy*, 43(20), 9569-9576. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.04.053>
- Amadu AA, Qiu S, Ge S, et al (2021) A review of biopolymer (Poly-β-hydroxybutyrate) synthesis in microbes cultivated on wastewater. *Science of the Total Environment* 756:143729. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143729>
- Bhatia SK, Otari S V., Jeon JM, et al (2021) Biowaste-to-bioplastic (polyhydroxyalkanoates): Conversion technologies, strategies, challenges, and perspective. *Bioresour Technol* 326:124733. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.124733>
- Centemero M. La filiera del biowaste per lo sviluppo sostenibile. Edizioni Ambiente 2023.
- Carlozzi P, Giovannelli A, Traversi ML, Touloupakis E (2021) Poly(3-hydroxybutyrate) bioproduction in a two-step sequential process using wastewater. *Journal of Water Process Engineering* 39:101700. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101700>
- Chandrasekhar, K., Kumar, S., Lee, B. D., & Kim, S. H. (2020). Waste based hydrogen production for circular bioeconomy: Current status and future directions. *Bioresour technology*, 302, 122920. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.122920>
- Christensen, C. M., & Raynor, M. E. (2003). *The innovator's solution: creating and sustaining successful growth*. Harvard Business

School Press.

Costa, P., Basaglia, M., Casella, S., & Favaro, L. (2022). Polyhydroxyalkanoate production from fruit and vegetable waste processing. *Polymers*, 14(24), 5529.

Domenici, M., Pierguidi, L., Spinelli, S., Dinnella, C., Monteleone, E. Innovating meat products: guiding tailor-made new product development for flexitarians and omnivorous through a Jobs-To-Be-Done co-creation approach, *Food Quality and Preference*, in press.

Ind, N., & Coates, N. (2013). The meanings of co-creation. *European Business Review*, 25(1), 86–95. <https://doi.org/10.1108/09555341311287754/FULL/XML>

Kokkorou, M., Spinelli, S., Dinnella, C., Pierguidi, L., Wollgast, J., Maragkoudakis, P., & Monteleone, E. (2025). Co-creating innovative and accepted legume-based dishes for school canteens with adolescents in a low socioeconomic area. *Food Quality and Preference*, 123, 105343. <https://doi.org/10.1016/J.FOODQUAL.2024.105343>

Logan, B. E., & Rabaey, K. (2012). Conversion of wastes into bioelectricity and chemicals by using microbial electrochemical technologies. *science*, 337(6095), 686-690.

Lundahl, D. S. (2012). Breakthrough food production innovation through emotions research. Elsevier/Academic Press.

Ministero dell'Università e della Ricerca. (2020). Programma nazionale per la ricerca 2021-2027. <https://www.mur.gov.it/it/aree-tematiche/ricerca/programmazione/programma-nazionale-la-ricerca>

Monroy I, Buitrón G (2020) Production of polyhydroxybutyrate by pure and mixed cultures of purple non-sulfur bacteria: A review. *J Biotechnol* 317:39–47. <https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2020.04.012>

Pliner, P., & Hobden, K. (1992). Development of a scale to measure the trait of food neophobia in humans. *Appetite*, 19(2), 105–120. [https://doi.org/10.1016/0195-6663\(92\)90014-W](https://doi.org/10.1016/0195-6663(92)90014-W)

Pliner, P., & Loewen, E. R. (1997). Temperament and Food Neophobia in Children and their Mothers. *Appetite*, 28(1992), 239–254. <https://doi.org/10.1006/appe.1996.0078>

Roy, M., Aryal, N., Zhang, Y., Patil, S. A., & Pant, D. (2022). Technological progress and readiness level of microbial electrosynthesis and electrofermentation for carbon dioxide and organic wastes valorization. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, 35, 100605.

Spinelli, S., Mini, E., Monteleone, E., Angiolini, C., & Roviello, G. (2021). ALTERTASTE: improving food pleasure and intake of oncology patients receiving chemotherapy. *Future Oncology*. <https://doi.org/10.2217/fon-2020-0871>

Vohland, K., Land-Zandstra, A., Ceccaroni, L., Lemmens, R., Perello, J., Ponti, M., Samson, R., & Wagenknecht, K. (2021). The science of citizen science. *The Science of Citizen Science*, 1–529. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-58278-4/COVER>

Complexity and Uncertainty: Agricultural Economics in the Face of Global Challenges

Martino^a G., Romano^b D.

^a DSA - University of Perugia

^b DISEI - University of Florence

Introduction

The last decades have been marked by increased complexity and uncertainty in the contexts where the global agrifood systems operate due to interlinked crises, such as climate change, resource scarcity, population growth, and economic instability. This paper set the stage for a discussion on how agricultural economics can address these issues amidst global challenges and how the global agrifood systems must adapt to dynamic and interconnected crises.

It frames the subject as both urgent and multifaceted, reflecting the increasing importance of addressing agricultural and economic complexities in light of globalization and its disruptions. By referencing the dual focus on complexity and uncertainty, we emphasize the unpredictability of the global economic environment, which directly affects agricultural systems and food security.

Our contribution's primary objective underscores the need to explore the intersections of economic policy, research methodologies, and real-world applications in addressing global agrifood challenges. They call for innovative, systemic, and forward-looking approaches to mitigate risks, enhance resilience, and promote sustainability. It also highlights the need for actionable insights and interdisciplinary collaboration to navigate the complexities of modern agrifood systems.

In pursuing this objective, the paper is organized as follows. First, the global context is sketched, recalling what are the major drivers of change, the major sources of risks and uncertainty, and the consequences of the new state of facts. Building on this new context, methodological implications for research are discussed, focusing on food security and migration. Finally, selected examples that highlight the economic aspects of these challenges are discussed. This structure reflects an interdisciplinary approach, combining macroeconomic analysis, methodological rigor, and case studies to provide a comprehensive understanding of the issues at hand.

The global context

This section set the scene for the methodological discussion, identifying global long-term drivers, such as population dynamics and economic growth in developed as well as developing countries, important emerging characteristics of the agrifood systems' operating environment, such as increased complexity and uncertainty, and the most important consequences at global level, such as the increased food insecurity and migration flows as a result of shocks and stressors.

Long-term drivers

Figure 1 presents global population trends, illustrating the historical and projected total population and annual growth rates from 1950 to 2100. The world population has been

continuously increasing, surpassing 8 billion around 2020, and is projected to reach approximately 10-12 billion by 2100. This evolution takes place despite a clear downward trend in the annual population growth rate.¹ This reflects a global demographic transition driven by reduced fertility rates and an even more pronounced reduction in mortality rates, reflecting advancements in healthcare, agrifood production, and overall living standards. At the same time, the population dynamic features increased urbanization and aging populations, particularly in high-income countries.

The interplay between slower growth rates and an increasing total population will bring challenges such as resource management, urban planning, and healthcare systems for aging populations. This underscores the importance of proactive policies to manage the demographic and epidemiological transitions (Omran, 2001). Investments in education, family planning, and sustainable resource use will be crucial to navigating the challenges of a growing global population.

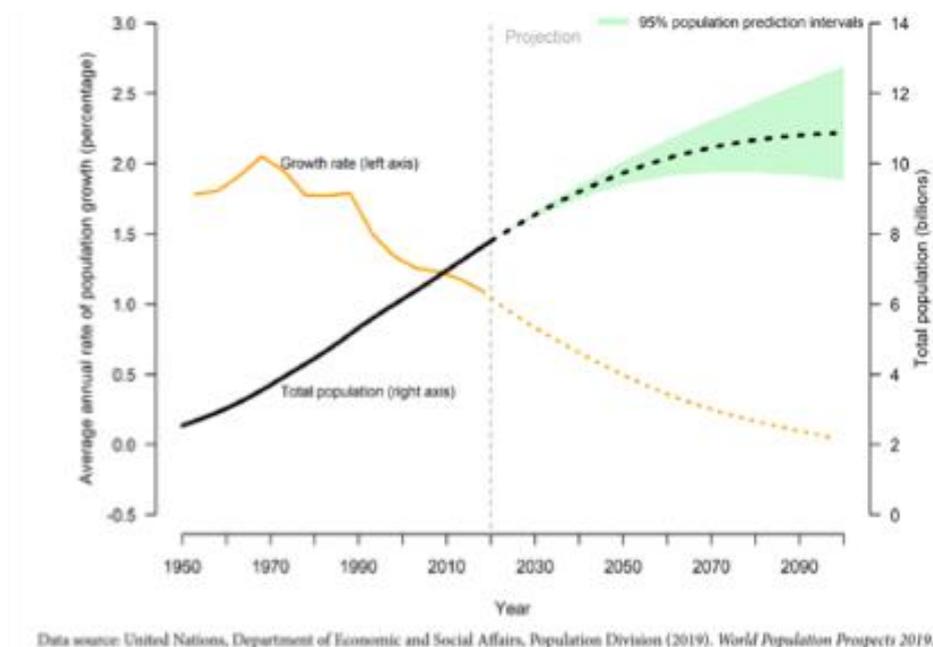


Figure 1. Global population dynamics, 1950-2100

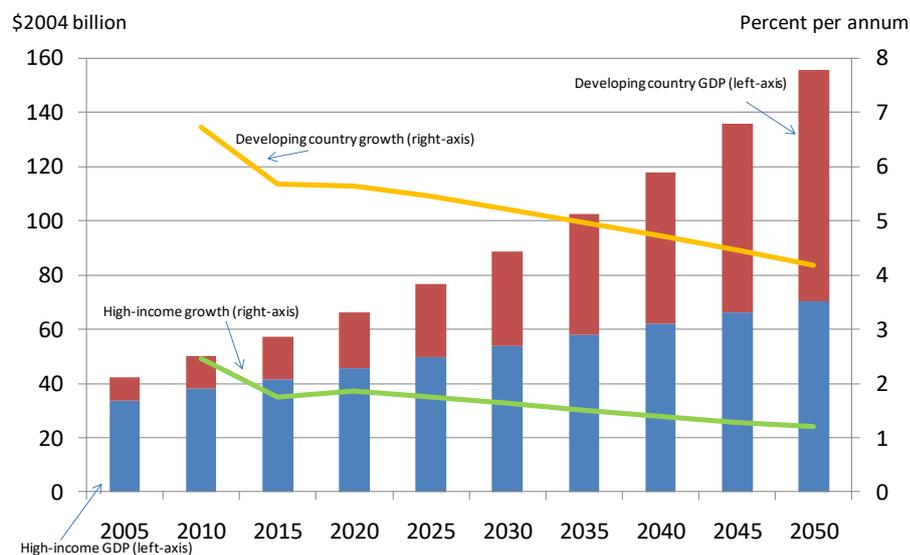
Figure 2 shows the global dynamics of gross domestic product (GDP), comparing high-income and developing countries' economic growth over the first half of this century. A clear trend emerges: while high-income countries still account for a significant portion of global GDP, the share of developing countries is steadily increasing. This reflects the rapid economic expansion of emerging economies, driven by factors such as industrialization, urbanization, and integration into global markets.

The annual growth rates reveal a stark contrast between the two groups of countries. Developing countries exhibit higher growth rates compared to high-income countries, which are characterized by slower and more stable growth. This divergence is expected, given the

¹ From a peak of about 2% in the 1960s, growth rates have steadily declined and are projected to drop below 0.5% by 2100.

untapped potential in developing regions, such as expanding labor forces, increasing consumption, and improving infrastructure. In contrast, high-income countries experience saturation in their markets, aging populations, and slower productivity gains, which contribute to their reduced growth rates.

One key insight is the convergence of global economic power. While high-income countries remain dominant in absolute GDP terms, their relative influence is declining as developing economies continue to grow faster. Additionally, Figure 2 underscores the challenges faced by developing economies. Maintaining high growth rates while addressing environmental, social, and governance challenges is critical for long-term stability. For high-income countries, fostering innovation and supporting global partnerships will be essential to adapt to this evolving economic landscape.



Source: Simulation results with World Bank's ENVISAGE model.

Figure 2. Economic growth in developed and developing economies

Looking at the combined dynamics of population and income, we can observe that in developing countries population growth is stronger, accompanied by GDP growth at a faster pace than in mature economies. This rapid growth brings significant challenges, such as the need to ensure sufficient food resources, adequate infrastructure, and policies that foster sustainable development. In high-income countries, we can observe a slowdown in both population and economic growth. However, these economies, while growing at a slower pace, remain crucial as drivers of technological innovation and as trading partners for emerging countries.

We can conclude that global growth will be mainly driven by developing countries, which highlights the need for global policies that promote equity, sustainability, and resilience. Population growth poses significant challenges to food security and the management of natural resources, requiring innovative solutions to balance increased demand with global production capacities. Indeed, by 2050, global production of food, fiber, and feed will need to increase by 50% compared to 2012. Overall, the transition to food saturation will not be achieved before 2070-2090. This will exert significant pressure on natural resources.

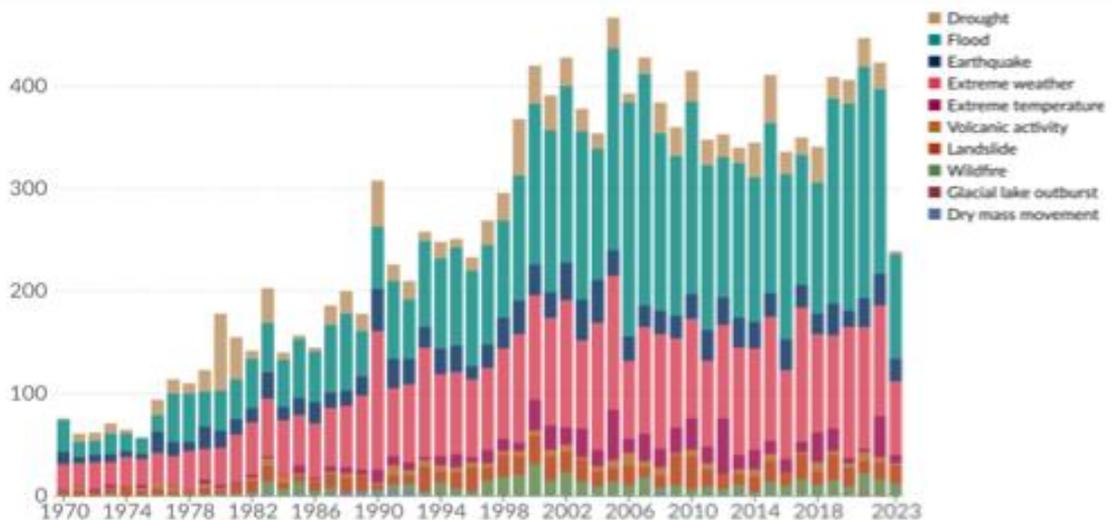
This brings us to a critical economic debate often framed as "Malthus vs. Borlaug." This debate centers on whether the global food supply can keep pace with the ever-growing population and its increasing demand. Historical data show that global food supply has grown faster than demand, largely due to advancements in agricultural productivity. This outcome aligns with Norman Borlaug's perspective, whose "Green Revolution" demonstrated that innovations in agriculture could outpace population growth, contrary to Thomas Malthus' more pessimistic predictions of inevitable food shortages.

The key question here is: will this trend of increasing food productivity continue? This question reflects concerns about the sustainability of current agricultural practices in the face of mounting environmental pressures. Factors such as climate change, land degradation, and water scarcity pose significant challenges to maintaining the upward trend of food supply growth. Furthermore, the growing global population, combined with shifts in dietary preferences (e.g., increased demand for meat and processed foods), will exert further stress on food production systems.

While past successes in agricultural innovation have proven Malthus wrong, ongoing investment in research and development, alongside policy measures promoting sustainable practices, will be essential to meet future food demands. Addressing future food security challenges requires a balance between agricultural productivity growth, environmental sustainability, and equitable distribution to avoid potential global crises.

Increasing Risk and Uncertainty

The last decades showed a marked increase in risks and uncertainty at the global level in several dimensions such as natural disasters, conflicts, and economic instability. Figure 3 illustrates the increase in the frequency of natural disasters from 1970 to 2023, particularly since the 1990s.

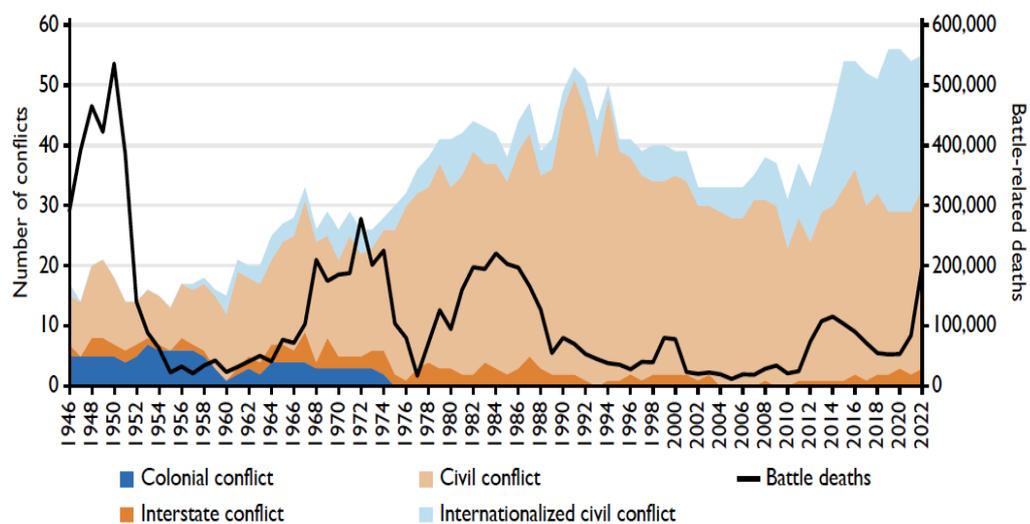


Source: Our World in Data (2023)
Figure 3. Natural disasters, 1970-2023

This increase is largely driven by the rising frequency of climate-related events such as floods, extreme weather, and wildfires. Among these, extreme weather phenomena, floods,

droughts and extreme temperatures represent a significant portion of the disasters, reflecting the growing influence of climate change on global environmental stability. Meanwhile, geophysical events like earthquakes and volcanic activity remain relatively stable, as they are less influenced by anthropogenic factors. Climate change related events have far-reaching implications for agriculture production, water resources, and human health, especially in vulnerable regions, raising critical concerns about the resilience of global systems.

Figure 4 presents an overview of conflicts and battle-related deaths from 1946 to 2022. Taken together, all types of conflicts are on the rise, although the balance among the various types of conflict has been significantly changing since World War II.

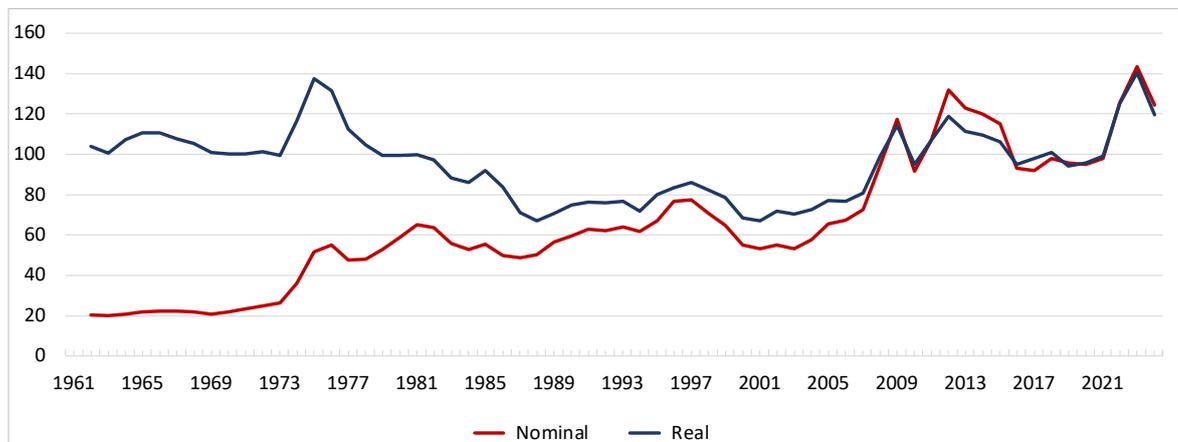


Source: Obermeier and Rustad (2023)
Figure 4. Conflicts and battle-related deaths, 1946-2022

Until the 1970s, colonial conflicts and interstate conflicts were predominant. However, as colonial conflicts waned in the 1960s, the focus shifted to civil conflicts, reflecting internal struggles within newly independent nations. The last 25 years show a marked rise in internationalized civil conflicts. This trend highlights how global geopolitical dynamics increasingly influenced local wars, particularly with foreign powers intervening in domestic disputes.

The early peak in battle deaths corresponds to large-scale decolonization struggles and interstate wars, such as the Korean War. The 1990s saw a peak in battle deaths, largely due to the Rwandan Genocide, the Yugoslav Wars, and other intrastate conflicts with international dimensions. Interestingly, the early 2000s marked a decline in battle deaths despite the high number of conflicts, reflecting a shift toward lower-intensity wars and advancements in conflict resolution mechanisms. However, this statement should be taken with caution since the Figure 4 data do not include the most recent conflicts such as the Russia-Ukraine war as well as the recent Gaza war and related conflicts in the Middle East (including Israeli attacks on Lebanon).

Figure 5 shows the increase in food price volatility, using historical data from the FAO Food Price Index (FAO, 2024). The chart depicts both nominal and real food price trends, adjusted for inflation, highlighting key periods of price instability and their underlying drivers.



Source: FAO (2024)

Figure 5. FAO food price index (2014-2016=100), 1961-2023

From the 1960s to the early 2000s, real food prices exhibited relative stability, reflecting improvements in agricultural productivity and supply chain integration in a globalized economy. However, starting in the commodity price spikes of 2007-08, significant price movements emerged.² In fact, comparing the 1989-2006 period with the 2007-2023 period, we can see that not only the average price index is significantly higher in the latter than in the former (41.3% in real terms), but the volatility of the food prices has increased even more (2.5 times in real terms).

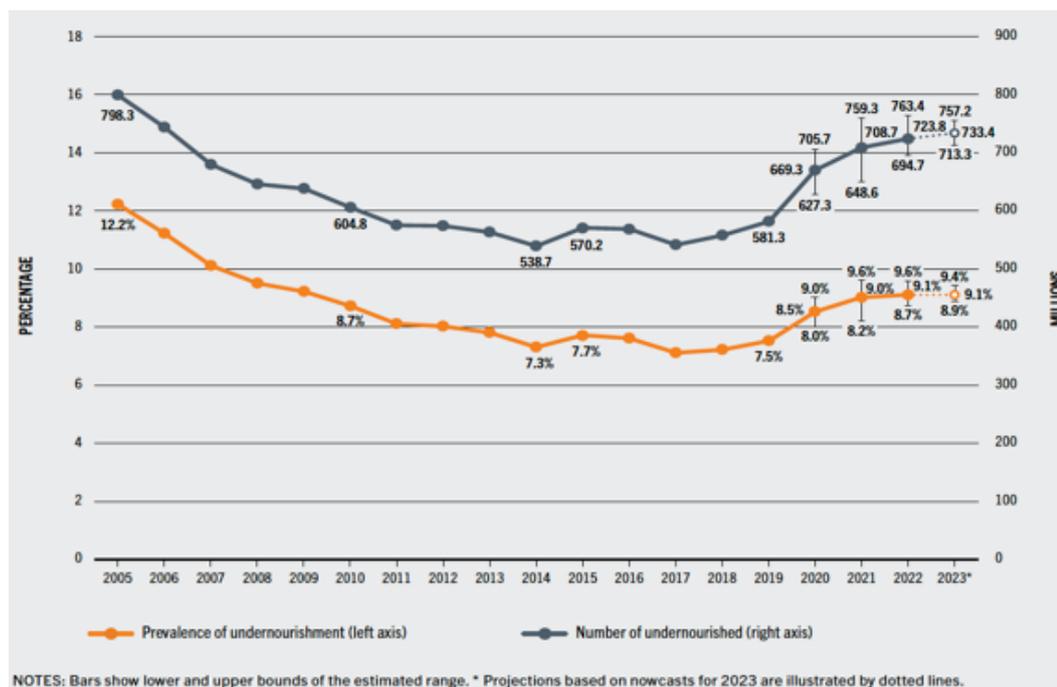
The increased food price volatility poses serious challenges, particularly for low-income countries where food constitutes a large share of household expenditures. Price surges exacerbate food insecurity, increase poverty, and fuel social unrest, as witnessed during the Arab Spring.

Consequences

The increased shocks and stressors illustrated in Figures 3 to 5 are examples of a more complex and difficult context within which the agrifood systems operate. This new context has far-reaching consequences. Here we would like to recall only two examples of the challenges posed to human livelihood and wellbeing, namely the threat to food security and the increase in migration flows in search of a better life.

Figure 6 illustrates the trend in global undernourishment from 2005 to 2023. The data showcases a concerning reversal in progress toward reducing hunger, particularly after 2014.

² The peaks correlate with major global events, such as the 2008 financial crisis, adverse weather conditions linked to climate change, and disruptions in global trade due to geopolitical tensions.



Source: FAO et al. (2024)

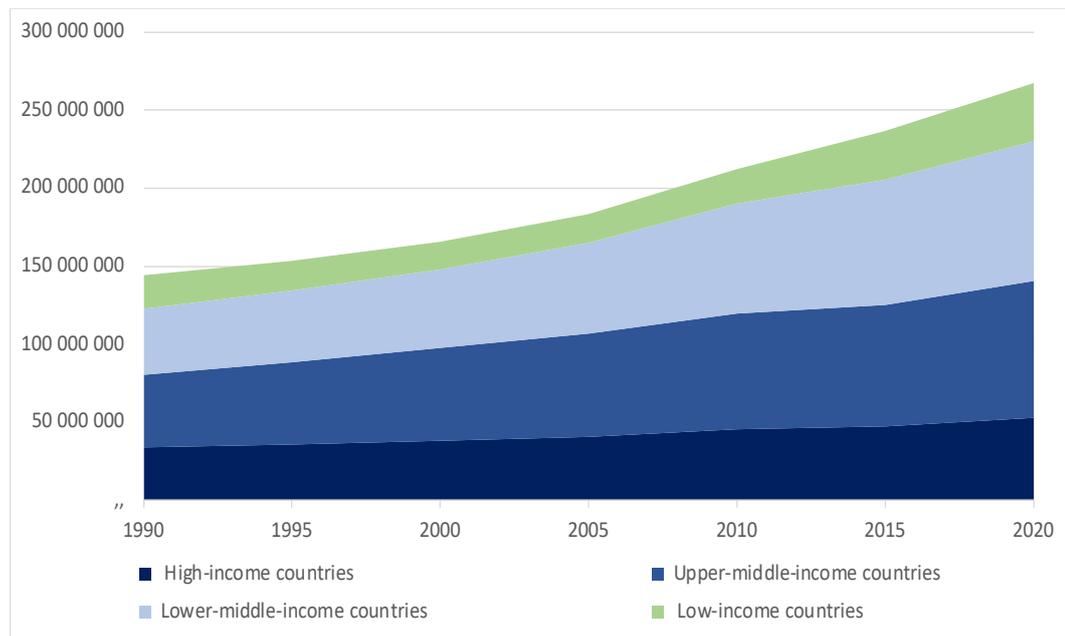
Figure 6. Prevalence of undernourished and number of undernourished, 2005-2023

Until 2014, significant progress was made in reducing global undernourishment. The prevalence dropped from 12.2% to a low of 7.5%, while the number of undernourished individuals fell from 798.3 million to 538.7 million. This period of improvement reflects advances in global food production, economic growth, and targeted policies aimed at poverty reduction and food security.

However, in the second half of 2010s, the trend began to reverse. By 2023, the prevalence of undernourishment increased to 9.1%, with the number of undernourished individuals reaching approximately 733 million. Key factors contributing to this reversal include climate change, conflicts, economic shocks, and the COVID-19 pandemic, which disrupted food systems and livelihoods globally. Rising food prices and reduced access to nutritious food have further exacerbated the situation, particularly in low-income countries. Vulnerable populations, especially in regions already facing poverty and weak infrastructure, are most affected.

In conclusion, these data serve as a stark reminder of the fragility of global food security and the need for collective efforts to address the root causes of food insecurity, including climate adaptation, conflict resolution, and equitable access to food.

Figure 7 illustrates migration flows originating from different income groups of countries – low-income, lower-middle-income, upper-middle-income, and high-income countries – since 1990. In today’s globalized world, migration remains a critical component of global development and social change.



Source: McAuliffe and Triandafyllidou (2024).
Figure 7. Migration flows, 1990-2020

A prominent observation is the significant increase in migration flows from lower-middle-income and upper-middle-income countries. These regions are characterized by rapidly growing populations, economic transitions, and, in some cases, instability or lack of opportunities. As a result, many individuals migrate in search of better livelihoods, education, and safety in higher-income regions or neighboring countries.³

Flows from low-income countries, while smaller in absolute numbers, reveal the challenges faced by these regions. Migration from low-income countries is often driven by push factors such as poverty, conflict, and environmental degradation. These migrants are typically among the most vulnerable, seeking refuge in neighboring regions or more stable economies.

Migration flows from high-income countries remain steady but modest compared to other groups. These migrations are often driven by professional opportunities, international assignments, or lifestyle choices.

Global migration patterns represent a complex phenomenon reflecting varying drivers for each income group. They emphasize the need for tailored migration policies that address economic disparities, provide safe migration pathways, and support development in source regions to reduce the need for forced migration.

More broadly, the changes highlighted above speak of a "new (dis)order" in the global economic and geopolitical landscape. Two critical dynamics shape this transformation: the disconnection between global markets and national governments and the world's increasing uncertainty and riskiness.

Deglobalization or, as some called it, the emergence of "block globalization," signals a fragmentation of global trade and cooperation into smaller, regional blocks/agreements. This shift reflects growing tensions between national interests, exacerbated by rising protectionism and geopolitical conflicts. Furthermore, global shocks and stressors – such as pandemics and

³ It is worth noting the role of emerging economies not only as sources but, increasingly, as destinations of migration.

climate change – further contribute to uncertainty and instability. These disruptions are reshaping the global agrifood systems, requiring a systemic transformation fuelled by cooperation, and innovation to ensure sustainability, resilience, and inclusivity.

Methodological implications for research

The examples shown in Figures 3 to 5 call for specific interventions that are essential to reduce the human, economic, and environmental toll of increased complexity and uncertainty. For example, the increase in natural disasters highlights the urgent need for investments in disaster risk reduction, early warning systems, and climate change adaptation and mitigation practices. Similarly, the increase in conflicts calls for a more effective international system to prevent, manage, and resolve conflicts effectively while addressing their root causes to mitigate human suffering and instability. And to address the root causes of food price volatility climate resilience, sustainable agricultural practices, and improved global trade policies are essential as well as strengthening safety nets and international cooperation.

However, the increased complexity and uncertainty of the operational environment of agrifood system also challenge the received wisdom of agricultural economics and call for a revision of the discipline approach. First of all, increased complexity and uncertainty call for a systemic and interdisciplinary approach to address the multifaceted issues affecting these systems to address issues where ecological, social, and institutional factors interact in unpredictable ways. In addition, this implies moving beyond static models and adopting a dynamic perspective.

By adopting systemic thinking, researchers and policymakers can better understand the interconnectedness of various dimensions of the challenges to agrifood systems and develop strategies that consider long-term impacts and trade-offs. This involves moving beyond traditional models and incorporating tools that account for uncertainty, such as stochastic and non-linear models. Such approaches can help identify critical thresholds, tipping points, and early warning signals of system failure. Additionally, this also calls for research methodologies that explicitly accounts for adaptability and causality (i.e., the capacity to establish causal relationships that make possible learning which interventions can have positive impacts in addressing complexity and uncertainty).

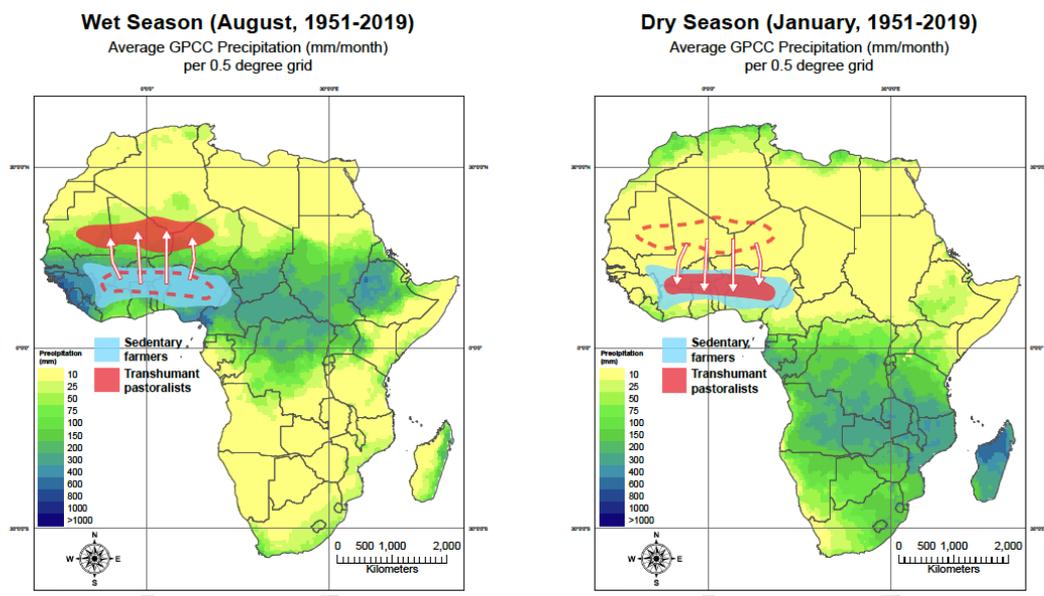
The challenges the global agrifood systems are facing in this era of complexity and uncertainty also call for a revision/integration of the political objectives to be pursued, with sustainability, resilience, and inclusivity playing a key role. Achieving these goals requires innovation in technical, social, and institutional domains. It also calls for investment in transformative research and policies that address structural challenges while fostering equitable and sustainable growth within agrifood systems.

The next sections provide selected examples of how agricultural economics is addressing these challenges.

Complexity and the Need for Interdisciplinary Studies

McGuirk and Nunn (2025) have recently published a paper that is an excellent example of collaborative research involving several social scholars and environmental scientists. They analyze the conflict between nomadic pastoralists and sedentary farmers in Mali, offering a systemic perspective on the intersection of ecological and socio-institutional factors. Their research delves into the historical and contemporary roots of this conflict, driven by competition over scarce natural resources such as land and water.

The conflict arises from the fundamentally different livelihoods of the two groups. Pastoralists rely on mobility to access grazing land and water, adapting to seasonal changes and environmental variability. In contrast, sedentary farmers depend on stable agricultural plots, requiring secure and predictable land use. As climate change and desertification exacerbate resource scarcity, the overlap of these systems leads to heightened tensions, shifting a relationship that used to be cooperative – in the dry season, the pastoralists moved to agricultural plots that were not farmed fertilizing it with manure (Figure 8) – into a competitive one – the anticipation of the dry season because of climate change implies that the movement of transhumant pastoralists happens while farmers are still farming their own plots.



(a) Gridded Historical average precipitation during a wet season month in the northern hemisphere (dry in the south).

(b) Gridded Historical average precipitation during a dry season month in the northern hemisphere (wet in the south).

Source: McGuirk & Nunn (2025)

Figure 8. From cooperation to competition between pastoralists and farmers in Mali

McGuirk and Nunn argue that this conflict cannot be understood solely through economic or ecological lenses. It requires a systemic approach that incorporates institutional and social dimensions. For example, traditional land tenure systems, once effective in managing resource sharing, have been undermined by colonial legacies and state policies that often favor sedentary agriculture over nomadic practices. This institutional bias intensifies the marginalization of pastoralist communities and fuels disputes.

Their work also points to the role of external stressors such as political instability, weak governance, and armed conflict, which further destabilize resource-sharing arrangements and escalate violence. Addressing this conflict requires innovative, inclusive policies that integrate traditional knowledge with modern governance systems.

In conclusion, McGuirk and Nunn's study underscores the importance of a systemic and interdisciplinary approach to resolving resource-based conflicts, emphasizing the need to balance ecological sustainability with social equity and institutional reform. Their insights are critical for informing strategies to mitigate similar conflicts in other regions facing resource scarcity and competing land use demands.

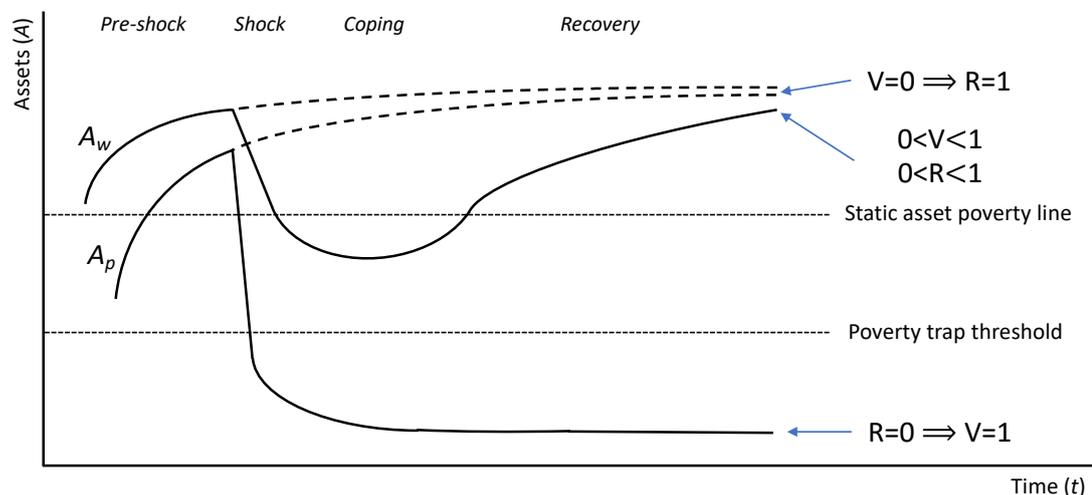
Vulnerability vs. Resilience: The Impact of Shocks and Stressors on Wellbeing

Agrifood systems are inherently dynamic systems and the changes in the patterns of shocks and stressors affect their performance and people's well-being. Vulnerability and resilience are two key concepts that have gained increasing importance in response to disruptions such as climate change, economic crises, and social instability.

Vulnerability is defined as the probability of falling below a critical threshold of well-being, influenced by exposure to risks and the availability of coping mechanisms. Resilience, in contrast, refers to the system's capacity to recover from shocks without permanent damage. One of the most important results of recent research is that a system (or an individual) can be at the same time vulnerable and resilient.

To clarify the relationship between vulnerability and resilience, Montalbano and Romano (2022), drawing on a model from Carter et al. (2007), illustrates the impact of shocks on asset dynamics for two households (Figure 9): a wealthy household (A_w) and a poor household (A_p). The model identifies four phases: the pre-shock period, the shock event, the coping phase (marked by asset decumulation), and the recovery phase, where households aim to rebuild assets.

The analysis shows that households unaffected by shocks are not vulnerable ($V = 0$) and are fully resilient ($R = 1$). Conversely, a poor household hit by a shock that drives it below the poverty trap threshold is unable to recover ($R = 0$), making it both vulnerable ($V = 1$) and non-resilient. For wealthier households, intermediate cases arise where they can be both vulnerable and resilient simultaneously ($0 < V < 1$ and $0 < R < 1$). For instance, a household driven below the asset poverty line by a shock may eventually recover, demonstrating resilience despite temporary vulnerability.



Source: Montalbano and Romano (2022)
Figure 9. Vulnerability and resilience

While vulnerability assesses the probability of falling below a welfare threshold in the future, resilience focuses on the ability to recover from such shocks, considering the non-linear dynamics of recovery paths. A poverty trap framework, shaped by factors like tipping points and critical thresholds that may lead to regime shifts, enriches this analysis by highlighting the interplay between conditional expectations and variances, showing that households can be

simultaneously vulnerable (e.g., there is a non-zero likelihood of become food insecure in the future) and resilient (e.g., the system can recover from the shock returning to a level of wellbeing able to ensure food security).

This calls for non-linear, stochastic models to analyze these dynamics, capturing the complexity of agrifood systems. Emphasizing the possibility of being at the same time vulnerable and resilient helps to capture the nuanced realities of Food and Nutrition Security (FNS) challenges. Furthermore, Montalbano and Romano (2022) show that while vulnerability and resilience are interconnected concepts, they are distinct constructs with unique characteristics. Both frameworks share common elements such as the explicit consideration of risks, shocks, and stressors, as well as the capacity to foresee long-term adverse welfare outcomes. However, resilience uniquely satisfies all four FNS measurement axioms – scalable and aggregable into higher-level dimensions (scale axiom), inherently dynamic (time axiom), conditioned to various factors (access axiom), applicable to various measures of food and nutrition as dependent variables (outcomes axiom) – which allows for a more comprehensive dynamic analysis.

Policy implications stemming out from this analysis are the importance of early warning systems, risk management, and systemic approaches to enhance the adaptability and sustainability of agrifood systems.

The Search for Causal Inference in Economics

Unlike hard sciences, where controlled experiments can often be conducted, economics frequently deals with scenarios where direct experimental manipulation is impossible. This limitation necessitates the development and application of advanced statistical tools to infer causality rather than relying solely on observational correlations (Duflo, 2017). The issue of causal inference in economics is key and presents important challenges, especially for understanding complex systems such as agrifood systems and assessing the impact of agricultural policies, social protection programs, or environmental changes.

Experimental methods, such as Randomized Controlled Trials (RCTs), and quasi-experimental methods, including Propensity Score Matching, Difference-in-Differences (DiD), and Regression Discontinuity Designs (RDD), have revolutionized economic research by allowing economists to estimate counterfactual outcomes and isolate the impact of specific interventions or policies. However, these methods may present some limitations in addressing complex problems. Issues such as unobserved heterogeneity, dynamics, and non-linear relationships pose significant challenges for causal inference. Additionally, research on food and nutrition security often involves interdependencies and trade-offs between variables, requiring sophisticated models that account for these interactions.

There is a need for robust frameworks and interdisciplinary approaches to tackle these challenges. By integrating economic theory, advanced statistical techniques, and domain-specific knowledge, researchers can better understand the causal pathways affecting fundamental wellbeing outcomes such as food and nutrition security.

In conclusion, causal inference plays a pivotal role in shaping evidence-based policies. It calls for the continued development of innovative methodologies to address the complexities of economic systems and ensure that interventions are both effective and equitable, particularly in areas as critical as food and nutrition security. This focus on rigorous analysis is essential for crafting solutions that address both immediate needs and long-term sustainability.

Concluding Remarks

These few examples call for transformative change in agrifood systems, emphasizing the distinction between incremental adjustments and systemic transformation. In an era characterized by structural uncertainty, achieving sustainability, resilience, and inclusivity requires a paradigm shift rather than mere modifications along the existing development path.

Uncertainty is now a structural feature of agrifood systems due to the combined impacts of climate change, geopolitical instability, and evolving socio-economic dynamics. Addressing these challenges demands moving beyond traditional, linear solutions toward innovative approaches that account for complex interactions and long-term implications.

Solving the multifaceted challenges facing agrifood systems requires a holistic and transformative approach. Incremental changes are insufficient to address the depth of current challenges, making a focus on systemic, inclusive, and sustainable transformation essential for the future of global food security. Transformation involves a fundamental rethinking of the systems governing agricultural production, distribution, and consumption. This includes integrating technical, social, and institutional innovations that are not only forward-looking but also adaptive to evolving challenges

Systems challenges: a role for institutions

Institutional framework

The analysis developed above emphasizes urgent questions on how markets and other institutions could cope with the emerging challenges highlighted. By delving deeper into the analysis, it becomes clear not only the need to accurately identify which institutions and organizations are involved in the ongoing challenges but also the necessity of addressing the appropriateness of the entire institutional architecture of our agri-food systems. Below, we first outline the fundamental characteristics of this architecture and then provide some examples that substantiate the argument developed in this note.

The research challenges posed by the trends described above require us to delimit two distinct and interrelated issues. First, it must be recognized that technology per se does not allow us to address these challenges. In fact, technological and organizational variables are jointly chosen by the agents (Williamson, 1985). Then, it is necessary to identify the organizational modalities by which new technologies can be implemented to actually achieve the expected outcomes. When analyzing organizational modalities, a critical distinction must be made between property rights and decision rights. Property rights pertain to the residual claimant, who, as a last resort, can transfer rights to use and determine the conditions under which such a transfer can be made (Ménard, 2017). Decision rights concern how these rights are exercised and/or the procedures through which decision-makers operate (Ménard, 2017).

Second, agri-food chains (AFC) are regulated by long-term and detailed public intervention – for example, the European Common Agricultural Policy – spanning from market regulation to farmers' income regulation, from technology to environmental protection. It is then necessary to identify the role of the general rules with respect to the trends – as illustrated above – and the entities and mechanisms that implement the general rules, making them operational and potentially effective. Private organizational arrangements are strongly influenced by public regulation in several areas of AFC activities. An interplay exists between the level of governance structures, which organize the production and exchange of agricultural goods, and the institutional environment, which consists of the "rules of the game" (North, 1990; Williamson, 1996).

Ménard (2014, 2017) innovated the conceptualization of institutional architecture by identifying three layers: a) Macro-institutions, which define the general rules and norms; b) Meso-institutions, which connect the rules and norms to their operational application in a coordination context; and c)

Micro-institutions, which represent the actual organization of the transaction within the framework set by the two previous layers (see Figure 10).

This conceptualization presents governance structures (micro-level) as the outcome of negotiations among transacting parties and the embeddedness of these negotiations within the operational context defined by meso- and macro-institutions.

Meso-institutions contribute to the analysis of the mechanisms through which institutions permeate organizational arrangements and transmit feedback. This analysis directly connects the study of organization with the foundations of development and growth (Ménard, 2014, p. 578). Meso-institutions are devices embedded in and legitimized by inclusive societal institutions, responsible for implementing the general rules of the game by translating them into sector- and/or geographically specific rules, thus framing and delineating the domain of activities of actors (Ménard, 2014, p. 578).

More precisely, meso-institutions are arrangements through which rules and rights are interpreted and implemented, framing the domain of possible transactions among stakeholders (Ménard, 2017). Organizational arrangements define their governance (internal rules, codes, conventions) while remaining subject to the specific rules set by meso-institutions and grounded in the general rules (Ménard, 2014, p. 579). Meso-institutions are necessary because laws and norms are often abstract or ambiguous (Ménard, 2017), and they need to be interpreted by devices that translate general rules into specific guidelines and mechanisms that shape their implementation, adapting the definition and allocation of decision rights and their usage to the scope, space, and time in which actors evolve (Ménard, 2017).

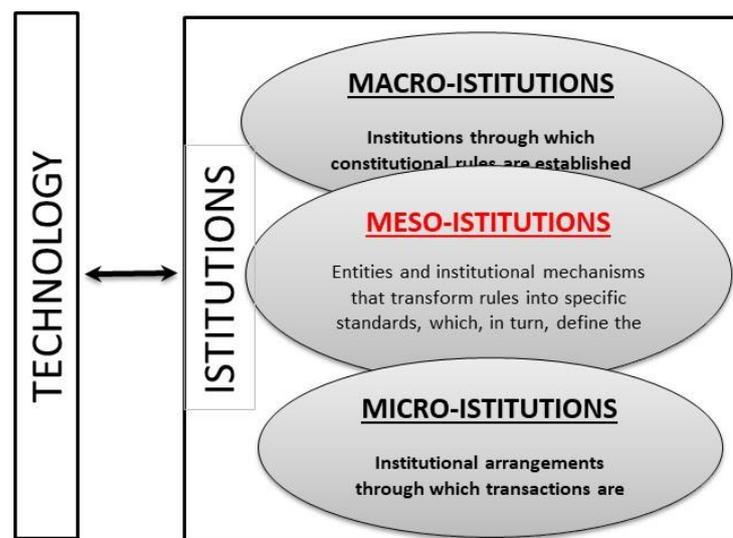


Figure 9: Institutional layers (Ménard, 2017)

Technological and Organizational Innovation

Several empirical studies can be related to the previous analytical framework. The concept of meso-institutions innovates the New Institutional Economics approach to technology by articulating the interaction between technology and institutions on three levels (Ménard, 2014, p. 583): global embeddedness, which concerns the relationship between technological architecture and general rules; sector governance, which aligns specific technical characteristics with meso-institutions; and the transaction level, where technical operations align with organizational arrangements.

The articulation of these three layers clarifies how the organization of a transaction depends on negotiations among the parties at the micro level and how macro- and meso-institutions frame this negotiation. This highlights how designing and implementing private orderings to facilitate exchanges between farmers and processors requires a focus on both meso- and micro-institutional levels.

General norms (security, safety, quality, ethics, and equity) must be effectively translated into operational terms. Here, the role of fully developing the functions of meso-institutions (translating, implementing, enforcing) is crucial, for example, in the areas of food safety and quality (Ménard et al., 2022; de Oliveira et al., 2023), as well as the need for strategic impulses in this direction in other areas (such as income distribution, Ciliberti et al., 2022).

Institutional Complementarities

The main effects of current trends primarily concern production processes—both at the level of individual production units and at the level of the entire supply chain—products (especially in terms of food security, food safety, and quality, as previously discussed), as well as productive resources (the relationship between capital and labor, in particular). It is essential first to clarify these points and their main implications in terms of research, and consequently, the expected impact of the results, both on the side of economic policy interventions for the sector and on the side of the relative role of disciplines within the field of Agricultural Sciences.

Technological innovation represents a powerful driver of change for businesses and economic systems (as seen in this note, it is necessary to keep the two areas distinct, avoiding superficial overlaps and the subsequent risk of drawing unfounded conclusions). The scenarios outlined place the ability of systems (both business and non-business) to respond to climate change at the center of the challenges. We can therefore expect significant evolutions in the configurations of production processes and, more specifically, in cropping and livestock systems. The design and implementation of these new systems represent the first area of interdisciplinary integration to which we are called.

Moreover, supply chains need to consolidate forms of collaboration and, in any case, complex organizational solutions that can guarantee the production and supply of agri-food goods with the characteristics required by the transformation (Cholez et al., 2023). Technology—an element connected to the organization—imposes consistent and shared choices for all agents in the supply system (Ménard, 2018). The impact of the transformation takes on characteristics in terms of finalization/democratization (Duncan et al., 2022).

The goods involved in the transformation have different economic natures: private goods and services are associated with public goods (or common and club goods). While private goods circulate through the market, other institutional arrangements are needed for the other goods. Many of the expected outcomes for the evolution of agri-food supply systems converge, in particular, toward the production of public goods. This is the case for improving environmental protection—and, in general, for the so-called "true transition" (i.e., what still seems desirable)—for food security and fair labor employment. As a result, the market must be complemented by institutions capable of ensuring the production and supply of these goods.

A key point in that framework is the relationship between farmers' strategies and societal expectations with respect to the most urgent challenges we are facing. The European Union has strongly encouraged the production of environmental improvements (public goods). Therefore, studies that highlight the relationships between European policies and the outcomes in terms of public good production are particularly required and valuable. Under this view, Varacca et al. (2023), for example, showed that the impact of specific European policies is lower than expected in terms of innovation of production processes, but it is evident in terms of crop mixes and systems.

Ciliberti et al. (2022) demonstrated that the impact of direct payments (an intervention of the Common Agricultural Policy in Europe) is unable to improve the income of small farmers and, especially, to reduce the disparities among farmers of different sizes.

Notably, Romano and Traverso (2020) demonstrated the positive impact of international migration on household food security and nutrition in Bangladesh. Beyond showing the modalities by which international migration determines its impact on food security, the study highlights the existence of potential geographical, social, and economic nexuses playing a significant role in enhancing global food chains. Further evidence makes clear that desirable outcomes for agri-food-based public goods,

like poverty reduction and food security enhancement, require complementing the market process with public intervention (Romano et al., 2019).

Ménard et al. (2022) provided empirical evidence of the role of meso-institutions in improving the food safety level of dairy milk in Canada, Brazil, and Italy. De Oliveira et al. (2023) analyzed the impact of the creation of a meso-institution aimed at improving milk safety in Brazil and proved that this impact is positive. Their conclusions highlight the fundamental role of meso-institutions in bridging the gap between the "institutional environment" level and the "governance" level. The study is a clear example of how a potential policy implementation path can be followed by other developing and emerging countries in the dairy industry, which is often marked by frequent food safety scandals.

Concluding remarks

The article emphasized the interconnection of various crises (climatic, resource scarcity, global population growth, economic instability) and highlighted the need to identify proper conceptual perspectives, as well as to equip the analysis with appropriate and rigorous methodological tools. The uncertainty and complexity triggered by these crises require structured multidisciplinary approaches and demand that technological developments be placed within the space of the organizations and institutions that are inherent to them. The most urgent challenges are primarily related to the relationship between population growth, food security, and environmental sustainability. Migration processes are often a consequence of the intertwining of crises and the difficulties in formulating effective responses. This context is further complicated by the severity of war scenarios in many areas of the world and the unresolved tensions in migration governance policies. The analysis presents three main conclusions. The first conclusion emphasized by the work concerns the need to adopt an adequate conceptualization of the relationship between shocks and resilience, with all the implications this relationship has on the productive fabric that supports food production. Secondly, it is stressed that there is a need to enhance the analytical capacity of the causal links within the dynamics of agro-food systems, expanding the use of appropriate methodologies and the vast amounts of existing data. Finally, economic and agricultural analysis should deepen its focus on the institutional dimensions of agro-industrial systems, both to clearly define the relationship between technology (and technological research) and organization, and to develop effective regulatory models.

References

- Carter, M.R., Little, P.D., Mogues, T., and Negatu, W. (2007). Poverty Traps and Natural Disasters in Ethiopia and Honduras. *World Development* 35(5), 835-56.
- Cholez, C., Pauly, O., Mahdad, M., Mehrabi, S., Giagnocavo, C., & Bijman, J. (2023). Heterogeneity of inter-organizational collaborations in agrifood chain sustainability-oriented innovations. *Agricultural Systems*, 212, 103774.
- Ciliberti, S., Severini, S., Ranalli, M. G., Biagini, L., & Frascarelli, A. (2022). Do direct payments efficiently support incomes of small and large farms?. *European Review of Agricultural Economics*, 49(4), 796-831.
- de Oliveira, G. M., Miranda, B. V., Saes, M. S. M., & Martino, G. (2023). Opening the "black box" of food safety policy implementation: The efficiency-enhancing role of a private meso-institution. *Food Policy*, 121, 102528.
- Duflo, E. (2017). The Economist as Plumber. *American Economic Review* 107(5): 1–26.
- Duncan, J.; DeClerck, F.; Baldi, A.; Treyer, S.; Aschemann-Witzel, J.; Cuhls, K.; Ahmé, L.; Bisoffi, S.; Grando, S.; Guobys, L.; Brunori, G. *Democratic directionality for transformative food systems research* Nature Food 3 3 183-186 2022 Nature Publishing Group
- FAO (2024). Food Price Index. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations. <https://www.fao.org/worldfoodsituation/foodpricesindex/en/>.

- FAO, IFAD, UNICEF, WFP and WHO (2024). *The State of Food Security and Nutrition in the World 2024 – Financing to End Hunger, Food Insecurity and Malnutrition in All Its Forms*. Rome: FAO. <https://doi.org/10.4060/cd1254en>.
- McAuliffe, M. and Triandafyllidou, A. (eds.) (2021). *World Migration Report 2022*. Geneva: International Organization for Migration. https://publications.iom.int/system/files/pdf/WMR-2022-EN_1.pdf.
- McGuirk, E. F., and Nunn, N. (2025). Transhumant Pastoralism, Climate Change, and Conflict in Africa. *The Review of Economic Studies* 92(1): 404-441.
- Ménard, C. (2017). Meso-institutions: The variety of regulatory arrangements in the water sector. *Utilities Policy*, 49, 6-19.
- Ménard, C. (2018). Organization and governance in the agrifood sector: How can we capture their variety?. *Agribusiness*, 34(1), 142-160.
- Ménard, C., Martino, G., de Oliveira, G. M., Royer, A., Saes, M. S. M., & Schnaider, P. S. B. (2022). Governing food safety through meso-institutions: A cross-country analysis of the dairy sector. *Applied Economic Perspectives and Policy*, 44(4), 1722-1741.
- Montalbano, P., and Romano, D. (2022). Vulnerability and Resilience to Food and Nutrition Insecurity: A Review of the Literature Towards a Unified Framework. *Bio-based and Applied Economics* 11(4): 303-322.
- Obermeier, A.M., and Rustad, S.A. (2023). Conflict Trends: A Global Overview, 1946–2022. PRIO Paper. Oslo: Peace Research Institute.
- Omran, A.R. (2001). The epidemiologic transition: a theory of the epidemiology population change. *Bulletin of the World Health Organization* 79: 161-170.
- Our World in Data (2023). Global Reported Natural Disasters by Type, 1970-2023. <https://ourworldindata.org/natural-disasters>.
- Romano, D., and Traverso, S. (2020). Disentangling the Impact of International Migration on Food and Nutrition Security of Left-behind Households: Evidence from Bangladesh. *The European Journal of Development Research* 32: 783-811.
- Romano, D., Stefani, G., Rocchi, B., and Fiorillo, C. (2019). The Impact of Assistance on Poverty and Food Security in a Fragile and Protracted-Crisis Context: The Case of West Bank and Gaza Strip. *Bio-based and Applied Economics* 8(1): 21-61.
- UNDESA (2019). World Population Prospects 2019. United Nations Department of Economic and Social Affairs, Population Division. New York.

Cambiamenti climatici e foreste: effetti, adattamento e mitigazione

Travaglini D.¹, Chirici G.¹, Marchi E.¹

¹DAGRI - Università degli Studi di Firenze.

Riassunto

Le foreste forniscono molteplici servizi ecosistemici essenziali per il benessere umano e per la qualità dell'ambiente. Il clima svolge un ruolo importante per la composizione, la funzionalità e la salute delle foreste. Il cambiamento climatico ha determinato una maggiore frequenza e intensificazione dei disturbi naturali che minacciano la salute delle foreste, come tempeste, siccità, incendi e diffusione di insetti e patogeni. Questo lavoro presenta i principali effetti dei cambiamenti climatici sulle risorse forestali e descrive le principali strategie di gestione da perseguire per adattare le foreste ai cambiamenti climatici e per mitigare il cambiamento.

Abstract

Forests provide multiple ecosystem services that are important for human well-being and environmental health. Climate plays an important role in the makeup, function, and health of forests. Climate change will influence a number of natural disturbances that threaten forest health, such as storms, drought, wildfires and insect outbreaks. This paper presents the main effects of climate change on forest resources and describes the main management strategies that can be used to adapt forests to the changing climate and to mitigate climate change.

Keywords: *Mediterranean forests, forest management, drought, storm, wildfires, carbon sequestration.*

Introduzione

Il riscaldamento climatico ha determinato una maggiore frequenza e intensificazione degli eventi estremi. I dati del rapporto IPCC del 2023 indicano che la temperatura superficiale globale continuerà ad aumentare e probabilmente raggiungerà livelli di circa 1.5-2 °C superiori ai livelli preindustriali, anche considerando scenari con basse emissioni di gas serra (IPCC, 2023).

Oggi circa metà della popolazione mondiale vive una grave carenza d'acqua per almeno una parte dell'anno a causa di una combinazione di fattori climatici e non climatici. Questo comporta problemi connessi alla insicurezza alimentare, alla salute e benessere dei cittadini, alla disuguaglianza sociale. Oltre a questo, i cambiamenti climatici provocano danni a strutture e infrastrutture, hanno un impatto sulle attività economiche e determinano effetti sugli ecosistemi naturali e seminaturali (IPCC, 2023).

In questo contesto le foreste svolgono un ruolo importante perché sono sistemi multifunzionali che riducono la quantità di CO₂ in atmosfera, contribuendo così alla mitigazione del cambiamento climatico.

Secondo il *Forest Resource Assessment* della FAO (2020), nel mondo le foreste coprono circa il 31% delle terre emerse. Tra il 1990 e il 2020 la superficie forestale globale è in diminuzione, anche se il trend di riduzione rilevato dopo il 2000 è inferiore rispetto a quello

registrato tra il 1990 e il 2000. La situazione è diversificata nelle diverse aree del mondo: in Europa, in Asia e nei paesi del Nord America la superficie forestale è in aumento come risultato della espansione naturale del bosco nei terreni abbandonati e a seguito di attività di rimboschimento e imboschimento (FAO, 2015); viceversa, nel centro Africa e in sud America la superficie forestale è in diminuzione ed è in queste aree del Pianeta che la deforestazione rappresenta ancora un problema ed è causa di emissione di gas ad effetto serra.

Le foreste mediterranee fanno parte di un mosaico paesaggistico che riflette le interazioni tra condizioni climatiche, geomorfologiche e le attività che l'uomo ha svolto in questi territori per millenni (Scaracia-Mugnozza et al., 2000; Nocentini e Coll, 2013).

Nell'ambiente mediterraneo la conservazione dell'acqua è un aspetto di particolare importanza. La regione mediterranea si trova a dover affrontare periodicamente la scarsità d'acqua a causa di fattori climatici (precipitazioni limitate e irregolari, che si prevede diminuiranno ulteriormente con il cambiamento climatico) e sociali (ad esempio, cambiamenti nell'uso del suolo con l'espansione dell'agricoltura irrigua e consumo insostenibile di acqua soprattutto nelle aree urbane) (Biot et al., 2011). Il cambiamento climatico sta quindi emergendo come il principale fattore di cambiamento ambientale nella regione del Mediterraneo (FAO, 2018; Cramer et al., 2020).

In questa nota si presentano i principali effetti del cambiamento climatico sulle risorse forestali e si descrivono le principali strategie gestionali da perseguire per adattare le foreste al clima che cambia e per mitigare il cambiamento climatico.

Effetti del cambiamento climatico sulle foreste

Il Mediterraneo è stato identificato come una delle regioni più sensibili ai cambiamenti climatici ed è stato definito come un importante *hotspot* (Giorgi 2006; IPCC, 2013). I principali impatti dei cambiamenti climatici previsti sulle foreste del Mediterraneo sono: un rapido cambiamento del ciclo dell'acqua dovuto all'aumento dell'evaporazione e alla diminuzione delle precipitazioni; una diminuzione della capacità di immagazzinamento dell'acqua nel suolo a causa delle variazioni di porosità dovute al cambiamento delle temperature, che rendono i suoli più secchi e, quindi, un'accelerazione della desertificazione già in atto a causa dell'eccessivo sfruttamento e dell'impoverimento dei suoli; un aumento dei disturbi forestali connessi a tempeste di vento, incendi e diffusione di insetti e patogeni; uno spostamento verso nord, o verso altitudini maggiori, della biodiversità terrestre sia animale che vegetale; l'estinzione delle specie più sensibili al clima o meno mobili e la colonizzazione da parte di nuove specie (Seidl et al., 2017; Cramer et al., 2020; Morán-Ordóñez et al., 2021).

Il prolungamento dei periodi siccitosi dovuto al cambiamento del clima ha effetti negativi sulla disponibilità idrica e questo si ripercuote sullo stato di salute della vegetazione e sulla funzionalità degli ecosistemi forestali (Alderotti et al., 2024; Bussotti et al., 2024), fino a rendere una parte di territorio a rischio desertificazione (Munafò, 2023).

Il vento è il principale fattore di disturbo delle foreste europee (Forest Europe, 2020). In Italia, nell'ultimo decennio si sono verificate tempeste di vento di intensità eccezionale che hanno provocato danni alle foreste in varie regioni della penisola, interessando soprattutto soprassuoli di conifere di origine artificiale. Il più importante disturbo da vento avvenuto in anni recenti è la tempesta VAIA, che nel mese di ottobre del 2018 ha abbattuto ampie porzioni di foresta nelle regioni del nord (Motta et al., 2018; Chirici et al., 2019). L'accumulo a terra di biomassa legnosa causato da VAIA ha poi innescato la diffusione del bostrico (*Ips typographus*)

(AA.VV., 2022), che ha determinato ulteriori danni alle foreste creando serie difficoltà alle economie delle comunità locali.

Fattori di disturbo come il vento e in particolare gli incendi possono mettere a rischio la sicurezza delle persone e possono determinare il rilascio di quantità anche sostanziali di gas ad effetto serra e particolato (Scarpa et al., 2023). La frequenza di questo tipo di eventi è aumentata e la vulnerabilità delle foreste europee ai disturbi indotti dai cambiamenti climatici, in particolare tempeste e incendi è, in genere, elevata (Senf e Seidl 2021; Forzieri et al., 2021).

Con l'aumento delle temperature le specie forestali si troveranno a vegetare in condizioni ambientali sempre più difficili e questo può comportare, nel lungo periodo, lo spostamento delle specie verso ambienti più freschi, quindi una migrazione verso nord o uno spostamento verso quote superiori. Studi condotti in Italia utilizzando modelli di distribuzione delle specie arboree e scenari di cambiamento climatico mostrano che certe specie potrebbero subire una contrazione della loro attuale distribuzione (ad esempio il faggio sulle Alpi e nell'Appennino settentrionale) mentre altre potrebbero ampliare il proprio areale di distribuzione (ad esempio il larice sulle Alpi e il cerro nell'Appennino) (Noce et al., 2023). I soprassuoli puri sono risultati più suscettibili rispetto ai popolamenti misti, i quali, essendo caratterizzati da una maggiore ricchezza di specie, e quindi da un livello di biodiversità più elevato, sono più resilienti agli effetti del cambiamento climatico (Pecchi et al., 2020).

Il clima ha poi effetti sulla produzione delle specie forestali. Ad esempio, è stato rilevato che maggiori concentrazioni di azoto e un periodo vegetativo prolungato hanno contribuito ad aumentare la produttività delle foreste di abete rosso in centro e nord Europa (Etzold, 2020). In ambiente mediterraneo sono stati segnalati sia aumenti che diminuzioni della produttività, in relazione alla specie arborea considerata, alla produttività della stazione e alle condizioni climatiche locali (Martin-Benito et al., 2011; Tegel et al., 2014; Charru et al., 2017).

Foreste e adattamento ai cambiamenti climatici

Le foreste sono ecosistemi che nel tempo sono stati capaci di adattarsi ai cambiamenti ambientali. Le strategie che possiamo adottare oggi per supportare e aumentare la capacità di adattamento delle foreste ai cambiamenti climatici sono varie.

La gestione forestale può svolgere un ruolo importante in questo senso, agendo sulla densità dei soprassuoli per limitare i tassi di traspirazione e rendere le foreste più resistenti ai periodi siccitosi.

Ad esempio, nei cedui mediterranei di querce sempreverdi è stato rilevato che diradamenti di intensità moderata aumentano la disponibilità idrica e riducono l'evapotraspirazione del popolamento e l'impoverimento idrico del suolo, aumentando allo stesso tempo l'assimilazione del carbonio (Limousin et al., 2010; Cabon et al., 2018). In popolamenti di *Pinus pinaster* sottoposti a diradamenti di bassa intensità (asportazione di 10 m² ha⁻¹) è stata riscontrata una ridotta intercettazione delle piogge da parte del soprassuolo in piedi e una maggiore disponibilità idrica a livello del suolo che peraltro ha favorito una maggiore produzione di funghi commestibili (*Lactarius* spp.) (Bonet et al., 2012).

Nelle aree dove il rischio incendi è elevato, la gestione della biomassa combustibile con interventi quali diradamenti, fuoco prescritto e pascolo prescritto (Ascoli e Bovio, 2013; Lovreglio et al., 2014, Corona et al., 2015) è utile per ridurre la probabilità di innesco, per accrescere la resistenza e la resilienza del soprassuolo al passaggio del fuoco e per aumentare l'efficacia delle operazioni di spegnimento (La Mela Veca et al., 2024).

Nella gestione dei rimboschimenti il diradamento rappresenta una pratica culturale importante sia per favorire l'efficienza funzionale dei popolamenti in termini di stato di salute e sotto il profilo incrementale, sia per aumentarne la stabilità nei confronti di eventi di disturbo determinati da agenti atmosferici, tendenzialmente sempre più intensi e frequenti per effetto del cambiamento climatico. Il vento è uno dei principali fattori che influisce sulla stabilità dei rimboschimenti, provocando, nel caso di eventi di forte intensità, lo sradicamento o lo stroncamento degli alberi. La resistenza dei singoli individui è strettamente legata alla loro stabilità meccanica. L'indice maggiormente utilizzato per determinare la stabilità di un popolamento forestale è il rapporto ipsodiametrico (La Marca, 1983). La stabilità dei fusti arborei aumenta al decrescere di tale rapporto e, quindi, a parità di altre condizioni diminuisce all'aumentare della densità dell'impianto. La stabilità meccanica dei soprassuoli, valutata in funzione del rapporto ipsodiametrico, migliora subito dopo l'intervento, ma è stato rilevato che l'effetto del diradamento su tale rapporto tende a ridursi velocemente nel tempo (Corona et al., 2025).

In termini più generali, per aumentare la capacità di adattamento delle foreste al cambiamento del clima la gestione forestale dovrebbe promuovere una maggiore diversificazione del mosaico paesaggistico e un aumento dell'eterogeneità e della complessità dei sistemi forestali, in particolare di quelli più semplificati come i rimboschimenti estensivi di conifere (Nocentini e Coll, 2013).

La piantagione di specie e provenienze più adatte alle nuove condizioni ambientali imposte dal clima rappresenta una ulteriore strategia di adattamento. In questa prospettiva risulta importante approfondire le conoscenze sulla genetica delle specie forestali per integrare la diversità genetica nelle pratiche forestali adattative e contribuire a migliorare la capacità delle foreste gestite di rispondere ai cambiamenti climatici (Paffetti et al., 2012; Garosi et al., 2022; Oggioni et al., 2024).

Foreste e mitigazione dei cambiamenti climatici

Le foreste svolgono un ruolo importante per mitigare il cambiamento climatico grazie alla loro capacità di ridurre la concentrazione di CO₂ in atmosfera.

Le foreste mediterranee contribuiscono all'immagazzinamento e al sequestro del carbonio, anche se l'incertezza legata alla valutazione di tale contributo nei diversi Paesi è elevata e il beneficio connesso alla regolazione del clima globale non è valutato in modo sistematico e spesso rimane sito specifico (Thurner et al., 2014). L'importanza delle foreste mediterranee nel sequestro del carbonio è quindi piuttosto variabile e risente della generale minore produttività dei sistemi mediterranei rispetto agli ecosistemi dell'Europa settentrionale o centrale (Ruiz-Peinado et al., 2017). Le foreste dei Paesi del Mediterraneo settentrionale sequestrano circa 0,01-1,08 t C/ha all'anno (Croitoru, 2007). Negli ultimi 25 anni, il volume legnoso nelle foreste mediterranee è aumentato di 137 milioni di m³ all'anno. In Italia è stato stimato che tra il 2005 e il 2018 la provvigione forestale media è passata da 130 m³ ha⁻¹ a 180 m³ ha⁻¹ e lo stock di carbonio medio è passato da 36,9 Mg C ha⁻¹ a 59,3 Mg C ha⁻¹ (Vangi et al., 2023). I motivi dell'accumulo di biomassa nelle foreste mediterranee sono molteplici e complessi, ma l'abbandono dei territori e la riduzione delle utilizzazioni forestali sono le principali cause di questo fenomeno (FAO, 2018).

L'impatto della gestione forestale o dell'abbandono dei territori forestali sui servizi ecosistemici connessi al carbonio è stato valutato con vari approcci modellistici. La gestione attiva delle foreste in genere implica una riduzione del carbonio sequestrato mentre

l'abbandono, almeno nel medio termine, dovrebbe portare ad aumentare lo stock di carbonio a seguito dell'aumento dei livelli di biomassa nei soprassuoli (Bottalico et al., 2016; Ovando et al., 2019). D'altra parte, l'accumulo di biomassa può determinare una maggiore evapotraspirazione, riducendo la disponibilità idrica nel suolo (Ovando et al., 2019), e può aumentare il rischio degli incendi boschivi (La Mela Veca et al., 2024)

Il potenziale di mitigazione delle foreste può essere valorizzato attraverso azioni che prevedono la protezione delle foreste, la gestione forestale sostenibile, il recupero delle aree degradate e l'uso efficiente del legno (Verkerk et al., 2022). La protezione delle foreste consiste in primo luogo nella lotta alla deforestazione e nell'evitare il degrado dei territori forestali. Conservando gli ecosistemi forestali si conserva il carbonio stoccato nelle foreste e si riducono le emissioni di gas climalteranti derivanti dalla deforestazione. La gestione forestale svolge un ruolo importante sul potenziale di mitigazione delle foreste. Approcci gestionali che prevedono intensità di prelievo moderate in genere favoriscono il potenziale di mitigazione. Il recupero delle aree degradate consiste, ad esempio, nella riqualificazione dei territori denudati attraverso imboschimenti e rimboschimenti.

Valorizzare l'uso della materia prima legno è un'altra strategia a supporto della mitigazione. Questo significa in primo luogo valorizzare l'uso a cascata del legno in un contesto di bio-economia forestale (Scarascia-Mugnozza et al., 2021). Attraverso la valorizzazione del legno, un materiale che alimenta filiere di trasformazione quali quelle della carta, degli imballaggi, dell'arredo e delle costruzioni, applicando criteri di forte circolarità, è possibile stoccare il carbonio per periodi di tempo prolungati, destinando solo i residui della filiera ad impiego energetico. Peraltro, il legno può essere utilizzato per sostituire altri materiali la cui produzione, gestione e riciclo hanno costi ambientali più elevati.

Conclusioni

Il cambiamento climatico è un problema globale crescente che ha un impatto sul benessere umano e rappresenta una minaccia per la conservazione delle risorse forestali.

Gli impatti previsti del riscaldamento climatico nel Mediterraneo mostrano una riduzione generale della fornitura di servizi di regolazione, un aumento dei rischi forestali legati al clima e una riduzione dell'estensione dell'areale e dell'idoneità degli habitat per le specie forestali più sensibili alla siccità. A causa del riscaldamento globale si prevede un aumento del rischio incendi, che può essere reso ancora più grave dall'abbandono delle aree rurali e montane e dall'aumento della biomassa combustibile.

Le foreste mediterranee saranno probabilmente soggette a limitazioni idriche crescenti entro la fine del XXI secolo. Ciò evidenzia la necessità di elaborare approcci di gestione forestale in grado di promuovere una sinergia tra la prevenzione degli incendi e la gestione dell'acqua, sia a scala di popolamento che di paesaggio, soprattutto laddove l'abbandono favorisce una maggiore densità dei soprassuoli forestali.

Vari studi hanno dimostrato che il diradamento è potenzialmente vantaggioso in termini di riduzione del rischio di incendi (Crecente-Campo et al., 2009; Corona et al., 2015) o di aumento delle riserve idriche sotterranee (del Campo et al., 2014), ma può anche comportare una variazione del microclima forestale e, sebbene il diradamento possa in parte alleviare il calo di accrescimento durante i periodi siccitosi, non è ancora del tutto chiaro quali siano gli effetti sulla crescita dopo il periodo di stress (Castagneri et al., 2022).

La definizione della densità ottimale per ottenere questi benefici combinati dipende dalle caratteristiche della stazione e dalla composizione e struttura dei singoli soprassuoli

(Cabon et al., 2018). La ricerca deve quindi concentrarsi su una conoscenza più approfondita dell'ecoidrologia delle foreste mediterranee e della loro risposta alla siccità per garantire la migliore efficacia delle pratiche di gestione (Vicente et al., 2018).

Le foreste sono sistemi adattivi complessi che svolgono molteplici funzioni. Per garantire la fornitura dei servizi e benefici di cui godiamo è necessario adottare approcci gestionali flessibili, che sostengono l'auto-organizzazione, la capacità di adattamento e la resilienza del sistema forestale.

Bibliografia

- AA.VV., 2022. Stato di attuazione del Piano d'Azione per la gestione degli interventi di esbosco e ricostituzione dei boschi danneggiati dalla Tempesta Vaia. Report finale. Provincia Autonoma di Trento.
- Alderotti F., Bussotti F., Brunetti C., Ferrini F., Gori A., Pollastrini M., 2024. Linking patterns of forest dieback to triggering climatic and weather events: an overview on Mediterranean forests. *iForest*, 17: 309-316.
- Ascoli D., Bovio G., 2013. Prescribed burning in Italy: a review of issues, advances and challenges. *iForest* 6: 79-89. doi: 10.3832/for0803-006.
- Birot Y., Gracia C., Palahí M., 2011. Water for forests and people in the Mediterranean region - a challenging balance. *What Science Can Tell Us No. 1*. Joensuu, Finland, European Forest Institute.
- Bonet J.A., de-Miguel S., Martínez de Aragón J., Pukkala T., Palahi M., 2012. Immediate effect of thinning on the yield of *Lactarius group deliciosus* in *Pinus pinaster* forests in Northeastern Spain. *Forest Ecology and Management*, 265: 211-217. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2011.10.039>.
- Bottalico F., Pesola L., Vizzarri M., Antonello L., Barbati A., Chirici G., Corona P., Cullotta S., Garfi V., Giannico V., Laforteza R., Lombardi F., Marchetti M., Nocentini S., Riccioli F., Travaglini D., Sallustio L., 2016. Modeling the influence of alternative forest management scenarios on wood production and carbon storage: a case study in the Mediterranean region. *Environmental Research*, 144: 72-87. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2015.10.025>.
- Bussotti F., Papitto G., Di Martino D., Cocciufa C., Cindolo C., Cenni E., Bettini D., Iacopetti G., Ghelardini L., Moricca S., Panzavolta T., Bracalini M., Pollastrini M., 2024. Extreme climatic events, biotic interactions and species-specific responses drive tree crown defoliation and mortality in Italian forests. *iForest*, 17: 300-308.
- Cabon A., Mouillot F., Lempereur M., Ourcival J.M., Simioni G., Limousin J.M., 2018. Thinning increases tree growth by delaying drought-induced growth cessation in a Mediterranean evergreen oak coppice. *Forest Ecology and Management*, 409: 333-342. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2017.11.030>.
- Castagneri D., Vacchiano G., Hacket-Pain A., DeRose R.J., Klein T., Bottero A., 2022. Meta-analysis Reveals Different Competition Effects on Tree Growth Resistance and Resilience to Drought. *Ecosystems*, 25: 30-43. <https://doi.org/10.1007/s10021-021-00638-4>.
- Charru M., Seynave I., Hervé J.C., Bertrand R., Bontemps J.D., 2017. Recent growth changes in Western European forests are driven by climate warming and structured across tree species climatic habitats. *Annals of Forest Science*, 74: 33. <https://doi.org/10.1007/s13595-017-0626-1>.
- Chirici G., Giannetti F., Travaglini D., Nocentini S., Francini S., D'Amico G., Calvo E. et al., 2019. Stima dei danni della tempesta "Vaia" alle foreste in Italia. *Forest@*, 16: 3-9. <http://dx.doi.org/10.3832/efor3070-016>.
- Corona P., Ascoli D., Barbati A., Bovio G., Colangelo G., Elia M., Garfi V., Iovino F., Laforteza R., Leone V., Lovreglio R., Marchetti M., Marchi M., Menguzzato G., Nocentini S., Picchio R., Portoghesi L., Puletti N., Sanesi G., Chianucci F., 2015. Integrated forest management to prevent wildfires under Mediterranean environments. *Annals of Silvicultural Research* 39 (1): 1-22.
- Corona P., Bernardini V., Iovino F., Lisa C., Paletto A., Plutino M., Sacchelli S., Vangi E., Travaglini D., Nocentini S., 2025. Utilità ecosistemiche e valorizzazione selvicolturale dei rimboschimenti di conifere. Rete Rurale Nazionale 2014-2020, Scheda n. 22.2 – Foreste. Consiglio per la ricerca in agricoltura e l'analisi dell'economia agraria, Roma. ISBN 9788833853895.
- Cramer W., Guiot J., Marini K. (eds.), 2020. Climate and Environmental change in the Mediterranean Basin - current situation and risks for the future. First Mediterranean Assessment Report. Union for the Mediterranean, Plan Bleu, UNEP/MAP, Marseille, France; 632pp. 10.5281/zenodo.4768833.
- Crecente-Campo F., Pommerening A., Rodríguez-Soalleiro R., 2009. Impacts of thinning on structure, growth and risk of crown fire in a *Pinus sylvestris* L. plantation in northern Spain. *Forest Ecology and Management*, 257: 1945-54. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.02.009>.
- Croitoru L., 2007. How much are Mediterranean forests worth? *Forest Policy and Economics*, 9: 536-45. <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2006.04.001>.
- del Campo A.D., Fernandes T.J.G., Molina A.J., 2014. Hydrology-oriented (adaptive) silviculture in a semiarid pine plantation: how much can be modified the water cycle through forest management? *European Journal of Forest Research*, 133: 879-94. <https://doi.org/10.1007/s10342-014-0805-7>.
- FAO, 2015. How are the world's forests changing? Second edition. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.
- FAO, 2018. State of Mediterranean Forests. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome and Plan Bleu, Marseille.
- FAO, 2020. Global Forest Resources Assessment 2020: Main report. Rome. <https://doi.org/10.4060/ca9825en>.
- Forest Europe, 2020. State of Europe's Forests 2020. Ministerial Conference on the Protection of Forests in Europe - Forest Europe. 392 pp.
- Forzieri G., Girardello M., Ceccherini G., Spinoni J., Feyen L., Hartmann H., Beck P.S.A., Camps-Valls G., Chirici G., Mauri A., Cescatti A., 2021. Emergent vulnerability to climate-driven disturbances in European forests. *Nature Communications*, 12: 1081. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-21399-7>.

- Garosi C., Ferrante R., Vettori C., Paffetti D., 2022. Meta-Analysis as a Tool to Identify Candidate Genes Involved in the *Fagus sylvatica* L. Abiotic Stress Response. *Forests*, 13: 159. <https://doi.org/10.3390/f13020159>.
- IPCC, 2023. Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, pp. 1-34, doi: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.001.
- La Marca O., 1983. Il problema degli schianti nei boschi. Ricerche sperimentali su alcuni popolamenti di conifere. *Annali dell'Accademia Italiana di Scienze Forestali*, XXXII: 69-114.
- La Mela Veca D.S., Piroli E., Bacciu V., Barbera G., Brunori A., Calvani G., Delogu G.M., Elia M., La Mantia T., Laschi A., Lovreglio R., Masiero M., Salis M., Tonarelli L., Motta R., Ascoli D., 2024. Governare gli incendi in Italia: superare l'emergenza, pianificare la prevenzione. *Forest@*, 21: 37-47. doi: 10.3832/efor4606-021.
- Limousin J.M., Misson L., Lavoie A.V., Martin N.K., Rambal S., 2010. Do photosynthetic limitations of evergreen *Quercus ilex* leaves change with long term increased drought severity? *Plant Cell Environment*, 33: 863-75. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.2009.02112.x>.
- Lovreglio R., Meddour-Sahar O., Leone V. (2014). Goat grazing as a wildfire prevention tool: a basic review. *iForest*, 7: 260-268. doi: 10.3832/ifor1112-007.
- Martin-Benito D., Kint V., del Río M., Muys B., Cañellas I., 2011. Growth responses of West-Mediterranean *Pinus nigra* to climate change are modulated by competition and productivity: Past trends and future perspectives. *Forest Ecology and Management*, 262: 1030-1040. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2011.05.038>.
- Morán-Ordóñez A., Ramsauer J., Coll L., Brotons L., Ameztegui A., 2021. Ecosystem services provision by Mediterranean forests will be compromised above 2°C warming. *Global Change Biology*, 27: 4210-4222. <https://doi.org/10.1111/gcb.15745>.
- Motta R., Ascoli D., Corona P., Marchetti M., Vacchiano G., 2018. Selvicoltura e schianti da vento. Il caso della "tempesta Vaia". *Forest@*, 15: 94-98. <https://doi.org/10.3832/efor2990-015>.
- Munafò M. (a cura di), 2023. Consumo di suolo, dinamiche territoriali e servizi ecosistemici. Edizione 2023. Sintesi. Report SNPA 38/23.
- Noce S., Cipriano C., Santini M., 2023. Altitudinal shifting of major forest tree species in Italian mountains under climate change. *Frontiers in Forest Global Change*, 6: 1250651. <https://doi.org/10.3389/ffgc.2023.1250651>.
- Nocentini S., Coll L., 2013. Mediterranean Forests: human use and complex adaptive systems. In: Messier C., Puettmann K.J., Coates K.D., editors. *Managing Forests as Complex Adaptive Systems. Building Resilience to the Challenge of Global Change*. Routledge, London and New York; 2013. pp. 214-243.
- Oggioni S.D., Rossi L.M.W., Avanzi C., Marchetti M., Piotti A., Vacchiano G., 2024. Drought responses of Italian silver fir provenances in a climate change perspective. *Dendrochronologia*, 85: 126184. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2024.126184>.
- Ovando P., Beguería S., Campos P., 2019. Carbon sequestration or water yield? The effect of payments for ecosystem services on forest management decisions in Mediterranean forests. *Water Resources and Economics*, 28: 100119. <https://doi.org/10.1016/j.wre.2018.04.002>.
- Paffetti D., Travaglini D., Buonamici A., Nocentini S., Vendramin G.G., Giannini R., Vettori C., 2012. The influence of forest management on beech (*Fagus sylvatica* L.) stand structure and genetic diversity. *Forest Ecology and Management*, 284: 34-44. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.07.026>.
- Pecchi M., Marchi M., Moriondo M., Forzieri G., Ammoniaci M., Bernetti I., Bindi M., Chirici G., 2020. Coverage and the Spatial Distribution of 19 Key Forest Tree Species in Italy under RCP4.5 IPCC Trajectory for 2050s. *Forests*, 11: 934. doi:10.3390/f11090934.
- Ruiz-Peinado R., Bravo-Oviedo A., López-Senespleda E., Bravo F., Río M., 2017. Forest management and carbon sequestration in the Mediterranean region: a review. *Forest Systems*, 26: eR04S. <https://doi.org/10.5424/fs/2017262-11205>.
- Scarascia-Mugnozza G., Oswald H., Piussi P., Radoglou K., 2000. Forests of the Mediterranean region: gaps in knowledge and Research needs. *Forest Ecology and Management*, 132:97-109. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(00\)00383-2](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(00)00383-2).
- Scarascia-Mugnozza G., Romagnoli M., Fragiaco M., Piazza M., Lasserre B., Brunetti M., Zanuttini R., Fioravanti M., Marchetti M., Todaro L., Togni M., Ferrante T., Maesano M., Nocetti M., De Dato G.B., Sciomenta M., Villani T., 2021. La filiera corta del legno: un'opportunità per la bio-economia forestale in Italia. *Forest@*, 18: 64-71. doi: 10.3832/efor0052-018.
- Scarpa C., Bacciu V., Ascoli D., Costa-Saura J.M., Salis M., Sirca C., Marchetti M., Spano D., 2023. Estimating annual GHG and particulate matter emissions from rural and forest fires based on an integrated modelling approach. *Science of the Total Environment* 907: 167960. doi: 10.1016/j.scitotenv.2023.167960.
- Seidl R., Thom D., Kautz M., Martin-Benito D., Peltoniemi M., Vacchiano G., Wild J., Ascoli D., Petr M., Honkaniemi J., Lexer M.J., Trotsiuk V., Mairota P., Svoboda M., Fabrika M., Nagel T.A., Reyser C.P.O., 2017. Forest disturbances under climate change. *Nature Climate Change*, 7: 395-402. <https://doi.org/10.1038/nclimate3303>.
- Senf C., Seidl R., 2021. Mapping the forest disturbance regimes of Europe. *Nature Sustainability*, 4: 63-70. <https://doi.org/10.1038/s41893-020-00609-y>.
- Tegel W., Seim A., Hakelberg D., Hoffmann S., Panev M., Westphal T., Büntgen U., 2014. A recent growth increase of European beech (*Fagus sylvatica* L.) at its Mediterranean distribution limit contradicts drought stress. *European Journal of Forest Research*, 133: 61-71. <https://doi.org/10.1007/s10342-013-0737-7>.
- Thurner M., Beer C., Santoro M., Carvalhais N., Wutzler T., Schepaschenko D., Shvidenko A., Kompter E., Ahrens B., Levick S.R., Schmullius C., 2014. Carbon stock and density of northern boreal and temperate forests. *Global Ecology and Biogeography*, 23: 297-310. <https://doi.org/10.1111/geb.12125>.
- Vangi E., D'Amico G., Francini S., Borghi C., Giannetti F., Corona P., Marchetti M., Travaglini D., Pellis G., Vitullo M., Chirici G., 2023. Large-scale high-resolution yearly modeling of forest growing stock volume and above-ground carbon pool. *Environmental Modelling & Software*, 159: 105580. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2022.105580>.
- Verkerk P.J., Delacote P., Hurmekoski E., Kunttu J., Matthews R., Mäkipää R., Mosley F., Perugini L., Reyser C.P.O., Roe S., Trømborg E., 2022. Forest-based climate change mitigation and adaptation in Europe. From Science to Policy 14. European Forest Institute. <https://doi.org/10.36333/fs14>.
- Vicente E., Vilagrosa A., Ruiz-Yanetti S., Manrique-Alba A., González-Sanchís M., Moutahir H., Chirino E., del Campo A., Bellot J., 2018. Water balance of Mediterranean *Quercus ilex* L. and *Pinus halepensis* Mill. Forests in semiarid climates: a review in a climate change context. *Forests*, 9: 426. <https://doi.org/10.3390/f9070426>.

Approcci genetici per migliorare la tolleranza allo stress da alte temperature

Barone A.M.¹, Macciotta N.P.P.²

¹Dipartimento di Agraria, Università degli Studi di Napoli Federico II

²Dipartimento di Agraria, Università degli Studi di Sassari

Riassunto

I danni che le temperature crescenti negli ultimi anni stanno causando all'agricoltura sono evidenti sia nella coltivazione di piante di maggiore interesse economico sia nell'allevamento di specie zootecniche che costituiscono la base dell'alimentazione umana. In entrambi i settori, il contributo della genetica e del miglioramento genetico è cruciale per comprendere i meccanismi alla base della risposta di tolleranza di piante ed animali che meglio si adattano allo stress da caldo, nonché per selezionare i genotipi migliori da immettere sul mercato. Gli approcci genetici per raggiungere questi obiettivi si avvalgono oggi di strumenti genomici che consentono di accelerare il lavoro di identificazione di geni-chiave per tale risposta, grazie alla disponibilità di numerose piattaforme ad alta processività per l'analisi della variabilità genetica. In questo contesto, si inserisce il presente contributo, che riporta alcuni esempi dei successi che si possono ottenere sia in campo vegetale che animale, grazie all'utilizzo di tali piattaforme, concentrandosi in particolare sui risultati ottenuti in attività di ricerca svolte su pomodoro e su bovini.

Abstract

Consequences of increasing temperatures in recent years are evident in economically important crops and in livestock species that represent the basis of human nutrition. Contribution of genetics and breeding is crucial in both areas to understand the mechanisms underlying plant and animal heat stress tolerance and to select best genotypes. Approaches for achieving these goals will exploit genomic tools able to speed up the identification of genes involved in heat stress tolerance mechanisms, as high throughput platforms for the analysis of genetic variability. This paper will present some successful examples of use such platforms, particularly in the case of tomato and cattle.

Keywords: Cambiamenti climatici, tolleranza ad alte temperature, piattaforme genomiche, pomodoro, ereditabilità, bovini, selezione, epigenetica

Introduzione

I cambiamenti climatici costituiscono una delle principali minacce per il futuro del nostro pianeta. Il riscaldamento della temperatura terrestre, l'aumento degli eventi meteorologici estremi (ondate di calore, violenti temporali), la variazione della entità e della distribuzione delle precipitazioni nel corso dell'annata che si osservano negli ultimi anni sono conseguenze tangibili del fenomeno. La causa principale dei cambiamenti climatici è stata individuata nelle emissioni di gas serra derivanti dalle attività antropiche, tra le quali vanno annoverate quelle agricole. La riduzione delle emissioni da parte dell'agricoltura può essere considerata come una strategia di mitigazione dei cambiamenti climatici di medio – lungo periodo. Una opzione di medio-breve periodo invece è quella di ottenere organismi, vegetali e animali, che siano in grado di adattarsi ai cambiamenti climatici. Tra i caratteri di adattamento, la resistenza allo stress da caldo è una delle maggiormente studiate.

Effetti delle alte temperature sulle piante: un esempio in pomodoro

Le rese agricole sono spinte a livelli produttivi sempre più alti per far fronte alla costante crescita demografica, ma i cambiamenti climatici, con il graduale aumento delle temperature globali registrate, si pongono in forte contrapposizione a tale esigenza. Le conseguenze delle alte temperature sulla vita e sulla produttività delle piante di interesse economico sono diverse ed includono molteplici tipologie di danni spesso combinati a carenze idriche, ma anche a tutta una serie di stress abiotici tra cui carenze nutritive, l'incremento della salinità e di metalli pesanti nei suoli e all'aumento di ozono nell'aria. In molti casi gli stress abiotici sono combinati e causano danni simili alle piante perché colpiscono in diverse fasi del loro sviluppo vegetativo e riproduttivo, di conseguenza lo studio e la distinzione dei singoli effetti sulle coltivazioni risulta complesso. Pertanto, comprendere i meccanismi di risposta delle piante ai singoli stress abiotici è un processo lungo e tortuoso, poiché richiede l'integrazione di diverse competenze scientifiche unite ad un sistema di allevamento delle piante in condizioni controllate, il quale troppo spesso è difficile da realizzare per raggiungere tale scopo.

Nel laboratorio di Genomica e Fisiologia Vegetale del Dipartimento di Agraria dell'Università di Napoli Federico II°, da alcuni anni il lavoro di un gruppo di ricercatori e dottorandi di ricerca si è focalizzato sulla comprensione dei meccanismi di tolleranza alle alte temperature e alla riduzione idrica in pomodoro, nonché degli effetti combinati delle due condizioni di stress, integrando le competenze di genetica e fisiologia con le più innovative piattaforme di analisi genomica, disponibili per questa specie.

Negli ultimi cinquanta anni, infatti, l'area geografica che ha maggiormente risentito degli aumenti di temperatura è l'Europa, dove si sono realizzati incrementi medi di 2.4 °C (FAOSTAT). Tra le colture che maggiormente risentono del cambiamento climatico c'è certamente il pomodoro, con l'Italia che si attesta tra i maggiori produttori mondiali (dati FAO) e, in essa, la Campania si pone come la terza regione nazionale per volumi di produzione (dati Istat). Solitamente, l'aumento delle temperature al di sopra del livello ottimale avviene nella fase tardiva della stagione di crescita del pomodoro, influenzando drammaticamente le fasi riproduttive. Durante queste fasi, l'esposizione allo stress da caldo comporta diversi effetti negativi sull'apparato fiorale poiché può causarne l'abscissione, oppure può indurre una scarsa crescita di stami e pistilli, ma anche una riduzione della germinazione del polline e un alterato sviluppo del tubo pollinico (Alsamir et al., 2021). Questi effetti riducono inevitabilmente i livelli di allegagione e la conseguente produzione di frutti, e si riflettono negativamente sulla resa finale (Ayenan et al., 2019; Raja et al., 2019). In linea generale, gli effetti del caldo non si limitano solo alla sfera riproduttiva, ma anche alla parte vegetativa. Infatti, l'aumento delle temperature può incidere sulla crescita radicale, diminuendo il tasso di assorbimento dei nutrienti (Sato et al. 2000; Giri et al. 2017), ma anche alterando il rapporto tra radici e biomassa epigea inficiando ulteriormente sulla riproduzione, sulla resa e sulla qualità del frutto (Abdul-Baki e Stommel 1995, Zinn et al. 2010, Wahid et al. 2007). Di rilevante importanza è anche l'effetto che le alte temperature hanno sull'attività fotosintetica poiché, questa, determina la crescita e la produttività delle piante. Di fatto, lo stress da caldo è capace di diminuire il tasso fotosintetico perché i fotosistemi I e II (PSI e PSII) sono particolarmente sensibili, specialmente il PSII, il quale subisce gravi danni alla proteina D1 che lega il centro di reazione (Yoshioka et al., 2006; Yan et al., 2013).

La risposta al caldo in pomodoro

Le piante di pomodoro rispondono allo stress termico attivando modifiche evolutive, fisiologiche e biochimiche sotto l'espressione di geni che rispondono allo stress (Guo et al., 2016). La risposta molecolare comprende la percezione del segnale di stress, la trasduzione del segnale ai componenti cellulari, l'espressione genica ed infine tutti i cambiamenti metabolici che inducono la tolleranza allo stress (Agarwal et al., 2006). Il complesso sistema di percezione dello stress coinvolge le specie reattive dell'ossigeno (ROS), il flusso degli ioni calcio (Ca^{2+}), fosfolipidi e fitormoni. Nel dettaglio, lo stress termico aumenta la fluidità della membrana plasmatica, e ciò comporta l'attivazione dei canali che mediano l'ingresso del Ca^{2+} nelle cellule. Le alte temperature comportano anche l'accumulo di specie reattive dell'ossigeno (ROS). Inoltre, c'è un rimodellamento dei fosfolipidi di membrana ed un aumento di molecole che agiscono come mediatori chiave delle vie di segnale. Infine, il ruolo fondamentale dei fitormoni, come acido abscissico (ABA), acido salicilico (SA) ed etilene, influenza l'insorgenza della risposta molecolare attraverso l'espressione di geni sensibili al calore (Choudhury et al., 2017; Nievola et al., 2017; Medina et al., 2021; Haider et al., 2022; Huang et al., 2022; Pan et al., 2019; Qu et al., 2013). La risposta molecolare del pomodoro allo stress da caldo è governata da una fitta rete di fattori di trascrizione (HSF), che svolgono un ruolo chiave rilevando la percezione dello stress e regolando l'espressione di diversi geni. Questi geni regolano l'espressione di proteine da shock termico (HSP), le quali sono essenziali per mantenere condizioni equilibrate all'interno delle cellule; nello specifico, queste proteine sono degli "chaperon" le cui funzioni principali coinvolgono il ripiegamento, lo spiegamento e il trasporto di tutte le altre proteine presenti nelle cellule, mantenendo così l'omeostasi della pianta (Khan et al., 2021). Inoltre, le HSF sono implicate anche nella regolazione dell'espressione di altri geni di risposta allo stress, influenzando la maggiore o minore tolleranza delle piante.

In sintesi, lo stress da caldo comporta un generico calo di produzione, ed è capace di indurre una molteplicità di risposte sia a livello morfologico che cellulare. Di conseguenza, in un contesto così complesso, risulta necessario individuare geni con azione di "major genes" per l'ottenimento di varietà tolleranti al caldo, dato che la complessità delle risposte genetiche suggerisce che tale tolleranza sia un carattere quantitativo (Wen et al., 2019). La variabilità di questi geni può essere studiata dettagliatamente mediante piattaforme di genotipizzazione ad alta processività, in modo da individuare polimorfismi funzionali nelle regioni codificanti e/o regolatrici ed identificare nuovi QTL (Quantitative Trait Loci) associati a tratti fenotipici relazionati alla resa, che potrebbero determinare tolleranza o sensibilità.

Utilizzo di piattaforme genomiche in pomodoro

Nel laboratorio di Genomica e Fisiologia Vegetale vengono utilizzate piattaforme "omiche" già disponibili per il pomodoro, ma anche realizzate ad hoc su genotipi selezionati, per comprendere i meccanismi di tolleranza. In particolare, recentemente sono stati utilizzati tre approcci per comprendere le basi genetiche della tolleranza alle alte temperature, i cui risultati sono stati combinati per individuare un numero di geni ridotto su cui focalizzare le future attività di ricerca, finalizzate all'ottenimento di nuovi genotipi tolleranti.

Il primo approccio ha riguardato lo studio di una collezione di oltre 80 genotipi di pomodoro, raccolti in diverse regioni del mondo, sottoposti a coltivazione in diverse condizioni di alte temperature, in diversi ambienti geografici, e valutando le performance di alcuni caratteri legati alla produzione finale (Fig. 1). La stessa popolazione è stata sottoposta anche ad un'analisi del genoma mediante una piattaforma di genotipizzazione "high-throughput", la

piattaforma SOLCAP (Ruggeri et al., 2014), disponibile per il pomodoro, che ha consentito di studiare la variabilità in oltre 7000 SNP (Single Nucleotide Polymorphism), e di individuare 14 regioni cromosomiche associate a sei caratteri produttivi analizzati (Ruggeri et al., 2019).

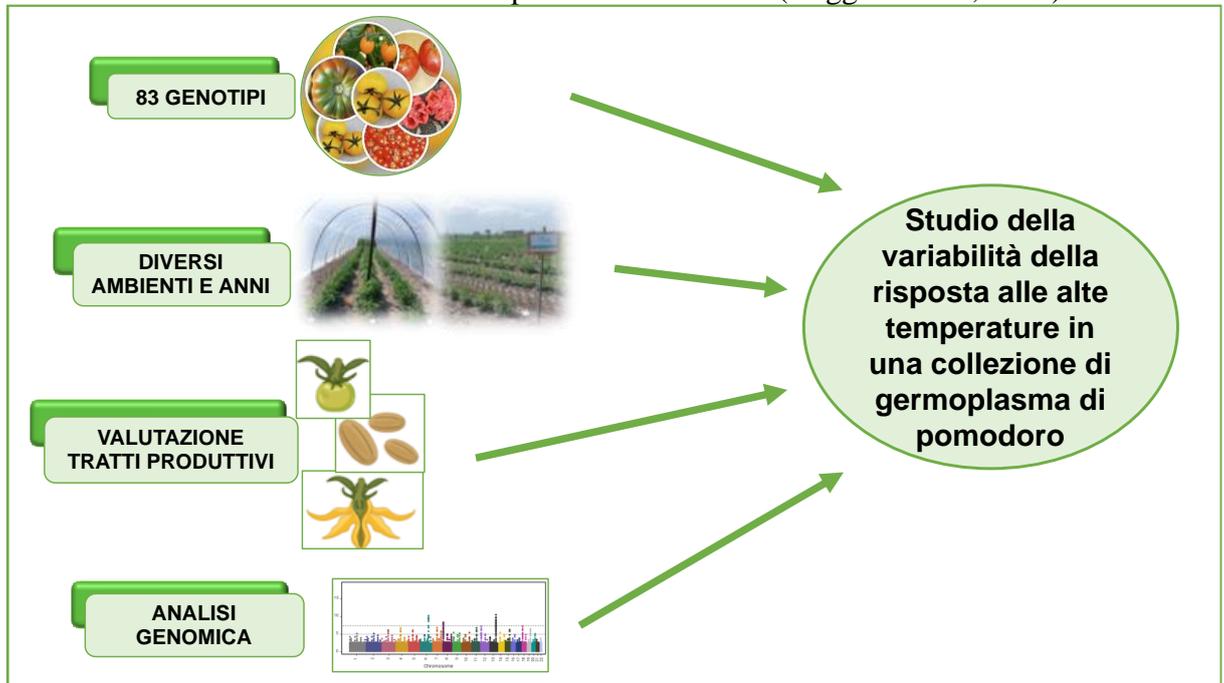


Figura 1 – Studio di una collezione di un germoplasma di pomodoro per identificare diversi genotipi tolleranti alle alte temperature

Tra i vari genotipi più tolleranti, ne è stato individuato uno (codificato E42) che ha avuto produzioni elevate e stabili nel tempo, paragonabili a quelle di due ibridi selezionati dalla Monsanto per la tolleranza alle alte temperature (DOCET e JAG8810). Pertanto, questo genotipo è stato utilizzato nel secondo approccio, mirato a studiare la manifestazione di caratteri distintivi in regime di alte temperature e a identificare polimorfismi in geni chiave, realizzando così un “dissecting” del carattere tolleranza in E42 (Fig. 2). Anche in questo caso, le analisi fenotipiche condotte a vari livelli (morfologico, fisiologico, biochimico) sono state combinate con l’uso di piattaforme di genotipizzazione, quali Genotype-by-sequencing (GBS), SPET (Single Primer Enrichment Technology) e whole-genome resequencing.

Tra le caratteristiche fenotipiche più rilevanti nel genotipo E42 sono state identificate l’elevato numero di fiori, che ha come conseguenza anche un elevato numero di frutti per pianta, e pertanto una maggiore produzione finale. Inoltre, il più elevato contenuto di clorofille ed una maggiore efficienza fotosintetica, insieme ad una maggiore produzione di antiossidanti, sono risultate caratteristiche distintive di questo genotipo, sicuramente legate alla manifestazione di tolleranza alle alte temperature (Fig. 3). Dalle analisi genomiche complessivamente condotte su questo genotipo, è stato evidenziato un livello di polimorfismo molto elevato rispetto al genoma di riferimento della cv. Heinz di pomodoro, e tale polimorfismo è stato riconducibile per oltre il 70% a variazioni simili a quelle del genoma della specie selvatica *Solanum pimpinellifolium*, tollerante alle alte temperature. Grazie al sequenziamento completo del genoma di E42, realizzato nel nostro laboratorio, è stato possibile identificare oltre 100 geni putativamente legati al meccanismo di risposta alle alte temperature, che presentano polimorfismi con conseguenze ad alto o moderato impatto sulla struttura delle proteine che

vengono codificate (Graci et al., 2023). Tra questi, alcuni geni legati alla fotosintesi, alla fluidità delle membrane, al ripiegamento delle proteine, alla fioritura e agli ormoni, nonché fattori di trascrizione e proteine dello stress, tutti elementi che generalmente giocano un ruolo nella risposta agli stress abiotici. Le conseguenze di tali variazioni geniche sono in corso di studio nel nostro laboratorio.

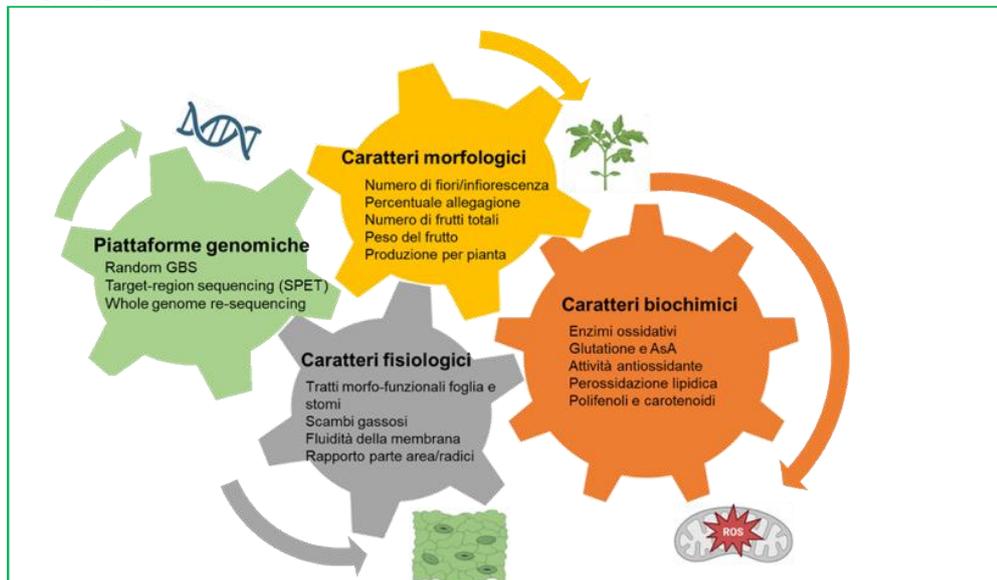


Figura 2 – Caratterizzazione multilivello del genotipo tollerante E42

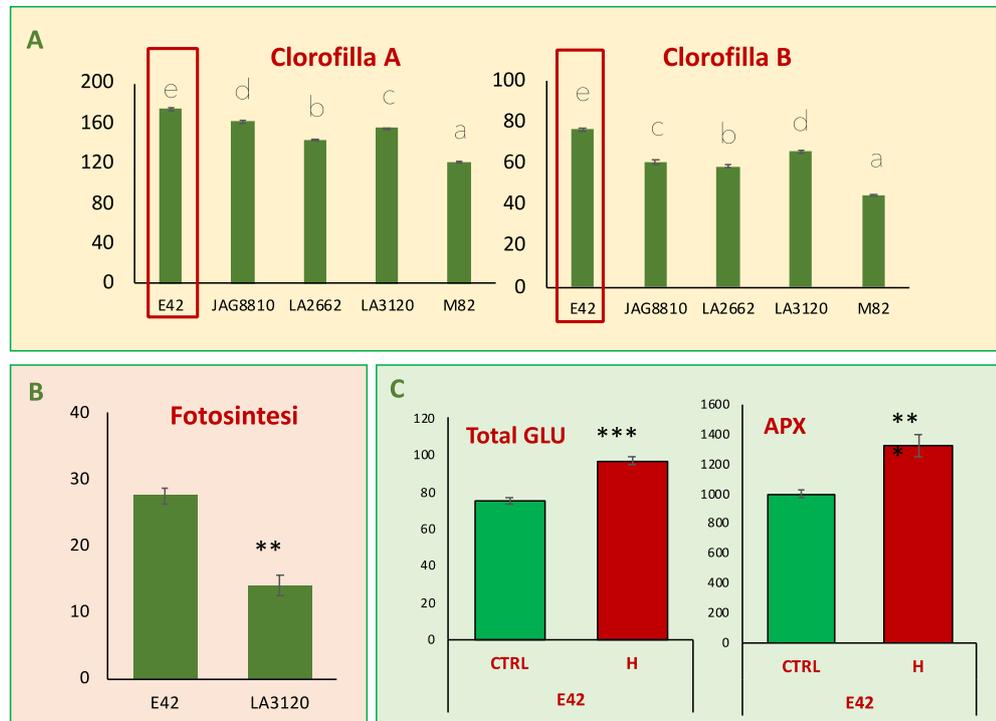


Figura 3 – Contenuto di clorofille (A) e efficienza di fotosintesi (B) in E42 a confronto con altri genotipi (JAG8810, LA2662 e LA3120, tolleranti; M82 suscettibile); produzione di glutazione totale (GLU) e APX (Ascorbato perossidasi) (C) in E42 in condizioni controllo (CTRL) e di alte temperature (H).

Il terzo approccio utilizzato ha riguardato lo studio delle variazioni presenti nel genotipo E42 nella regolazione dell'espressione genica, in quanto non solo le variazioni geniche possono influenzare la risposta allo stress, ma anche una pletera di reazioni differenti a livello trascrizionale, traduzionale e post-traduzionale (Graci e Barone 2024). Nel caso della risposta al caldo, sicuramente nelle piante svolgono un ruolo fondamentale nei processi di regolazione i fattori di trascrizione "heat-shock factor" (HSF), che inducono o reprimono la formazione di proteine specifiche di tale stress, le "heat-shock proteins" (HSP). Pertanto, per approfondire i meccanismi di risposta del genotipo E42, abbiamo ricercato in questo genotipo polimorfismi nei promotori dei geni associati allo stress da caldo e ai processi riproduttivi, in particolare sono stati ricercati nei motivi di regolazione specifici dello stress (Heat stress elements, HSE) riportati in letteratura (Arce et al, 2020; Wang et al., 2022), e sono stati individuati network di geni che coinvolgono principalmente i fattori di trascrizione HSF (Fig. 4).

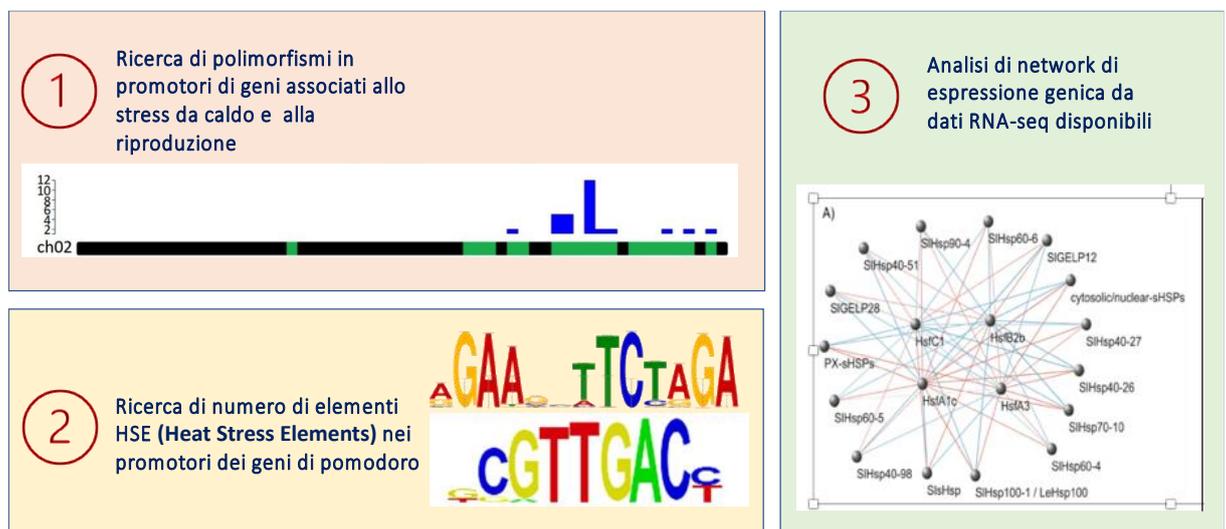


Figura 4 – Studio delle variazioni trascrizionali ed interazione di geni nella risposta al caldo in pomodoro, mediante: 1) analisi dei polimorfismi nei promotori dei geni, 2) ricerca di elementi HSE nei promotori; 3) analisi dei network genici che coinvolgono HSF (heat shock factors).

Al termine di queste analisi, i dati ottenuti con i tre approcci utilizzati sono stati combinati per selezionare un gruppo ristretto di geni. In particolare, sono stati messi in evidenza 13 geni che presentano motivi HSE nel promotore, mostrano varianti nella sequenza codificante del gene e nei network di espressione interagiscono con fattori di trascrizione HSF specifici della risposta al caldo. A questo gruppo di geni appartengono due HSF, nove proteine HSP e due geni codificanti per enzimi lipolitici (GELP) legati allo sviluppo riproduttivo delle piante e coinvolti nell'interazione pianta-ambiente, con particolare riferimento agli stimoli esterni dovuti agli stress abiotici (Shen et al., 2022).

Successivamente, questi geni sono stati localizzati sui 12 cromosomi di pomodoro e nelle regioni in cui mappano sono stati ricercati QTL legati alla riproduzione e/a allo stress da caldo, precedentemente mappati da diversi autori con approcci genetici differenti (Fig. 5). Questo gruppo di geni potrà costituire in futuro un "core" di geni da cui partire per approfondirne il loro ruolo in varie condizioni di stress e in diversi genotipi mediante approcci di editing genomico, quali la CRISPR/CAS. Infine, se tali tecniche confermeranno il ruolo-chiave di alcuni geni nel determinare la risposta di termo-tolleranza in pomodoro, essi potranno essere utilizzati per costruire marcatori molecolari utili per accelerare programmi di selezione

assistita finalizzati al trasferimento di tali geni in nuovi genotipi da migliorare per la risposta al caldo.

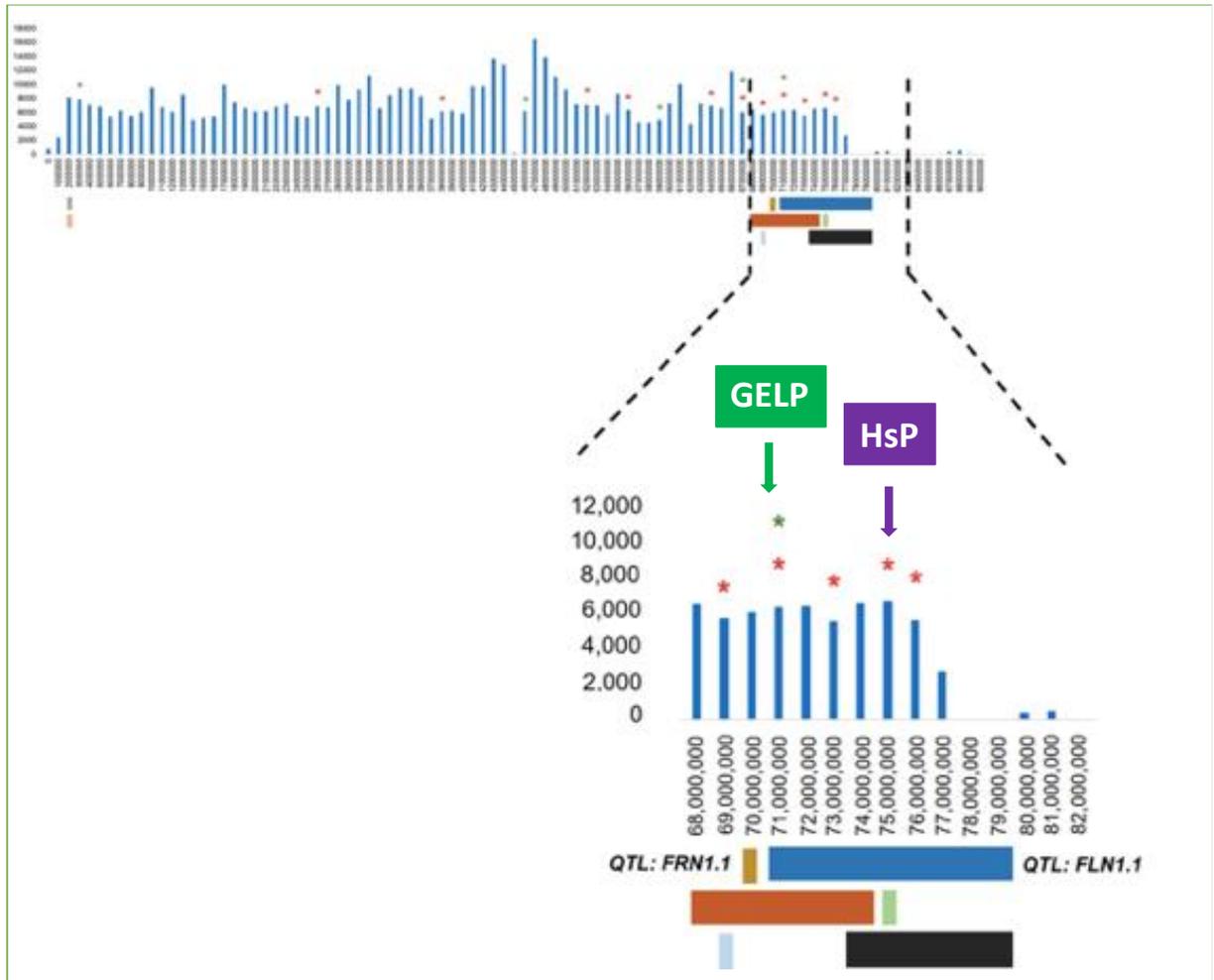


Figura 5 - Localizzazione sul cromosoma 1 dei geni GELP e HsP selezionati per 1) presenza di motivi HSE nel promotore, 2) varianti polimorfiche nel gene e 3) interazione con fattori di trascrizione per la risposta al caldo. Gli asterischi indicano la posizione di geni polimorfici: in rosso quelli relativi alla risposta al caldo, in verde quelli legati alla riproduzione. QTL-FRN1.1 (Gonzalo et al., 2020) è un QTL per il numero di frutti e QTL-FLN-1 (Gonzalo et al., 2020) è un QTL per il numero di fiori/infiorescenza, entrambi mappati nella regione.

Lo stress da caldo negli animali di interesse zootecnico

La condizione di stress da caldo si verifica quando l'animale non è in grado di dissipare in maniera adeguata l'eccesso di calore al fine di mantenere il bilancio termico corporeo (Bernabucci et al., 2014). L'effetto dello stress da caldo sugli animali è sia diretto, con modificazioni fisiologiche (ipertermia, disidratazione, stress ossidativo, alterazione attività sistema immunitario) e comportamentali (ad es. riduzione dell'ingestione alimentare), che indiretto, con modifiche dell'ambiente e ecologia dei parassiti, variazione della qualità e disponibilità degli alimenti e dell'acqua, necessità di adattamenti di tipo gestionale. Tutto ciò si traduce in conseguenze negative sul benessere dell'animale, sul suo stato di salute e sulle performance produttive e riproduttive. Studi condotti sui bovini da latte hanno evidenziato

come l'uscita dell'animale dalla sua *comfort zone* termica comporti la riduzione della produzione di latte, dei contenuti in grasso e proteina, l'aumento del contenuto in cellule somatiche. Tali ricerche hanno riguardato non solo specie e razze allevate in zone tropicali e subtropicali, ma anche i sistemi zootecnici delle zone temperate. Va infatti considerato il fatto che gli animali altamente selezionati producono elevate quantità di calore metabolico che si va ad assommare a quello esogeno, accentuando così la condizione di stress da caldo (Segnalini et al., 2011).

Esistono differenze tra specie e razze per quanto riguarda la tolleranza al caldo. I piccoli ruminanti (pecore e capre) sono generalmente più tolleranti dei bovini. I suini sono particolarmente sensibili al caldo, essendo praticamente privi di ghiandole sudoripari. I bufali, anche se spesso presenti in zone calde, sono particolarmente sensibili alla radiazione solare diretta, fatto legato alla pigmentazione nera della pelle. All'interno delle singole specie, le razze locali poco selezionate ed evolutesi sotto la spinta dell'ambiente sono generalmente più tolleranti alle avversità climatiche, e quindi anche al caldo, di quelle cosmopolite altamente selezionate. Esiste infine la variabilità individuale che suggerisce la possibilità di includere il miglioramento genetico tra le strategie di mitigazione dell'effetto dello stress da caldo. Tra le specie zootecniche, la maggior parte degli studi sulla genetica dello stress da caldo ha riguardato i bovini da latte.

La selezione tradizionale

Una delle principali criticità del miglioramento genetico della tolleranza allo stress da caldo è rappresentata dalla definizione di un fenotipo misurabile da utilizzare come obiettivo di selezione. Caratteri come la temperatura rettale, il ritmo respiratorio, il tasso di sudorazione, misurano le reazioni dell'organismo alle condizioni termiche esterne e presentano anche una moderata componente genetica, come evidenziato dai valori di ereditabilità riportati in tabella 1. Il loro utilizzo nei programmi di selezione è però fortemente limitato dalle oggettive difficoltà di misurazione su scala di popolazione. Un ulteriore problema è costituito dalla loro correlazione genetica sfavorevole con i caratteri produttivi, per cui una selezione mirata al loro miglioramento comporterebbe una riduzione delle performance produttive degli animali.

| Carattere | Razza | h^2 | rg | Autore |
|-----------------------|----------|-------|------|---------------------------|
| Temperatura vaginale | Angus, | 0.36 | | Sarlo Davila et al., 2019 |
| | Brahman | | | |
| Temperatura rettale | Holstein | 0.17 | | Dikmen et al., 2012 |
| | Holstein | 0.06 | 0.34 | Luo et al., 2021 |
| Tasso di respirazione | Holstein | 0.04 | 0.22 | Luo et al., 2021 |
| Tasso di salivazione | Holstein | 0.02 | 0.06 | Luo et al., 2021 |

Tabella 1. Ereditabilità (h^2) di alcuni caratteri fisiologici legati alla reazione dell'animale allo stress da caldo e loro correlazione genetica (rg) con la produzione totale di latte a 305 giorni nei bovini.

Per i motivi soprariportati, la tolleranza allo stress da caldo viene comunemente valutata in base alla risposta produttiva dell'animale attraverso livelli crescenti di una variabile termica,

comunemente il Temperature Humidity Index (THI). Ciò permette di sfruttare i dati produttivi, normalmente rilevati nei programmi di selezione, ed i dati metereologici rilevati di routine dai servizi metereologici. Questa misura di tolleranza al caldo presenta una moderata ereditabilità (0.22) e può quindi essere utilizzata quale obiettivo di selezione. Esistono programmi di selezione che utilizzano questa misura per migliorare la tolleranza al caldo nei bovini da latte (Nguyen et al., 2016).

Il problema della correlazione sfavorevole con i caratteri produttivi però rimane. Dal punto di vista teorico, il merito genetico relativo alla tolleranza dell'animale allo stress da caldo viene comunemente stimato con un modello a norma di reazione (*reaction norm*) in cui l'effetto genetico additivo dell'animale è modellizzato con un'intercetta, che rappresenta il livello produttivo medio, e da una pendenza, che rappresenta la risposta dell'animale a valori crescenti di THI. I due indici sono fra loro correlati per cui un miglioramento della pendenza (tolleranza allo stress da caldo) si traduce in un peggioramento dell'intercetta (livello produttivo). Una possibile soluzione è quella di inserire il carattere resistenza allo stress da caldo in un indice di selezione aggregato, insieme a caratteri produttivi, le cui importanze relative vengano pesate in base al valore economico dei singoli caratteri ed alle correlazioni esistenti dal punto di vista genetico. Un'altra opzione è rappresentata dall'utilizzo di modelli genetici in grado di stimare un indice della resistenza al caldo non correlato al livello produttivo. Un esempio è dato dall'utilizzo dell'analisi delle componenti principali che consente di estrarre dai dati produttivi combinati con il THI due nuove variabili, i cui autovettori sono riportati in figura 6, simili all'intercetta e alla pendenza del modello a norma di reazione, ma che hanno il vantaggio di non essere correlate fra loro (Macciotta et al., 2017).

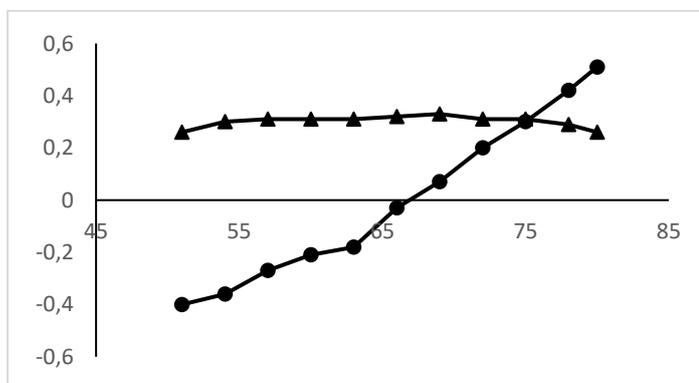


Figura 6 – Pattern degli autovettori della prima (▲) e seconda componente principale (●) estratte combinando i dati della produzione del latte con il THI.

La genomica

L'introduzione delle tecnologie genomiche ha avuto un grande impatto sulla selezione delle specie di interesse zootecnico. Anche nel caso della selezione sulla tolleranza allo stress da caldo la selezione genomica è stata integrata nei programmi selettivi consentendo di ridurre gli intervalli di generazione e aumentare l'accuratezza di stima del valore genetico. Un recente studio condotto sulle popolazioni Holstein e Jersey americane ha stimato i valori genetici genomici (GEBVs, Genomic Estimated Breeding Values) per la tolleranza allo stress da caldo che, anche in questo caso mostrano una moderata correlazione genetica negativa (sfavorevole) con i GEBVs dei caratteri produttivi (McWhorter et al., 2023). Lo studio riportava inoltre le

soglie del THI oltre le quali la produzione inizia a calare per effetto dello stress da caldo: 69 per la Holstein e 72 per la Jersey, rispettivamente.

Un altro dei vantaggi della genomica è quello di consentire lo studio approfondito della base genetica dei caratteri. Nel caso della tolleranza allo stress da caldo, sono stati svolti numerosi studi di genome wide association (GWAS) che hanno messo in risalto diverse regioni del genoma associate a tale carattere. Tra i geni candidati evidenziati da questi studi vanno ricordate diverse Heat Shock Proteins (HSP) e Heat Shock Factors (HSF) che risultano sovra espressi in condizioni di stress da caldo in diverse specie e tessuti (Lemal et al., 2023)..

Tra i geni maggiormente studiati va ricordato il gene responsabile del cosiddetto fenotipo “SLICK” (in italiano liscio) (LittleJohn et al, 2014) caratterizzato dalla presenza di un mantello con il pelo molto corto. Il fenotipo SLICK è determinato da una della serie di mutazioni evidenziate nel gene del recettore della prolattina, che si trova sul cromosoma bovino 20. Tra le diverse azioni svolte dalla prolattina, va ricordata quella di inibizione della crescita dei peli. Le mutazioni SLICK, originariamente descritte in razze bovine caraibiche, sono anche oggetto di programmi di incrocio per la loro introduzione nelle razze altamente produttive. Holstein con fenotipo SLICK hanno mostrato superiori capacità di termoregolazione e minore depressione della produzione di latte durante il periodo estivo rispetto agli animali con fenotipo normale (Dikmen et al., 2014). Studi recenti di genomica funzionale hanno dimostrato che la mutazione SLICK determina anche una modifica dell’attività delle ghiandole sudoripare (Sosa et al., 2022).

Epigenetica e stress da caldo

L’espressione dei geni può essere modificata in risposta a variazioni ambientali da meccanismi di tipo epigenetico. Nei primi stadi di sviluppo dei mammiferi avvengono delle vere e proprie ondate di riprogrammazione epigenetica, in particolare a livello di cellule germinali primordiali e nelle prime fasi di vita dell’embrione (Bellver-Sanchis et al., 2021), che possono essere influenzate da eventi stressori quali ad esempio lo stress da caldo. Se tale condizione si verifica quando l’animale è in gravidanza, si avranno effetti negativi non solo sull’animale direttamente esposto, ma anche sulla sua progenie (Ouellet et al., 2021). Studi sui bovini da latte hanno evidenziato come le vacche concepite in estate siano meno produttive e longeve di quelle concepite in inverno (Pinedo e De Vries, 2017). Tali effetti possono verificarsi anche nelle generazioni successive: nipoti di bovine soggette a stress da caldo nella fase finale di gravidanza presentano peggiori performance produttive e longevità rispetto alle loro contemporanee le cui nonne non avevano subito lo stress termico (Laporta et al., 2020). Alcuni recenti studi transgenerazionali hanno evidenziato la trasmissione dell’effetto epigenetico dopo 4 generazioni. Il rationale del modello transgenerazionale è riportato nella figura 1: lo stress da caldo subito dalle bisnonne (F_0) influenza direttamente tre generazioni (F_0 , F_1 , F_2). Se si riscontrano effetti anche nella quarta generazione (F_3) non direttamente esposta, essi sono presumibilmente dovuti alla trasmissione di marker epigenetici generati durante la gravidanza delle F_0 . Tale fenomeno è noto come eredità epigenetica transgenerazionale, un meccanismo di trasmissione della variabilità fenotipica che influenza la struttura della popolazione e ne influenza l’evoluzione. Studi condotti su bovine Holstein israeliane (Weller et al., 2021) e Pezzate Rossa italiane (Macciotta et al., 2023) hanno evidenziato che le bisnipoti di bovine che hanno avuto la parte finale di gravidanza in estate e autunno avevano prestazioni produttive inferiori rispetto alle vacche loro contemporanee le cui bisnonne hanno avuto la parte finale di gravidanza in inverno e primavera.



F₀ -Bisnonne che subiscono o stress da caldo durante le gravidanze



F₁ -Nonne che subiscono l'effetto dello stress da caldo come embrioni in utero delle F₀



F₂ -Madri, che subiscono l'effetto dello stress da caldo come cellule germinali primordiali negli embrioni delle madri F₁



F₃ – Figlie che non subiscono alcun effetto diretto dello stress da caldo subito dalle loro bisnonne F₀

Figura 7 – La logica del modello transgenerazionale.

Conclusioni

Negli ultimi anni la ricerca in campo genetico sia vegetale che animale si è concentrata sullo studio dei meccanismi di risposta allo stress da caldo, per rispondere alle sfide dei cambiamenti climatici. La disponibilità di dati provenienti dalle diverse discipline “omiche” sta fornendo un prezioso contributo alla comprensione di tali meccanismi, come evidenziato dal caso studio illustrato sul pomodoro e dalle attività svolte in campo zootecnico principalmente sui bovini. Tutto ciò avrà prevedibilmente un impatto negli anni a venire sulla selezione di nuovi genotipi con performance superiori per tolleranza dello stress da caldo.

Bibliografia

- Acin-Albiac M., Filannino P., Coda R., Rizzello C.G., Gobbetti M., Di Cagno R. 2021. How water-soluble saccharides drive the metabolism of lactic acid bacteria during fermentation of brewers' spent grain. *Microbial Biotechnology*, 13846
- Alsamir, M., Mahmood, T., Trethowan, R., and Ahmad, N. (2021). An overview of heat stress in tomato (*Solanum lycopersicum* L.). *Saudi J. Biol. Sci.* 28 (3), 1654–1663. doi: 10.1016/j.sjbs.2020.11.088
- Abdul-Baki, A.A., Stommel, J.R., 1995. Pollen Viability and Fruit Set of Tomato Genotypes under Optimum and High-temperature Regimes. *HortScience* 30
- Agarwal, P. K., Agarwal, P., Reddy, M. K., and Sopory, S. K. (2006). Role of DREB transcription factors in abiotic and biotic stress tolerance in plants. *Plant Cell Rep.* 25, 1263–1274. doi: 10.1007/s00299-006-0204-8doi:10.1007/s00299-006-0204-8
- Arce, D. P., De Las Rivas, J., Pratta, G. R. (2020). Interactomic analysis of the sHSP family during tomato fruit ripening. *Plant Gene* 21, 100208. doi: 10.1016/j.plgene.2019.100208

- Ayenan, M. A. T., Danquah, A., Hanson, P., Ampomah-Dwamena, C., Sodedji, F. A.K., Asante, I. K., et al. (2019). Accelerating breeding for heat tolerance in tomato (*Solanum lycopersicum* L.): an integrated approach. *Agronomy* 9 (11), 720. doi: 10.3390/agronomy9110720
- Bellver-Sanchis, A., Pallàs, M., and Griñán-Ferré, C. (2021). The contribution of epigenetic inheritance processes on age-related cognitive decline and Alzheimer's Disease. *Epigenomes*, 5(2):15.
- Bernabucci, U., Biffani, S., Buggiotti, L., Vitali, A., Lacetera, N., and Nardone, A. 2014. The effects of heat stress in Italian Holstein dairy cattle. *J. Dairy Sci.* 97:471-486.
- Choudhury, F. K., Rivero, R. M., Blumwald, E., and Mittler, R. (2017). Reactive oxygen species, abiotic stress and stress combination. *Plant J.* 90 (5), 856–867. doi: 10.1111/tpj.13299
- Dikmen, S., Cole, J.B., Null, D.J., and Hansen, P. J. (2012). Heritability of rectal temperature and genetic correlations with production and reproduction traits in dairy cattle. *J. Dairy Sci.* 95:3401–3405.
- Dikmen, S., Khan, F.A., Huson, H.J., Sonstegard, T.S., Moss, J.I., Dahl, G.E., and Hansen, P.J. (2014). The *SLICK* hair locus derived from Senepol cattle confers thermotolerance to intensively managed lactating Holstein cows. *J. Dairy Sci.* 97 :5508–5520
- Giri, A., Heckathorn, S., Mishra, S., Krause, C., 2017. Heat Stress Decreases Levels of Nutrient-Uptake and-Assimilation Proteins in Tomato Roots. *Plants*, 6, doi:10.3390/plants6010006
- Gonzalo, M. J., Li, Y. C., Chen, K. Y., Gil, D., Montoro, T., Nájera, I., ... & Monforte, A. J. (2020). Genetic control of reproductive traits in tomatoes under high temperature. *Frontiers in Plant Science*, 11, 326.
- Guo, M., Liu, J.-H., Ma, X., Luo, D.-X., Gong, Z.-H., and Lu, M.-H. (2016). The plant heat stress transcription factors (HSFs): structure, regulation, and function in response to abiotic stresses. *Front. Plant Sci.* 7, 114. doi: 10.3389/fpls.2016.00114
- Graci, S., Ruggieri, V., Francesca, S., Rigano, M. M., & Barone, A. (2023). Genomic insights into the origin of a thermotolerant tomato line and identification of candidate genes for heat stress. *Genes*, 14(3), 535.
- Graci, S., & Barone, A. (2024). Tomato plant response to heat stress: a focus on candidate genes for yield-related traits. *Frontiers in Plant Science*, 14, 1245661.
- Haider, S., Raza, A., Iqbal, J., Shaukat, M., and Mahmood, T. (2022). Analyzing the regulatory role of heat shock transcription factors in plant heat stress tolerance: A brief appraisal. *Mol. Biol. Rep.* 49 (6), 5771–5785. doi: 10.1007/s11033-022-07190-x
- Huang, L.-Z., Zhou, M., Ding, Y.-F., and Zhu, C. (2022). Gene networks involved in plant heat stress response and tolerance. *Int. J. Mol. Sci.* 23 (19), 11970. doi: 10.3390/ijms231911970
- Keller, M., Hu, Y., Mesihovic, A., Fragkostefanakis, S., Schleiff, E., and Simm, S. (2017). Alternative splicing in tomato pollen in response to heat stress. *DNA Res.* 24, 205–217. doi: 10.1093/dnares/dsw051
- Khan, S., Jabeen, R., Deeba, F., Waheed, U., Khanum, P., Iqbal, N. (2021). Heat shock proteins: classification, functions and expressions in plants during environmental stresses. *J. Bioresource Manage.* 8 (2), 9. doi: 10.35691/JBM.1202.0183
- Laporta, J., Ferreira, F.C., Ouellet, V., Dado-Senn, B., Almeida, A.K., De Vries, A., and Dahl, G.E. (2020). Late-gestation heat stress impairs daughter and granddaughter lifetime performance. *J. Dairy Sci.* 103:7555-7568.
- Lemal, P., May, K., König, S., Schroyen, M., and Gengler, N. (2023). Invited review: From heat stress to disease—Immune response and candidate genes involved in cattle thermotolerance. *J. Dairy Sci.* 106:4471–4488
- Li, H., Ahammed, G. J., Zhou, G., Xia, X., Zhou, J., Shi, K., et al. (2016). Unraveling main limiting sites of photosynthesis under below- and above-ground heat stress in cucumber and the alleviatory role of luffa rootstock. *Front. Plant Sci.* 7:746. doi: 10.3389/fpls.2016.00746
- Littlejohn, M.D., Henty, K.M., Tiplady, K., Johnson, T., Harland, C., Lopdell, T., Sherlock, R.G., Li, W., Lukefahr S.D., Shanks, B.C., Garrick, D.J., Snell, R.G., Spelman, R.J., Davis, S.R. (2014). *Nat Commun.* 18;5:5861.
- Luo, H., Brito, L.F., Li, X., Su, G., Dou, J., Xu, W., Yan, X., Zhang, H., Guo, G., Liu, L., and Wang, Y. (2021). Genetic parameters for rectal temperature, respiration rate, and drooling score in Holstein cattle and their relationships with various fertility, production, body conformation, and health traits. *J. Dairy Sci.* 104:4390–4403.
- Macciotta, N.P.P., Biffani, S., Bernabucci, U., Lacetera, N., Vitali, A., Ajmone-Marsan, P., and Nardone, A.. (2017). Derivation and genome-wide association study of a principal component-based measure of heat tolerance in dairy cattle. *J. Dairy Sci.* 100:4683–4697.
- Macciotta, N.P.P., Dimauro, C., Degano, L., Vicario, D., and Cesarani, A. (2023). A transgenerational study on the effect of great-granddam birth month on granddaughter EBV for production traits in Italian Simmental cattle. *J. Dairy Sci.* 106:2588-2597.
- McWhorter, T.M, Sargolzaei, M., Sattler, C.G., Utt, M.D., Tsuruta, S., Misztal, I., and Lourenco, D. 2023. Single-step genomic predictions for heat tolerance of production yields in US Holsteins and Jerseys. *J. Dairy Sci.* 106:7861-7879.
- Medina, E., Kim, S.-H., Yun, M., and Choi, W.-G. (2021). Recapitulation of the function and role of ROS generated in response to heat stress in plants. *Plants* 10 (2),371. doi: 10.3390/plants10020371
- Nguyen, T.T.T., Bowman, P.J., Haile-Mariam, M., Pryce, J.E., and Hayes, B.J. (2016). Genomic selection for tolerance to heat stress in Australian dairy cattle. *J. Dairy Sci.* 99:2849–2862.
- Nievola, C. C., Carvalho, C. P., Carvalho, V., and Rodrigues, E. (2017). Rapid responses of plants to temperature changes. *Temperature* 4 (4), 371–405. doi: 10.1080/23328940.2017.1377812
- Ouellet, V., Boucher, A., Dahl, G.E., and Laporta, J. (2021). Consequences of maternal heat stress at different stages of embryonic and fetal development on dairy cows' progeny. *Anim. Front.* 11:48-56.
- Pan, C., Zhang, H., Ma, Q., Fan, F., Fu, R., Ahammed, G. J., et al. (2019). Role of ethylene biosynthesis and signaling in elevated CO₂-induced heat stress response in tomato. *Planta* 250, 563–572. doi: 10.1007/s00425-019-03192-5
- Pinedo, P. J., and De Vries A. (2017). Season of conception is associated with future survival, fertility, and milk yield of Holstein cows. *J. Dairy Sci.* 100:6631-6639.
- Porcar-Castell, A., Tyystjarvi, E., Atherton, J., van der Tol, C., Flexas, J., Pfundel, E. E., et al. (2014). Linking chlorophyll a fluorescence to photosynthesis for remote sensing applications: mechanisms and challenges. *J. Exp. Bot.* 65, 4065– 4095. doi: 10.1093/jxb/eru191
- Qu, A.-L., Ding, Y.-F., Jiang, Q., and Zhu, C. (2013). Molecular mechanisms of the plant heat stress response. *Biochem. Biophys. Res. Commun.* 432 (2), 203–207. doi: 10.1016/j.bbrc.2013.01.104
- Raja, M. M., Vijayalakshmi, G., Naik, M. L., Basha, P. O., Sergeant, K., Hausman, J. F., et al. (2019). Pollen development and function under heat stress: from effects to responses. *Acta Physiologica Plantarum* 41, 1–20. doi: 10.1007/s11738-019-2835-8
- Ruggieri, V., Francesc, G., Sacco, A., D'Alessandro, A., Rigano, M. M., Parisi, M., ... & Barone, A. (2014). An association mapping approach to identify favourable alleles for tomato fruit quality breeding. *BMC plant biology*, 14, 1-15.

- Ruggieri, V., Calafiore, R., Schettini, C., Rigano, M. M., Olivieri, F., Frusciante, L., & Barone, A. (2019). Exploiting genetic and genomic resources to enhance heat-tolerance in tomatoes. *Agronomy*, 9(1).
- Sarlo Davila, K.M., Hamblen, H., Hansen, P.J., Dikmen, S., Oltenacu, P.A., and Mateescu, R.G. (2019). Genetic parameters for hair characteristics and core body temperature in a multibreed Brahman–Angus herd. *J. Anim. Sci.* 2019.97:3246–3252.
- Sato, S., Kamiyama, M., Iwata, T., Makita, N., Furukawa, H., Ikeda, H., 2006. Moderate increase of mean daily temperature adversely affects fruit set of *Lycopersicon esculentum* by disrupting specific physiological processes in male reproductive development. *Ann. Bot.*, 97:731.
- Segnalini, M., Nardone, A., Bernabucci, U., Vitali, A., Ronchi, B., and Lacetera, N. (2011). Dynamics of the temperature-humidity index in the Mediterranean basin. *Int. J. Biometeorol.* 55:253–263.
- Shen, G., Sun, W., Chen, Z., Shi, L., Hong, J., & Shi, J. (2022). Plant GDSL esterases/lipases: evolutionary, physiological and molecular functions in plant development. *Plants*, 11(4), 468.
- Sosa, F., Carmickle, A.T., Oliveira, L.J., Sagheer, M., Saleem, M., Yu, F.H., Altman, M.D., Dikmen, S., Denicol, A.C., Sonstegard, T.S., Larson, C.C., and Hansen, P.J. 2022. Effects of the bovine SLICK1 mutation in PRLR on sweat gland area, FOXA1 abundance, and global gene expression in skin. *J. Dairy Sci.* 105:9206–9215.
- Wang, Y., Gai, W., Yuan, L., Shang, L., Li, F., Gong, Z., et al. (2022). Heat-inducible SIWRKY3 confers thermotolerance by activating the SGRXS1 gene cluster in tomato. *Hortic. Plant J.* doi: 10.1016/j.hpj.2022.12.00
- Weller, J.I., Ezra, E., and Gershoni, M. (2021). Broad phenotypic impact of the effects of transgenerational heat stress in dairy cattle: a study of four consecutive generations. *Genet. Sel. Evol.* 53:1-12.
- Wen J., Jiang F., Weng Y., Sun M., Shi X., Zhou Y., Yu L., Wu Z. (2019) - Identification of heat-tolerance QTLs and high-temperature stress-responsive genes through conventional QTL mapping, QTL-seq and RNA-seq in tomato. *BMC Plant Biology* (2019) 19:398
- Yan, K., Chen, P., Shao, H., Shao, C., Zhao, S., and Brestic, M. (2013). Dissection of photosynthetic electron transport process in sweet sorghum under heat stress. *PLoS One* 8:e62100. doi: 10.1371/journal.pone.0062100
- Yoshioka, M., Uchida, S., Mori, H., Komayama, K., Ohira, S., Morita, N., and et al. (2006). Quality control of photosystem II. Cleavage of reaction center D1 protein in spinach thylakoids by FtsH protease under moderate heat stress. *J. Biol. Chem.* 281, 21660–21669. doi: 10.1074/jbc.M602896200
- Zinn, K.E., Tunc-Ozdemir, M., Harper, J.F., 2010. Temperature stress and plant sexual reproduction: uncovering the weakest links. *J. Exp. Bot.*, 61: 1959.

Smart agriculture per l'adattamento ai cambiamenti climatici

Tarolli P.¹

¹TESAF - Università degli Studi di Padova

Riassunto

I cambiamenti climatici rappresentano una delle più grandi sfide del nostro secolo. Eventi meteo estremi, come siccità prolungate, piogge intense e ondate di calore, stanno diventando sempre più frequenti, con impatti significativi sulla produzione agricola e sulla sicurezza alimentare. Alcune regioni sono più vulnerabili rispetto ad altre poiché situate in un contesto idro-morfologico più fragile e maggiormente esposto agli effetti del cambiamento climatico, come ad esempio l'agricoltura costiera o quella eroica. È necessario adottare strategie di adattamento e mitigazione al fine di preservare il patrimonio culturale di queste aree. Le tecnologie innovative come i *big data*, i satelliti, i sensori e l'intelligenza artificiale (IA) possono contribuire in modo significativo al monitoraggio, previsione e mitigazione degli effetti dei cambiamenti climatici. Obiettivo di questo lavoro è presentare una sintesi delle possibili applicazioni in questi contesti e indicare alcune prospettive future.

Abstract

Climate change is one of the greatest challenges of our century. Extreme events, such as prolonged droughts, intense rainfall and heat waves, are becoming more frequent, significantly impacting agricultural productivity and food security. Some regions are more vulnerable than others because they are located in a more fragile hydro-morphological context and exposed to the effects of climate change, such as coastal or heroic agriculture. There is an urgent need to adopt adaptation and mitigation strategies to preserve the cultural heritage of these areas. Innovative technologies such as big data, satellites, sensors and artificial intelligence (AI) can significantly contribute to monitoring, predicting and mitigating the effects of climate change. This work aims to synthesize the possible applications in these contexts and indicate future perspectives.

Keywords: *climate change, big data, satellite, artificial intelligence, smart agriculture*

Introduzione

Il cambiamento climatico è diventato uno dei principali problemi globali, influenzando profondamente diversi settori, tra cui l'agricoltura. Quest'ultima è particolarmente vulnerabile alle variazioni climatiche, poiché dipende direttamente da fattori naturali come la temperatura, le precipitazioni e la fertilità dei suoli. Il *Copernicus Climate Change Service (C3S)*, finanziato dalla Commissione Europea, ha confermato che il 2024 è stato l'anno più caldo mai registrato a livello globale e il primo anno solare in cui la temperatura media globale ha superato di 1,5°C i livelli della media preindustriale del periodo 1850-1900. Secondo l'*European Centre for Medium-Range Weather Forecasts Reanalysis v5 (ERA5)*, la temperatura media globale del 2024 è stata di 0,72 °C superiore alla media 1991-2020 e di 0,12 °C superiore al 2023, il precedente anno più caldo mai registrato. Fatto ancora più allarmante e che denota la progressiva accelerazione del processo di riscaldamento del pianeta è che ognuno degli ultimi 10 anni (2015-2024) rientra tra i più caldi mai registrati. Il 2024 ha fatto inoltre registrare il nuovo record per la temperatura media giornaliera globale raggiungendo i 17,16 °C il 22 luglio 2024. Per quanto riguarda il Mediterraneo e l'Italia, gli ultimi anni sono stati caratterizzati da

una lunga serie di eventi drammatici. La siccità ha impattato severamente per più di un anno sull'agricoltura del Nord Italia (2022-2023), con la manifestazione di fenomeni come l'intrusione del cuneo salino nell'area del Delta del Po (Ghirardelli *et al.*, 2025), e poi sulla Sicilia (dai primi mesi del 2024). Nel 2023 le alluvioni hanno messo in crisi intere filiere agroalimentari (es. Emilia-Romagna, dove nelle prime due settimane di maggio in soli due eventi sono caduti circa il 50% della pioggia che usualmente cade in un anno). Tra il 4 ed il 12 settembre il ciclone tropicale mediterraneo *Daniel* ha interessato vaste aree della Grecia dove nella regione della Tessaglia sono caduti quasi 1000 mm di pioggia e poi in Libia, qui con danni ingenti a infrastrutture e dove risultano disperse più di 11,000 persone (Qiu *et al.*, 2023). Nell'estate 2023 le temperature hanno superato per più giorni consecutivi i 40 °C in Sicilia e grandinate estreme si sono abbattute nel Nord Italia, che risulta la regione in Europa dove gli eventi con grandine di grossa dimensione si manifestano con più frequenza⁴. Purtroppo, questi fenomeni saranno sempre più frequenti ed estremi e impatteranno in modo drammatico sull'agricoltura. Un recente articolo pubblicato su *Nature Reviews Earth and Environment* indica che il 90% delle aree viticole di pianura e costiere nell'area mediterranea sarà minacciato entro la fine del secolo a causa della maggiore frequenza di siccità e ondate di calore (van Leeuwen *et al.*, 2024). L'aumento delle temperature, ad esempio, può determinare variazioni nei periodi di crescita delle colture e influenzare negativamente i raccolti. Parallelamente, l'intensificazione degli eventi meteorologici estremi, come precipitazioni intense e alluvioni lampo, rappresenta una minaccia diretta per le infrastrutture agricole e per le risorse naturali su cui si basa la produzione alimentare. A queste dinamiche si aggiunge la minaccia rappresentata dall'espansione di parassiti e malattie, la cui dinamica è influenzata anche dal riscaldamento globale e dalle alterazioni degli ecosistemi. Le implicazioni del cambiamento climatico sull'agricoltura non si limitano però agli aspetti ecologici e produttivi, ma si estendono anche alle dimensioni economiche e sociali. Gli agricoltori, specialmente quelli nei Paesi in via di sviluppo, oppure coloro che devono operare in contesti idro-morfologici estremi o più sensibili al cambiamento climatico (es. agricoltura eroica, agricoltura costiera o insulare; Figura 1 e Figura 2) si trovano a fronteggiare crescenti incertezze economiche e instabilità derivanti dalla variabilità climatica, che influenzano i mercati agricoli, i costi di produzione e la disponibilità di risorse.



⁴ ESSL, European Severe Weather Database: www.eswd.eu.

Figura 1. Viticoltura eroica: terrazzamenti nelle Cinque Terre, Liguria



Figura 2. Agricoltura costiera: risaie nel Delta del Mekong, Vietnam

Questi scenari richiedono una profonda trasformazione e adattamento delle pratiche agricole, integrando approcci tecnologici e sostenibili per garantire la sicurezza alimentare. Tra le possibili soluzioni emergono l'adozione di pratiche agricole sostenibili finalizzate ad un uso efficiente delle risorse idriche, meccanizzazione leggera, minima lavorazione del suolo e le soluzioni *nature-based* (Figura 3), le quali possono mitigare un processo, tutelando al tempo stesso gli ecosistemi (Tarolli *et al.*, 2024).



Figura 3. Strategie di mitigazione ed adattamento

Tuttavia, è soprattutto il progressivo sviluppo di tecnologie innovative che potrebbe contribuire a migliorare la resilienza dei sistemi agricoli. L'impiego di colture resistenti alle avversità climatiche unito all'impiego di sistemi *smart* per una migliore gestione delle risorse idriche potrebbe rendere l'agricoltura più resiliente al cambiamento climatico. I sensori remoti, l'impiego dei *big data* e l'intelligenza artificiale (IA), stanno già portando ad un cambio di atteggiamento nel modo di fare agricoltura. Strumenti come i satelliti e i droni multispettrali

consentono il monitoraggio continuo di variabili critiche, come l'umidità del suolo, la salinità e gli indici di vigoria della vegetazione. Questi dati, combinati con tecniche di modellistica avanzata, permettono di sviluppare sistemi di allerta per eventi estremi, come la siccità agricola. L'IA, in particolare, rappresenta un elemento chiave per supportare decisioni complesse, dalla gestione delle risorse idriche alla pianificazione colturale. Algoritmi di *machine learning* e *deep learning* possono analizzare dati meteorologici, pedologici e agronomici per ottimizzare l'uso delle risorse idriche e minimizzare ad esempio l'impatto di una siccità particolarmente severa.

Telerilevamento, big data, sensori

L'impiego di satelliti, droni e dei dati da essi derivati sta rivoluzionando il settore agricolo. I satelliti, grazie alla loro capacità di monitorare vaste aree geografiche, fornendo immagini e dati aggiornati, con la possibilità di rilievi di uno stesso punto dopo solo uno o più giorni, permettono agli agricoltori di prendere decisioni supportate da una solida base di analisi. Ad esempio, l'uso di immagini multispettrali e iperspettrali consente di analizzare la salute delle colture, individuando precocemente problemi come carenze nutrizionali, infestazioni di parassiti o stress idrico. Questi strumenti permettono di identificare anomalie che non sarebbero visibili a occhio nudo, consentendo interventi mirati che riducono le perdite e migliorano la produttività. Il telerilevamento è inoltre fondamentale per la gestione delle risorse idriche, una delle sfide più urgenti in un contesto di cambiamenti climatici. Attraverso il monitoraggio dell'umidità del suolo e la rilevazione dello stress idrico delle piante, gli agricoltori possono ottimizzare l'irrigazione, riducendo lo spreco d'acqua e garantendo una distribuzione efficiente delle risorse. Oltre all'acqua, il telerilevamento aiuta anche nella gestione dei nutrienti del suolo. Attraverso l'analisi delle variazioni nella composizione del terreno, è possibile determinare le aree che necessitano di fertilizzanti, evitando applicazioni eccessive che possono causare danni ambientali come l'eutrofizzazione delle acque.

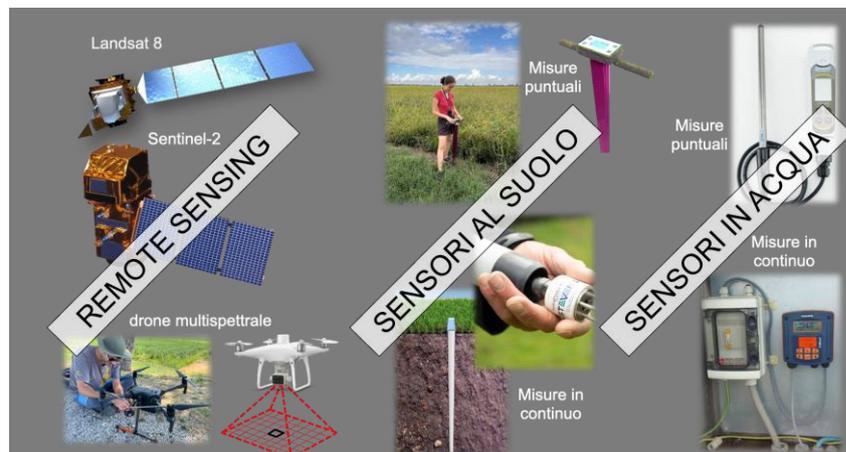


Figura 4. Sensori remoti ed a terra per il monitoraggio

I satelliti e i droni, attraverso la loro capacità di monitorare la diffusione di queste minacce, offrono un vantaggio significativo nella gestione delle emergenze fitosanitarie. Le immagini rilevate possono infatti identificare aree colpite da malattie o infestazioni, consentendo interventi localizzati che riducono la necessità di trattamenti chimici su larga scala. Questo approccio non solo tutela la salute delle colture, ma contribuisce anche a proteggere la biodiversità e a ridurre l'inquinamento ambientale. Le tecnologie satellitari utilizzate in

agricoltura includono sia piattaforme pubbliche che private. Programmi come Copernicus dell'Agenzia Spaziale Europea e Landsat della NASA/USGS forniscono dati gratuiti e accessibili a chiunque, mentre aziende private offrono immagini ad alta risoluzione che possono essere utilizzate per applicazioni specifiche. L'integrazione di questi dati con altre tecnologie (Figura 4), come i sensori a terra e i droni, può ulteriormente migliorare l'analisi di processi fisici e loro interazione con le colture, anche nell'ottica di gestione delle emergenze con segnali di allerta. Nonostante i numerosi vantaggi, l'adozione diffusa dei dati satellitari in agricoltura presenta ancora alcune sfide. Tra queste, la necessità di formare gli agricoltori all'uso di queste tecnologie e di garantire l'accessibilità dei dati anche nelle regioni meno sviluppate. Inoltre, la gestione e l'analisi di grandi quantità di dati richiedono infrastrutture e competenze avanzate, che non sono sempre disponibili in tutti i contesti. Con il continuo progresso tecnologico e l'aumento della disponibilità di dati digitali, il potenziale di queste applicazioni è destinato a crescere. Nella Figura 5 viene mostrato un modello digitale del terreno (DTM) ad altissima risoluzione (20 cm di pixel) ricavato da rilievo fotogrammetrico *Structure from Motion* con drone. Il DTM è servito per simulare, con un modello idrologico, il deflusso in area terrazzata durante un evento estremo di pioggia (Pijl *et al.*, 2021).

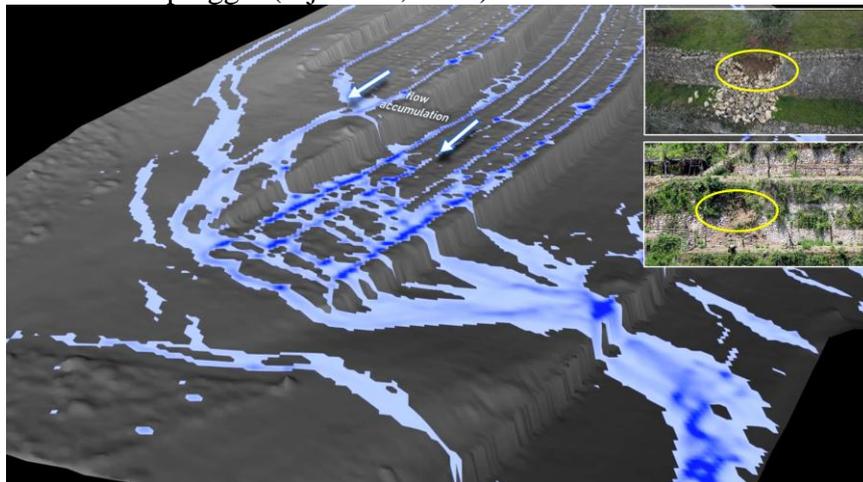


Figura 5. DTM ad alta risoluzione e modellistica idrologica impiegati per simulare il deflusso in area terrazzata durante precipitazioni intense.

Intelligenza Artificiale (IA)

La disponibilità dei *big data* ad una risoluzione spazio-temporale impensabile rispetto al passato, unita al miglioramento delle performance dei sistemi di calcolo, ha reso l'applicazione degli algoritmi di autoapprendimento sempre più diffusa e raffinata. In questo modo l'IA sta progressivamente entrando in vari settori della nostra società. Tralasciando il dibattito inerente alla sicurezza e privacy, un aspetto senz'altro positivo dell'applicazione dell'IA lo vedremo nella medicina e nell'agricoltura, dove la diagnosi precoce di possibili malattie o problematiche che potrebbero comportare la perdita di un raccolto potrebbe portare grandi benefici. Un recente report del parlamento europeo⁵ pubblicato nel 2023 presenta una sintesi sulle applicazioni, i rischi e l'impatto dell'IA nel settore agro-alimentare. Fra le applicazioni più interessanti dell'IA in agricoltura possiamo menzionare il monitoraggio delle

⁵ [https://www.europarl.europa.eu/stoa/en/document/EPRS_STU\(2023\)734711](https://www.europarl.europa.eu/stoa/en/document/EPRS_STU(2023)734711)

colture e diagnosi di malattie, la pianificazione delle rotazioni, la gestione efficiente dell'acqua, i sistemi di preallerta, l'agricoltura di precisione ed il miglioramento genetico. In aggiunta, anche per le previsioni meteorologiche, molto importanti per la pianificazione di operazioni come la semina, la raccolta e l'irrigazione, vedremo un progressivo miglioramento nell'accuratezza dei modelli; a questo proposito *Google DeepMind* sta lavorando ad un nuovo modello di IA per migliorare le previsioni meteorologiche⁶, offrendo previsioni più rapide e accurate fino a 15 giorni. Entrando più nel dettaglio, in questa sezione vengono descritte alcune delle applicazioni più interessanti:

- Monitoraggio delle colture e diagnosi delle malattie – L'IA può essere utilizzata per monitorare la salute delle colture e diagnosticare precocemente malattie o infestazioni. Sensori e droni equipaggiati con telecamere multispettrali raccolgono immagini delle coltivazioni, che vengono analizzate da algoritmi per identificare segni di stress idrico, carenze nutrizionali o presenza di parassiti. Questo approccio consente interventi tempestivi e mirati, riducendo l'uso di pesticidi e fertilizzanti e migliorando la produttività complessiva.
- Pianificazione delle colture ed agricoltura di precisione – Gli algoritmi di IA possono analizzare dati climatici, caratteristiche del suolo (tessitura, contenuto sostanza organica) e modelli di rotazione delle colture per suggerire agli agricoltori quali colture coltivare in base alle condizioni attuali e previste. Sulla base di queste informazioni un'azienda potrebbe optare per colture più resistenti alla siccità o al calore in regioni particolarmente vulnerabili. I sistemi di IA possono inoltre analizzare il fabbisogno di nutrienti di singole piante e applicare fertilizzanti solo dove necessario. Queste applicazioni non solo massimizzano i rendimenti e l'efficienza riducendo gli sprechi, ma riducono anche il rischio di perdita di un raccolto a causa di condizioni climatiche avverse, migliorando la qualità delle colture e minimizzando l'impatto ambientale.
- Gestione efficiente dell'acqua – Specifici applicativi dell'IA potrebbero ottimizzare l'uso delle risorse idriche attraverso sistemi di irrigazione intelligenti che utilizzano sensori del suolo, dati meteorologici e modelli predittivi per determinare quando e quanto irrigare.
- Sistemi di preallerta – L'IA può essere utilizzata per sviluppare sistemi di allarme che avvisano gli agricoltori di potenziali rischi climatici o biologici. Ad esempio, modelli predittivi possono identificare condizioni favorevoli per lo sviluppo di malattie o infestazioni di parassiti e inviare notifiche in tempo reale agli agricoltori. Questi avvertimenti tempestivi permettono di adottare misure preventive, riducendo al minimo i danni.
- Sviluppo di colture resistenti – Un'applicazione interessante dell'IA potrà riguardare il processo di selezione e miglioramento genetico delle colture per renderle più resistenti al cambiamento climatico. Gli algoritmi di apprendimento automatico possono analizzare grandi dataset genomici per identificare tratti genetici associati a resistenza alla siccità, salinità o temperature estreme. Questo consentirà di sviluppare varietà di piante più adatte alle condizioni climatiche future.
- Sostenibilità economica e cambiamento climatico – l'IA potrà essere impiegata per aiutare gli agricoltori a mitigare i rischi economici associati al cambiamento climatico, riducendo i costi e ad aumentare i rendimenti. Ad esempio, algoritmi di IA potrebbero

⁶ <https://deepmind.google/discover/blog/genecast-predicts-weather-and-the-risks-of-extreme-conditions-with-sota-accuracy/>

analizzare i dati di mercato per prevedere i prezzi delle colture, suggerire i momenti migliori per vendere e ottimizzare le decisioni finanziarie.

Nella Figura 6, viene illustrato un esempio di applicazione dell'IA per la gestione di un possibile sistema di preallerta per la siccità agricola. Maggiore sarà il dettaglio dei dati di input del modello, migliore sarà il risultato di previsione di condizioni particolarmente critiche per una coltura. Un primo prototipo di impiego dell'IA per lo sviluppo di un indice integrato per la quantificazione della siccità agricola è stato recentemente pubblicato da Xue *et al.* (2025) sulla rivista *Computers and Electronics in Agriculture*, dove è stata analizzata la siccità che ha colpito il Nord Italia nel 2022.

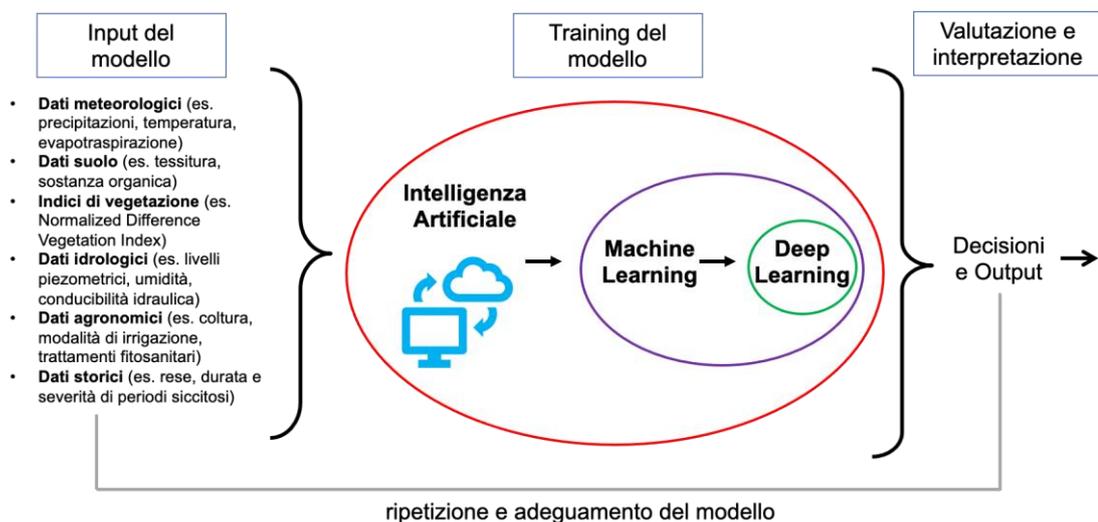


Figura 6. Esempio applicazione dell'IA per lo sviluppo di un sistema di preallerta per la gestione della siccità agricola

Mitigazione delle ondate di calore: non solo *big data* e IA

La gestione delle criticità in agricoltura dovute cambiamento climatico richiede un approccio integrato, dove, oltre a *big data* e IA, devono essere prese in considerazione anche soluzioni tecnico-strutturali che tuttavia possono alterare il paesaggio. Nello specifico, se da un lato gli strumenti per la gestione di determinate condizioni critiche dovute alla scarsità idrica sono disponibili, più problematica è la mitigazione degli impatti delle ondate di calore poiché di difficile gestione se non con interventi invasivi. Nel dettaglio possono essere prese in considerazione alcune soluzioni, che per la viticoltura trovano già impiego: agri-voltaico, teli coprenti e nebulizzazione di acqua. L'agri-voltaico, che combina agricoltura e produzione di energia solare, sta emergendo come una delle soluzioni più promettenti per proteggere le colture dal caldo. Installare pannelli solari sopra le viti crea una condizione di ombreggiamento che riduce l'esposizione diretta al sole, abbassando la temperatura e mitigando lo stress termico. L'ombreggiamento parziale può anche ridurre la perdita di acqua tramite evaporazione, ottimizzando così l'uso delle risorse idriche. Inoltre, i pannelli solari producono energia rinnovabile che può essere utilizzata per alimentare le operazioni agricole, come i sistemi di irrigazione e i sistemi di monitoraggio automatizzati. L'agri-voltaico, sebbene invasivo e impattante, consente di creare un ciclo virtuoso che rende le coltivazioni più resilienti e sostenibili. Più semplice è invece la soluzione con teli coprenti. Questi possono essere realizzati

in materiali traspiranti o riflettenti, riducono la temperatura sotto di essi, creando un microclima favorevole per le piante. I teli possono essere fissi o mobili, a seconda delle necessità. In viticoltura, il loro impiego è particolarmente utile per preservare la fotosintesi, senza danneggiare la salute delle piante o compromettere la qualità del raccolto. Una terza soluzione, meno invasiva delle due sopra descritte, tuttavia esigente in termini di impiego risorsa idrica, è la nebulizzazione dell'acqua, tecnica che prevede l'emissione di finissime gocce di acqua nell'aria per abbassare la temperatura circostante. Quando l'acqua evapora, sottrae calore all'ambiente, creando un effetto di raffreddamento che può essere particolarmente utile nelle ore più calde della giornata. In viticoltura questa tecnica è già applicata in varie parti del mondo (es. Napa Valley, California; Mendoza, Argentina) con risultati interessanti⁷. Sebbene efficace, questo sistema deve essere tuttavia gestito con attenzione per evitare sprechi di acqua. La nebulizzazione può essere integrata con sensori di umidità e temperatura per un controllo più preciso e per garantire che venga attivata solo quando necessario.

Conclusioni

Il cambiamento climatico sta ponendo sfide senza precedenti per l'uomo; l'agricoltura sarà tra i settori più a rischio. Il progresso tecnologico potrà dare una risposta efficace a queste sfide. Attraverso applicazioni che spaziano dalle previsioni meteorologiche alla gestione delle risorse, dal miglioramento genetico delle colture alla riduzione delle emissioni, l'IA può trasformare il settore agricolo rendendolo più sostenibile e resiliente ai cambiamenti climatici. Tuttavia, per sfruttare appieno il potenziale dell'IA, è essenziale investire in infrastrutture tecnologiche, formazione degli agricoltori e politiche di supporto. Con un approccio integrato e collaborativo, l'IA potrà contribuire in modo significativo a garantire la sicurezza alimentare globale in un mondo in rapida evoluzione.

Bibliografia

- Ghirardelli A., Straffelini E., Park E., D'Agostino V., Masin R., Tarolli P. (2025). Global impact of seawater intrusion on coastal agriculture. *Environmental Research Letters*, 20: 013005.
- Pijl A., Quarella E., Vogel T.A., D'Agostino V., Tarolli P. (2021). Remote sensing vs. field-based monitoring of agricultural terrace degradation. *International Soil and Water Conservation Research*, 9: 1–10.
- Qiu J., Zhao W., Brocca L., Tarolli P. (2023). Storm Daniel revealed the fragility of the Mediterranean region. *The Innovation Geoscience*, 1(3): 100036.
- Tarolli P., Luo J., Park E., Barcaccia G., Masin R. (2024). Soil salinization in agriculture: Mitigation and adaptation strategies combining nature-based solutions and bioengineering. *iScience*, 27: 108830.
- van Leeuwen C., Sgubin G., Bois B., Ollat N., Swingedouw D., Zito S., Gambetta G.A. (2024). Climate change impacts and adaptations of wine production. *Nature Reviews Earth & Environment*, 5: 258–275.
- Xue C., Ghirardelli A., Chen J., Tarolli P. (2024). Investigating agricultural drought in Northern Italy through explainable Machine Learning: Insights from the 2022 drought. *Computers and Electronics in Agriculture*, 227: 109572.

⁷ <https://magazine.wein.plus/news/efficient-spraying-with-water-helps-vines-survive-heat-waves-study-half-a-litre-per-day-is-enough>

Difesa delle colture nell'ottica del cambiamento climatico

Mugnai L.¹, Sacchetti P.¹, Torrini G.²

¹DAGRI - Università degli Studi di Firenze

²Centro di ricerca Difesa e Certificazione, Firenze - CREA

Riassunto

Il cambiamento climatico intensifica la frequenza di eventi meteorologici estremi tra cui ondate di caldo, siccità, forti acquazzoni, incendi, tempeste e grandinate che minacciano seriamente la sicurezza alimentare globale e i servizi ecosistemici. L'influenza di tali fenomeni su tutte le componenti dell'ecosistema si riflette anche sugli organismi nocivi, la risposta di difesa della pianta e la loro interazione. La gestione della difesa delle colture deve quindi attivarsi nella piena consapevolezza dell'importanza della prevenzione, con una maggiore attenzione al monitoraggio e allo sviluppo di sistemi di diagnosi rapida ed accurata che consentano di attuare tempestivamente misure di controllo e di limitare i danni. L'attenzione deve essere concentrata, inoltre, su un'ampia gamma di misure, dalla selezione di piante resistenti, a pratiche agricole sostenibili.

Keywords: *eventi estremi, gestione integrata, monitoraggio, nematodi, insetti, patogeni, prevenzione, prodotti fitosanitari*

Abstract

Climate change intensifies the frequency of extreme weather events, including heatwaves, droughts, heavy rainfall, wildfires, storms, and hailstorms, which seriously threaten global food security and ecosystem services. The impact of such phenomena on all components of the ecosystem also affects harmful organisms, plant defense responses, and their interactions. Crop protection management must therefore be activated with full awareness of the importance of prevention, with increased focus on monitoring and the development of early and accurate diagnostic systems that enable timely control measures and limit damage. Attention should also be directed toward a wide range of measures, from the selection of resistant plants to sustainable agricultural practices.

Keywords: *extreme events, integrated management, monitoring, nematodes, insects, pathogens, prevention*

Introduzione

I cambiamenti climatici sono sulla bocca di tutti – e in modo spesso drammatico - per i molteplici danni che causano a moltissimi livelli. Fra questi l'influenza sull'ecosistema e sulle interazioni fra le sue componenti porta a ricadute spesso imprevedibili, in molti aspetti delle coltivazioni agrarie. Sia i fenomeni cronici che quelli acuti, come gli eventi estremi sempre più frequenti, l'instabilità, la rapidità e la disformità dei cambiamenti, rendono molto complessa la messa a punto di processi di adattamento o l'adeguamento dei protocolli colturali, e in particolare anche dei protocolli e dei mezzi per la difesa. Oltre all'ovvia ricaduta sulle fisiopatie infatti (i danni direttamente causati dalle anomalie idriche e termiche), già vediamo come questi fenomeni impattino fortemente sull'insorgenza, incidenza e severità di avversità causate da agenti biotici: patogeni (procarioti e funghi in particolare, ma anche virus e viroidi) e fitofagi (insetti, acari, nematodi) (Gullino *et al.* 2022). Siamo quindi di fronte ad una sfida ancora più preoccupante in una fase in cui la riduzione dei prodotti fitosanitari disponibili coincide anche con una forte richiesta di riduzione nell'uso di questi mezzi di difesa.

Un cambiamento dei fattori ambientali che condizionano l'interazione fra l'ospite e il patogeno, anche se non immediatamente visibile, può determinare effetti economici e sociali

devastanti, come la storia ci ha dimostrato. Basta ad esempio pensare all'epidemia storica causata da un agente di marciume della patata, *Phytophthora infestans* in Irlanda, al recente insediamento di *Spodoptera frugiperda* in Africa (Zacarias, 2020), ma anche in maniera più locale ma esemplificativa, a problemi recenti e improvvisi della nostra viticoltura quali le infestazioni di cicalina africana in Sicilia, l'incontenibile peronospora del 2023, la feroce e improvvisa recrudescenza ed espansione di flavescenza dorata e del suo vettore, *Scaphoideus titanus*.

I cambiamenti climatici influenzano direttamente tutti gli elementi del triangolo della malattia o il ciclo biologico degli organismi nocivi, la fisiologia della pianta ospite, la loro interazione e, non ultimo anche se da poco considerato in tutta la sua rilevanza, il microbioma, una quarta componente di grande rilievo – sia a livello del suolo che della microflora endofitica (Lorenzini, 2021).

Nella review di Harvey *et al.* (2023) “*Scientists’ warning on climate change and insects*”, vengono sottolineati elementi che sono in realtà applicabili a tutte le interazioni tra organismo dannoso e pianta ospite: i cambiamenti gradualmente, a lungo termine, e gli eventi estremi impattano sugli areali di distribuzione, sulla velocità di sviluppo delle popolazioni di patogeni e parassiti, sul numero di generazioni di insetti o sul numero di cicli dei patogeni. La complessità degli effetti porta a risultati contrastanti tra specie diverse, portando anche ad un forte rischio di estinzione e quindi alla perdita di biodiversità. Drammatico, ad esempio, l'impatto del cambiamento climatico sui nematodi, che hanno visto una estrema espansione della loro distribuzione geografica. A causa del riscaldamento globale, infatti, alcuni nematodi galligeni (*Meloidogyne* spp.) sono passati da un habitat tipicamente tropicale a regioni temperate (Dutta *et al.*, 2012). Questo spostamento dei nematodi in nuove aree aumenta la minaccia per le colture locali, che non sono adattate a difendersi da questi nuovi parassiti

Inoltre, l'aumento della temperatura, l'alterazione delle precipitazioni e la crescente frequenza di eventi climatici estremi hanno un impatto significativo anche sulla dinamica delle popolazioni di nematodi fitoparassiti (Colagiero e Ciancio, 2012; Dutta e Phani, 2023) (Figura 1). I nematodi, infatti, possiedono in generale una vasta gamma di adattamenti strutturali e comportamentali per sopravvivere anche in condizioni climatiche estreme o a stress atmosferici imprevedibili (McSorley, 2003).

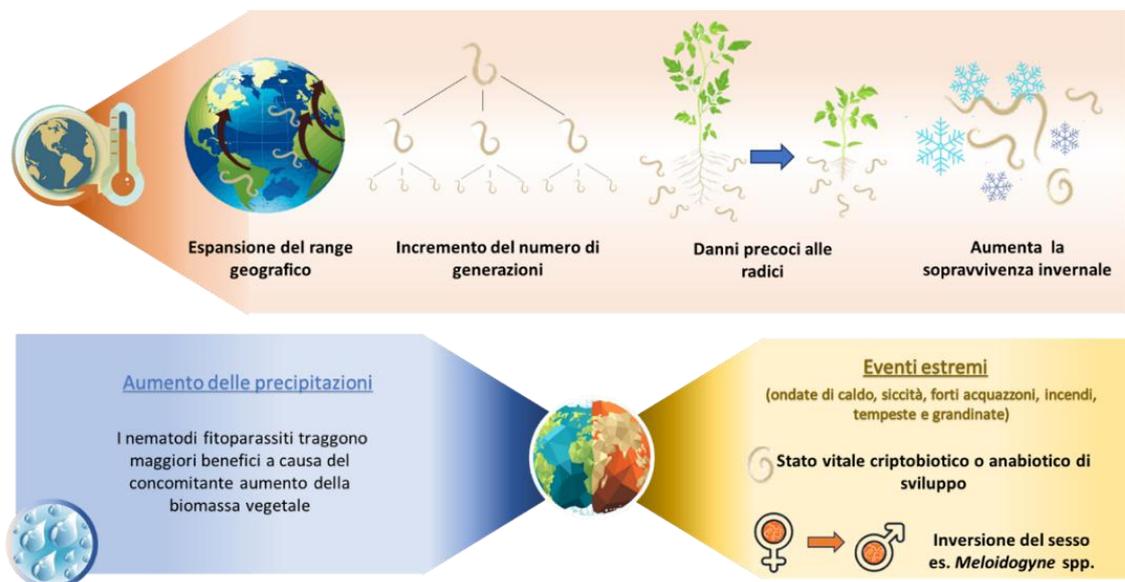


Figura 1. Rappresentazione delle possibili influenze che i cambiamenti climatici esercitano sui nematodi fitoparassiti

Un altro esempio rappresentativo degli effetti del cambiamento climatico sugli agenti nocivi è quello di un importante insetto fitofago, la mosca delle olive, *Bactrocera oleae* (Rossi). Fino agli anni '90 i testi di entomologia agraria indicavano le zone meridionali dell'Italia (le cosiddette zone pandacie) come quelle soggette ai danni più ingenti inferti dalla mosca, a causa del maggior numero di generazioni che questa può completare nei climi caldi (Tremblay, 1994). Invece, negli ultimi 15 anni, le alte temperature estive (superiori alle medie dei precedenti 50 anni), unite alla bassa umidità, hanno limitato l'attività della mosca riducendone la riproduzione e le infestazioni proprio in Italia meridionale. Effetti opposti sugli attacchi di *B. oleae* sono stati causati dal cambiamento climatico nelle regioni settentrionali. Peraltro, entrambe le conseguenze erano già state ipotizzate da alcuni studi basati su modelli di sviluppo della mosca delle olive e della sua pianta ospite (Gutierrez *et al.*, 2009; Ponti *et al.*, 2009; Ponti *et al.*, 2014).

In particolare, un modello previsionale impostato su dati meteo e sulla fisiologia, creato per simulare la fenologia, la crescita e le dinamiche di popolazione sia dell'insetto sia della pianta, è stato applicato a tre ipotetici scenari di riscaldamento climatico caratterizzati da una temperatura media giornaliera superiore di 1, 2 e 3 °C a quella osservata. Nel 2009 il modello ha previsto che in Italia l'areale dell'olivo si sarebbe espanso nelle zone settentrionali e ad altitudini maggiori sugli Appennini centrali dove il clima più freddo, allora non risultava essere idoneo alla coltura (Gutierrez *et al.*, 2009). Purtroppo, basta consultare i dati sulla superficie olivetata degli ultimi anni per valutare come tale previsione si sia già avverata (<http://dati.istat.it/>). In maniera analoga, gli scenari di riscaldamento climatico ipotizzati in questi studi prevedevano l'espansione dell'areale della mosca delle olive verso nord in molte regioni italiane, con un forte incremento degli attacchi di *B. oleae* in precise aree caratterizzate da condizioni di umidità più favorevoli, quali ad esempio quelle circostanti il lago di Garda (Gutierrez *et al.*, 2009). Anche in questo caso i cambiamenti previsti si sono già verificati, tanto che nel 2023, favoriti da frequenti precipitazioni estive, sono stati registrati alti livelli di infestazione delle olive in Veneto e Trentino (Mori, 2024), con addirittura una perdita del 30% delle olive nella zona del Garda (<https://www.qualivita.it/news/olio-raccolta-in-calo-del-30-a-causa-dei-cambiamenti-climatici/#toggle-id-1-closed>). In conclusione, il riscaldamento conseguente al cambiamento climatico determinerà un aumento delle popolazioni di *B. oleae* producendo effetti negativi sull'infestazione delle olive in tutto il bacino del Mediterraneo, soprattutto nelle aree con maggiore disponibilità idrica nel suolo, ovviamente con conseguenze gravi sulle rese e ricadute di tipo economico e sociali (Ponti *et al.*, 2014).

Le mutevolissime condizioni ambientali si combinano poi con la continua introduzione di organismi nocivi grazie all'ormai inarrestabile movimento di merci e persone. Gli organismi accidentalmente – ma frequentemente – introdotti, che spesso non rappresentavano un rischio nel loro ambiente naturale, talvolta trovano nel nuovo ambiente condizioni ideali per una rapida espansione. Proprio i cambiamenti indotti, a livello globale, da queste “rivoluzioni climatiche” (piogge abbondantissime e concentrate in pochi eventi, temperature medie innalzate in pochi anni, solo per fare due esempi eclatanti) amplificano il rischio che si creino condizioni favorevoli a vere e proprie epidemie – effetti diversi sulle popolazioni degli agenti nocivi e cambiamenti nella suscettibilità delle piante.

Anche per le malattie si evidenziano cambiamenti che devono costringere a rivalutare i nostri approcci alla difesa. Ad esempio, le piogge intense e continue del periodo primaverile del 2023 e 2024 hanno favorito gli attacchi della peronospora della vite a tal punto da mettere

in ginocchio la viticoltura in molte regioni d'Italia, con perdite fino al 100% in regioni in cui questa malattia era fino ad allora ritenuta un evento marginale. Ma uno degli esempi più significativi dell'impatto del cambiamento climatico riguarda *Aspergillus flavus*. Questo fungo, tipico delle zone tropicali e subtropicali, vanta diversi ospiti e tra i principali possiamo ricordare mais, cotone, frutta secca, soprattutto arachidi e pistacchi. L'interesse per questo fungo è focalizzato sulla sua capacità di produrre la sostanza naturale più tossica che si conosca, l'aflatossina. Si tratta di un debole parassita che raramente mostra sintomi visibili sulle colture colpite, che sono comunque pericolose per ingestione, se contaminate.

Questa problematica era sconosciuta in Italia fino al 2003 quando per la prima volta è stata riscontrata aflatossina nel latte, poi confermato come prodotto da vacche alimentate con mais contaminato. L'estate 2003, calda e priva di piogge, ben nota a chi si occupa di clima, ha favorito la diffusione di *A. flavus* e la produzione di aflatossina nel mais. La tossina presente negli alimenti, essendo soggetta a "carry over", ovvero passaggio attraverso l'animale, dal mais è arrivata al latte, con pesanti conseguenze sulla filiera (Piva *et al.*, 2006). Dal 2003, il problema è sempre presente, con manifestazioni sporadiche, in annate non troppo calde e secche, ma con impatto grave in quelle con condizioni più estreme. L'area destinata a mais si è fortemente ridotta negli ultimi anni in buona parte come conseguenza di questo effetto del cambiamento climatico. Il successo nella difesa da questo fungo è stato fino ad ora ottenuto solo con l'impiego di ceppi autoctoni non produttori di aflatossina che agiscono per esclusione competitiva. Di conseguenza, si è reso necessario selezionare anche in Italia un ceppo che ha poi dato origine ad un prodotto attualmente a disposizione degli agricoltori (Mauro *et al.*, 2015, 2018).

Come deve cambiare l'approccio alla difesa per fare fronte ai cambiamenti climatici?

Tutto questo ha effetti diretti sulla gestione della difesa ed obbliga ad un sempre maggiore impegno per l'individuazione e messa in atto di mezzi di PREVENZIONE, l'elaborazione di mezzi di MITIGAZIONE degli effetti sulle avversità biotiche, la messa in atto di processi di ADATTAMENTO a mutate o mutabili condizioni ambientali (Secretariat I.P.P.C. *et al.*, 2021).

Un grosso sforzo deve essere fatto per l'individuazione di Misure fitosanitarie condivise fra continenti diversi, di Protocolli standard internazionali e adeguate Misure di quarantena. A questo scopo progetti come EUPHRESCO III (<https://www.phrescoglobal.net/>), che mirano al coordinamento globale fitosanitario assumono un ruolo innovativo e fondamentale. Una maggiore attenzione e impegno nell'Analisi del rischio fitosanitario (*Pest risk analysis*) e nel coordinamento della sorveglianza fitosanitaria a livello globale sono infatti punti essenziali da raggiungere.



Figura 2. Alcuni dei principali aspetti della prevenzione e del controllo degli organismi nocivi verso le colture agrarie.

L'importanza della prevenzione

In questo quadro così complesso, così variabile e imprevedibile, per la difesa delle colture si deve fortemente rivalutare l'importanza della prevenzione, nel passato talvolta trascurata e su cui ancora molto deve essere fatto perché ne venga completamente accettato il concetto dagli agricoltori, che ancora – ma sempre meno – tendono “a rincorrere” le malattie con la speranza di approcci curativi.

Nella prevenzione un posto principe lo occupa la rivalutazione dell'impatto di adeguate tecniche colturali. L'uso del compost e la fertilizzazione organica, le rotazioni, l'eliminazione delle sorgenti di inoculo, l'irrigazione, la scelta dei tempi di semina possono avere un ruolo determinante nel ridurre le condizioni favorevoli alle infezioni o infestazioni. Esemplicativo a questo scopo quanto suggerito da Harvey *et al.* (2023) e riportato sommariamente nella Tabella 1. A tale proposito occorre ricordare che le caratteristiche climatiche e ambientali che danneggiano gli insetti possono in realtà costituire un ostacolo alla prevenzione delle avversità, quando gli insetti in questione sono agenti di controllo biologico.

Anche nel caso della gestione dei nematodi l'attenzione va quindi concentrata su un approccio integrato che parta dalla prevenzione, prevedendo ad esempio l'utilizzo di sementi e materiali di propagazione certificati che rappresentano uno strumento altamente efficace utilizzato per impedire ai nematodi fitoparassiti come agli altri organismi nocivi di espandere il proprio areale.

| Caratteristiche ambientali che danneggiano gli insetti | Caratteristiche ambientali che favoriscono gli insetti |
|---|---|
| Vegetazione ridotta e con scarsa biodiversità | Aumentare la complessità strutturale Vegetazione densa |
| Superfici sigillate e cementificazione (creano isole di calore) | Ridurre superfici sigillate |

| | |
|---|--|
| Suoli continuamente disturbati | Aumentare la naturale copertura del suolo |
| Mancanza di corpi idrici | Creare corpi idrici (semi-)permanenti |
| Ambiente ripulito e «ordinato» | Mantenere tutto l'anno piante spontanee autoctone Equilibrare la vegetazione erbacea, arbustiva e arborea |
| Regolare distribuzione di prodotti fitosanitari | Potenziare il controllo naturale dei fitofagi Effettuare diserbo manuale o ridurlo al minimo |
| Distribuzione di concimi | Mantenere lettiera e compost |

Tabella 1. Caratteristiche dell'ambiente che possono influenzare la presenza di insetti, in modo negativo o positivo (adattato da Harvey *et al.*, 2023). Gli elementi che vengono maggiormente influenzati da questi fattori sono la presenza di "rifugi", l'umidità, la disponibilità di nutrimento e l'assenza di fitofarmaci.

L'importanza del monitoraggio: consapevolezza e conoscenza dei problemi

Uno degli strumenti più efficaci nella prevenzione è senza dubbio il monitoraggio, o "surveillance", ovvero l'individuazione degli effetti dei cambiamenti climatici sulle popolazioni di patogeni o parassiti presenti o sulla loro proliferazione (Singh *et al.*, 2023). L'individuazione precoce dei problemi garantisce una efficacia enormemente maggiore di qualunque approccio successivo. Il monitoraggio si avvantaggia sempre di più delle nuove tecnologie – le mappe di vigore, l'uso di immagini termiche e iperspettrali, i rilievi digitalizzati e georiferiti, l'uso dell'intelligenza artificiale in varie forme, stanno diventando mezzi utilissimi ad esempio per individuare precocemente aree a rischio, dove concentrare osservazioni più approfondite. Ma – come spesso si dice – la macchina più completa e perfetta resta l'uomo e dunque il monitoraggio in campo, l'osservazione visiva, il contatto diretto che ci permette di valutare tanti aspetti contemporaneamente resta insostituibile. E questo è un elemento che in un quadro di imprevedibilità come quello descritto fino ad ora rimane una "tecnologia insuperabile" e da rivalutare profondamente, soprattutto alla luce della integrazione fra le tecnologie che, elaborando informazioni molto diverse come nel caso dei modelli previsionali e dei DSS, possono indicare le fasi o gli elementi di rischio, indirizzando il monitoraggio di campo in maniera molto più tempestiva e mirata – e dunque più efficace.

A questo scopo si stanno sviluppando anche approcci intermedi ma spesso di grande impatto, che combinano tecnologia e presenza attiva, in contatto con le manifestazioni delle avversità, come nel caso della cosiddetta "Citizen Science". Un esempio concreto di questa sinergia è la mobilitazione della comunità per segnalare, tramite App, la presenza in natura di insetti dannosi quali ad esempio lo scarabeide invasivo *Popillia japonica* con IPM App (<https://www.popillia.eu/blog/categories/citizen-science>).

L'importanza di una diagnosi rapida e tempestiva e della difesa mirata

Anche la diagnosi deve essere tempestiva, una volta individuato un nuovo elemento di rischio le misure corrette di contrasto possono essere messe a punto solo se conosciamo chi deve essere colpito e quando. Non solo dunque le sempre più precise tecniche per l'identificazione molecolare o immunologica dell'avversità ma anche la messa a punto di APP per smartphone che semplificano la diagnosi permettendo di eliminare eventuali nuovi focolai con la necessaria tempestività.

Per rendere più efficaci gli interventi sono poi sempre più utilizzati – e da promuovere ancora – i Sistemi di Supporto alle Decisioni (DSS), che in particolare tramite modelli meccanicistici che possono aiutarci a collegare dati climatici nuovi con il loro effetto sul parassita o il patogeno, ci permettono di migliorare l'efficacia della difesa con un minore impatto sull'ambiente (Battilani *et al.*, 2012; Caffarra *et al.*, 2012; Lessio e Alma, 2021; Talari *et al.*, 2022).

Prendendo di nuovo come esempio la mosca delle olive, lo studio degli effetti a breve termine delle variazioni climatiche sulle fluttuazioni delle infestazioni di *B. oleae* ha permesso di evidenziare come gli attacchi più elevati si verificano negli anni che seguono inverni più caldi. In particolare, l'infestazione a inizio stagione è influenzata dalla temperatura dell'inverno e della primavera precedenti mentre l'infestazione annuale totale risente anche delle temperature estive. È quindi sempre più importante effettuare attività di monitoraggio pluriennale per meglio definire la dinamica delle popolazioni della mosca su scala territoriale e applicare DSS sempre più affidabili (Marchi *et al.*, 2016).

Le varietà tolleranti alle malattie, le tecniche di evoluzione assistita e la memoria epigenetica

Le nuove sfide impongono anche un maggiore impegno nel lavorare sulla ridotta sensibilità dell'ospite. Per molte specie e per molte malattie riuscire a selezionare varietà tolleranti, se non proprio resistenti, alle avversità biotiche e abiotiche resta una grande risorsa. È un approccio dunque su cui si concentrano molte ricerche ma che ha dei limiti nella velocità di selezione e soprattutto nella durata della “resistenza”, in particolare con una situazione in continuo cambiamento. Le tecnologie di evoluzione assistita (TEA) da questo punto di vista rappresentano certamente un notevole passo avanti (Pley *et al.*, 2021).

Altrettanto promettente è però anche la memoria epigenetica (Osler, 2021; Mc Guigan *et al.*, 2021), ovvero il naturale meccanismo di adattamento delle piante ad un ambiente in rapido cambiamento, che può permettere di recuperare approcci naturali quali la selezione massale, mantenendo la massima biodiversità – così fondamentale per garantire la disponibilità di adeguate risorse genetiche per il futuro.

E i mezzi per la difesa? Quale futuro?

I mezzi per la difesa, in un'agricoltura che per sua natura rende le piante più suscettibili alle avversità (uniformità genetica, densità di popolazione, selezione per la qualità/produttività e non per la resistenza, ecc.) restano un elemento irrinunciabile. La richiesta di ridurre l'uso e l'impatto possono condizionarne l'efficienza, anche perché la riduzione delle sostanze attive a disposizione rischia di aumentare molto l'insorgenza di fenomeni di resistenza verso le limitate molecole di sintesi rimaste disponibili. Le variabili condizioni ambientali possono influenzarne anche l'efficacia cambiandone la persistenza, la traslocazione nei tessuti, o, nel caso di agenti di biocontrollo, la capacità di attivarsi come tali. Anche l'impegno (anche dal punto di vista normativo) nella diffusione di protocolli di applicazione dei prodotti fitosanitari che ne migliorino l'efficacia riducendone i quantitativi è un aspetto importantissimo e da valorizzare non solo dal punto di vista della salvaguardia ambientale (Secretariat I.P.P.C. *et al.*, 2021).

Una risorsa da valorizzare nell'abbassare la pressione dei vari agenti è anche l'uso di sostanze prive di impatto ambientale ma con capacità di mitigazione quali le sostanze di base o sostanze ad azione fisica o repellente (Khursheed, *et al.* 2022). È necessaria invece una grande attenzione sul possibile impatto dei CC sui mezzi di lotta biologica, che possono essere

anch'essi fortemente influenzati dalle mutate condizioni, che certo non vengono valutate nel momento in cui si mettono a punto le diverse formulazioni a base di micro o macro organismi. Un punto critico che potrà essere affrontato con la necessaria consapevolezza dei possibili cambi di efficacia e valutazioni adeguate (Magan e Medina, 2020; Harvey *et al.*, 2023).

Inoltre metodi innovativi quali l'applicazione delle vibrazioni per il disorientamento sessuale (biotremologia), le nanotecnologie, l'impiego dei semiochimici possono permettere di integrare approcci diversi modulando gli interventi nelle situazioni più imprevedute o in cambiamento, e anche l'uso sempre più sofisticato di reti antinsetto può diventare una prospettiva di grande interesse in quanto altamente sostenibile dal punto di vista ambientale.

Un esempio di applicazione pratica di metodi innovativi: la gestione di *Meloidogyne graminicola* su riso

Un esempio chiaro è l'applicazione della tecnica della pianta esca, anche conosciuta come *Trap-crop*, nella gestione del nematode galligeno *Meloidogyne graminicola* considerato una delle specie di nematodi fitoparassiti tra le più nocive in agrosistemi di risaia (Prasad e Somasekhar, 2009).

Uno dei metodi di controllo fitosanitari più utilizzati ad oggi per l'abbattimento della popolazione nematologica nel suolo è l'allagamento del campo infestato in assenza della coltura per circa un anno. Con le estati più siccitose e la diminuzione della disponibilità di acqua per l'irrigazione e la sommersione, il controllo di questo nematode deve prevedere nuove strategie più sostenibili.

È stata sperimentata nelle risaie della Lombardia, la tecnica della *Trap-crop* da eseguire in asciutta, proprio per far fronte alle carenze idriche (Sacchi *et al.*, 2021). Questa antichissima tecnica prevede di seminare il riso che attrarrà le *Meloidogyne* presenti nel terreno. I nematodi penetreranno nelle radici già all'emissione delle prime radichette. Distruggendo le piante prima della fine del ciclo dei nematodi si va ad eliminare buona parte della popolazione, riducendone progressivamente la carica se ripetuta la tecnica per almeno tre volte.

Sulla base dei risultati di questa sperimentazione e sulla redazione di un Pest Risk Analysis per il territorio italiano (Torrini *et al.*, 2020), l'Unione europea ha deciso di inserire la *Trap-crop* come metodo ufficiale per l'eradicazione e il contenimento di *Meloidogyne graminicola*.

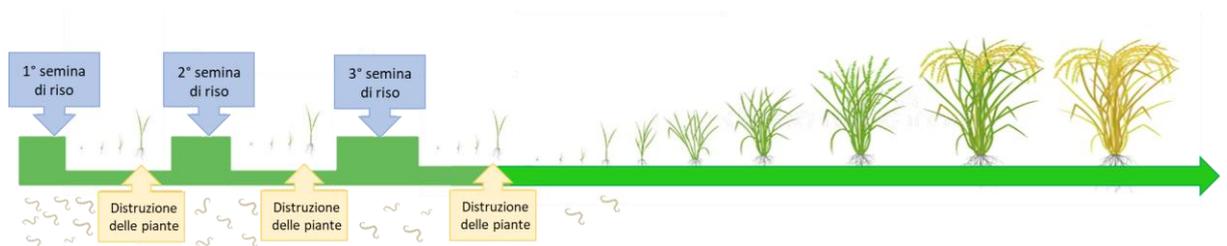


Figura 3. Schema esplicativo della tecnica di *Trap-crop* riconosciuta come metodo ufficiale per l'eradicazione e il contenimento del nematode galligeno *Meloidogyne graminicola*

Conclusioni

È evidente da quanto qui esposto che sono molte le soluzioni esplorabili e spesso già applicabili, ma resta fondamentale individuare precocemente i problemi, comprendere l'influenza dei cambiamenti a cui il clima va incontro – e ancor più potrà andare incontro nel

futuro – sui vari aspetti del ciclo degli organismi nocivi, al fine della messa a punto di modelli che ci aiutino a interpretarne lo sviluppo in situazioni imprevedibili. Fondamentale resta anche l'influenza sulla suscettibilità della pianta e sulla interazione fra agente e ospite (Lahlali *et al.* 2024). Comprendere l'eccezionalità dei fenomeni per saperla gestire al meglio è un passo irrinunciabile, in modo da continuare lo sviluppo di mezzi innovativi e sostenibili nell'ambito dell'agricoltura di precisione ma anche fare ancora tanta ricerca mirata all'adattamento delle tecniche colturali, all'individuazione di incroci e varietà tolleranti al cambiamento climatico e alla inusuale pressione di malattie e infestazioni, alla salvaguardia dell'adattamento naturale, con una costante grande attenzione alla biodiversità.

E in questa ricerca di mezzi e metodi non possiamo dimenticare la necessità di implementare queste soluzioni e l'approccio ampio ed "elastico" che dobbiamo avere in un grosso impegno di formazione dei tecnici e degli agricoltori, coinvolgendo di più anche i giovani nel riconoscere il valore di tecniche e approcci innovativi senza dimenticare i più tradizionali, integrando quindi gli strumenti disponibili in modo da affrontare la complessità che ci si prospetta nel modo più efficace possibile.

Bibliografia

- Battilani P., Toscano P., Van der Fels-Klerx H.J., Moretti A., Camardo Leggieri M., Brera C., Rortais A., Goumperis T., Robinson T. Aflatoxin B1 contamination in maize in Europe increases due to climate change. *Scientific Reports*, 2016, 6: 24328 doi:10.1038/srep24328
- Caffarra A., Rinaldi M., Eccel E., Rossi V., Pertot, I. 2012. Modelling the impact of climate change on the interaction between grapevine and its pests and pathogens: European grapevine moth and powdery mildew. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 148, 89-101.
- Colagiero M., Ciancio A. 2012. Climate changes and nematodes: expected effects and perspectives for plant protection. *Redia*, 94, 113-118.
- Dutta T. K., Ganguly A. K., Gaur H. S. 2012. Global status of rice root-knot nematode, *Meloidogyne graminicola*. *African Journal of Microbiology Research*, 6, 6016-6021. doi: 10.5897/AJMR12.707.
- Dutta T.K., Phani V. 2023. The pervasive impact of global climate change on plant nematode interaction continuum. *Frontiers in Plant Science*, 14:1143889. doi: 10.3389/fpls.2023.1143889.
- Gullino M. L., Albajes R., Al-Jboory I., Angelotti F., Chakraborty S., Garrett K. A., ... & Stephenson T. 2022. Climate change and pathways used by pests as challenges to plant health in agriculture and forestry. *Sustainability*, 14(19), 12421.
- Gutierrez, A. P., Ponti, L., Cossu, Q. A. 2009. Effects of climate warming on olive and olive fly (*Bactrocera oleae* (Gmelin)) in California and Italy. *Climatic Change*, 95(1), 195-217.
- Harvey J. A., Tougeron K., Gols R., Heinen R., Abarca M., Abram P. K., ... & Chown S. L. 2023. Scientists' warning on climate change and insects. *Ecological monographs*, 93(1), e1553.
- Khurshed A., Rather M.A., Jain, V., Wani A.R., Rasool S., Nazir, R., Malik N.A., Majid S.A., 2022. Plant based natural products as potential ecofriendly and safer biopesticides: A comprehensive overview of their advantages over conventional pesticides, limitations and regulatory aspects. *Microbial Pathogenesis* 173, 105854. <https://doi.org/10.1016/j.micpath.2022.105854>.
- Lahlali R., Taoussi M., Laasli S. E., Gachara G., Ezzouggari R., Belabess Z., ... Barka E. A. 2024. Effects of climate change on plant pathogens and host-pathogen interactions. *Crop and Environment*, 3(3), 159-170.
- Lessio F., Alma A., 2021. Models applied to grapevine pests: A review. *Insects*, 12(2), 169.
- Lorenzini G. 2021. Cambiamenti climatici e malattie delle piante. *Georgofili: atti dell'Accademia dei Georgofili: Serie VIII, Vol. 18, supplemento*, 2021, 291-301.
- Magan N., Medina A. 2020. Climate Change and Resilience of Biological Control Agents. In: De Cal, A., Melgarejo, P., Magan, N. (eds) *How Research Can Stimulate the Development of Commercial Biological Control Against Plant Diseases. Progress in Biological Control*, vol 21. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-53238-3_6
- Marchi S., Guidotti D., Ricciolini M., Petacchi R. 2016. Towards understanding temporal and spatial dynamics of *Bactrocera oleae* (Rossi) infestations using decade-long agrometeorological time series. *International Journal of Biometeorology*, 60, 1681-1694.
- Mauro A., Battilani P., Cotty P.J. Atoxigenic *Aspergillus flavus* endemic to Italy for biocontrol of aflatoxins in maize. *BioControl*, 2015, 60, 125-134. DOI 10.1007/s10526-014-9624-5
- Mauro A., Garcia-Cela E., Pietri A., Cotty P.J., Battilani P. Biological Control Products for Aflatoxin Prevention in Italy: Commercial Field Evaluation of Atoxigenic *Aspergillus flavus* active Ingredients. *Toxins*, 2018, 10(1), 30; doi:10.3390/toxins10010030
- McGuigan K., Hoffmann A. A., Sgrò C. M. 2021. How is epigenetics predicted to contribute to climate change adaptation? What evidence do we need? *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 376(1826), 20200119.
- McSorley R. 2003. Adaptations of nematodes to environmental extremes. *Florida Entomologist* 86, 138-142.
- Mori N. 2024. Il bilancio fitosanitario della mosca dell'olivo nel centro nord Italia. Presentazione Giornate fitopatologiche 11_01_2024 (<https://aipp.it/wp-content/uploads/2024/01/Olivo-Mosca-Regioni-del-Nord-2024-01-11.pdf>).
- Osler R., 2021. *Le piante immunizzate*. Forum, Editrice Universitaria Udinese, ISBN: 8832832550. 184 pp.
- Piva G., Battilani P., Pietri A., Emerging issues in Southern Europe: aflatoxins in Italy. In "The mycotoxin factbook". Barug D., Bhatnagar D., van Egmond H.P., van der Kamp J.W. van Osenbruggen W.A., Visconti A. Eds., 2006, Wageningen Academic Publisher, The Netherlands, 139-153.

- Pley C., Evans M., Lowe R., Montgomery H., Yacoub S. 2021. Digital and technological innovation in vector-borne disease surveillance to predict, detect, and control climate-driven outbreaks. *The Lancet Planetary Health*, 5(10), e739-e745.
- Ponti L., Cossu Q.A., Gutierrez A.P. 2009. Climate warming effects on the *Olea europaea*-*Bactrocera oleae* system in Mediterranean islands: Sardinia as an example. *Global Change Biology*, 15(12), 2874-2884.
- Ponti L., Gutierrez A.P., Ruti P.M., Dell'Aquila, A. 2014. Fine-scale ecological and economic assessment of climate change on olive in the Mediterranean Basin reveals winners and losers. *PNAS* 111, 5598-5603.
- Prasad J. S., Somasekhar N. 2009. Nematode pest of rice: Diagnosis and management. *Technical Bulletin* no. 38. Directorate of Rice Research (ICAR), Rajendranagar, Hyderabad – 500030, A.P. India. pp. 29.
- Sacchi S., Torrini G., Marianelli L., Mazza G., Fumagalli A., Cavagna B., Ciampitti M., Roversi P. F. 2021. Control of *Meloidogyne graminicola* a root-knot nematode using rice plants as trap crops: Preliminary results. *Agriculture*, 11(1), 37.
- Secretariat I. P. P. C., Gullino M. L., Albajes R., Al-Jboory I., Angelotti F., Chakraborty S., ... & Stephenson T. 2021. *Scientific review of the impact of climate change on plant pests*. FAO on behalf of the IPPC Secretariat.
- Singh B. K., Delgado-Baquerizo M., Egidì E., Guirado E., Leach J. E., Liu H., Trivedi P. 2023. Climate change impacts on plant pathogens, food security and paths forward. *Nature Reviews Microbiology*, 21(10), 640-656.
- Talari G., Cummins E., McNamara C., O'Brien J. 2022. State of the art review of Big Data and web-based Decision Support Systems (DSS) for food safety risk assessment with respect to climate change. *Trends in Food Science & Technology*, 126, 192-204.
- Torrini G., Roversi P. F., Cesaroni C. F., Marianelli L. 2020. Pest risk analysis of rice root-knot nematode (*Meloidogyne graminicola*) for the Italian territory. *EPPO Bulletin*, 50(2), 330-339.
- Tremblay E., 1994. *Entomologia applicata*. Vol. 3/2. Volume III. Parte seconda: Ditteri Brachiceri (Caliptrati esclusi). Liguori editore, Napoli, 216 pp.
- Zacarias D.A. 2020. Global bioclimatic suitability for the fall armyworm, *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae), and potential co-occurrence with major host crops under climate change scenarios. *Climatic Change*, 161(4), 555.

Sistemi colturali di pieno campo e in serra: misure di adattamento e mitigazione alle emergenze geopolitiche e climatiche

Dichio B.,¹ Incrocci L.,² Roggero P.P.³

¹Dipartimento dei Sistemi Colturali, Forestali e dell'Ambiente, Università della Basilicata

²Dipartimento di Scienze Agrarie, Alimentari e Agro-ambientali, Università di Pisa

³Dipartimento di Agraria, Università degli studi di Sassari

Riassunto

Negli ultimi 25 anni si è assistito ad una rapida trasformazione delle dinamiche sociali, con una crescente prevalenza delle società urbane rispetto a quelle rurali, che ha portato alla polarizzazione dei centri di produzione e di consumo dei prodotti agricoli. A queste dinamiche, che condizionano la domanda e l'offerta dei prodotti agricoli, si sono sovrapposte le crescenti pressioni sull'agricoltura indotte dal cambiamento climatico, come l'intensificazione di fenomeni atmosferici estremi (nubifragi, prolungati periodi di siccità) e l'aumento delle temperature dell'aria e del mare. Questi cambiamenti climatici e sociali stanno contribuendo a modificare le fasce climatiche del globo, con impatti significativi sugli ecosistemi naturali, agricoli, e sulle attività umane, come la tropicalizzazione delle colture, la crescente necessità di investire in sistemi di protezione delle colture (reti ombreggianti, serre, ecc.), soprattutto per quelle frutticole e orticole con maggior valore aggiunto. L'adozione di strategie di adattamento ai cambiamenti climatici nel comparto agricolo richiede un approccio integrato che combini innovazione tecnologica, pratiche agricole sostenibili, nuovi servizi e politiche di supporto, educazione e sensibilizzazione in tutti i segmenti delle filiere agroalimentari. Solo attraverso cambiamenti significativi del modo di fare ricerca, progettare e gestire gli agroecosistemi, sarà possibile affrontare in modo concertato ed efficace le sfide poste dalle dinamiche geopolitiche e dal cambiamento climatico, per garantire la sicurezza alimentare per le generazioni future.

Abstract

Over the past 25 years, social dynamics have undergone a transformation, with an increasing prevalence of urban over rural populations and global-scale polarization of production and consumption centers for agricultural products. This trend is shaping the supply and demand of agri-food products and is combined with increasing pressures of climate change on agricultural systems, including the increased frequency of extreme weather events like floods and prolonged drought, as well as rising air and sea temperatures. These climatic and social changes have led to shifts in the Earth's climatic belts, significantly affecting both natural and agricultural ecosystems, as well as human activities. For instance, there has been a shift toward tropical crops, and a growing need to invest in crop protection systems—such as shade nets and greenhouses—particularly for high-value fruits and vegetables. To effectively respond to climate change within the agricultural sector, it is essential to adopt new approaches combining technological innovation, sustainable farming practices, new services, and supportive policies. Education and awareness-raising are also critical components of this strategy. Only through transformative changes in research approaches, and in the design and management of agroecosystems, will we be able to tackle the challenges posed by the ongoing geopolitical and climate change dynamics, to ensure food security for future generations.

Keywords: *Climate change, agricultural transformation, food security, sustainable farming, tropicalization.*

Dinamiche globali

Le dinamiche dell'agricoltura globale negli ultimi 25 anni non hanno precedenti nella storia dell'agricoltura. La progressiva polarizzazione dei centri di produzione e di consumo dei prodotti agricoli e dei mezzi di produzione, associata alle contrastanti dinamiche demografiche continentali, alle trasformazioni sociali e alla sempre maggior volatilità dei mercati, ha generato scenari inediti che, sovrapposti alle dinamiche climatiche, producono ripetute crisi da “tempesta perfetta”.

In questo lavoro, elaborato a partire da questa dinamica cornice geopolitica globale, si illustrano, con esempi basati su esperienze maturate sul campo, le implicazioni dell'evoluzione delle emergenze geopolitiche e ambientali sulla domanda di ricerca agronomica a supporto delle misure di adattamento e mitigazione al cambiamento climatico, con un focus sui sistemi colturali erbacei, arborei e ortofloricoli dell'agricoltura nazionale.

Negli ultimi 100 anni nell'EU 27 si è assistito a un progressivo abbandono delle zone rurali nelle aree montane e collinari a vantaggio dei principali agglomerati urbani. Le trasformazioni sociali, con il progressivo aumento dell'incidenza di popolazione urbana rispetto a quella rurale, hanno generato effetti a cascata sulle scelte politiche, sul ricambio generazionale nelle zone rurali e sul paesaggio rurale. Molte aree montane e collinari, un tempo coltivate, sono diventate boschi o macchia mediterranea, molti suoli fertili di pianura sono stati consumati dall'urbanizzazione o sono sotto la pressione di attività agricole e zootecniche ad alto livello di intensificazione, con conseguenze sulla fertilità dei suoli e la qualità delle acque sotterranee. Si è assistito quindi a una dinamica divergente tra abbandono delle aree più marginali e intensificazione e pressione sulle aree più fertili e costiere. Il recupero della vegetazione spontanea nelle aree abbandonate ha esposto territori, un tempo oggetto di intensa utilizzazione in ambito silvo-pastorale, alle calamità naturali in particolare incendi, frane, smottamenti e dissesto idrogeologico. Il fenomeno ha interessato tutta Europa e in particolare i paesi dell'Unione Europea che si affacciano sul Mediterraneo. In Spagna, per esempio, Lasanta *et al.*, (2017) hanno dimostrato che l'abbandono delle terre è maggiore in terreni ad elevata pendenza. I *megafire*, sempre più frequenti nelle aree abbandonate, sono una indiretta conseguenza di queste situazioni (Oliveira & Zêzere, 2020), in particolare nelle aree insulari e montane soggette a lunghi periodi di siccità e a vento forte e le misure di sviluppo rurale per il contrasto all'abbandono si sono rivelate inefficaci (Colonico et al., 2022).

Il tema è globale. E solo dal 2008 che la popolazione mondiale urbana risulta più numerosa e in crescita esponenziale rispetto a quella rurale, che risulta pressoché stabile nell'ultimo decennio (FAOSTAT, 2024). Nell'Unione Europea il fenomeno è incominciato ancor prima del dopoguerra, con un costante calo numerico della popolazione rurale dal 1960 a oggi, con calo annuale di circa 0,5 milioni di abitanti in meno all'anno nel primo trentennio e oltre 0,3 milioni annui nell'ultimo trentennio. Nello stesso intervallo di tempo, la popolazione urbana è aumentata di oltre 2,3 milioni di abitanti all'anno nel primo trentennio e 2,1 milioni

anni nel secondo trentennio. Nel 2020 la popolazione rurale rappresentava meno del 25% della popolazione totale dell'Unione Europea. Le profonde trasformazioni sociali e ambientali associate a queste dinamiche sono in corso anche in paesi emergenti del Nord Africa e Medio Oriente, dove nel 1980 la popolazione rurale era circa il 50% della popolazione totale mentre oggi è solo il 34%, e questa percentuale è in costante calo (FAOSTAT, 2024).

Lo spostamento della popolazione dalle campagne ai grandi centri urbani ha avuto e avrà sempre più conseguenze molto marcate sull'ambiente, gli stili di vita e alimentazione, i territori, la cultura e la percezione sociale della natura e dell'agricoltura (Quintas-Soriano *et al.*, 2023).

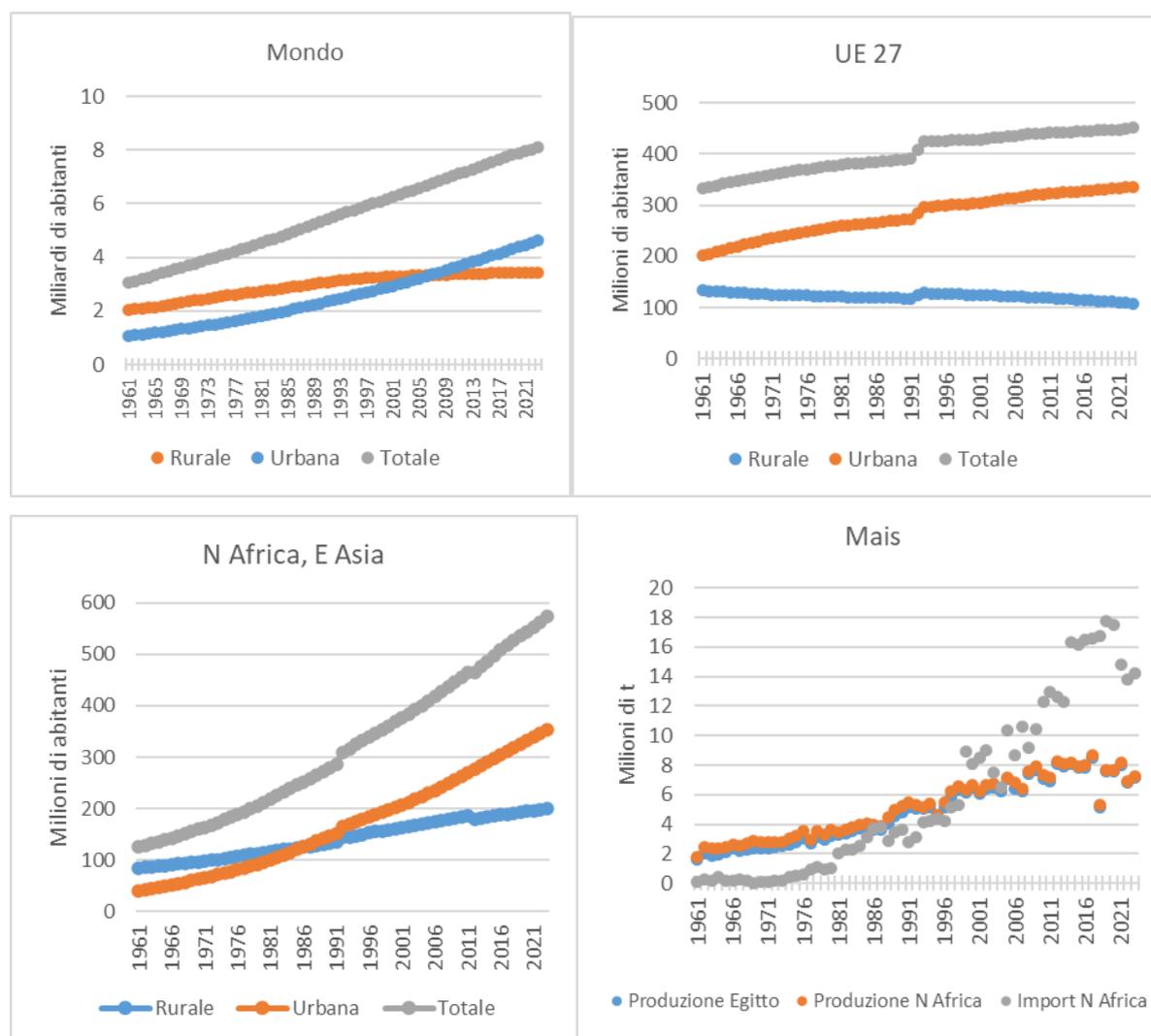


Figura 1 – Dinamiche della popolazione rurale e urbana a scala mondiale, dell'Unione Europea 27 e del nord Africa e est Asia, e corrispondenti dinamiche delle produzioni e import di mais nell'Africa settentrionale (Fonti: FAOSTAT e World Bank via "Our World in data")

In questo contesto, il numero di persone malnutrite ha raggiunto un minimo di poco meno di 600 milioni di persone nel secondo decennio di questo secolo ma ha ripreso a salire negli ultimi

anni raggiungendo gli 800 milioni di persone, localizzate prevalentemente in Africa subsahariana e Asia meridionale (Ritchie et al., 2023). Tuttavia, negli ultimi due decenni il numero di obesi è cresciuto linearmente da poco più di 300 milioni nel 2000 a oltre 890 milioni nel 2022 (WHO, 2023).

La gran parte della popolazione mondiale non ha percezione di dove e come venga prodotto il cibo che consumano nei supermercati e che deriva da filiere produttive ormai quasi completamente globalizzate. Per esempio, la quasi totalità del mais prodotto in Nord Africa (e che proviene dall'Egitto), copre appena il 30% del fabbisogno complessivo, e la produzione cresce molto meno delle importazioni, che sono più che triplicate nell'ultimo ventennio. Ciò rende questi paesi fortemente dipendenti dalle importazioni di derrate alimentari, come evidenziato dalla recente crisi associata alla guerra in Ucraina (FAOSTAT, 2024).

È in corso da un paio di decenni una forte e progressiva polarizzazione dei centri di produzione e consumo delle principali *commodities*. Per esempio, circa due terzi dell'olio di girasole viene prodotto in Ucraina (42%) e Russia (21%). L'Ucraina negli ultimi 10 anni ha aumentato la produzione di mais da meno di 5 a oltre 40 milioni di tonnellate, superando così la produzione di mais di tutta l'Europa occidentale, che da anni ristagna intorno ai 20 milioni di tonnellate. Il caso del mais in Italia è emblematico, visto che circa 20 anni fa eravamo praticamente autosufficienti mentre ora importiamo oltre il 50% del fabbisogno di mais, in quanto le produzioni si sono ridotte da oltre 10 milioni a poco più di 5 milioni di tonnellate.

Ma il caso forse più rilevante a scala mondiale è quello delle proteine vegetali, i cui centri di produzione sono concentrati in America, con oltre l'80% della produzione mondiale distribuita tra USA (35%), Brasile (34%) e Argentina (11%). La situazione attuale deriva da un forte incremento delle produzioni in Brasile e sud America in generale, a cui ha fatto riscontro un aumento medio delle superfici coltivate nell'ultimo trentennio di circa 1,6Mha/anno, superando nel 2023 65 Mha coltivati a soia, a scapito prevalentemente della foresta amazzonica (*Figura 2*). Il rapido aumento di produzione di soia in sud America, e in Brasile in particolare, destinato quasi esclusivamente all'export, è perfettamente speculare all'incremento dell'import di soia da parte della Cina, che sino ai primi anni 2000 era praticamente autosufficiente e oggi importa annualmente, prevalentemente dal sud America, circa 100 milioni di tonnellate di soia, oltre sei volte l'import dell'Unione Europea, secondo importatore mondiale. L'aumento della domanda di questa *commodity* è associato prevalentemente alla rapida trasformazione della società cinese associata alle politiche "open-door": la popolazione cinese è oggi prevalentemente urbana, che ha determinato un profondo cambiamento degli stili di vita e delle diete, che ha avuto ripercussioni sui consumi di proteine animali e sulle malattie non trasmissibili (Yan et al., 2022).

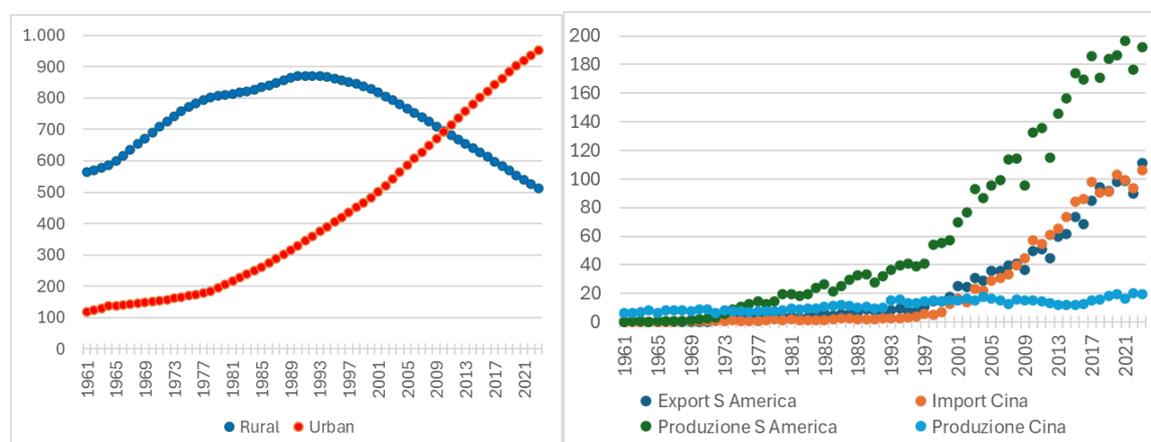


Figura 2. Dinamiche della popolazione urbana e rurale cinese (milioni di abitanti) e della produzione e import-export della soia (milioni di t) dal Sud America alla Cina.

La concentrazione dei centri di produzione e consumo determina una maggiore esposizione a forti perturbazioni e conflitti dei mercati e non solo. La forte dipendenza dell'agricoltura dai fertilizzanti e quindi ancora oggi dalle fonti di energia non rinnovabile, espone il settore a effetti a cascata che in genere impattano negativamente su produttori e consumatori, esposti alle speculazioni dei grandi gruppi finanziari che controllano i segmenti della trasformazione e distribuzione nelle filiere agroalimentari.

Un tema importante è la continua perdita di biodiversità che riguarda l'intero sistema agricolo (FAO, 2019). La frutticoltura italiana nel XX secolo contava sulla presenza di 8.000 varietà, oggi il numero è sceso a poco meno di 2.000. Di queste, 1.500 sono considerate a rischio "estinzione" anche per effetto dei moderni sistemi della distribuzione commerciale, che privilegiano le grandi quantità e la spersonalizzazione dell'offerta. (Report Coldiretti, 2019)

Le superfici coltivate a frutticole hanno evidenziato un forte calo nell'ultimo ventennio e una decisa perdita di valore produttivo; pesco e pero, sono le specie che più hanno sofferto in termini di ridimensionamento, solo parzialmente compensate dalla stabilità o dall'incremento delle superfici investite a ciliegio, actinidia, albicocco e melo. (Costa & Bassi 2025). La riduzione delle superfici interessa sia le aree settentrionali che quelle meridionali del Paese. Tra queste, l'Emilia Romagna è una delle regioni più colpite, con cali attorno al 40% per il pero e il susino, al 30% per l'albicocco e l'actinidia e al 20-25% per il ciliegio e il pesco, dal confronto del periodo 2019-2023 con il 2014-2018 (Palmieri, 2024).

Impatto dei cambiamenti climatici sui sistemi colturali italiani

L'ultimo rapporto di valutazione (AR6) dell'IPCC offre un quadro delle dinamiche climatiche e degli impatti sull'agricoltura che si divide tra effetti devastanti degli eventi estremi, in particolare siccità, alluvioni e ondate di calore, ed effetti meno apparenti ma subdoli, associati alla varietà di risposte degli organismi viventi alle pressioni climatiche. Particolarmente di effetto è l'infografica dell'IPCC che illustra come le ultime tre generazioni abbiano fatto

esperienza di climi molto diversi tra loro, che richiama l'attenzione sul fatto che l'esperienza passata non sia sufficiente ad affrontare in modo adattativo le incertezze del clima futuro.

In Italia, al centro dell'hotspot climatico mediterraneo, i segnali di cambiamento climatico riguardano la riduzione di numero di ore di gelo, il netto aumento delle notti estive con temperatura minima superiore ai 20°C, dei giorni caldi ($T_{max} > 25^{\circ}\text{C}$) e delle ondate di calore. Il regime idrologico appare alterato soprattutto per la minore incidenza delle precipitazioni nevose e lo scioglimento dei ghiacciai nell'arco alpino, e per la maggiore frequenza di lunghi eventi siccitosi.

Impatti sulle coltivazioni erbacee

Un recente studio condotto nelle tre regioni biogeografiche italiane (Dibari *et al.*, 2021) ha messo in evidenza la sito-specificità e complessità degli impatti delle pressioni climatiche sui **pascoli permanenti** nelle alpi, appennini e nella regione mediterranea. Gli impatti riguardano la biodiversità, la prevalenza di specie xerofile e adattate al freddo, i servizi ecosistemici, la qualità del foraggio offerto, la ricchezza floristica, la produttività e i tratti funzionali delle specie. Le risposte sono state studiate prevalentemente nelle zone alpine, molto meno in quelle appenniniche e in particolare mediterranee, dove mancano informazioni sulle risposte in termini di composizione floristica e biodiversità. In generale gli effetti attesi sono prevalentemente negativi, con una riduzione della qualità del foraggio offerto e della produttività dovuta alla maggiore frequenza di stress abiotici. Nelle Alpi gli effetti negativi sono stati osservati anche in termini di biodiversità e ricchezza floristica. Queste dinamiche sono sovrapposte a quelle dell'abbandono e del recupero della vegetazione legnosa già descritte prima. Il progetto Pastoralp ((Piccot *et al.*, 2022) ha individuato alcune opzioni di adattamento al cambiamento climatico basate su interventi sito-specifici, orientati nel breve termine a migliorare la resistenza agli eventi estremi in alpeggio, o nel medio-lungo termine alla realizzazione di interventi infrastrutturali e di organizzazione aziendale. Tra le opzioni, anche quelle basate sulla integrazione di nuove tecnologie digitali con tecniche di pascolamento che consentano di migliorare l'efficienza di utilizzazione al pascolo (Schillings *et al.*, 2024).

Nel caso dei cereali e in particolare del **frumento**, l'adattamento al cambiamento climatico richiede un forte investimento su nuove varietà a fioritura più tardiva, caratterizzate da un più rapido tasso di riempimento delle cariossidi in modo da poter ridurre l'esposizione a stress idrici (Asseng *et al.*, 2017). Queste opzioni di adattamento potrebbero rivelarsi non efficaci in aree marginali asciutte e gli impatti negativi attesi sulla qualità della granella in termini di contenuto proteico aggiungono ulteriori elementi alle sfide del clima futuro (Asseng *et al.*, 2019)

Un altro esempio degli effetti negativi del nuovo clima è quello del **pomodoro da industria** per il quale si attende un calo di resa in particolare negli Stati Uniti e in Italia, non sempre compensabile con un maggior consumo idrico (Cammarano *et al.*, 2022)

Gli effetti attesi dall'aumento della concentrazione di anidride carbonica in atmosfera sulle coltivazioni erbacee sono controversi e fortemente sito-specifici e interagiscono con altri fattori concomitanti: le specie C4 risponderrebbero positivamente solo in condizioni di stress

idrico, l'incremento di tasso fotosintetico atteso dalle C3, è controbilanciato dall'esposizione ad altri stress abiotici, in particolare azotati e idrici (Ainsworth & Long, 2021).

Tropicalizzazione delle colture

Uno degli effetti preoccupanti dei cambiamenti climatici è lo spostamento e/o la modifica delle fasce climatiche del nostro globo, con impatti significativi sugli ecosistemi naturali, agricoli, e sulle le attività umane. Per esempio, per alcuni paesi dell'Europa meridionale (Italia, Spagna e Grecia), le zone temperate potrebbero diventare sempre più simili a zone con clima desertico o subtropicale.

Il clima gioca un ruolo importante nel decidere la distribuzione negli anni della produzione di frutti, fenologia, qualità del frutto, malattie e incidenza dei parassiti. L'incremento delle temperature di molti areali di produzione frutticola sta portando alla tropicalizzazione delle colture e quindi all'introduzione di colture tipiche delle zone tropicali in areali temperati o semi-aridi. Per esempio, nelle regioni del Sud Italia si sta espandendo l'areale di produzione dell'avocado, mango e papaya, come tra l'altro la coltivazione dell'olivo si sta estendendo verso le regioni del Nord. I cambiamenti climatici impongono la definizione di nuovi areali idonei per le colture. Un esempio recente è rappresentato dall'evoluzione delle superfici del Kiwi in Italia (Figura 3): fino al 2011 si nota un incremento delle superfici totali sia al Nord che al Centro-Sud, e successivamente, a causa di patologie (PSA) e fisiopatie (Moria) e soprattutto con introduzione delle varietà a polpa gialla, il kiwi si spostando nelle zone più vocate del Centro-Sud.

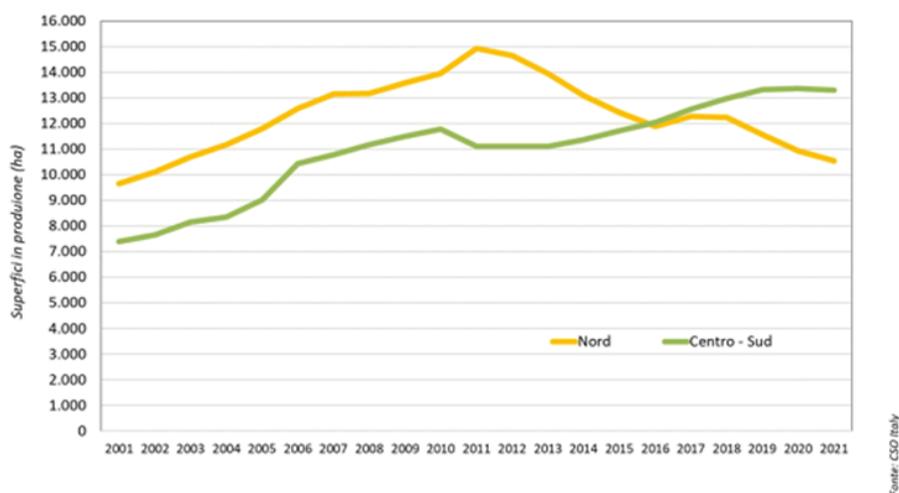


Figura 3. Evoluzione delle superfici a kiwi in Italia fra Nord e Centro-Sud fra il 2001 e il 2021.

Fra gli effetti del cambiamento climatico vi sono l'intensificazione degli eventi meteorologici estremi come nubifragi, ondate di freddo/caldo intenso e anomalo per la media delle temperature della zona climatica considerata. Per difendersi da queste avversità sempre più frequenti, specialmente nell'orticoltura, per le specie più redditizie si fa sempre più ricorso all'uso di colture protette, più o meno tecnologiche. Tuttavia, l'effetto dell'aumento della temperatura media dell'aria comporta una riduzione della necessità di riscaldamento in serra

e/o la possibilità di coltivare specie maggiormente esigenti dal punto di vista termico. Mariani *et al.* (2016) hanno effettuato una simulazione di come l'aumento delle temperature, dovuto al cambiamento climatico, ha ridotto la necessità di riscaldamento in serra. Nell'articolo si stima che la quantità di energia necessaria per riscaldare una serra dedicata alla coltivazione del pomodoro in Europa e nel bacino del Mediterraneo nel periodo 1988-2014 era mediamente del 15-20% in meno di quella necessaria nel periodo 1973-1987, rendendo così più conveniente la coltivazione del pomodoro nel nord-Europa e al tempo stesso, ciò rende eccessivamente calde le strutture protette dei paesi più a Sud, con la necessità di aumentare la ventilazione naturale o forzata delle serre.

Anche nelle colture protette, così come nella frutticoltura, il riscaldamento globale comporta un cambiamento dell'ordinamento colturale dei paesi più a Sud (Sicilia e Spagna) in cui si vede una sostituzione delle colture tradizionali come pomodoro con altre di origine più tropicali come, ad esempio, la pitaya (Figura Figura 4).



Figura 4. Coltivazione di pitaya (*Selenicereus undatus* D.R.Hunt) in serra ad Almeria in Spagna. In questa regione, vocata per la produzione del pomodoro, si sta espandendo la coltivazione di specie tropicali in serra.

Impatti sulla fenologia delle colture e temperatura e fabbisogno in freddo

In frutticoltura, le fasi fenologiche sono molto influenzate dalle condizioni termiche ed in modo particolare dalle ore in freddo (*Chilling Hours* - C.H.) e dalle ore in caldo (*Growing Degree Hours* – G.D.H.). Per molte specie a foglia caduca (es. melo, pero, pesco, kiwi, ecc.) durante la fase di dormienza hanno bisogno di accumulare un numero di ore di freddo per schiudere le gemme e fruttificare. Il cambiamento nei tempi dell'attività di crescita delle piante, o il cambiamento nella fenologia, è uno degli impatti più noti dei cambiamenti climatici. Le fasi vegetative e riproduttive degli alberi da frutto sono state alterate a causa dell'incremento delle temperature (Fu *et al.*, 2022). Negli

ultimi decenni, è sempre più frequente osservare un anticipo della primavera con conseguenze su alterazioni del ciclo vegetativo ed esposizione delle colture a gelate tardive. Inoltre, un ritardo nella fase di entrata in dormienza, corrispondente alla caduta delle foglie (per specie a foglia caduca) e rallentamento dei processi fisiologici per le sempreverdi, comporta un dispendio energetico importante e una riduzione del periodo utile per l'accumulo delle ore in freddo (Figura 5).

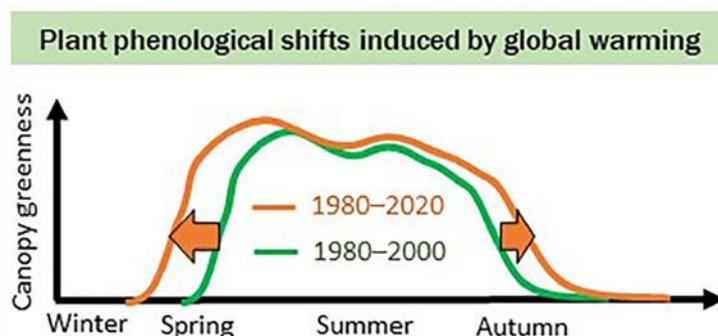


Figura 5. Rappresentazione schematica dello spostamento (shifts) delle due fasi fenologiche rilevanti per la frutticoltura (caduta foglie in autunno e schiusura delle gemme in primavera), indotto dai cambiamenti climatici (da Fu et al., 2022).

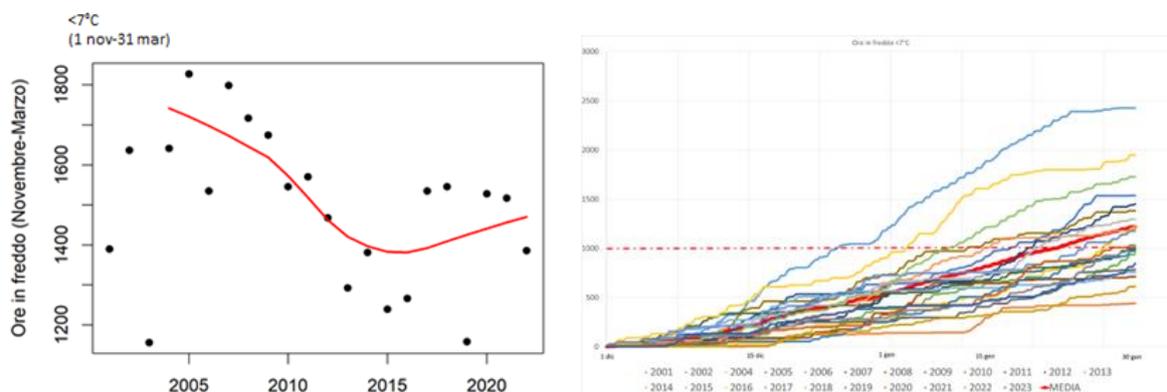


Figura 6. Nel grafico a sinistra è rappresentata la serie storica dal 2000 al 2020 delle ore in freddo (<7.2 °C) annuali (1° novembre-31 marzo) nell'areale di Metaponto (Basilicata) (elaborato da Montanaro G). Nel grafico a destra sono riportate le dinamiche di accumulo annuale delle ore in freddo. L'elevata variabilità nell'andamento e nei valori assoluti dell'accumulo di ore in freddo sono fenomeni che impattano la fisiologia della rimozione della dormienza da parte delle gemme delle piante da frutto.

In diversi areali di produzione, in particolar modo quelli del Sud Italia, si stanno riducendo le ore in freddo durante la fase di riposo vegetativo e sta aumentando la variabilità tra gli anni (Figura 6). Per la frutticoltura, la schiusura gemme, la fioritura e la fase di allegagione dei frutti sono fasi fenologiche che vengono influenzate dal soddisfacimento delle ore in freddo e dalle ore in caldo. Il mancato soddisfacimento delle ore in freddo nelle diverse specie causa alcuni disturbi fenologici, tra cui fioritura tardiva, cascola delle gemme, fioritura disforme e con tempi prolungati, malformazioni fiorali (pistilli corti o assenti, deformi, ecc.) e un periodo più lungo tra la fioritura e il raccolto (Figura 7). L'assenza di freddo precoce a dicembre e gennaio ha un impatto negativo sulla quantità di freddo necessario (Bhattacharjee *et al.*, 2022).

La fioritura è una fase critica nello sviluppo dei frutti che ha un impatto sulla produzione e sulla produttività.

Un aumento di 0,45°C per decennio (1973–2009) nella temperatura della primavera precoce ha portato a un anticipo della fioritura di meli e peri di 1,6 giorni per decennio (Grab *et al.*, 2011).



Figura 7. Squilibri nelle fasi fenologiche della pera coscia: seconda fioritura avvenuta dopo la grande siccità estiva e in corrispondenza delle prime piogge, (prima decade di settembre 2024), i frutti, sebbene di pezzatura inferiore, hanno raggiunto la maturazione a dicembre 2024. (Metaponto, foto B. Dichio).

Impatti sulla qualità dei prodotti

La temperatura dell'aria influenza i processi di sviluppo e maturazione dei frutti. In particolare, le elevate temperature notturne nel primo periodo dell'accrescimento del frutto o prima dell'inizio della fase di maturazione hanno un impatto negativo sulle caratteristiche fisiche, chimiche e organolettiche dei frutti.

- In melicoltura, l'innalzamento delle temperature notturne in primavera provoca: una più rapida degradazione delle gibberelline, un'intensa, ma ridotta fase della citochinesi, una minore densità cellulare, maggiori spazi intercellulari, una ridotta serbevolezza, forme piatte, buccia con un numero minore di cellule aggregate, che determina la suscettibilità alla rugosità e lesioni.
- L'innalzamento delle temperature notturne in autunno e basse oscillazioni notte /giorno provoca: maggiore produzione di etilene, incrementa il processo di maturazione, maggiore degradazione delle clorofille, elevata degradazione degli acidi, presenza di vitrescenza dei frutti, diminuisce la colorazione di copertura, si riduce il periodo della raccolta (Stainer, 2011).
- Per i vigneti da vino, le temperature alte durante il processo di maturazione influenzano il metabolismo primario e quello secondario e provoca: anticipo di maturazione,

riduzione del contenuto di antociani e acidità, ridotta pigmentazione tutti fattori che determinano una riduzione della qualità.

- Nei frutti di kiwi le ridotte oscillazioni di temperatura notte/giorno alla fine della terza fase di sviluppo del frutto provoca un'accelerazione del processo di maturazione, con aumento dei °Brix, difficoltà di colorazione del mesocarpo, bassa qualità nella fase di conservazione (post-harvest).

Strategie di adattamento

I cambiamenti climatici impattano sul bilancio idroclimatico (BIC) estivo, (ET0 – Piogge) e quindi sul fabbisogno idrico delle colture. Tale fenomeno interessa anche gli areali produttivi del Nord Italia. Dall'analisi condotta in Emilia-Romagna (De Vecchi *et al.*, 2023, Fig. 6) si osserva un evidente calo, da una media di -240 mm nel 1961-90 a -314 mm nel clima recente. I valori più estremi, oltre -400 mm, sono stati osservati nel 2012.

Nel clima del Sud Italia (Metaponto-Basilicata, **Figura 8**) negli ultimi 25 anni si osserva una grande variabilità del BIC che si attestano su valori più frequenti di circa -700 mm con punte di circa -1.000 mm. L'analisi mette in evidenza come i due areali considerati sono estremamente diversi tra loro in termini di valori assoluti del bilancio idroclimatico, mentre sono molto simili relativamente all'elevata variabilità interannuale e interdecadale. Un bilancio idroclimatico più negativo significa certamente un più elevato fabbisogno irriguo per le colture, quindi un tema che riguarda il governo dei bacini idrologici e dei distretti irrigui.

I cambiamenti climatici in atto e quindi le peculiarità dei BIC degli areali di produzione, impongono l'adozione di strategie di precisione nella gestione della risorsa idrica destinata all'agricoltura.

L'elevata variabilità dei bilanci idrologici degli areali di produzione è una conseguenza dell'elevata variabilità nella distribuzione ed intensità delle piogge. L'irregolare distribuzione degli eventi piovosi può determinare periodi anomali di siccità o di eccesso di acqua piovana, entrambi fenomeni che possono determinare problemi alle colture in particolare quelle arboree (**Figura 9**).

Per contrastare tali fenomeni è importante la gestione della risorsa idrica secondo i principi dell'irrigazione di precisione, integrando le conoscenze di ecofisiologia delle colture con le innovazioni tecnologiche che rendono possibile il monitoraggio costante dei parametri del sistema Suolo-Pianta-Atmosfera. Il monitoraggio in continuo permette di disporre di misure giornaliere di tutti i parametri utili per computare il bilancio idrico della coltura e stimare il loro fabbisogno idrico. Le strategie di aggiustamento dei volumi irrigui da distribuire (*feedback*) attraverso il monitoraggio in continuo dello stato idrico delle colture e contenuto idrico del suolo, rappresentano una grande opportunità per aumentare la *Water Productivity*, evitando sprechi di acqua, danni da eccesso idrico e carenza idrica, e preservando la salute dell'agroecosistema produttivo.

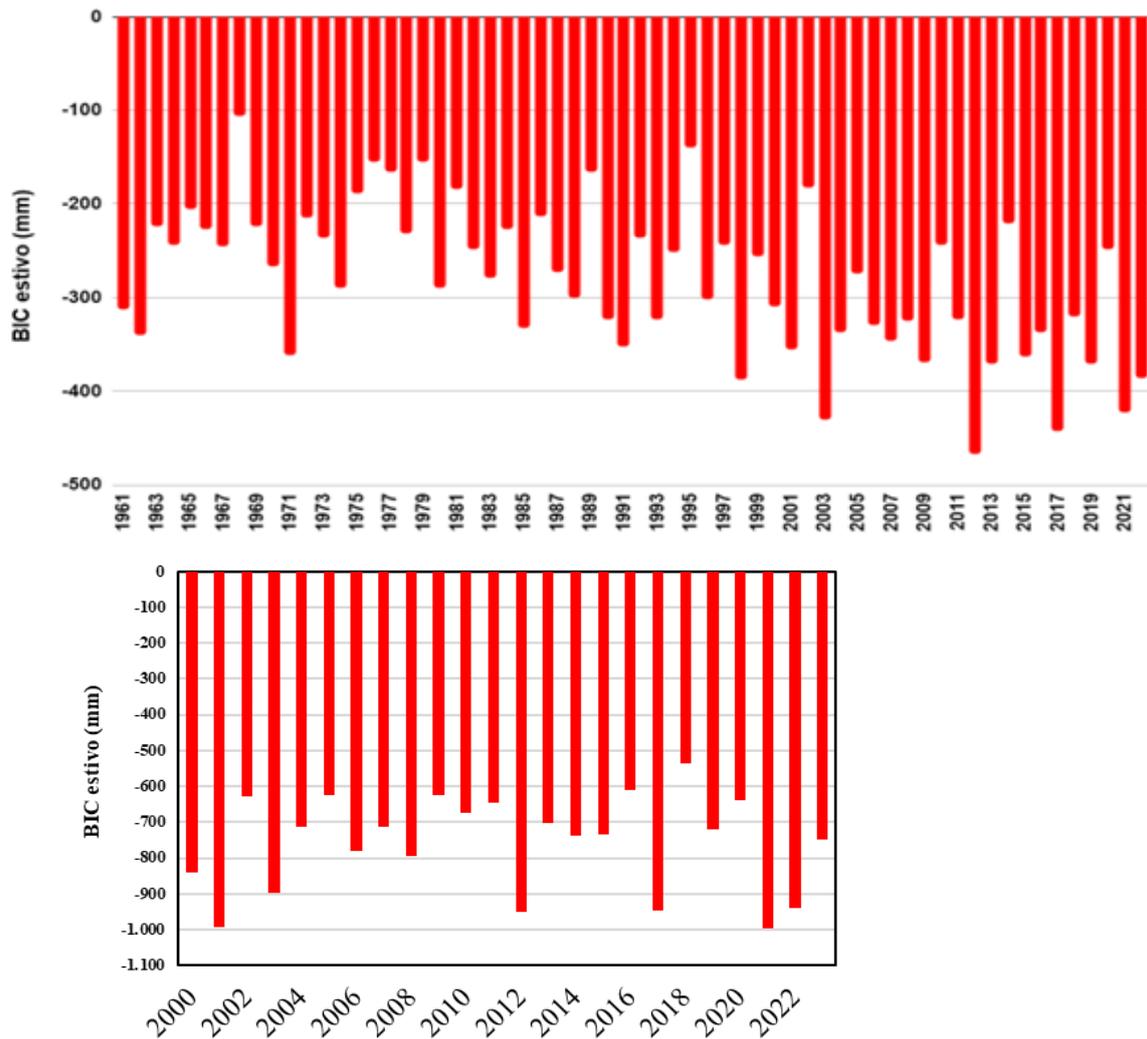


Figura 8. Confronto tra il bilancio idroclimatico (BIC) estivo (giugno-agosto) negli anni 1961-2021 dell'Emilia-Romagna (grafico in alto, da Vecchi et al., 2023) e il BIC dell'areale di produzione del Metapontino (marzo-ottobre) negli anni 2000-2023 (grafico in basso). Dati stazione meteorologica di Metaponto ALSIA (elaborazione B. Dichio).



Figura 9. Danni da carenza idrica sulle foglie di actinidia (sinistra), apparato radicale danneggiato da processi di asfissia del suolo determinato da sbilanciamento idrico nel suolo in seguito a piogge abbondanti e volumi irrigui in eccesso (destra) (foto B. Dichio).

Oggi giorno sono disponibili sensori di prossimità (della pianta e del suolo, Figura 10) e tecnologie di monitoraggio da remoto (strumenti satellitari, ICT, IoT, piattaforme, ecc) che rappresentano delle opportunità per supportare il processo della decisione irrigua. Applicazioni di strategie irrigue basate sulla restituzione parziale del fabbisogno idrico della coltura durante particolari fasi fenologiche meno sensibili alla carenza idrica, (ad esempio, durante la seconda fase di crescita del frutto, o dopo la raccolta) permette di ridurre i volumi irrigui stagionali ed aumentare la produzione in termini quali-quantitativi, incrementando la *water productivity*.

Esempi di stress termico e strategie di adattamento

Lo stress termico (temperature troppo elevate o troppo basse) altera la fisiologia delle piante compromettendo la crescita, la resa e la qualità delle produzioni (Figura 11).

Per la mitigazione dei danni da abbassamento termico (danni da gelate), l'uso dell'irrigazione soprachioma pulsata è la tecnica agronomica più diffusa e ancora valida in frutticoltura (Figura 12). Di recente sta crescendo l'interesse anche per i ventilatori da pieno campo, che sono impianti con ventole fisse dotate di fotovoltaico, anemometro e termometri.

L'aumento del numero di giorni estivi con temperature $>$ di 35°C rappresenta una minaccia per le produzioni in particolare negli ambienti del Sud Italia nei quali alle alte temperature, spesso, sono associati valori bassi di umidità relativa dell'aria (anche $<$ di 30%).



Figura 10. a-b-c): illustrazione di alcune fasi installazione di sonde per il monitoraggio dell'umidità del suolo, sonde SM100 waterscout spectrum (tecnologia FDR). d) sensori FDR Netafim installati a 20-30-60 cm di profondità. f) sistema Irrisense con sonda di profilo con sensori FDR integrati e con centralina per acquisizione dati e controllo da remoto (da Dichio et al., 2020).

Le reti ombreggianti e fotoprotettive in agricoltura rappresentano un valido strumento per ridurre la radiazione solare mitigare gli incrementi di temperatura, mitigare la riduzione dell'efficienza del fotosistema ed orientare la fisiologia della pianta. In aggiunta anche irrigazioni climatizzanti (sopra e sottochioma) possono mitigare gli incrementi delle temperature nei frutteti. L'aumento dei giorni con alte temperature dell'aria si ripercuote anche sulle colture in serra, dove le condizioni termiche durante i periodi estivi crescono drammaticamente, nonostante l'adozione di importanti ombreggiamenti (fino al 50%), superando facilmente i 45 °C, con disastrose conseguenze sia sulla produttività che sulla qualità delle produzioni. In queste regioni è quindi necessario un aggiornamento tecnologico delle serre, in modo da aumentare il tasso di ventilazione naturale, ampliando e automatizzando il controllo dell'apertura delle finestrate.

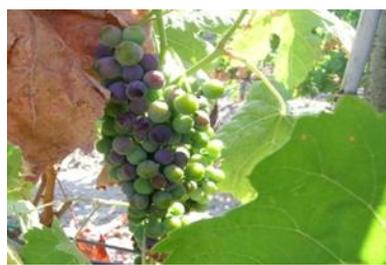


Figura 11 - Danni da colpi di sole ed elevato VPD dell'ambiente: da sinistra, pero (foto da McClymont, Ian Goodwin and Susanna Turpin), vite (foto V. Nuzzo) e kiwi (foto B. Dichio).



Figura 12. Impianto antibrina soprachioma con microaspersione pulsata (10-15 m³/ha) su giovane frutteto di avocado nel metapontino (foto B. Dichio).

Prospettive di sviluppo della ricerca

L'attuale scenario del cambiamento climatico ha gravi implicazioni per la produzione agricola e rappresenta sicuramente una nuova sfida per i sistemi produttivi, richiedendo con urgenza pratiche agricole più sostenibili e strategie di adattamento.

Le strategie di adattamento ai cambiamenti climatici in agricoltura sono fondamentali per garantire la resilienza e la sostenibilità delle coltivazioni, in particolare in un contesto in cui gli eventi climatici estremi e i cambiamenti nei modelli meteorologici stanno diventando sempre più frequenti e intensi. Sarà necessario investire nel settore della ricerca in agricoltura per definire le strategie da adottare per adattarsi ai cambiamenti climatici, alcune delle quali possono essere attuate nel breve periodo, mentre altre richiedono approcci più a lungo termine.

Vocazionalità e zonazione

I cambiamenti climatici in atto determinano modifiche importanti agli areali di produzione. Le mappe di vocazionalità e la zonazione agricola rappresenteranno, sempre più, strumenti fondamentali per sviluppare strategie di adattamento ai cambiamenti climatici in agricoltura. Questi strumenti sono utili per consentire agli imprenditori agricoli e ai responsabili delle politiche agricole di prendere decisioni riguardo la pianificazione delle attività agricole nei diversi territori.

Miglioramento genetico

Una delle strategie principali consiste nella costituzione e/o scelta di genotipi che siano più resistenti ai cambiamenti climatici, come la siccità, le alte temperature o le gelate improvvise.

In frutticoltura, per esempio, il miglioramento genetico deve essere orientato all'ottenimento di cultivar a basso fabbisogno in freddo (CU – *chilling unit*), ad elevato fabbisogno in caldo (GDH), con elevata efficienza dell'uso dell'acqua, cultivar con ciclo breve, tolleranti ad abbassamenti termici e temperature elevate, e autofertili.

Relativamente ai portinnesti si dovranno selezionare genotipi a basso fabbisogno in freddo, con apparati radicali profondi, tolleranti alla carenza idrica e all' eccesso idrico.

In orticoltura il miglioramento genetico deve essere orientato a selezionare varietà adatte a svilupparsi bene in ambienti caldi, con induzione a fiore il più indipendente possibile dalle temperature (sia alte che basse), oltre che maggiormente resistenti ai patogeni di origine tellurica. L'adozione di varietà di colture geneticamente più robuste e adattate alle nuove condizioni climatiche può ridurre i rischi per la produzione.

Agricoltura di precisione

L'implementazione e l'uso di tecnologie avanzate, come i sensori per monitorare il clima, le condizioni del suolo e lo stato di benessere delle coltivazioni, può permettere di supportare, in modo puntuale le decisioni degli imprenditori agricoli nella gestione dei sistemi produttivi. Con l'adozione di strategie di agricoltura di precisione, sarà possibile applicare risorse (acqua, fertilizzanti, pesticidi) in modo mirato, riducendo gli sprechi e migliorando l'efficienza. Fondamentale nei prossimi anni sarà l'introduzione di *Decision Support System* (DSS) e sistemi di *Digital Tween*, che permetteranno una migliore conduzione delle colture agrarie, in modo da ottimizzare l'uso degli input con vantaggi immediati di ordine economico e ambientale. Ad esempio, il progetto PRIMA iGUESS-MED (*Innovative Greenhouse Support System in the Mediterranean Region efficient fertigation and pest management through IoT based climate control*) ha sviluppato un DSS per la coltura del pomodoro in serra, che partendo dal monitoraggio della temperatura, umidità, intensità della radiazione in serra, fornisce direttamente sullo *smartphone* dell'agricoltore informazioni sulla quantità di fertilizzanti e di acqua necessari alla coltura, oltre a consigli su quando lanciare l'entomofauna utile o modificare le condizioni climatiche interne che possono favorire l'insorgenza di malattie fungine. I risultati del progetto iGUESS-MED hanno dimostrato che l'adozione del DSS può contribuire a ridurre del 20-25% il consumo idrico e dal 25 al 40% il consumo di alcuni fertilizzanti utilizzati nella coltura del pomodoro. Inoltre, l'adozione di sistemi di monitoraggio climatico avanzato e l'accesso a previsioni meteorologiche accurate possono consentire agli agricoltori di anticipare i cambiamenti nel clima e prendere decisioni tempestive per proteggere i raccolti.

Sostenibilità, agroecologia e agricoltura rigenerativa

Adottare pratiche agroecologiche, che combinano la sostenibilità ambientale con la produttività agricola, può contribuire a offrire risposte efficaci ai cambiamenti climatici. Queste pratiche comprendono l'adozione di pratiche agronomiche meno basate su fertilizzanti di sintesi

o agrofarmaci, diversificazione delle colture, integrazione di allevamenti e coltivazioni in sistemi agro-silvo-pastorali, recupero di pratiche come la rotazione delle colture e le consociazioni, l'uso di *cover crops* (colture di copertura) e la promozione della biodiversità negli agroecosistemi (HLPE, 2019). Le pratiche agroecologiche sono fortemente sensibili al contesto ecologico e socio-economico locale e quindi strutturalmente accoppiate ai processi sociali. Per questo motivo gli approcci agroecologici richiedono nuovi spazi di apprendimento che permettano la co-progettazione e concertazione degli interventi, per affrontare efficacemente complesse questioni agro-ambientali associate a pratiche convenzionali. Da qui deriva un ruolo per *living lab* e *lighthouses*, che rappresentano l'elemento portante dei nuovi programmi di ricerca europei come la *partnership agroecology* (<https://www.agroecologypartnership.eu/>) e la mission “*A soil deal for Europe*” (<https://mission-soil-platform.ec.europa.eu/>). Lo sviluppo dei *living lab* pone nuove importanti sfide per la ricerca scientifica in ambito agrario, in quanto richiede l'integrazione competenze tipiche delle metodologie delle scienze sociali, che raramente entrano nella sfera delle scienze agrarie (Ceseracciu *et al.*, 2023).

L'adozione di tecniche di agricoltura rigenerativa, con particolare attenzione al miglioramento della fertilità del suolo, permetterà di incrementare i servizi ecosistemici dei sistemi produttivi come il sequestro del carbonio nei suoli, incremento della sostanza organica, miglioramento della struttura, incremento della capacità di ritenzione idrica, riduzione dell'erosione, ecc.

Infrastrutture di protezione contro eventi estremi

L'adozione di infrastrutture resilienti, come serre moderne, impianti di drenaggio, sistemi di protezione contro il vento, grandine o le inondazioni, può aiutare a proteggere le colture da eventi climatici estremi e limitare le perdite. Le colture protette rappresenteranno sempre di più uno strumento di adattamento ai cambiamenti climatici.

Politiche di supporto e cooperazione internazionale

Le politiche agricole a livello nazionale e internazionale, in particolare, incentivi per l'adozione di pratiche agricole sostenibili, finanziamenti per la ricerca e l'innovazione, e la cooperazione tra paesi avranno un ruolo sempre più cruciale per affrontare le sfide globali del cambiamento climatico. Inoltre, gli operatori del settore agricolo devono essere adeguatamente supportati attraverso la formazione e l'accesso a risorse tecniche che li aiutino a implementare strategie di adattamento efficaci.

Conclusioni

Le sfide per l'agricoltura del futuro sono associate alle grandi trasformazioni della società e alle forzanti di cambiamento del clima che si manterranno in futuro anche nell'ipotesi, purtroppo ancora remota, di azzeramento delle emissioni climalteranti. È quindi necessario investire sull'adattamento, che impone interventi sito-specifici, basati sulla conoscenza approfondita delle risposte delle colture alle pressioni climatiche. L'adozione di strategie di

adattamento ai cambiamenti climatici nel comparto agricolo richiede approcci integrati che uniscano innovazione tecnologica, pratiche agricole sostenibili e politiche di supporto, educazione e sensibilizzazione e nuovi spazi di apprendimento e nuovi servizi a supporto della progettazione di interventi sito-specifici.

Solo attraverso un cambiamento significativo e un impegno collettivo sarà possibile affrontare le sfide del cambiamento climatico e garantire la sicurezza alimentare per le generazioni future.

Bibliografia

- Ainsworth, E. A., & Long, S. P. (2021). 30 years of free-air carbon dioxide enrichment (FACE): What have we learned about future crop productivity and its potential for adaptation? *Global Change Biology*, 27(1), 27–49. <https://doi.org/10.1111/GCB.15375>
- Asseng, S., Cammarano, D., Basso, B., Chung, U., Alderman, P. D., Sonder, K., Reynolds, M., & Lobell, D. B. (2017). Hot spots of wheat yield decline with rising temperatures. *Global Change Biology*, 23(6), 2464–2472. <https://doi.org/10.1111/GCB.13530>
- Asseng, S., Martre, P., Maiorano, A., Rötter, R. P., O’Leary, G. J., Fitzgerald, G. J., Girousse, C., Motzo, R., Giunta, F., Babar, M. A., Reynolds, M. P., Kheir, A. M. S., Thorburn, P. J., Waha, K., Ruane, A. C., Aggarwal, P. K., Ahmed, M., Balkovič, J., Basso, B., ... Ewert, F. (2019). Climate change impact and adaptation for wheat protein. *Global Change Biology*, 25(1), 155–173. <https://doi.org/10.1111/GCB.14481>
- Bhattacharjee P., Warang O., Das S., Das S. 2022. Impact of climate change on fruit crops-a review. *Current World Environment*, 17(2), 319. <https://doi.org/10.12944/CWE.17.2.4>
- Cammarano, D., Jamshidi, S., Hoogenboom, G., Ruane, A. C., Niyogi, D., & Ronga, D. (2022). Processing tomato production is expected to decrease by 2050 due to the projected increase in temperature. *Nature Food* 2022 3:6, 3(6), 437–444. <https://doi.org/10.1038/s43016-022-00521-y>
- Ceseracciu, C., Branca, G., Deriu, R., & Roggero, P. P. (2023). Using the right words or using the words right? Re-conceptualising living labs for systemic innovation in socio-ecological systems. *Journal of Rural Studies*, 104, 103154. <https://doi.org/10.1016/j.jrurstud.2023.103154>
- Colonico, M., Tomao, A., Ascoli, D., Corona, P., Giannino, F., Moris, J. V., Romano, R., Salvati, L., & Barbati, A. (2022). Rural development funding and wildfire prevention: Evidences of spatial mismatches with fire activity. *Land Use Policy*, 117, 106079. <https://doi.org/10.1016/J.LANDUSEPOL.2022.106079>
- Costa, G., Bassi D., (2025) La frutticoltura italiana deve guardare avanti. *Rivista di Frutticoltura*, 10, 1. <https://rivistafrutticoltura.edagricole.it/economia-politica/frutticoltura-italiana-guarda-avanti/>
- Dibari, C., Pulina, A., Argenti, G., Aglietti, C., Bindi, M., Moriondo, M., Mula, L., Pasqui, M., Seddaiu, G., & Roggero, P. P. (2021). Climate change impacts on the Alpine, Continental and Mediterranean grassland systems of Italy: A review. *Italian Journal of Agronomy*, 16(3), 1843. <https://doi.org/10.4081/IJA.2021.1843>
- Dichio B., Xiloyannis C., Sofo A., Montanaro G. 2007. Effects of post-harvest regulated deficit irrigation on carbohydrate and nitrogen partitioning, yield quality and vegetative growth of peach trees. *Plant and Soil* 290: 127-137. <https://doi.org/10.1007/s11104-006-9144-x>
- Dichio B, Mininni A.N., Xiloyannis E., Tuzio A.C., Xiloyannis C. 2020. Gestire la risorsa idrica in modo efficiente, serve un cambio di passo. *Rivista di Frutticoltura*, 6, 32:42. <https://hdl.handle.net/11563/113131>
- FAOSTAT. (2024). <https://www.fao.org/faostat/en/#home>
- FAO. 2019. The State of the World’s Biodiversity for Food and Agriculture. J. Bélanger & D. Pilling (eds.). FAO Commission on Genetic Resources for Food and Agriculture Assessments. Rome. <https://doi.org/10.4060/CA3129EN>
- Fu YH, Preve´ y JS, Vitasse Y. 2022. Editorial: Plant phenology shifts and their ecological and climatic consequences. *Front. Plant Sci.* 3:1071266. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1071266>

- Grab S., Craparo A. 2011. Advance of apple and pear tree full bloom dates in response to climate change in the southwestern Cape, South Africa 1973–2009. *Agriculture and Forest Meteorology* 151(3):406-413. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2010.11.001>
- Lasanta T., Errea M.P., Nadal-Romero E. 2017. Traditional agrarian landscape in the Mediterranean mountains. A regional and local factors analysis in the Central Spanish Pyrenees. *Land Degradation & Development* 28, 1626-1640. <https://doi.org/10.1002/ldr.2695>
- Mariani L, Cola G., Bulgari R., Ferrante A., Martinetti L. 2016. Space and time variability of heating requirements for greenhouse tomato production in the Euro-Mediterranean area. *Science of the Total Environment* 562, 834–844. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.04.057>
- Oliveira, S., & Zêzere, J. L. (2020). Assessing the biophysical and social drivers of burned area distribution at the local scale. *Journal of Environmental Management*, 264, 110449. <https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2020.110449>
- Palmieri, A. (2024). Frutticoltura senza sostenibilità economica. *Rivista di Frutticoltura*, n.2 p 40-44. <https://rivistafrutticoltura.edagricole.it/featured/frutticoltura-sostenibilita-economica/>
- Piccot, A., Argenti, G., Bellocchi, G., P. B., Cremonese, E., Della Vedova, M., Dibari, C., Galvagno, M., S. G., Napoléone, C., Stendardi, L., Targetti, S., Trombi, G., Varese, P., Bassignana, M., INRAE, I. A. R. d'Aoste ; P., Florence, U. degli S. di F. = U. of, Unité Mixte de Recherche sur l'Ecosystème Prairial - UMR ; VetAgro Sup - Institut national d'enseignement supérieur et de recherche en alimentation, santé animale, sciences agronomiques et de l'environnement-I. N. de R. pour l'Agriculture, l'Alimentation et l'Environnement, Valley, E. P. A. of A., ... PASTORALP, L. (2022). Adaptation policies and measures to cope with climate change in Alpine mountain farming. *J Environ Manage*, 336, 117575. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.117575>
- Quintas-Soriano, C., Torralba, M., García-Martín, M., & Plieninger, T. (2023). Narratives of land abandonment in a biocultural landscape of Spain. *Regional Environmental Change*, 23(4), 1–16. <https://doi.org/10.1007/S10113-023-02125-Z/FIGURES/4>
- Schillings, J., Holohan, C., Lively, F., Arnott, G., & Russell, T. (2024). The potential of virtual fencing technology to facilitate sustainable livestock grazing management. *Animal*, 18(8), 101231. <https://doi.org/10.1016/J.ANIMAL.2024.101231>
- Stainer R. 2011. Il cambiamento climatico e i suoi effetti sulla frutticoltura altoatesina. *Frutta e vite*. 1/2011 13-14. <https://hdl.handle.net/10863/29763>
- Vecchi A., Antolini G., Tomozeiu R., Pavan V., Villani G. 2023. I cambiamenti climatici mettono in difficoltà la produzione ortofrutticola. *Rivista di Frutticoltura*, 6, 46-49. <https://rivistafrutticoltura.edagricole.it/irrigazione/impatto-cambiamenti-climatici-ortofrutticoltura-in-difficolta/>
- Yan, D., Wu, S., Tang, Y., Zhu, J., Zhou, S., & Xu, Z. (2022). Arable land and water footprints for food consumption in China: From the perspective of urban and rural dietary change. *Science of The Total Environment*, 838, 155749. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2022.155749>

Sitografia

- HLPE, 2019. HLPE Report 2019 - Agroecological and other innovative approaches. Disponibile online su: <http://www.fao.org/3/ca5602en/ca5602en.pdf>
- Obesity and overweight. (n.d.). Retrieved January 26, 2025, from <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/obesity-and-overweight>
- Ritchie, H., Rosado, P., & Roser, M. (2023). Hunger and Undernourishment. *Our World in Data*. <https://ourworldindata.org/hunger-and-undernourishment>

