



Università  
Ca'Foscari  
Venezia

Corso di Laurea Magistrale  
in Economia e Gestione delle  
Aziende

Tesi di Laurea

**Innovazione tecnologica e sostenibilità nel  
settore agricolo**

**Relatrice**

Ch. Prof. Christine Mauracher

**Laureanda**

Chiara Tartaglia

Matricola 874591

**Anno Accademico**

2022 / 2023

# Indice

<b>Introduzione</b>	<b>1</b>
<b>1. Le dimensioni fondamentali dell'agricoltura</b>	<b>3</b>
1.1 Individuare le dimensioni fondamentali dell'agricoltura	3
1.2 Agricoltura e alimentazione	4
1.2.1 La relazione tra agricoltura e alimentazione	4
1.2.2 Food security e food safety	4
1.2.3 Nutrienti e qualità organolettica	13
1.2.4 Cibo e dimensione psicosociale	15
1.3 Agricoltura e ambiente	18
1.3.1 Il legame tra agricoltura e ambiente	18
1.3.2 Effetti del riscaldamento globale sulla produzione agricola	20
1.3.3 Utilizzo delle risorse idriche	23
1.3.4 Impatto dell'agricoltura sul suolo	26
1.3.5 Relazione tra energia e settore agricolo	42
1.3.6 Perdite e sprechi nella filiera alimentare	45
1.4 Agricoltura e dimensione sociale	50
1.4.1 L'impatto delle attività agricole sulla dimensione sociale	50
1.4.2 Sostenibilità del lavoro nel settore agricolo	50
1.4.3 La relazione con i consumatori	57
1.4.4 Impatto dell'agricoltura sullo sviluppo del territorio	60
1.5 Policy europee e italiane su agricoltura, sostenibilità e innovazione	62
1.6 Stato della letteratura su transizione ecologica e digitale in agricoltura	67
<b>2. Modelli agricoli per l'evoluzione del settore</b>	<b>73</b>
2.1 Garantire la sostenibilità dei modelli agricoli	73
2.2 Agricoltura di precisione	74
2.2.1 Cos'è l'agricoltura di precisione, tecnologie utilizzate e benefici	74
2.2.2 Stato dell'arte in Italia	83
2.3 Coltivazione indoor e verticale	86
2.3.1 Coltivazione indoor	86
2.3.2 Coltivazione verticale	90
2.3.3 Plant Factory with Artificial Lighting	93
2.4 Agricoltura biologica	96
2.4.1 Cos'è l'agricoltura biologica	96
2.4.2 Vantaggi e limiti	99
2.4.3 Le consociazioni	102
2.5 Agricoltura rigenerativa	106

2.5.1 Definizioni, obiettivi e strumenti	106
2.5.2 La copertura del suolo	111
2.6 Aridocoltura	118
<b>3. Innovazioni tecnologiche nel settore agricolo</b>	<b>121</b>
3.1 Le principali innovazioni e il loro scopo	121
3.2 Agriculture automation system	122
3.2.1 La robotica in agricoltura	122
3.2.2 Internet of Things	128
3.3 Intelligenza artificiale nel settore agricolo	136
3.3.1 Definizione e principali applicazioni	136
3.3.2 Machine Vision	142
3.3.3 Machine Learning	150
3.4 Blockchain e web3	157
3.4.1 Blockchain	157
3.4.2 Smart Contract	167
<b>4. Casi studio</b>	<b>171</b>
4.1 Premesse e approccio di analisi	171
4.2 Le realtà considerate: una panoramica	174
4.2.1 Meracinque	174
4.2.2 DiCristiana	177
4.2.3 Porto Felloni	180
4.2.4 Planet Farms	184
4.2.5 Ferrari Farm	187
4.2.6 Karadrà	189
4.2.7 Feeducia	192
4.2.8 Pixelfarming Robotics	194
4.3 Le tecniche agricole e le innovazioni tecnologiche implementate	196
4.3.1 L'obiettivo di analisi: approfondire percorsi e benefici	196
4.3.2 Percorsi e peculiarità nelle applicazioni	197
4.3.3 Vantaggi e benefici nelle applicazioni	209
4.4 Conclusioni e possibili pattern	214
<b>Conclusione</b>	<b>219</b>
<b>Bibliografia</b>	<b>225</b>
<b>Sitografia</b>	<b>250</b>
<b>Riferimenti per i casi</b>	<b>252</b>

# Introduzione

In virtù del suo ruolo essenziale per la produzione alimentare e il benessere della società, del suo profondo legame con il territorio, nonché delle criticità che la caratterizzano, l'agricoltura è stata oggetto di crescente attenzione negli ultimi decenni. A causa di fattori quali il depauperamento delle risorse naturali e l'aumento della popolazione globale, la necessità di trovare un equilibrio tra la produttività dell'attività agricola e la sostenibilità ambientale e sociale si sta facendo sempre più pressante.

La cosiddetta 'rivoluzione verde' che ha coinvolto il settore agricolo nelle decenni passate, pur portando a un notevole aumento generalizzato della produttività agricola, ha infatti provocato ingenti danni ambientali (di cui è causa e allo stesso tempo subisce gli effetti) con cui è ora necessario fare i conti. L'odierna consapevolezza in merito all'importanza delle risorse naturali e della loro tutela pone in evidenza la necessità di abbandonare tale strada, tracciando un nuovo percorso di sviluppo che sia in grado di coniugare efficienza e rispetto dell'ambiente, secondo un approccio che alcuni definiscono di '*sustainable intensification*' (Zachariah, 2019). In un mondo in continua evoluzione, l'innovazione è inoltre essenziale per il successo a lungo termine delle aziende agricole e per garantire agli agricoltori una redditività e delle condizioni lavorative e di vita soddisfacenti.

Il presente elaborato si propone dunque l'obiettivo di individuare le principali opportunità e soluzioni che emergono dall'integrazione di agricoltura, sostenibilità e innovazione, focalizzandosi in particolare sulle tecniche agricole e sulle nuove tecnologiche più adatte allo scopo. L'intera trattazione è basata sulla volontà di affrontare i diversi aspetti mantenendo una visione organica e sistemica, con la convinzione che qualsiasi tentativo di evoluzione e di miglioramento di un contesto complesso e dai molteplici equilibri come quello agricolo non possa poggiare su un'unica traiettoria o 'moda' emergente – per quanto innovativa e accattivante questa appaia –, ma debba prendere in considerazione l'intero sistema e le sue molteplici sfaccettature.

Il primo capitolo contiene un'analisi del panorama attuale che ne evidenzia limiti e criticità, ma anche potenziali opportunità per il settore. In particolare, sono approfondite le relazioni dell'agricoltura con dimensioni quali l'alimentazione,

l'ambiente e la società. Seguono dei brevi cenni in merito al panorama legislativo nazionale ed europeo in materia di sostenibilità del sistema agroalimentare e transizione ecologica e digitale del settore.

Nel corso del secondo capitolo verranno poi analizzati i principali modelli e tecniche di produzione idonei a rispondere alle esigenze evidenziate nel primo capitolo, in relazione ai quali si effettuerà una breve disamina, evidenziandone soprattutto vantaggi e limiti, con il fine di individuare possibili implicazioni e traiettorie aziendali e di settore.

Il terzo capitolo evidenzia poi le principali tecnologie emergenti che si candidano a rivoluzionare il modo in cui le attività agricole vengono svolte, come l'automazione e l'*Internet of Things*, l'intelligenza artificiale e la *blockchain*. Si esploreranno quindi le loro possibili applicazioni in agricoltura e le loro implicazioni, in termini di pianificazione e gestione dell'attività produttiva, di tracciabilità e di trasparenza della filiera, oltre che di sviluppo di nuovi modelli di offerta.

Saranno infine presentati otto esempi di aziende che, ciascuna con i propri strumenti, logiche e obiettivi, hanno implementato con successo le soluzioni presentate nel corso dell'elaborato, allo scopo di dimostrare la loro applicabilità in contesti reali e di evidenziare i possibili *driver* sottostanti e *pattern* ricorrenti che emergono dall'analisi. Si descriveranno a tal fine le azioni svolte e le eventuali tecnologie adottate dalle diverse realtà, le esigenze avvertite e le aspirazioni che hanno guidato tale percorso e i benefici risultanti.

# 1. Le dimensioni fondamentali dell'agricoltura

## 1.1 Individuare le dimensioni fondamentali dell'agricoltura

Il presente capitolo nasce con il fine di passare in rassegna i principali elementi che contribuiscono a definire la sostenibilità del settore agricolo italiano. Dal momento che l'obiettivo primario dell'attività agricola è la produzione di cibo per nutrire e fornire sostentamento all'umanità, il paragrafo 1.2 analizza il legame tra agricoltura e alimentazione e le molteplici sfaccettature ad esso associate.

Per garantire la sostenibilità del settore sul lungo periodo, la produzione di alimenti non può tuttavia avvenire a discapito dell'ambiente. Il paragrafo 1.3 elenca pertanto le principali risorse naturali coinvolte nella produzione agricola e gli effetti del loro utilizzo sull'ecosistema, anticipando alcune possibili soluzioni ai problemi che emergono.

Il paragrafo 1.4 pone invece in evidenza l'impatto che il settore agricolo ha sulla sostenibilità sociale del sistema territoriale in cui è integrato. Nonostante passi spesso in secondo piano rispetto alle questioni ambientali, si tratta di un elemento essenziale da considerare nel definire la traiettoria di sviluppo auspicabile per il settore.

Il paragrafo 1.5 esamina poi le principali *policy* italiane ed europee adottate al fine di indirizzare l'evoluzione del settore verso un futuro digitale e sostenibile. Tali politiche promuovono l'utilizzo di strumenti tecnologici innovativi a supporto degli obiettivi di sostenibilità stabiliti.

La simbiosi tra la transizione ecologica e digitale, definita *twin transition*, è ampiamente analizzata inoltre dalla letteratura accademica al fine di fornire supporto e indirizzo a legislatori e imprenditori interessati al tema. Il paragrafo 1.6 propone quindi una breve rassegna di quanto emerge da studi e ricerche accademiche in materia, al fine di comprendere meglio come l'innovazione tecnologica può contribuire a guidare il cambiamento verso una produzione alimentare più sostenibile, senza tralasciare tuttavia le criticità ancora irrisolte.

## 1.2 Agricoltura e alimentazione

### 1.2.1 La relazione tra agricoltura e alimentazione

L'obiettivo primario del settore agroalimentare, anche alla luce delle sfide e opportunità che il panorama attuale presenta, è quello di fornire cibo sicuro, sano e sostenibile, che sia in grado di rispondere alle esigenze e alle richieste dei consumatori. Dal momento che il consumo di cibo è fondamentale per la sopravvivenza umana, si deve innanzitutto garantire la sua presenza in quantità sufficiente a sfamare la popolazione, assicurando allo stesso tempo che i prodotti offerti non siano pericolosi o dannosi per la salute (vedi paragrafo 1.2.2).

La salubrità è oggi tuttavia una condizione necessaria ma non più sufficiente al successo sul mercato di un alimento, dal momento che sempre più spesso assumono rilevanza l'esperienza di consumo e l'impatto complessivo sul benessere del consumatore. I nutrienti contenuti all'interno dei prodotti agroalimentari possono infatti influenzare lo stato di salute della persona, proteggendola da carenze nutrizionali o patologie legate agli stili di vita, mentre l'elevata qualità organolettica si traduce in un'esperienza di consumo più piacevole, grazie alla presenza di odori e sapori gradevoli e intensi (vedi paragrafo 1.2.3).

A ciò si aggiunge infine un ulteriore componente, che coinvolge la sfera dei bisogni psicologico-sociali: il cibo, soprattutto nella cultura italiana, ha un elevato significato simbolico ed emozionale, può rappresentare un modo di prendersi cura di sé o di festeggiare ed è strettamente connesso a momenti tradizionali di convivialità. Per soddisfare la domanda e distinguersi dai concorrenti è pertanto indispensabile che i produttori, nella progettazione della propria offerta, considerino anche questo elemento (vedi paragrafo 1.2.4).

### 1.2.2 *Food security e food safety*

La sicurezza alimentare viene raggiunta quando «*all people, at all times, have physical and economic access to sufficient, safe and nutritious food to meet their dietary needs and food preferences for an active and healthy life*» [FAO, 1996]. Il termine nasce in origine per indicare la garanzia di approvvigionamento di una quantità di cibo

sufficiente a eliminare il rischio di carestie e denutrizione, ma assume in seguito una connotazione più ampia, ricomprendendo anche l'aspetto qualitativo degli alimenti (Pilati, 2004). Si inizia quindi a riconoscere il diritto alla salute del consumatore, che deve essere protetto dagli alimenti potenzialmente dannosi che possono essere messi in commercio in seguito a frodi alimentari o processi di stoccaggio e trasporto effettuati in condizioni inadeguate. Mentre in italiano il termine sicurezza alimentare si riferisce a entrambi gli aspetti, in inglese esiste una netta distinzione tra *food security* e *food safety*. La *food security* riguarda la dimensione quantitativa della produzione alimentare in termini di disponibilità, accessibilità e stabilità dell'offerta (Sassi, 2010). Con il termine *food safety* ci si riferisce invece alle adeguate condizioni igienico-sanitarie del prodotto, volte ad assicurare che «*food will not cause an adverse health effect for the consumer when it is prepared and/or consumed in accordance with its intended use*» [ISO, 2018, p. 4]. Nel presente elaborato si ricorre ai termini inglesi al fine di identificare e trattare in modo distinto questi due aspetti.

### ***Food security***

Il tema della *food security* ha assunto particolare rilevanza a livello internazionale a partire dagli anni '40, in seguito all'impatto della Seconda Guerra Mondiale sulla produzione agricola mondiale (Sassi, 2010). Le politiche alimentari dell'epoca si sono infatti concentrate sulla capacità dell'offerta – che era del tutto inadeguata a soddisfare i fabbisogni della popolazione – di garantire la disponibilità fisica e l'accessibilità dei prodotti agroalimentari necessari a saturare la domanda locale. Nei decenni successivi, con l'aumentare del livello medio di benessere e l'ampliarsi delle possibilità di acquisto il focus si è gradualmente spostato su aspetti più qualitativi dell'offerta alimentare. La capacità di far fronte alla domanda in termini quantitativi è per lo più considerata come un obiettivo acquisito, tant'è che la possibilità di recarsi al supermercato e acquistare qualunque alimento si desidera è oggi data per scontata. Una serie di fattori emergenti quali i cambiamenti climatici – di cui si parla da decenni, ma i cui effetti sull'agricoltura si fanno sempre più evidenti e rilevanti – o la guerra in Ucraina – che è uno dei principali produttori di grano a livello mondiale, al 6° posto nel 2021 secondo la FAO<sup>1</sup> – rendono tuttavia l'argomento quanto mai attuale.

---

<sup>1</sup> Dato estrapolato dal database FAOSTAT, disponibile su: [www.fao.org/faostat/en/#data/QCL](http://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL)



Per affrontare con successo la questione e disegnare delle traiettorie utili ad assicurare il mantenimento della *food security* nei decenni a venire, data la complessità che caratterizza il sistema agroalimentare, è indispensabile adottare un approccio sistemico e multidisciplinare, che sia in grado di cogliere e valorizzare le connessioni tra i diversi componenti e sistemi che lo compongono (van Mil et al., 2014). Si deve infatti tenere presente che «*the Agri&Food system is linked with the economic, health-care, and social-cultural systems. All of these systems are continuously changing, self-organising, interdependent, and adaptive, or, in other words: they are all complex systems*» [van Mil et al., 2014, p. 21]. Suddividere l'argomento in compartimenti stagni che non dialogano e non si interfacciano tra loro rischia al contrario di portare all'ottenimento di un ottimo parziale che non giova al sistema nella sua interezza e, anzi, genera squilibri in grado di acuire i problemi invece di risolverli. Tale approccio sistemico è imprescindibile poiché:

- i fattori che influenzano la produzione alimentare sono molteplici e devono essere considerati congiuntamente per elaborare strategie efficaci;
- intraprendere una serie di azioni locali può innescare ulteriori cambiamenti in aree o sistemi correlati che si riflettono a loro volta sul sistema iniziale. Se non si considerano tutti i fattori coinvolti è molto difficile riuscire a prevedere e gestire queste ripercussioni.

Quando le conseguenze delle politiche intraprese sugli equilibri complessivi del sistema vengono ignorate abbastanza a lungo, gli effetti possono essere devastanti. I sistemi complessi sono infatti caratterizzati dalla presenza di soglie (o punti di non ritorno). Fintanto che tali soglie non vengono oltrepassate il sistema è in grado di assorbire i cambiamenti senza subire eccessive alterazioni dei meccanismi che ne regolano il funzionamento; nel momento in cui si raggiunge uno di questi punti, tuttavia, il sistema si disgrega molto rapidamente ed emergono nuove regole e meccanismi differenti da quello di partenza (Monbiot, 2022). Si tratta di un cambiamento che una volta avvenuto è molto difficile da invertire. Un esempio di tale fenomeno può essere rinvenuto nelle *Dust Bowl*<sup>2</sup> che hanno caratterizzato parte degli Stati Uniti durante gli

---

<sup>2</sup> Il termine *Dust Bowl* indica una serie di tempeste di sabbia che si sono abbattute nelle Grandi Pianure degli Stati Uniti centrali durante gli anni 1931-1939. Furono una conseguenza dei danni ambientali provocati da decenni di tecniche agricole inadeguate, come la coltivazione intensiva e l'assenza di rotazione delle colture, che portarono il suolo vicino a un punto di non ritorno (Monbiot, 2022). Nel corso del decennio, agevolati dall'eccessiva siccità, «*strong winds blew away an average of 480 tons of topsoil per acre, degrading soil productivity, harming health, and damaging air quality*» [Hansen e Libecap,

anni '30. Per scongiurare il rischio che degli eventi catastrofici di tale portata si presentino di nuovo, Rockström et al. (2009) hanno identificato nove *planetary boundaries* da rispettare per rimanere all'interno di uno 'spazio operativo sicuro' all'interno del quale è bene rimanere (vedi paragrafo 1.3.1).

Dal momento che l'output delle attività agricole dipende strettamente dalle caratteristiche del luogo in cui queste si svolgono e dalla sua disponibilità di risorse naturali, è fondamentale garantire che tali attività non contribuiscano a modificare pesantemente l'ambiente in cui si inseriscono. Costruire un sistema agricolo che sia ambientalmente sostenibile si configura dunque come una condizione necessaria per assicurare una produzione adeguata a soddisfare la domanda e mantenere la *food security* (Capone et al., 2014). Ciò richiede un sostanziale intervento sulle modalità utilizzate per la produzione di cibo (vedi capitolo 2) e sulle tecnologie adottate (vedi capitolo 3), poiché l'attuale configurazione del sistema contribuisce in molti casi a depauperare quelle stesse risorse naturali che sono necessarie al suo mantenimento.

Per garantire la capacità del sistema agroalimentare di prosperare nonostante le sfide che dovrà affrontare negli anni a venire – tra le quali la Commissione Europea ricorda «*climate and environmental crises, changes in demography and geopolitical instability*» [Commissione Europea, 2022, p. 7] – è inoltre necessario agire sulla sua resilienza. Aumentarne la capacità di far fronte agli shock e ridurre la velocità di propagazione degli stessi è essenziale per mantenere elevate le rese agricole anche di fronte a cambiamenti repentini ed eventi avversi. È essenziale a tal fine che i diversi attori del sistema adottino comportamenti diversificati e non dipendano tutti dagli stessi input, così da limitare l'impatto che un eventuale shock può avere sulla produzione complessiva. Al contrario di quanto sarebbe auspicabile, si sta invece attualmente verificando una convergenza verso una dieta standard globale che rende il sistema vulnerabile agli shock. Ad oggi quattro piante (grano, riso, mais e soia) forniscono da sole quasi il 60% delle calorie coltivate in agricoltura (D'Odorico et al., 2014). A ridurre ulteriormente la diversificazione del sistema contribuiscono inoltre la diminuzione delle variabilità intra-specie, dovuta all'utilizzo di un esiguo numero di varietà colturali selezionate in base a criteri quali le maggiori rese per unità di terreno e la miglior resistenza a parassiti e malattie, e l'aumento dell'omogeneità genetica dei

---

2004, p. 666]. A causa di questi avvenimenti, quattro milioni di ettari persero gran parte del loro strato coltivabile, con un conseguente crollo della produzione alimentare in tutta l'area.

singoli esemplari all'interno della medesima varietà. Si tratta di un fenomeno che non può essere ignorato quando si analizza la *food security* poiché «*crop diversity – variation among crop species, their varieties and/or individual plants – underpins the productivity, resilience and adaptive capacity of agricultural systems*» [Khoury et al., 2021, p. 85]. La riduzione della diversità genetica, nota come *genetic erosion*, è dunque uno dei fattori che diminuiscono la capacità del sistema agricolo di garantire una produzione adeguata anche di fronte a condizioni ambientali in continuo cambiamento e non sempre favorevoli. L'importanza di tale aspetto è evidenziata anche dalle Nazioni Unite, che hanno inserito all'interno dei *Sustainable Development Goals* (SDGs) la necessità di mantenere «*the genetic diversity of seeds, cultivated plants and farmed and domesticated animals and their related wild species*»<sup>3</sup> per assicurare il raggiungimento dell'obiettivo 2 – *End hunger, achieve food security and improved nutrition and promote sustainable agriculture*.

Un'ulteriore sfida alla capacità del sistema agricolo di garantire la *food security* è fornita dall'andamento demografico previsto per i prossimi decenni. Non si hanno dati certi sull'impatto che la crescita della popolazione mondiale avrà sull'aumento della domanda agricola, ma le stime variano tra il +60% e il +110% entro il 2050 rispetto ai livelli del 2005 (D'Odorico et al., 2018). Tale incremento della domanda può essere assorbito dal settore agroalimentare in più modi (Capone et al., 2014):

1. espandendo la superficie totale coltivata, azione che deve però essere bilanciata con la necessità di mantenere intatti altri ecosistemi essenziali per la salute del pianeta. Secondo Rockström et al. (2009), per non alterare gli equilibri globali, possono essere convertite ad aree agricole al massimo il 15% delle terre emerse non coperte da ghiaccio. Per ottenere una produzione sufficiente senza superare tale limite, «*cropland should be allocated to the most productive areas, and processes that lead to the loss of productive land, such as land degradation, loss of irrigation water, and competition with land uses such as urban development or biofuel production, should be controlled*» [Rockström et al., 2009, p. 17]. Si deve inoltre considerare che una porzione compresa tra il 70 e l'80% della superficie terrestre non è adatta all'agricoltura «*due to limitations in growing season length, precipitation and soil moisture, soil characteristics or topography*» [Ramankutty et

---

<sup>3</sup> Descrizione tratta dal sito delle Nazioni Unite dedicato agli SDGs: [www.sdg.un.org/goals/goal2](http://www.sdg.un.org/goals/goal2)

al., 2002, p. 377]. Per quanto riguarda la superficie residua, circa il 50% è già coltivato e un'ampia percentuale della metà rimanente è attualmente coperta da foreste tropicali, che sono indispensabili per l'assorbimento della CO<sub>2</sub>. Per giunta, disboscare un'area coperta da foresta per fare spazio a nuove colture è un'azione dal risultato incerto dal momento che si tratta di terreni che, una volta disboscati, perdono la propria fertilità molto in fretta a causa delle temperature tropicali, che accelerano l'attività microbiologica e la conseguente decomposizione della materia organica, e della lisciviazione del terreno, causata dalle precipitazioni frequenti e abbondanti (Ramankutty et al., 2002);

2. aumentando la produttività delle aree attualmente coltivate, quando ciò è possibile. Alcuni studiosi, tra cui Grassini et al. (2012), esprimono tuttavia delle perplessità riguardo a tale possibilità. Essi sostengono infatti che il tetto massimo di produttività per alcune colture, tra cui riso, grano e mais, sia già stato raggiunto e che le maggiori rese ottenute negli ultimi decenni siano dovute a uno sovrasfruttamento delle risorse naturali che non può essere mantenuto a lungo. Ogni tentativo di aumentare ulteriormente le rese risulterebbe pertanto in un'erosione delle risorse naturali e in una diminuzione del ROI marginale dell'attività agricola dovuta alla quantità elevata di input (fertilizzanti, pesticidi, lavorazioni, ...) necessaria a raggiungere l'obiettivo. Infatti, più si satura lo *yield gap* che separa la resa attuale da quella potenzialmente ottenibile in condizioni ideali, più diventa difficile aumentare la produttività «*and the associated marginal costs, labour requirements, risks and environmental impacts may outweigh the benefits*» [Grassini et al., 2012, p. 8];
3. migliorando la distribuzione dei prodotti agricoli, in modo da ridurre gli sprechi e le perdite (vedi paragrafo 1.3.6);
4. modificando le abitudini di consumo in modo da ridurre la domanda di quegli alimenti che presentano un processo produttivo particolarmente *resource-intensive* (Capone et al., 2014) (vedi paragrafo 1.4.3).

I limiti e le sfide appena presentati non devono apparire come ostacoli insormontabili, ma devono stimolare la ricerca di soluzioni innovative volte ad assicurare il mantenimento della *food security*, a maggior ragione in un paese come l'Italia che si distingue positivamente per biodiversità e possibilità per l'agricoltura. Il

clima mediterraneo, la variabilità territoriale e la presenza di acqua in larga parte della superficie consentono infatti di coltivare molteplici prodotti di qualità e di possedere superfici coltivabili con possibilità produttive estremamente variegata, in accordo con la variabilità auspicata per garantire la resilienza del sistema agricolo. Questa predisposizione geografica ha fatto sì che nel corso della storia il settore agricolo italiano abbia vissuto un florido sviluppo, che ha dato origine a una molteplicità di prodotti tipici di eccellenza e alla creazione di una profonda conoscenza dell'attività agricola. Tale conoscenza può essere sfruttata per trovare soluzioni sempre migliori che si adattino all'ambiente e alle sue dinamiche e che consentano di trarre il meglio dal territorio e dalle circostanze.

### ***Food safety***

Il susseguirsi degli scandali che hanno coinvolto il comparto agroalimentare negli ultimi decenni (es. vino al metanolo, mozzarella blu, influenza suina, mucca pazza...) ha diminuito la fiducia dei consumatori e aumentato considerevolmente la loro sensibilità nei confronti della *food safety* (Pilati, 2004). Garantire la salubrità degli alimenti prodotti è pertanto uno degli obiettivi primari del settore agricolo. Nella valutazione della salubrità dei prodotti agricoli è importante tenere in considerazione che (Kaiser et al., 2020):

- affinché le conclusioni ottenute siano veritiere, il prodotto deve essere stato consumato per un lasso di tempo sufficiente a consentire l'osservazione e lo studio delle conseguenze a breve e a lungo termine sulla salute;
- la salubrità di un alimento può essere subordinata all'attuazione di specifiche strategie per prevenire l'accumulo di tossine post-raccolta, come ad esempio la conservazione in atmosfera modificata;
- nel caso in cui sia nota la presenza di tossine all'interno di un alimento, possono essere previsti dei metodi di preparazione accettati per assicurarne il consumo in sicurezza. È il caso ad esempio delle tipologie di funghi che possono essere consumate solo previa cottura.

Si devono inoltre tenere in considerazione i problemi legati a intolleranze o allergie, che riguardano i casi in cui un alimento, pur essendo innocuo per la maggior parte delle persone, si rivela dannoso o addirittura fatale per altre. Alcuni alimenti nello

specifico sono più propensi di altri a innescare reazioni allergiche e sono per questo motivo classificati come allergeni (es. soia e frutta secca). Si tratta di un elemento che i produttori di alimenti devono tenere in considerazione dato l'aumento della percentuale di popolazione europea che dichiara di avere almeno un'allergia alimentare (Spolidoro et al., 2022). Per fornire una soluzione a questo problema, alcuni studiosi stanno provando a creare dei *cultivar* OGM in cui le principali proteine responsabili della reazione allergica siano assenti o presenti in misura trascurabile (Sabbadini et al., 2021). Ciò richiede innanzitutto l'identificazione dei geni che causano la reazione allergica, che devono poi essere parzialmente o completamente silenziati. Nell'effettuare questo genere di intervento, si devono conoscere molto approfonditamente le interconnessioni tra le diverse vie metaboliche, poiché l'alterazione di una di queste vie può avere effetti secondari indesiderati sulle altre (Kumar, Shaunak e Verma, 2020). È stato ad esempio studiato da Muñoz et al. (2010) come il contenuto dell'allergene Fra a 1 nelle diverse varietà di fragola fosse correlato – oltre che alle condizioni ambientali di crescita – alla via metabolica di specifici tipi di flavonoidi normalmente presenti nel frutto, che si silenzia in modo direttamente correlato all'allergene in questione. Dal momento che il contenuto di flavonoidi influenza direttamente il colore del frutto, le varietà di fragola con un ridotto contenuto di Fra a 1 appaiono bianche. Si tratta in questo caso di un mutamento ben visibile ad occhio nudo, rilevabile anche dal consumatore meno esperto e che non provoca alcun danno (anche se il consumo di flavonoidi pare avere effetti benefici sulla salute e la loro diminuzione all'interno del frutto non può dunque apparire come un risultato positivo). Non si può tuttavia dare per scontato che gli effetti secondari che si innescano siano sempre innocui e si deve prestare elevata attenzione alla questione. Cercare di ottenere varietà ipoallergeniche si rivela inoltre più complesso per quei prodotti che devono rispettare dei requisiti tecnici ben definiti, come ad esempio il grano da cui si ottiene la farina, che deve soddisfare specifici parametri in termini di forza ed elasticità (Kaiser et al., 2020). Specifici modelli di simulazione *data-based* in grado di sfruttare la capacità dell'intelligenza artificiale di considerare molteplici variabili simultaneamente possono essere utilizzati a supporto di tali ricerche.

Una volta stabilita la salubrità dell'alimento di per sé, per non incorrere in problemi di *food safety*, si deve prestare attenzione alla corretta gestione del processo produttivo, durante il quale possono emergere due principali ordini di problemi:

1. contaminazione del prodotto con pesticidi ed erbicidi. «*An estimated 1 to 2.5 million tons of active pesticide ingredients are used annually, mainly in agriculture*» [Fenner et al., 2013, p. 752] e, dal momento che possono impiegare diversi anni a degradarsi completamente, i loro residui si accumulano costantemente in terreni, acqua e organismi viventi. I metaboliti<sup>4</sup> rinvenibili in natura possono essere altrettanto (o più) problematici del principio attivo che li origina e possono interferire con il corretto funzionamento del sistema immunitario, endocrino o riproduttivo dei vertebrati (Fenner et al., 2013). Tali elementi sono maggiormente presenti in alimenti convenzionali, mentre i prodotti biologici (Gomiero, 2018) sembrano presentare un profilo migliore sia in termini quantitativi (meno residui) che qualitativi (i residui sono meno dannosi). Anche nelle colture biologiche sono tuttavia talvolta rinvenuti residui di sostanze vietate dai regolamenti biologici. Ricordando che la certificazione biologica è una certificazione di processo e non di prodotto, ciò può essere causato da una contaminazione accidentale in campo o nella lavorazione, ma non si può escludere la presenza di un'etichettatura fraudolenta di prodotti convenzionali come biologici. Per ridurre al minimo i problemi correlati a pesticidi ed erbicidi è fondamentale adottare tecniche agricole che siano in grado di minimizzarne l'utilizzo;
2. presenza di metalli pesanti, micotossine e batteri indesiderati all'interno degli alimenti. Per quanto riguarda i metalli pesanti, McCarty (2014) riporta risultati migliori per i prodotti coltivati seguendo le regole dell'agricoltura biologica (vedi paragrafo 2.4), probabilmente grazie al divieto di ricorrere ai fertilizzanti a base di fosforo usati nell'agricoltura tradizionale, che sono spesso contaminati da cadmio. È inoltre fondamentale prestare particolare attenzione ai livelli di partenza dei vari metalli rilevati nel terreno, evitando di creare zone di accumulo che eccedano i limiti accettabili.

La contaminazione degli alimenti con micotossine è il risultato della colonizzazione delle colture da parte di funghi e muffe che le producono (Kaiser

---

<sup>4</sup> Il termine metaboliti indica i prodotti intermedi o finali del processo di decomposizione di una sostanza.

et al., 2020), che può avvenire in campo o durante lo stoccaggio dei prodotti (Gomiero, 2018). Per evitare che ciò accada, devono essere evitate quelle condizioni ambientali (ad esempio in termini di umidità e temperatura) che ne favoriscono la proliferazione.

La presenza di batteri indesiderati può essere causata dalla loro presenza all'interno del suolo o nell'acqua utilizzata per l'irrigazione, oppure dal contatto con altri alimenti contaminati.

Si deve infine prestare attenzione alla tutela della salute degli operatori coinvolti nel processo produttivo. Damalas e Koutroubas (2016) affermano a tal proposito che la loro esposizione ai pesticidi è spesso sottovalutata e notevolmente maggiore di quella dei consumatori, in termini di quantità e frequenza. L'esposizione avviene per lo più durante la preparazione e applicazione dei prodotti, ma può verificarsi anche in attività in cui i pesticidi non sono direttamente coinvolti a causa del contatto con i residui ancora presenti nelle colture o nel suolo o dell'erogazione nei campi vicini nel momento in cui l'operatore si trova in sito. Dhananjayan e Ravichandran (2018) evidenziano come *«correlation between occupational exposure to pesticides and development of a wide variety of diseases ranging from respiratory effects to various types of cancer has been identified»* [Dhananjayan e Ravichandran, 2018, p. 32]. Per tutelare la salute dei lavoratori agricoli, è quindi necessario minimizzare le occasioni in cui gli operatori entrano in contatto con pesticidi potenzialmente dannosi per la loro salute, riducendo il numero di applicazioni o automatizzando il processo. È possibile a tal fine ricorrere a soluzioni tecnologiche che riducano la necessità dei lavoratori agricoli di entrare in contatto con tali sostanze (vedi paragrafo 3.2) o adottare modelli agricoli che ne escludano l'utilizzo (vedi capitolo 2).

### 1.2.3 Nutrienti e qualità organolettica

Il cibo di cui ci nutriamo contiene numerose sostanze indispensabili al corretto funzionamento dell'organismo, note come nutrienti. I nutrienti sono responsabili della regolazione dei processi metabolici e biochimici, della riparazione dei tessuti corporei e della produzione di energia (Sabbadini et al., 2021). Possono essere suddivisi in macronutrienti (carboidrati, lipidi, proteine e fibre e micronutrienti (vitamine, minerali



e metaboliti secondari), a cui si aggiungono gli antinutrienti, che influenzano negativamente la biodisponibilità degli altri due.

La qualità organolettica di un prodotto riguarda invece il grado di soddisfazione sensoriale che esso provoca in chi lo consuma (Pilati, 2004). Comprende elementi come la freschezza, il sapore, il profumo e il colore ed è influenzato dal contenuto di nutrienti. Ad esempio, l'ossidazione di determinati acidi grassi provoca uno sgradevole sapore di rancido; mentre molecole come i flavonoidi, oltre ad avere un'azione antiossidante benefica per la salute del consumatore, modificano il colore dell'alimento (vedi paragrafo 1.2.2).

Il contenuto di nutrienti e le proprietà organolettiche di un prodotto fanno parte delle caratteristiche che contribuiscono a definirne il livello di qualità percepita. La presenza di nutrienti è correlata inoltre a potenziali effetti benefici dell'alimento sulla salute del consumatore. Nelle società di sazietà, caratterizzate dall'elevata disponibilità di prodotti e dalla conseguente saturazione del fabbisogno calorico giornaliero, le componenti 'salute' e 'soddisfazione' connesse ai prodotti agroalimentari assumono sempre maggior rilievo (Pilati, 2004). È pertanto fondamentale prestare attenzione a questi aspetti nella lavorazione, nella conservazione e nel trasporto dei prodotti agricoli, al fine di mantenere i livelli qualitativi quanto più elevati possibile. Particolare cura deve essere dedicata al trattamento dei prodotti freschi e freschissimi, che sono molto sensibili a processi di deterioramento quali (Behdani, Fan e Bloemhof, 2019):

- respirazione: catena di reazioni chimiche che trasformano l'amido in zuccheri e gli zuccheri in energia. La sua velocità diminuisce al diminuire della temperatura e della concentrazione di ossigeno in atmosfera. Anche se è talvolta utile (ad esempio nel processo di lievitazione nella panificazione), viene in genere considerato un elemento negativo perché riduce le proprietà nutritive e organolettiche dell'alimento;
- maturazione, che provoca mutamenti nella texture, nel colore e nel sapore dei prodotti freschi. La sua velocità aumenta all'aumentare della concentrazione di etilene<sup>5</sup> nell'atmosfera; è quindi necessario estrarre l'etilene prodotto durante il trasporto o lo stoccaggio dall'ambiente di conservazione. È inoltre necessario prestare attenzione quando si stoccano o trasportano prodotti diversi nella

---

<sup>5</sup> L'etilene è un un ormone vegetale prodotto da alcuni tipi di frutta e verdura che contribuisce alla loro maturazione.

stessa unità, poiché gli alimenti che producono etilene quando maturano (i cosiddetti frutti climaterici, come mele, banane e pere) possono far maturare più velocemente gli altri alimenti con cui entrano in contatto;

- traspirazione: l'acqua contenuta all'interno dell'alimento evapora per la differenza di temperatura e pressione rispetto all'atmosfera, modificando le caratteristiche organolettiche del prodotto. Per contenere tale fenomeno, è necessario che l'umidità relativa dell'atmosfera non si abbassi eccessivamente, evitando tuttavia di mantenere livello di umidità eccessivi che possono favorire la crescita di patogeni come muffe e funghi (vedi paragrafo 1.2.2).

La ricerca del benessere si concretizza inoltre in una maggiore popolarità di cibi *light*, *free from* e funzionali. Nel caso degli alimenti funzionali (o *superfood*), questi vengono presentati come veri e propri attori in grado di prevenire un ampio numero di disturbi e patologie grazie all'elevata densità di micronutrienti che li caratterizza. Tali micronutrienti sono chiamati anche nutraceutici, in virtù delle funzioni benefiche a loro attribuite. Il focus sui *superfood* coinvolge sia verdure e frutti tradizionali, di cui vengono scoperti sempre nuovi attributi funzionali, sia prodotti del tutto nuovi, che vengono intenzionalmente addizionati con composti nutraceutici (Arya et al., 2019).

#### 1.2.4 Cibo e dimensione psicosociale

Come visto nel paragrafo 1.2.3, l'occidente è oggi caratterizzato dall'abbondanza dell'offerta e dalla possibilità di accedere facilmente alle risorse necessarie a soddisfare i bisogni elementari e rientra per questo tra le 'società di sazietà'. In queste società, la dimensione puramente nutrizionale del cibo viene messa in secondo piano, in favore degli altri significati accessori che esso porta con sé (Montanari, 2010). Acquisiscono pertanto maggiore importanza altre dimensioni come: l'utilizzo di prodotti alimentari come beni posizionali; il cibo come momento di condivisione, coesione e convivialità e l'acquisto come atto di espressione della propria identità e dei propri valori.

#### **Posizionamento**

I prodotti alimentari sono considerati beni posizionali quando il loro acquisto non avviene solo per le qualità intrinseche che possiedono, ma viene visto come un

segno di distinzione sociale e un modo per affermare il proprio status (Pilati, 2004). Si tratta in genere di prodotti caratterizzati da anti-economicità, il cui prezzo non può essere interamente giustificato dai loro benefici funzionali (es. costose bottiglie di vino o liquori a produzione limitata). Possono avere un'utilità pratica e soddisfare anche dei bisogni primari, ma non è questo il fattore prevalente che spinge al loro acquisto e consumo. Il loro possesso serve infatti prima di tutto a comunicare la solidità finanziaria dell'acquirente e la sua appartenenza alla classe agiata, evidenziandone la ricchezza e il prestigio, secondo il paradigma del consumo ostentativo teorizzato da Veblen<sup>6</sup> (1899). Nell'acquisto di beni posizionali assumono particolare rilevanza i concetti di scarsità ed esclusività, dal momento che:

- meno persone hanno accesso a un determinato prodotto, più il suo possesso dimostra l'appartenenza dell'acquirente a una ristretta cerchia elitaria;
- parte dell'ostentazione che caratterizza i beni posizionali riguarda il possesso delle 'giuste conoscenze', che rappresentano un requisito necessario per l'accesso a determinati canali di vendita esclusivi.

Un perfetto esempio di ciò sono quei prodotti che vengono venduti unicamente ai soci di un dato club, a cui è possibile essere ammessi solo su invito e pagando una rilevante *fee* annuale.

## **Comunità**

La condivisione dei pasti è un aspetto tipico della cultura italiana, in cui ad esempio «*la cena [...] è un momento prevalentemente relazionale, durante la quale si avvia un processo di costruzione e condivisione dell'intimità e della vicinanza*» [Barilla Center For Food & Nutrition, 2009, p. 13]. Il cibo racchiude infatti in sé un significato relazionale importante: condividere il cibo con qualcuno significa in molti casi riconoscerlo come un membro della propria comunità. Ciò avviene tramite la creazione di rituali, convenzioni e gusti comuni (Barilla Center For Food & Nutrition, 2009).

---

<sup>6</sup> Veblen, nel testo '*The Theory of the Leisure Class*' parla di *conspicuous consumption* come di quel consumo che avviene per ostentare ricchezza e prestigio, nonché la propria appartenenza a una determinata classe sociale. «*Since the consumption of these more excellent goods is an evidence of wealth, it becomes honorific; and conversely, the failure to consume in due quantity and quality becomes a mark of inferiority and demerit. [...] Conspicuous consumption of valuable goods is a means of reputability to the gentleman of leisure.*» [Veblen, 1899, p. 53]

Fondamentale per la relazione tra socialità e alimentazioni è il ruolo del rito. «*Si può definire il rito come un insieme di atti e pratiche, il cui ripetersi va a formare nel tempo i modelli culturali di una data società. Esso svolge nel medesimo tempo una funzione di trasmissione dei valori e delle norme, di istituzionalizzazione dei ruoli, di riconoscimento dell'identità e di coesione sociale*» [Barilla Center For Food & Nutrition, 2009, p. 17]. Tutti gli appartenenti a una determinata comunità riconoscono questo codice condiviso e vi prendono parte, attribuendo all'atto di mangiare insieme uno specifico valore relazionale (es. banchetti di matrimonio o cene di lavoro).

La dimensione sociale e relazionale degli alimenti è talvolta talmente importante da arrivare ad attribuire loro un ruolo totalmente autonomo dalla sua dimensione nutrizionale, potenzialmente confliggendo con essa. Si pensi ad esempio al valore del caffè – che è di per sé una bevanda eccitante – come momento di pausa e relax (Montanari, 2010).

### **Identità e valori**

Dal momento che un prodotto porta con sé un insieme di dimensioni accessorie che ne affiancano gli attributi funzionali, il consumatore vede l'atto di acquisto come un'espressione della propria identità e un modo di affermare i propri valori, giungendo spesso a identificarsi con i propri consumi (Pilati, 2004). È il caso ad esempio di una persona che rifiuta di acquistare prodotti con un impatto ambientale o sociale negativo, nel rispetto di valori quali l'importanza di tutelare l'ambiente e l'attenzione alla sostenibilità sociale, o ancora di chi decide di seguire una dieta vegetariana o vegana per motivi etici, il cui valore guida è in questo caso il rispetto di ogni forma di vita animale. La scelta di (non) acquistare un prodotto agroalimentare diviene quindi strettamente connesso alla volontà di esprimersi, «*il cosa e il come mangiare sono intesi come un insieme di prodotti e convenzioni dal preciso significato identitario*» [Barilla Center For Food & Nutrition, 2009, p. 13].

Data la crescente importanza delle componenti valoriali nelle scelte di acquisto, per creare un legame profondo e duraturo con i consumatori, il produttore agricolo deve esprimere un'identità chiara e coerente con le strategie di *business* messe in atto. È possibile ad esempio proporsi al mercato come attori rispettosi dell'ambiente grazie all'adozione di pratiche agricole sostenibili, oppure collaborare con attori del settore

turistico per valorizzare il territorio e comunicare la propria attenzione alla comunità locale (vedi paragrafo 1.4.4).

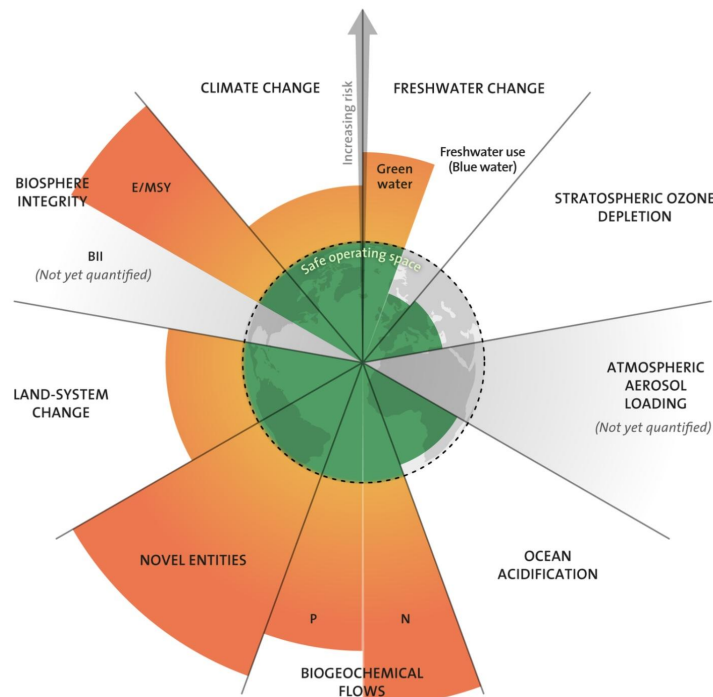
## 1.3 Agricoltura e ambiente

### 1.3.1 Il legame tra agricoltura e ambiente

Nell'indagare la relazione tra attività antropiche e ambiente, Rockström et al. (2009) individuano nove principali processi che influenzano la sostenibilità del sistema.

---

**Figura 1.1 - I planetary boundaries nella versione aggiornata del 2022**



FONTE: Azote per lo *Stockholm Resilience Centre*, basato su Wang-Erlandsson et al., 2022; Persson et al., 2022; Steffen et al., 2015. Disponibile su: [www.stockholmresilience.org/research/planetary-boundaries.html](http://www.stockholmresilience.org/research/planetary-boundaries.html)

---

Ognuno di questi processi è poi associato a una soglia critica, definita dagli autori *planetary boundary*, che deve essere rispettata per non intaccare la capacità della Terra di mantenere lo stato di equilibrio in cui si trova (vedi figura 1.1). Gli autori sostengono a tal proposito che «*transgressing one or more planetary boundaries may be deleterious*

*or even catastrophic due to the risk of crossing thresholds that will trigger non-linear, abrupt environmental change within continental- to planetary-scale systems»* [Rockström et al., 2009, p. 1]. Il rischio che il superamento di una determinata soglia provochi dei cambiamenti su larga scala è aumentato dalle numerose interconnessioni che sussistono tra i diversi processi e che possono causare le evoluzioni repentine e non lineari tipiche dei sistemi complessi prospettate dagli autori.

La relazione tra settore agricolo e *planetary boundaries* è multifaccettata e bidirezionale: da un lato lo svolgimento delle attività agricole può portare al superamento di alcune soglie critiche, dall'altro le condizioni ambientali determinate dai suddetti processi influenzano le rese e la qualità della produzione agricola.

Per quanto riguarda l'impatto delle attività agricole sul raggiungimento e il superamento dei *planetary boundaries*, i principali processi coinvolti sono:

- l'utilizzo di fertilizzanti a base di azoto e fosforo e la loro conseguente dispersione nell'ambiente, che ha un'azione lenta ma costante di erosione della resilienza di importanti sottosistemi del sistema Terra<sup>7</sup>. L'eccessivo ricorso a fertilizzanti di sintesi ha pertanto portato al superamento della soglia critica per i flussi biogeochimici dell'azoto e del fosforo (Rockström et al., 2009);
- il massivo utilizzo di poche specie e varietà vegetali e il predominio delle monocolture, che provocano una perdita di biodiversità, intaccando l'integrità della biosfera e riducendo la capacità degli ecosistemi di adattarsi ai cambiamenti (Campbell et al., 2017);
- il sistematico prelievo di acqua dolce dalle riserve idriche a una velocità che supera il tasso di riempimento delle falde, che ha conseguenze devastanti per gli ecosistemi e la biodiversità (vedi paragrafo 1.3.3);
- i mutamenti nell'utilizzo del suolo, che sono guidati dall'espansione e l'intensificazione dell'attività agricola. Data la situazione attuale, un'ulteriore espansione dei terreni coltivati su scala globale può minare le capacità di

---

<sup>7</sup> Tra gli effetti più dannosi della dispersione di fosforo e azoto nell'ambiente si ricorda l'eutrofizzazione, un processo degenerativo dei bacini idrici provocato dall'eccessiva presenza di sostanze ad effetto fertilizzante disciolte all'interno dell'acqua. L'elevata concentrazione dei nutrienti favorisce infatti la formazione di alghe (fitoplancton) che ricoprono la superficie del bacino idrico e ne modificano il colore, la trasparenza e l'ossigenazione. La carenza di ossigeno che ne deriva causa stati di sofferenza nelle comunità di organismi marini e morie di pesci, nonché la possibile produzione di tossine dannose per gli esseri umani (Stein, 2021)

regolazione del Sistema Terra, modificando il sistema climatico e il ciclo idrologico (Rockström et al., 2009);

- l'emissione di gas a effetto serra, che sono provocati dalle attività agricole sia direttamente, sia in modo indiretto quando il terreno in cui sono svolte è stato oggetto di deforestazione (Campbell et al., 2017).

L'insieme delle pratiche elencate finora può inoltre provocare fenomeni di degradazione del suolo quali erosione, perdita di materia organica, desertificazione, etc., che diminuiscono la capacità di autoregolazione dell'ecosistema (vedi paragrafo 1.3.4).

Considerando invece gli effetti che il raggiungimento dei *planetary boundaries* ha sull'agricoltura, si possono evidenziare:

- i danni alle colture provocati dalla diffusione di aerosol nell'atmosfera e dalle piogge acide che ne conseguono (Rockström et al., 2009);
- la riduzione delle rese e talvolta anche la completa distruzione dei raccolti provocata dall'aumento in termini di frequenza e intensità di fenomeni meteorologici estremi come alluvioni, siccità o sbalzi di temperatura;
- la variazione della produttività delle colture in conseguenza all'aumento della temperatura e della concentrazione di CO<sub>2</sub> in atmosfera (vedi paragrafo 1.3.2);
- le modifiche nella distribuzione dei parassiti provocate dall'inquinamento da sostanze chimiche e dai cambiamenti climatici, che possono aumentare la necessità di ricorrere ai pesticidi (Rockström et al., 2009).

Particolare attenzione deve essere dedicata inoltre all'utilizzo di energia nel settore (vedi paragrafo 1.3.5) e alla presenza di perdite e sprechi (vedi paragrafo 1.3.6), che diminuiscono la sostenibilità del sistema.

### 1.3.2 Effetti del riscaldamento globale sulla produzione agricola

La principale causa del vertiginoso innalzamento della temperatura media che si sta verificando a livello globale è da ricercare nell'aumento della concentrazione atmosferica di gas serra quali l'anidride carbonica (CO<sub>2</sub>), il metano (CH<sub>4</sub>) e il protossido di azoto (N<sub>2</sub>O). Il livello di gas serra in atmosfera e l'agricoltura sono strettamente legati da una relazione bidirezionale: da un lato «*land-use activities currently account for*

*approximately one-third of the human-induced warming from GHG increases» [Paustian, 2014, p. 140], dall'altro la variazione di temperatura conseguente può avere un elevato impatto sulla produttività delle colture. Tale impatto varia per natura ed entità in relazione alla zona considerata e alle sue caratteristiche: «Although some regions may benefit from global warming, and increase their agricultural output, (where water is not an issue), many other areas of the globe [...] may experience a reduction in agricultural productivity» [Gomiero, 2016, p. 5]. All'aumento delle temperature si associano inoltre numerosi altri squilibri ed eventi atmosferici estremi che possono influire sulla produzione agricola, tra cui ondate di calore e siccità, ma anche violente precipitazioni e alluvioni (Toreti et al., 2019). Si tratta di aspetti che è fondamentale tenere in considerazione nella progettazione di un sistema agricolo poiché pongono delle sfide indispensabili da affrontare per garantire la *food security* (vedi paragrafo 1.2.2) anche negli anni a venire. Muench et al. affermano infatti a tal proposito che «it is expected that global warming will increasingly affect food security by 2050» [Muench et al., 2022, p. 24]. È quest'ultimo il caso di buona parte del territorio italiano, che, essendo esposto a temperature elevate e aridità durante la stagione estiva (vedi paragrafo 1.3.3), rischia di veder diminuire notevolmente le rese delle proprie colture. Secondo Zampieri et al., (2017) più del 40% della variabilità nella resa delle colture di grano a livello globale può essere spiegata esaminando gli stress termici e idrici a cui sono state sottoposte nelle fasi chiave della loro crescita. Si deve inoltre tenere presente che «the interaction of water stress, elevated CO<sub>2</sub> and high temperature has an impact on mycotoxin production and increases the risks associated with aflatoxin contamination» [Toreti, 2019, p. 226], con conseguenze sulla *food safety*.*

Per affrontare la siccità tipica dei mesi estivi, alcune aree hanno sviluppato tecniche agricole in grado di massimizzare la produttività in assenza (o quasi) di precipitazioni, anche se le rese ottenibili non sono ad oggi comparabili con quelle ottenute da campi irrigati (vedi paragrafo 2.7). Sono inoltre sempre più frequenti i progetti che utilizzano la tecnologia al fine di ottimizzare le pratiche agricole sulla base delle osservazioni costanti degli eventi atmosferici. È poi utile ricordare che l'aumento della temperatura apre a nuovi potenziali percorsi di sviluppo. È ad esempio oggi possibile coltivare nel Sud Italia vari tipi di prodotti tropicali, di cui alcuni addirittura fuori serra (Romualdi, 2020), fatto impensabile fino a qualche decennio fa. Secondo un rapporto Coldiretti (2022), nel giro di cinque anni la produzione di frutta tropicale Made



in Italy è quasi triplicata, arrivando a sfiorare i 1200 ettari, con un effetto positivo sul reddito degli agricoltori coinvolti. Resta da capire se le opportunità che si stanno presentando e che continueranno a emergere negli anni a venire saranno sufficienti a compensare le possibili perdite e se il sistema agricolo italiano sarà in grado di organizzarsi in modo tale da coglierle al meglio.

Agli effetti sulle rese, si deve sommare inoltre l'influenza che temperatura e CO<sub>2</sub> atmosferica hanno dimostrato sul livello di nutrienti contenuti negli alimenti prodotti. Come già evidenziato (vedi paragrafo 1.2.3), l'assunzione di micro e macronutrienti attraverso il cibo è essenziale per la salute. Alcuni esperimenti sembrano tuttavia indicare che «una combinazione di temperature più elevate e maggiori concentrazioni di anidride carbonica nell'aria riduce sensibilmente il contenuto di minerali (quali ferro, zinco, calcio e magnesio), proteine e vitamine del gruppo B nelle colture» [Monbiot, 2022, p. 63]. L'esatto meccanismo per cui ciò accade non è ancora noto, ma si sa che l'entità della riduzione varia in relazione al tipo di coltura e allo specifico *cultivar*. Una riduzione rilevante nel contenuto di nutrienti è stata ad esempio rilevata da Bach et al. (2019) in riso, grano, patate, mais e canna da zucchero. Secondo Myers et al. (2014) e Costes et al. (2016) le differenze emerse tra *cultivar* di una stessa specie possono essere sfruttate per risolvere parzialmente il problema. Selezionando attivamente le varietà meno sensibili alle variazioni di temperatura e di CO<sub>2</sub> in atmosfera, sarebbe infatti possibile ottenere delle colture in grado di fornire i nutrienti necessari nonostante le mutate condizioni ambientali.

Una possibile spiegazione di questo fenomeno è legata alla maggiore velocità con cui le piante crescono quando si trovano in ambienti con temperature e concentrazioni di CO<sub>2</sub> elevate. Tale accelerazione nello sviluppo «shortens the crop production duration and reduces the time to accumulate biomass thereby lowering concentrations of nutrients, and producing lower yields» [Macdiarmid e Whybrow, 2019, p. 384]. Vergara et al. (2014) attribuiscono inoltre parte della diminuzione delle rese al rallentamento della fotosintesi che si verifica quando la temperatura atmosferica supera quella ottimale. Beach et al. (2019) hanno riscontrato come, anche se a parità di altre condizioni la maggiore concentrazione di CO<sub>2</sub> in atmosfera ha un potenziale effetto fertilizzante che può bilanciare gli effetti negativi legati alle temperature più elevate, nella realtà «increased atmospheric concentrations of CO<sub>2</sub> and other greenhouse gases lead to changes in temperature, precipitation patterns, extreme weather events, and other climatic

*conditions that must be considered simultaneously*» [Beach et al., 2019, p. 308] e pertanto l'esito complessivo sulle rese agricole è tendenzialmente negativo.

Gli eventi appena descritti che modificano le zone ideali di produzione, le rese e il contenuto di nutrienti dei prodotti agricoli possono essere affrontati singolarmente dagli attori operanti nel settore – ad esempio introducendo nuove colture o selezionando i cultivar più adatti al territorio –, ma ciò non può sostituire la presenza di un'azione sistemica, che valichi i confini settoriali e nazionali e abbia come obiettivo primario la riduzione del riscaldamento globale. Limitarsi a pianificare delle strategie di adattamento senza tentare di contenere il fenomeno non è infatti sufficiente a garantire la sostenibilità sociale e ambientale del sistema agricolo. Coerentemente con quest'idea, la Commissione Europea ha inserito tra gli obiettivi del *2030 Climate Target Plan*<sup>8</sup> il contenimento del riscaldamento globale, limitando l'aumento della temperatura media a +1,5°C rispetto a quella del periodo pre-industriale.

### 1.3.3 Utilizzo delle risorse idriche

L'acqua occupa il 70% della superficie terrestre, tuttavia «*only 2.5% of total water on the earth's surface is fresh water, [...] most of the fresh water on the earth is locked up in glaciers as ice and only a small fraction is available in rivers and lakes*» [Nemali e Stephens, 2014, p. 335]. Ciò rende quella piccola frazione di acqua dolce accessibile un bene quanto mai scarso e prezioso per l'umanità. In base alla sua origine l'acqua può essere suddivisa *blue water* (o acqua blu) e *green water* (o acqua verde) (Greco e Antonelli, 2015). Con il termine *blue water* si indica quell'acqua che è contenuta in bacini idrici superficiali (fiumi, torrenti, laghi) o sotterranei (falde acquifere). È di facile accesso, stoccaggio e trasporto. Ha origine da fonti rinnovabili quando si tratta di acqua di superficie o di falde continuamente alimentate, da fonti non rinnovabili se appartiene a falde con un tasso di riempimento molto basso, che impiegano migliaia di anni a formarsi<sup>9</sup>. La *green water* è invece quell'acqua piovana che non confluisce in un bacino idrico superficiale o sotterraneo, ma viene immediatamente assorbita dalle piante o dal suolo e da lì ritorna nell'aria sotto forma di vapore per effetto congiunto della traspirazione attraverso le piante e dell'evaporazione dal terreno. L'acqua verde è parte

---

<sup>8</sup> [https://climate.ec.europa.eu/eu-action/european-green-deal/2030-climate-target-plan\\_en](https://climate.ec.europa.eu/eu-action/european-green-deal/2030-climate-target-plan_en)

<sup>9</sup> L'acqua presente in questo tipo di falde sotterranee è nota come acqua fossile.

integrante del sistema piante-pioggia-suolo e non se ne può disporre liberamente. Rappresenta circa l'80% dell'acqua utilizzata a livello globale nella produzione agricola (Allan, 2015) ed è fondamentale per la crescita delle colture in aree non irrigate, lo sviluppo della vegetazione spontanea e la tutela della biodiversità. A queste due categorie si aggiunge poi la *grey water*, che non è direttamente coinvolta nella produzione degli alimenti, ma è definita come la quantità di acqua necessaria a diluire gli inquinanti utilizzati durante il processo produttivo, al fine di ripristinare il livello di qualità dei bacini idrici contaminati. L'acqua in tutte le sue forme è strettamente legata all'agricoltura poiché l'assorbimento di *green water* è fondamentale per la crescita delle piante e l'accesso alle riserve di *blue water* consente di irrigare le coltivazioni quando l'acqua piovana si rivela insufficiente. Pur essendo i campi irrigati solo una piccola percentuale del totale, il settore agricolo è responsabile del 70% di tutta l'acqua blu prelevata da falde acquifere, torrenti e laghi a livello globale (Gomiero, 2016). L'utilizzo di pesticidi e fertilizzanti e la loro dispersione nell'ambiente circostante influenza inoltre la quantità di acqua grigia coinvolta nel processo agricolo.

La ridotta disponibilità di acqua diventa un problema per le colture quando «*water extraction from the roots is less than that lost from the plants (usually from the aerial leaves and stems) determined by the evaporative demand of the atmosphere*» [Nemali e Stephens, 2014, p. 335]. Si dice in questo caso che le piante sono sottoposte a uno stress idrico. Tale stress idrico può essere accentuato dalle temperature elevate (Zampieri, 2017), dal momento che queste contribuiscono ad alterare l'equilibrio tra pianta e suolo «*enhancing soil water demand and reducing soil water supply*» [Toreti et al., 2019, p. 224], riducendo di conseguenza la quantità di acqua a cui la pianta può accedere attraverso le sue radici. Una temperatura maggiore modifica inoltre l'intensità degli scambi che avvengono con l'atmosfera, aumentando la traspirazione delle foglie e riducendo la capacità della pianta da trattenere l'umidità (Nemali e Stephens, 2014). Le principali modalità in cui si manifesta la scarsità di acqua sono (Rockström et al., 2009):

- la minor quantità di *green water* rilevabile nel terreno, che è amplificata dalla degradazione del suolo e dalla riduzione nella materia organica al suo interno (vedi paragrafo 1.3.4);
- la diminuzione della *green water* che sotto forma di vapore fuoriesce da suolo e piante per tornare nell'atmosfera (*feedback flow*), con conseguenti modifiche nei pattern delle precipitazioni locali e regionali;

- la riduzione delle riserve idriche di *blue water*, che è causata dall'eccessivo sfruttamento dei bacini idrici (velocità di utilizzo > tasso di rinnovamento).

Confrontando i dati sul consumo annuo di acqua pro capite in Italia e quelli sulle risorse idriche del Paese, si può supporre che nei prossimi decenni ci si troverà ad affrontare un serio problema relativo alla carenza di acqua (Santini e Rulli, 2015). Le aziende agricole dovrebbero pertanto attrezzarsi e iniziare ad adottare soluzioni per minimizzare il consumo di acqua. Le principali misure adottabili comprendono (Iglesias e Garrote, 2015): l'ottimizzazione delle modalità di irrigazione; il miglioramento dello stato di salute del suolo, che ne aumenta di conseguenza la capacità di trattenere l'umidità; l'adozione di pratiche agronomiche adeguate come la rotazione delle colture e una lavorazione conservativa del terreno e l'adozione di varietà colturali progettate *ad hoc* per tollerare al meglio gli stress idrici (Nemali e Stephens, 2014). Per quanto concerne le modalità di irrigazione, gli aspetti salienti su cui intervenire per aumentarne l'efficacia sono (Hedley et al., 2014):

- un'applicazione più uniforme dell'acqua grazie all'abbandono di tecniche tradizionali inefficienti, quali l'irrigazione per sommersione o aspersione, in favore di altre più sofisticate come l'irrigazione a goccia;
- l'adozione di una programmazione adeguata a ottimizzare l'erogazione di acqua in base alle esigenze delle colture nelle differenti fasi di sviluppo. Ciò avviene grazie al continuo monitoraggio del suolo e delle condizioni ambientali e all'impiego di modelli predittivi innovativi capaci di adattarsi automaticamente e in tempo reale a quanto viene rilevato (vedi capitolo 3);
- un'adeguata preparazione del terreno nella fase che precede l'irrigazione, al fine di aumentare l'infiltrazione dell'acqua nel suolo e ridurre le perdite dovute all'evaporazione (vedi paragrafo 2.7)

All'estremo opposto dello spettro si colloca l'eccesso di acqua nel terreno, che è causa di altrettanti problemi come inondazioni, «*proliferation of pests and diseases, leakage of nutrients, inhibition of oxygen uptake by roots, and interference with agronomical practices (e.g water logging during harvest)*» [Zampieri, 2017, pp. 1-2]. Le inondazioni che danneggiano le colture possono essere provocate da (Gaume et al., 2016):

- precipitazioni brevi (< 1 ora) ma molto intense (fino a 180 mm/h), che coinvolgono un'area limitata (< 100 km<sup>2</sup>). I danni che provocano non sono dovuti alle precipitazioni totali in valore assoluto, che sono limitate (< 100 mm), ma alla rapidità con cui queste si accumulano nel terreno, saturando la sua capacità di assorbimento;
- piogge stazionarie che durano diverse ore e coinvolgono aree di superficie variabile (da poche centinaia a diverse migliaia di km<sup>2</sup>), con precipitazioni totali che superano i 200 mm;
- una serie di precipitazioni intense che fanno parte di una perturbazione su larga scala che si prolunga per diversi giorni in un'area molto vasta. Si possono osservare in questi casi precipitazioni totali eccezionali (fino a 1500 mm).

Eccesso e scarsità di acqua spesso coesistono in uno stesso luogo, dal momento che in ambienti degradati si manifesta spesso un pattern composto da lunghi periodi di siccità seguiti da una serie di precipitazioni troppo abbondanti per non creare danni. Il modo migliore per arginare tali fenomeni consiste nell'attuazione di misure sistemiche in grado di diminuire l'impatto dei cambiamenti climatici sull'area, ma è utile anche adottare soluzioni locali volte a implementare la salute dell'ecosistema (cura del suolo, aumento della biodiversità, ...), rendendolo più resiliente e capace di fare fronte a eventi atmosferici estremi.

#### 1.3.4 Impatto dell'agricoltura sul suolo

L'agricoltura ha un enorme impatto sul suolo, dal momento che esso funge da input primario per la crescita delle colture, fornendo loro acqua e nutrienti. In passato il suolo è stato trattato come una risorsa inerte e illimitatamente disponibile, ma oggi *«there is a growing realization that soil needs to be treated and managed as a scarce and fragile non-renewable resource»* [Bindraban et al., 2012, p. 478]. Un'appropriata gestione del terreno garantisce infatti numerosi benefici in relazione alla struttura del suolo, alla relazione tra terreno e acqua, alla gestione dei fenomeni erosivi, al mantenimento di una sufficiente percentuale di materia organica nel suolo, alla regolazione della biodiversità e del ciclo dei nutrienti (Lal, 1997). Ciò consente di ottenere un sistema agricolo più resiliente agli stress, una resa delle colture più elevata e una minor influenza dei

cambiamenti climatici sul settore. Appare pertanto evidente l'importanza di strutturare le attività agricole in modo tale da renderle capaci di arricchire i terreni in cui sono collocate invece di limitarsi a sfruttarli e depauperarli.

Il contributo positivo che il suolo dà all'agricoltura è legato alle sue funzioni, che possono essere raggruppate in 7 categorie (Costantini e Lorenzetti, 2013):

- produttore di biomassa;
- luogo per lo stoccaggio, la filtrazione e la trasformazione di nutrienti, sostanze e acqua;
- bacino di biodiversità, che aumentano la resilienza dell'ecosistema;
- ambiente fisico e culturale che ospita e plasma le attività umane;
- fonte di materie prime per numerose attività umane;
- bacino di carbonio, che immagazzina grazie alla presenza di materia organica;
- archivio dell'eredità geologica e archeologica del pianeta.

Per come è strutturata oggi, tuttavia, l'agricoltura ha un impatto tendenzialmente negativo sul suolo (Gomiero, 2016), che contribuisce a degradare e sovrasfruttare. La degradazione del suolo è un fenomeno complesso, di cui nel corso del tempo sono state date molteplici definizioni. Secondo Lal consiste in *«the loss of actual or potential productivity or utility as a result of natural or anthropogenic factors»* [Lal, 1997, p. 998]. Per l'Organizzazione per la cooperazione e lo sviluppo economico (OECD) *«soil degradation refers to the process(es) by which soil declines in quality and is thus made less fit for a specific purpose, such as crop production»* [OECD, 2001, p. 400]. Per Costantini e Lorenzetti *«soil degradation can be defined as the process leading to the loss of the self-organization ability of the soil constituents, due to either natural causes or human activities»* [Costantini e Lorenzetti, 2013, p. 234]. La FAO definisce infine la degradazione del suolo come quel processo che *«inherently reduces or eliminates soil functions and their ability to support ecosystem services essential for human well-being»* [FAO e ITPS<sup>10</sup>, 2015, p. 5].

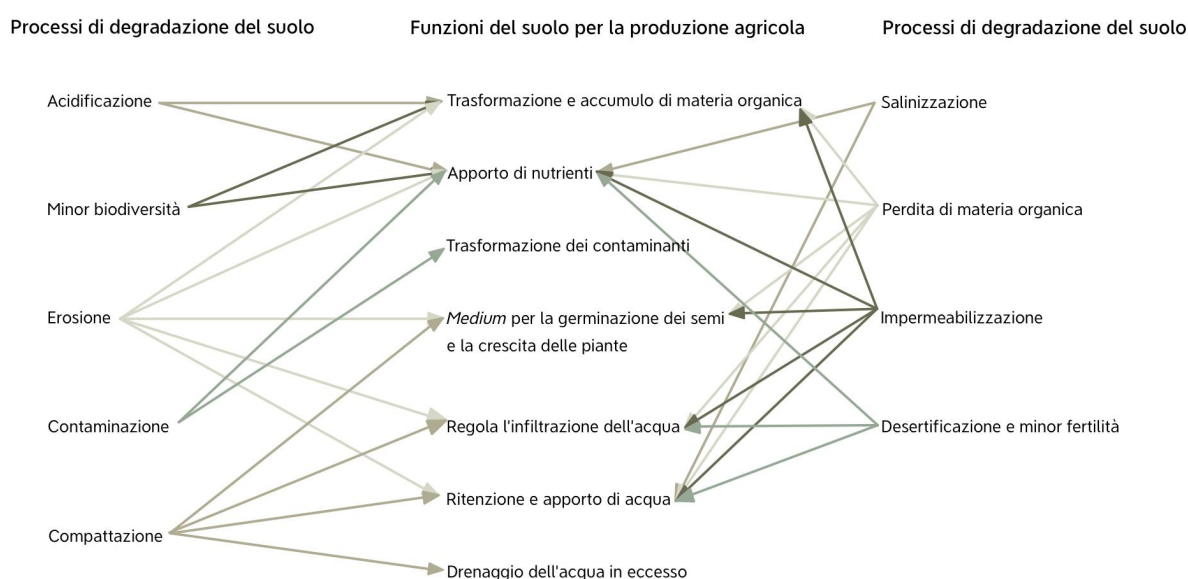
Le definizioni riportate, se considerate congiuntamente, consentono di identificare le caratteristiche principali della degradazione del suolo, che sono:

---

<sup>10</sup> L'*Intergovernmental Technical Panel on Soils* (ITPS) è un gruppo tecnico dell'ONU istituito nel 2013 al fine di fornire supporto tecnico e scientifico alle politiche sulla gestione sostenibile del suolo.

- la varietà dei fattori scatenanti, che possono essere naturali o antropogenici. Le principali cause naturali riguardano i cambiamenti climatici, mentre quelle antropogeniche sono legate alla cattiva gestione del territorio (Lal, 2015);
- la diminuzione della produttività e la perdita della funzionalità del suolo in seguito al peggioramento del suo stato di salute (vedi figura 1.2);
- la perdita della capacità del terreno di auto-organizzarsi.

**Figura 1.2 - Impatti della degradazione del suolo sulla sua funzionalità**



FONTE: adattato da FAO e ITPS [2015, p. 176]

Pur essendovi un ampio consenso tra gli studiosi riguardo all'importanza del fenomeno e al trend in crescita che lo caratterizza, non è possibile ad oggi ottenere una quantificazione univoca della sua ampiezza poiché (1) gli studi condotti adottano definizioni differenti e giungono pertanto a conclusioni divergenti e non comparabili; (2) gli strumenti utilizzati per ottenere dati e informazioni da elaborare hanno dei limiti intrinseci che si riflettono sull'accuratezza delle misurazioni ottenute (Bindraban et al., 2012). Per quanto riguarda i terreni agricoli nello specifico, «*the figures provided by different assessments range from 15 to 80% of global agricultural land. Later assessments, estimate 25% of the present agricultural land to be highly degraded [and] about 44% to be slightly-moderately degraded*» [Gomiero, 2016, p.8]. Tali numeri hanno un elevato

impatto sull'agricoltura, sia per la conseguente diminuzione delle rese agricole (influenza diretta), sia per l'incremento dei costi di gestione causato dalla necessità di ricorrere in misura maggiore a fertilizzanti e impianti di irrigazione (influenza indiretta). Gli effetti della degradazione del suolo si estendono inoltre ad altri sistemi a causa delle connessioni interne all'ecosistema (es. perdita di biomassa causata dall'erosione produce gas serra che contribuiscono al cambiamento climatico) e delle relazioni tra ecosistema e sistemi sociali (es. declino nella qualità del suolo conduce all'abbandono dei terreni e acuisce il problema dello spopolamento delle aree rurali) (Chotte et al., 2016, p. 611).

Salvati e Carlucci (2010) hanno analizzato la situazione del territorio italiano nello specifico, calcolando l'impatto economico della degradazione del suolo sull'attività agricola. Per fare ciò, gli autori hanno utilizzato l'indicatore di preallarme ESAI (*Environmental Sensitivity Areas Index*), un indice che analizza diverse variabili al fine di quantificare lo stato di clima, vegetazione e qualità del suolo e calcolare la probabilità che in una determinata area si verifichino fenomeni di degradazione del suolo. L'indice può assumere valori compresi tra 1 e 2, dove numeri più bassi corrispondono ad aree con una bassa sensibilità alla degradazione, mentre quelli più elevati evidenziano la presenza di condizioni critiche per il suolo. Le aree sono quindi classificate come non affette da degradazione del suolo ( $ESAI < 1.175$ ), potenzialmente affette ( $1.175 < ESAI < 1.225$ ), fragili ( $1.225 < ESAI < 1.375$ ) e critiche ( $ESAI > 1.375$ ). I punteggi ottenuti dal territorio italiano sono di 1.23 (con  $\sigma=0.07$ ) per il Nord, 1.25 (con  $\sigma=0.05$ ) per il Centro e 1.28 (con  $\sigma=0.07$ ) per il Sud. Secondo lo studio, la maggior parte del territorio italiano rientra pertanto nella fascia di suolo fragile, che deve essere protetto con tempestività da ulteriori danni che ne possano peggiorare le condizioni.

Come emerso dalle definizioni sopra riportate, le cause della degradazione sono numerose e di diversa natura. Secondo Lal (1997) possono essere identificati fenomeni biofisici, politici e socioeconomici che fungono da eventi scatenanti per i processi di degradazione del suolo (vedi figura 1.3). L'impatto che questi elementi hanno non è uguale in ogni luogo e momento, ma dipende dallo stato di altri fattori quali il suolo, il clima, il terreno e la vegetazione (Gomiero, 2016; Lal, 1997). Quando la combinazione locale di eventi scatenanti e fattori che influenzano la risposta del suolo è tale da dare inizio al processo di degradazione del suolo, a meno che non vengano messe in atto delle specifiche misure volte a contenerlo e invertirne la direzione, si crea una spirale



discendente che si autoalimenta, ampliandone la portata e l'intensità [Lal, 2015]. I principali processi di degradazione del suolo che si instaurano secondo la classificazione Joint Research Centre<sup>11</sup> (2012) sono:

- riduzione della materia organica,
- erosione,
- compattazione,
- impermeabilizzazione e formazione di croste,
- salinizzazione,
- acidificazione,
- riduzione della biodiversità del suolo,
- desertificazione e diminuzione della fertilità,
- contaminazione.

**Figura 1.3 - Degradazione del suolo**



FONTE: adattato da Lal [1997, p. 998]

### Riduzione della materia organica presente nel suolo

Con il termine materia organica (o SOM, *Soil Organic Matter*) si indica l'insieme dei composti organici presenti nel suolo, che derivano da piante e microrganismi a diversi stadi di decomposizione. La riduzione della materia organica presente all'interno del suolo è una delle principali cause di degradazione del suolo, specialmente nelle regioni mediterranee semi-aride (Lal, 2015). La diminuzione della SOM ha diversi effetti sul suolo: ne riduce la resistenza all'erosione causata da agenti come il vento e l'acqua,

<sup>11</sup> Il *Joint Research Centre* è un servizio interno della Commissione Europea, che fornisce consulenze scientifiche e tecniche volte a supportare la progettazione, l'attuazione e il controllo delle politiche UE.

ne diminuisce la capacità di trattenere acqua e filtrare le sostanze che vi passano attraverso, influenzandone negativamente lo stato di salute generale e la capacità di sostenere la crescita delle colture. Per quanto riguarda la capacità di trattenere l'acqua, si stima che *«for every 1% of SOM content, the soil can hold 10,000–11,000 liters of plant-available water per ha of soil down to about 30 cm»* [Gomiero, 2016, p. 28]. La perdita di materia organica è inoltre in grado di amplificare il problema del rilascio di CO<sub>2</sub> in atmosfera poiché: (1) il carbonio è alla base della materia organica, perciò quando quest'ultima diminuisce si riducono anche le scorte di carbonio nel terreno (note come SOC, *Soil Organic Carbon*) e il suolo *«becomes a net source of GHG emissions (i.e., CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub>) rather than a sink»* [Lal, 2015, p. 5877]; (2) la diminuzione della funzionalità del suolo conseguente alla perdita di SOM comporta la necessità di maggiori input esterni nello svolgimento dell'attività agricola per ottenere delle rese soddisfacenti (es. fertilizzanti), la cui produzione aumenta le emissioni totali di CO<sub>2</sub> (Gomiero, 2016). Tale aumento degli input chimici, in combinazione con altre pratiche agricole inadeguate (lasciare il suolo scoperto, eccessiva compattazione causata da mezzi pesanti, ...), si stima possa ridurre le riserve di carbonio contenute nel terreno del 30-50% (Paustian, 2014).

La situazione in Italia da questo punto di vista non è ottimale, soprattutto per quanto riguarda i terreni coltivati. Bonfante, Basile e Bouma rilevano a tal proposito che *«organic matter contents in Ap horizons<sup>12</sup> are relatively low ranging from 0.34 to 2.60%»* [Bonfante, Basile e Bouma, 2020, p. 3]. Dati simili emergono anche dallo studio di Costantini e Lorenzetti, da cui emerge che *«rice paddies and other arable lands (urban soils included) show mean values of between 2.0% and 2.3%»* [Costantini e Lorenzetti, 2013, p. 237]. Ad oggi l'80% dei terreni in Italia presenta un contenuto di materia organica inferiore al target di 3.5 g su 100 definito dalla *EU Resource Efficiency Roadmap*, mentre il 34% circa non raggiunge nemmeno il valore soglia di 1,72 g su 100, considerato da Costantini e Lorenzetti (2013) il valore minimo per assicurare alle piante che vi crescono un nutrimento sufficiente e per limitare il passaggio degli inquinanti dalla superficie del suolo alle falde acquifere sottostanti.

---

<sup>12</sup> L'orizzonte A di un suolo indica la porzione di terreno che si articola immediatamente sotto lo strato superficiale. È composto da una frazione minerale e una organica (humus). È ricco di radici ed è l'habitat di molti organismi animali che vivono all'interno del suolo (pedofauna). La maggior parte della materia organica del suolo si trova nei primi 15-25 cm di questo orizzonte (Gomiero, 2016). La lettera *p* indica che il terreno analizzato ha subito alterazioni a causa dell'attività agricola (es. aratura).

Se il terreno è adibito ad altri usi o è coltivato in modo meno intensivo i dati possono essere differenti: «*mean SOMC values for meadows and other less intensively or uncultivated areas vary between 3.0% and 3.9%, whereas in the different kind of woodlands and natural areas these values can reach 6.0%*» [Costantini e Lorenzetti, 2013, p. 237]. Diversi studi (Costantini e Lorenzetti, 2013; Smith et al., 2012; Paustian, 2014) suggeriscono infatti che un utilizzo rispettoso e una gestione adeguata del territorio (*land use and management*) abbiano un effetto positivo sui valori di materia organica riscontrati e che il ricorso a tali pratiche ottimali di gestione sia pertanto indispensabile per mantenere il suolo in salute. Tra queste, Paustian (2014) evidenzia la necessità di:

- programmare al meglio la rotazione delle colture e la copertura della superficie con i residui colturali. Gli studi condotti in campo dimostrano a tal proposito che «*rotations with high C inputs (i.e., use of winter cover crops, green manures, irrigation, high residue crop varieties, or annual crop rotations that have one or more years of hay) increased SOC storage relative to conventional crop rotations by 7–11% over a 20-year period.*» [Paustian, 2014, p. 144];
- affiancare specie perenni alle colture annuali, al fine di aumentare la quantità di C organico immagazzinata dal terreno;
- ridurre la lavorazione del terreno, che tende ad accelerare la decomposizione della materia organica.

### **Erosione del suolo**

Il meccanismo di erosione del suolo «*involve fluid (water/wind) detachment or entrainment followed by transport of soil particles and subsequent deposition as soil sediment*» [Baumhardt e Blanco-Canqui, 2014, p. 154]. È un processo fisiologico nella formazione del suolo, ma se può causare problemi se avviene in misura eccessiva. È causato da agenti atmosferici come pioggia e vento (Khatteli et al., 2016) o da una cattiva gestione del suolo (es. terreni lasciati scoperti tutto l'inverno senza utilizzare colture di copertura) (Gomiero, 2016). La resistenza di un suolo all'erosione è strettamente connessa al suo contenuto di materia organica e alla sua copertura da parte della vegetazione (Gomiero, 2016). L'assenza di tali elementi o la presenza di altri fattori di destabilizzazione riducono infatti la persistenza e la coesione degli aggregati del terreno, aumentandone la sensibilità all'erosione (Baumhardt e Blanco-Canqui, 2014).

I danni provocati dai fenomeni erosivi permangono a lungo, poiché il processo di rigenerazione del suolo avviene piuttosto lentamente. A tal proposito «*The USDA*<sup>13</sup> *estimated that it takes 500 years to produce an inch (2.54 cm) of topsoil*» [Gomiero, 2016, p. 27]. Si deve inoltre tenere presente che l'erosione del suolo provoca anche la perdita della materia organica contenuta al suo interno, che è di fondamentale importanza per gli ecosistemi. Dal momento che una percentuale rilevante della materia organica è collocata negli strati superficiali del suolo, si stima che «*the soil removed by either wind or water erosion is 1.3–5.0 times richer in organic matter than the soil left behind*» [Gomiero, 2016, p. 27]. A causa di tale perdita di materia organica, l'erosione può provocare un fenomeno noto come *nutrient depletion*, che consiste in una riduzione dei nutrienti all'interno del suolo che si riflette in tutta la *supply chain*, causando la produzione di cibi con una qualità nutrizionale ridotta.

Per contenere l'azione erosiva degli agenti atmosferici si possono mettere in atto delle apposite azioni conservative (Baumhardt e Blanco-Canqui, 2014). Per quanto riguarda l'impatto del vento, è possibile:

- aumentare la dimensione degli aggregati superficiali del suolo, al fine di contrastare la capacità di trascinamento dell'aria. Una misura spesso utilizzata per fare ciò, per quanto temporanea, è la lavorazione 'di emergenza' del terreno, a cui si ricorre quando il terreno è troppo arido per permettere la crescita di una coltura di copertura. Questa pratica ribalta la porzione superficiale del terreno, creando delle strisce lavorate perpendicolari alla direzione del vento e composte da zolle e aggregati di grandi dimensioni, che risultano più difficili da muovere;
- ridurre la velocità del vento in misura sufficiente a impedire il trascinamento dei sedimenti grazie all'utilizzo di appositi canali o terrazzamenti;
- creare una barriera fisica tra il suolo e il vento ricorrendo a cinture di riparo arboree note come frangivento o ai residui colturali;
- ridurre l'evaporazione di acqua dal terreno, aumentando così l'umidità nel suolo e migliorandone la stabilità strutturale.

Al fine di limitare l'impatto erosivo dell'acqua si può invece ricorrere a:

- strutture meccaniche appositamente progettate al fine di ridurre la velocità di deflusso, immagazzinare l'acqua in eccesso e convogliare il deflusso a velocità

---

<sup>13</sup> L'acronimo USDA indica il Dipartimento dell'agricoltura degli Stati Uniti d'America.

abbastanza contenute da limitare l'erosione dei terreni sottostanti. Sono a tal fine utilizzati elementi come terrazzamenti, canali aperti o sotterranei, fossati, stagni artificiali, serbatoi di stoccaggio o dighe di controllo;

- pratiche agronomiche conservative quali l'utilizzo di colture di copertura e la ridotta lavorazione del terreno, che aumentano la capacità di infiltrazione del suolo. Si tratta di interventi che hanno un impatto notevole, dal momento che «*between 60% and 80% of rainwater is lost as runoff from bare soils compared with residue mulched soils*» [Baumhardt e Blanco-Canqui, 2014, p. 161];
- l'inserimento nelle aree coltivate di *conservation buffer*, ossia di zone disegnate per intercettare l'acqua che defluisce e ridurre la velocità e il trasporto di sedimenti e nutrienti ad essi legati. Comprendono:
  - fasce filtranti: strisce di vegetazione larghe 5-15 m e poste lungo il perimetro inferiore del campo;
  - barriere d'erba: strisce larghe 0.75-1.2 m di erba alta e perenne poste a intervalli regolari (< 15 m) e perpendicolari rispetto al pendio principale;
  - *grass waterways*: canali naturali o artificiali coperti da erbe perenni e posti nel perimetro inferiore del campo per convogliare l'acqua a velocità non erosive;
  - fasce ripariali: fasce larghe 5-30 m coperte da erbe, alberi e cespugli che separano i campi coltivati dai corsi d'acqua per ridurre la contaminazione ad opera delle sostanze inorganiche usate nelle attività agricole.

### **Compattazione del suolo**

La compattazione del suolo è un fenomeno strettamente legato alla degradazione della sua struttura. Le principali cause antropogeniche sono: l'utilizzo di macchinari pesanti in terreni con una bassa percentuale di materia organica (Costantini e Lorenzetti, 2013) e l'eccessiva lavorazione (*tillage*) del suolo. A ciò si aggiungono «*natural forces such as raindrop impact, soil swelling and shrinking, and root enlargement*» [Pagliai, 2007, p. 1], che hanno tuttavia un impatto nettamente inferiore. Si tratta di un fenomeno piuttosto rilevante nel nostro paese, dal momento che «*After soil sealing, erosion, and organic matter decline, compaction is probably the most extensive degradation process affecting soil resources of Europe and Italy*» [Costantini e Lorenzetti, 2013, p. 239].

Un suolo troppo compatto non è in grado di assorbire una quantità adeguata di acqua, aumentando i danni provocati dalle precipitazioni eccessive, ed è povero di ossigeno, fattore che riduce la popolazione dei microrganismi aerobi che dovrebbero abitare un sottosuolo in salute. La minor vitalità della fauna sotterranea riduce la disponibilità di tutte quelle sostanze utili alla vita delle piante che sono di origine animale. Si innesca quindi un circolo vizioso in cui una minor percentuale di materia organica provoca una maggiore compattazione del terreno quando questo viene lavorato e la compattazione risultante diminuisce ulteriormente la materia organica presente all'interno del suolo. A meno che la struttura del suolo non venga migliorata attraverso una gestione più accorta, il solo ricorso ai fertilizzanti non è sufficiente a ridurre i processi di degradazione e a garantire la piena funzionalità del terreno nel lungo periodo (Lal, 1997). I suoli troppo compatti sono meno porosi, impediscono il regolare flusso di acqua e aria, limitano l'attività idrobiologica e riducono la dimensione degli apparati radicali delle colture, che faticano a penetrare terreni troppo compatti. La minor estensione delle radici in terreni compatti riduce la capacità delle piante di raccogliere acqua e nutrienti dal sottosuolo, poiché impedisce loro di raggiungere le sostanze collocate in profondità. Come riscontrato dallo studio di Pagliai (2007), inoltre, in un suolo compattato dal passaggio di un trattore il sistema di pori che caratterizzano il terreno viene modificato e «*the proportion of elongated pores, useful for water movement and root growth is strongly reduced*» [Pagliai, 2007, p. 1]. Ciò aumenta il ristagno idrico e il ruscellamento<sup>14</sup> superficiale, con un conseguente rischio di erosione più elevato, soprattutto nei terreni con forte pendenza, in cui l'acqua scorre più velocemente. È pertanto evidente come compattazione, riduzione della materia organica ed erosione siano fenomeni strettamente connessi, che possono coesistere e alimentarsi a vicenda, peggiorando esponenzialmente lo stato di salute del suolo.

Al fine di contenere il fenomeno di compattazione del terreno, è possibile cercare di (FAO e ITPS, 2015):

- mantenere un livello adeguato di materia organica nel suolo, per migliorarne e stabilizzarne la struttura;
- minimizzare il passaggio di mezzi pesanti sul terreno coltivato;
- ricorrere alla rottura meccanica del suolo tramite tecniche come il *deep ripping*;

---

<sup>14</sup> Il termine ruscellamento è utilizzato per descrivere il processo di scorrimento delle acque piovane sulla superficie del terreno che si verifica quando viene superata la sua capacità di infiltrazione.

- pianificare la rotazione colturale in modo che includa specie con apparati radicali forti ed estesi, che siano in grado di penetrare in profondità nel suolo;
- favorire l'attività della macrofauna del suolo, che è in grado di creare canali per l'infiltrazione dell'acqua e la crescita delle radici.

### **Impermeabilizzazione del suolo**

L'impermeabilizzazione del suolo (o *soil sealing*) è un fenomeno che coinvolge circa il 4,9% del territorio italiano, escluse le aree occupate da strade e ferrovie (ISPRA, 2013), con valori più elevati nel Nord del Paese (Munafò, Salvati e Zitti, 2013). Dati la sua irreversibilità e il fatto che comporta spesso la completa perdita delle funzioni biologiche del suolo – compresa la capacità di ospitare colture –, è stato definito «*the most harmful process of soil degradation*» [Costantini e Lorenzetti, 2013, p. 235].

È causato da fenomeni come l'urbanizzazione o la costruzione di strade. La FAO e l'ITPS (2015) hanno per questo definito l'urbanizzazione come una minaccia alla futura produzione di cibo, a causa (1) della perdita di suolo che comporta e (2) della contaminazione del suolo provocata dallo smaltimento dei rifiuti e dall'inquinamento atmosferico che caratterizza i centri urbani.

### **Salinizzazione del suolo**

La salinizzazione consiste nell'accumulo di sali solubili – principalmente cloruro, solfato, carbonato e bicarbonato di sodio, magnesio, calcio e potassio – all'interno del suolo (Costantini e Lorenzetti, 2013). A seconda della sua origine, può essere di tipo primario o secondario. Nella salinizzazione primaria l'eccessivo apporto di sali dipende dalle caratteristiche naturali dell'ambiente. È più frequente nelle aree in cui l'evaporazione dell'acqua è elevata e le precipitazioni sono limitate, come le regioni aride o semiaride. Le principali cause naturali di salinizzazione sono (FAO e ITPS, 2015):

- la presenza di quantità elevate di sali nella roccia madre del suolo;
- l'intrusione dell'acqua di mare all'interno del terreno;
- la deposizione atmosferica, che deposita sul terreno il sale derivato dal mare tramite pioggia o caduta secca.

La salinizzazione secondaria è invece legata alle modalità di gestione delle risorse idriche e territoriali. È causata principalmente da (FAO e ITPS, 2015):

- strutture di drenaggio del suolo inadeguate, che provocano un innalzamento delle falde acquifere saline;
- uso di sale per lo sbrinamento delle strade, che si disperde poi nell'ambiente circostante;
- utilizzo di acque salmastre per l'irrigazione (Crescimanno et al., 2009). Il ricorso ad acque di bassa qualità negli impianti di irrigazione è la principale causa di salinizzazione in Europa. Per ridurre tale fenomeno è dunque necessario progettare adeguatamente struttura e funzionamento dei sistemi di irrigazione;
- eliminazione di vegetazione perenne con radici profonde per fare posto a colture annuali con apparati radicali meno sviluppati e un minor consumo di acqua. Ciò causa l'accumulo di acqua nel terreno e il successivo innalzamento delle falde acquifere saline.

La salinizzazione è un problema per le attività agricole perché può alterare la struttura e il pH del terreno, provocando squilibri nutrizionali o tossicità per le piante. Gli effetti risultanti sono di due tipi:

- effetti specifici, che variano in base al tipo di coltura considerata,
- effetti non specifici, dal raggio d'azione più ampio. Sono causati dalla diminuzione del potenziale osmotico<sup>15</sup> del suolo, che riduce la capacità delle piante di assorbire l'acqua presente al suo interno.

Quando la salinità di un terreno aumenta eccessivamente, gli agricoltori sono costretti ad accrescere le quantità di input produttivi necessari a ottenere una resa agricola soddisfacente. Ciò può portare all'abbandono dei terreni in questione a causa dei costi di mantenimento troppo elevati che rendono l'attività agricola economicamente insostenibile (Gomiero, 2016). Inoltre, quando si supera una

---

<sup>15</sup> L'acqua è sempre presente all'interno del terreno sotto forma di soluzione e non come liquido puro. Il potenziale osmotico di una soluzione esprime la forza con cui l'acqua è attratta dai soluti in essa disciolti. Gli ioni e le molecole presenti all'interno della soluzione esercitano infatti una forza di attrazione elettrostatica sulle molecole d'acqua, riducendone l'attività. È una forza che ha sempre valore negativo, ma, se in condizioni ordinarie il suo contributo è minimo, assume una notevole rilevanza nei terreni salini, aridi o con un apporto elevato di concimi chimici. Un potenziale osmotico vicino allo zero denota una bassa capacità dei soluti di trattenere l'acqua, condizione che ne facilita l'assorbimento da parte delle piante. Al contrario, un potenziale osmotico con elevato valore negativo rappresenta una situazione in cui l'acqua è strettamente legata al terreno e le piante devono compiere sforzi notevoli per riuscire ad assorbirla.



determinata soglia di salinità (che è *crop-specific*), la crescita di una coltura può arrestarsi completamente (FAO e ITPS, 2015).

### **Acidificazione del suolo**

L'acidificazione del suolo consiste nell'eccessiva presenza di cationi come il manganese ( $Mn^{2+}$ ) e l'alluminio ( $Al^{3+}$ ) nella zona delle radici, e nella conseguente riduzione del suo pH (FAO e ITPS, 2015). I suoli acidi ( $pH < 5.5$ ) risultano fitotossici per molte specie vegetali a causa dell'alterazione di proprietà e funzioni essenziali quali il movimento di aria e acqua all'interno del terreno, la decomposizione dei contaminanti, la disponibilità dei nutrienti e l'attività microbiologica (Ramankutty et al., 2002). Per la maggior parte delle colture il pH ottimale del terreno è di 6-7, mentre «*at pH < 5, eight of 13 essential nutrients become unavailable, and furthermore Al becomes more available and is highly toxic to plants*» [Ramankutty et al., 2002, p. 382].

Le principali cause antropiche dell'acidificazione del suolo sono (FAO e ITPS, 2015):

- il rilascio di sostanze acide nell'aria causato da attività industriali e centri urbani;
- l'eccessiva applicazione di fertilizzanti a base di ammonio e la loro conseguente dispersione nell'ambiente circostante;
- la deforestazione e altre pratiche di utilizzo del suolo che ne rimuovono completamente la vegetazione. Nel loro processo di crescita, infatti, le piante assorbono nutrienti dal suolo, contribuendo a mantenere i livelli di queste sostanze sotto controllo.

### **Riduzione della biodiversità del suolo**

Una quota compresa tra un terzo e un quarto della biodiversità complessiva della Terra risiede all'interno del suolo (Russell, 2019) e, per mantenere l'ecosistema in equilibrio, deve essere preservata. Il biota del suolo è infatti fondamentale per la qualità e la funzionalità del suolo e contribuisce a ridurre il rischio di degradazione desertificazione (Lal, 2015). Comprende organismi quali batteri, funghi, protozoi, insetti, vermi altri invertebrati e mammiferi (FAO e ITPS, 2015). Il contributo del biota alle funzioni essenziali del suolo comprende (Lal, 2015; FAO e ITPS, 2015):

- decomposizione delle biomasse;
- regolazione del ciclo dei nutrienti;
- controllo della dinamica della materia organica del suolo;

- riduzione della CO<sub>2</sub> in atmosfera attraverso la cattura e il sequestro del carbonio;
- aumento della resistenza alle malattie dovuto alla presenza nel terreno dei predatori naturali dei patogeni. Mendes, Garbeva e Raaijmakers (2013) ipotizzano a tal proposito che la proliferazione di batteri patogeni per l'uomo sia ridotta nei suoli con un microbioma vario e ben bilanciato, con evidenti benefici in termini di *food safety*;
- modifiche alla struttura fisica del suolo e alla sua capacità di assorbire l'acqua;
- incremento dell'efficienza con cui le piante acquisiscono i nutrienti grazie alla relazione simbiotica con i batteri azotofissatori.

Le pratiche agricole intensive possono alterare la struttura della comunità microbica del suolo, riducendone la biodiversità. La presenza di estese monocolture, l'utilizzo di fertilizzanti e il loro impatto sul pH del terreno, la lavorazione del suolo, il ricorso a pesticidi ed erbicidi e l'esportazione dei residui colturali sono alcuni tra gli elementi che causano tale riduzione (FAO e ITPS, 2015). Gli organismi che si adattano più facilmente agli alti livelli di disturbo causati dall'agricoltura intensiva divengono dominanti all'interno delle comunità della fauna sotterranea. Al fine di contenere l'impatto delle attività agricole sulla fauna microbica, viene talvolta aggiunta al terreno una miscela di colture vive di microrganismi aerobi e anaerobi (batteri lattici e fotosintetici, lieviti, ...) isolati da altri suoli in salute nota come *Effective Microorganisms* (Prisa, 2022). Questi organismi, agendo sulla salute del suolo, hanno un impatto sulla capacità delle piante di assorbire acqua e nutrienti e di tollerare gli stress abiotici<sup>16</sup> a cui sono sottoposte; migliorano le caratteristiche qualitative del prodotto finale e riducono la necessità di utilizzare fitosanitari di sintesi.

Tra i componenti del microbiota, assumono inoltre particolare rilievo i funghi micorrizici, che sono in grado di instaurare una relazione simbiotica con le radici delle piante, nota come micorrizza. Tale associazione migliora la struttura del suolo nelle aree erose, incrementa la resistenza ai patogeni (Mendes, Garbeva e Raaijmakers, 2013), mobilita i nutrienti presenti all'interno del terreno verso le radici della pianta – aumentando il livello qualitativo degli alimenti – e ne riduce lo stress idrico grazie alla

---

<sup>16</sup> Il termine stress abiotici include tutti quei fattori di stress che sono correlati alle caratteristiche ambientali e non dipendono dalla presenza di altri organismi viventi.

maggior estensione e profondità dell'apparato radicale risultante (Duponnois et al., 2016).

## **Desertificazione**

La desertificazione è un processo complesso, che dipende dall'interazione di fattori ambientali e umani; per questo motivo le sue cause e conseguenze sono ancora ampiamente dibattute e ne esistono numerose definizioni differenti. Il processo di desertificazione ha inizio quando coesistono le adeguate condizioni ambientali e la diminuzione della vegetazione che ricopre il suolo. Tale riduzione della vegetazione funge da evento scatenante per una serie di processi di feedback che si auto-rinforzano e sono responsabili del depauperamento del terreno. Il processo di desertificazione si caratterizza in genere per (D'Odorico et al., 2013):

- l'aumento della percentuale di suolo che rimane scoperto, che ne favorisce l'erosione ad opera di acqua e vento;
- la diminuzione di risorse del suolo, che consiste ad esempio in una ridotta disponibilità dei nutrienti o in una minor capacità di immagazzinare l'acqua. Tale degradazione è favorita dai fenomeni erosivi che si verificano sul suolo quando viene lasciato nudo;
- l'eccessiva salinizzazione del terreno, che altera la popolazione vegetale dell'area. Accade allora ad esempio che le specie annuali e gli arbusti sovrastano le specie perenni e le praterie che caratterizzavano la zona. Tali cambiamenti nella vegetazione possono modificare ulteriormente il regime delle precipitazioni e l'umidità del suolo.

Anche se non è un fenomeno ad oggi presente in Italia, «*several studies have identified areas, especially in southern Italy, where locally severe conditions have led to high sensitivity to desertification*» [Salvati, Zitti e Perini, 2016, p. 98]. Le principali zone in cui il rischio di desertificazione è in aumento secondo Salvati, Zitti e Perini (2016) sono: la Pianura Padana, la costa Adriatica, le aree pianeggianti della Toscana e del Lazio e il nord della Sardegna. Per ridurre tale rischio è fondamentale favorire l'uso sostenibile delle risorse naturali e il ricorso a pratiche agricole rispettose dell'ambiente, al fine di tenere sotto controllo i fenomeni erosivi e la presenza di sali disciolti nel terreno (D'Odorico et al., 2013)

## Contaminazione del suolo

La contaminazione del suolo è un problema molto sentito a causa delle preoccupazione che genera sulla *food safety* degli alimenti prodotti (vedi paragrafo 1.2.2). I principali contaminanti comprendono sia composti inorganici (es. metalli come piombo, cadmio e arsenico) che composti organici di vario tipo (es. DDT e idrocarburi policiclici aromatici) (FAO e ITPS, 2015). Tra le principali cause di contaminazione correlate all'attività agricola si annoverano l'irrigazione con acque inquinate, l'utilizzo di fertilizzanti a base di fosforo (P) o azoto (N) e la permanenza nell'ambiente dei pesticidi e dei loro metaboliti. Ulteriori attività responsabili della contaminazione del suolo sono inoltre connesse allo svolgimento delle attività industriali o all'inadeguata gestione dei rifiuti. Per quanto riguarda ad esempio i fertilizzanti a base di azoto, secondo Kopittke et al. (2019) solo il 47% del quantitativo applicato alle colture è effettivamente assorbito dalle piante, mentre il resto viene disperso nell'ambiente a causa di fenomeni quali la volatilizzazione dell'ammoniaca, la denitrificazione ad opera dei batteri presenti nel sottosuolo e la lisciviazione dei nitrati (Omara et al., 2019). Tale inefficienza è indesiderabile non solo dal punto di vista economico per gli agricoltori, ma anche per l'impatto negativo che ha sul suolo e sull'intero ecosistema. La dispersione di azoto contribuisce infatti all'acidificazione del suolo, con conseguenze negative sull'equilibrio dell'ambiente circostante (Kopittke et al., 2019).

In relazione all'entità del fenomeno, si stima che il 6,2% dei terreni agricoli in UE richieda delle azioni correttive per garantire una produzione alimentare sicura, che le maggiori fonti di contaminazioni siano le attività commerciali e industriali e lo smaltimento e il trattamento dei rifiuti e che i contaminanti maggiormente presenti nel terreno siano i metalli pesanti (35%), gli oli minerali (24%) e gli idrocarburi policiclici aromatici (11%) (Kopittke et al., 2019).

Dalla disamina dei diversi processi che caratterizzano la degradazione del suolo e della loro relazione con le pratiche agricole attuate e la riduzione delle rese colturali, emerge chiaramente come la conservazione del suolo sia «*an imperative to guarantee food security to the present and future population*» [Gomiero, 2019, p. 35]. La costruzione di un settore agricolo che rispetti il suolo e lo mantenga in salute è pertanto un'evoluzione indispensabile per il raggiungimento degli obiettivi di sostenibilità

prefissati dai *policy maker* (vedi paragrafo 1.5), che non può essere ulteriormente rimandata.

### 1.3.5 Relazione tra energia e settore agricolo

In Italia il settore agricolo è responsabile di un quota compresa tra il 2 e il 5% dei consumi energetici totali del paese (Bertocco et al., 2008; Nassi o Di Nasso et al., 2011) e circa l'1% dei consumi energetici globali è connesso alla produzione e utilizzo dei fertilizzanti agricoli (JRC, 2015). I consumi energetici in ambito agricolo, in base alle attività che li provocano, sono distinti in (Nassi o Di Nasso et al., 2011; JRC, 2015):

- consumi diretti, che comprendono il carburante, i fertilizzanti e l'elettricità usati in campo per svolgere attività produttive quali la preparazione e la lavorazione del terreno, l'irrigazione e la raccolta dei prodotti;
- consumi indiretti, che racchiudono l'energia usata al di fuori dell'azienda agricola per la produzione dei mezzi produttivi (macchinari, fertilizzanti, pesticidi, ...).

A ciò si aggiunge inoltre l'energia necessaria al trasporto, alla lavorazione e allo stoccaggio dei prodotti agricoli ottenuti in campo (Hernandez-Escobedo, 2023).

In linea con gli obiettivi dell'Unione Europea di ridurre i consumi finali di energia e di aumentare la quota di energia derivante da fonti rinnovabili entro il 2030 (Agostini, Colauzzi e Amaducci, 2021), anche al settore agricolo è richiesta sempre maggiore attenzione all'efficienza energetica e alla provenienza dell'energia utilizzata. L'entità del consumo energetico di un'azienda agricola dipende *in primis* dalle specie coltivate e dalle tecniche utilizzate. Dal momento che la relazione tra spesa energetica e resa colturale non è lineare, è necessario trovare l'equilibrio ottimale tra le due. Superate determinate soglie, infatti, un maggior consumo energetico non si traduce necessariamente in ulteriori benefici; allo stesso tempo, però, l'energia rimane un input critico per lo sviluppo delle colture e «*an energy input too small can lead to very low yields and then, perversely, to an overall higher energy demand per tonne of harvested product*» [JRC, 2015, p. 32]. Non esiste una soluzione *one size fits all* per il bilanciamento ottimale, ogni singolo caso è a sé e deve essere analizzato in modo indipendente. Ad esempio, l'agricoltura biologica appare in genere migliore in termini di efficienza energetica grazie al minor utilizzo di input sintetici e lavorazioni meccaniche, ma esistono molteplici eccezioni, date da tutte quelle aree in cui le rese così ottenute sono

troppo basse e impattano negativamente sull'efficienza complessiva del sistema (JRC, 2015).

Analizzando gli effetti delle diverse intensità di lavorazione del terreno, Bertocco et al. (2008) riscontrano un dispendio energetico superiore per quelle tecniche che prevedono un'elevata intensità di lavorazione del terreno rispetto a quelle a lavorazione ridotta (+ 31,2%) o *no till* (+59,8%), che non sempre è compensata da maggiori rese. Nassi o Di Nasso et al., (2011) indagano invece la variabilità delle rese in relazione a diversi livelli di input sintetici utilizzati. I sistemi che impiegano minori quantità di pesticidi e fertilizzanti hanno rese più basse, ma comportano anche minori costi di acquisto e applicazione degli stessi. Tale riduzione si rivela conveniente in alcune aree come il Centro Italia, mentre è economicamente insostenibile in altre.

Anche nei casi in cui un sistema *low input* presenti una riduzione contenuta delle rese e sia pertanto economicamente vantaggiosa, la sua implementazione a livello territoriale deve essere preceduta da un'attenta analisi dei possibili problemi connessi alla sua capacità di garantire la *food security*. Le previsioni per i prossimi decenni suggeriscono infatti la necessità di aumentare la produzione alimentare per soddisfare la domanda, elemento apparentemente in contrasto con la possibilità di accettare le rese inferiori connesse alla maggiore efficienza energetica dei sistemi *low input*. Si devono tuttavia a tal proposito prendere in considerazione due elementi. Il primo riguarda la densità di nutrienti che presentano gli alimenti: le previsioni e i dati tendono a focalizzarsi sulla quantità di cibo prodotto e disponibile per il consumo, spesso senza considerarne la qualità nutrizionale. Nel momento in cui il sovrasfruttamento delle aree agricole causa la produzione di alimenti con valori nutrizionali peggiori, tale aumento produttivo non è di fatto adeguato a soddisfare la domanda. Il secondo punto riguarda invece la dipendenza del settore alimentare dalle fonti fossili: il massivo utilizzo di energia nel settore agricolo dà origine a una stretta correlazione tra prezzi di alcuni alimenti e prezzo del petrolio (Karakotsios, Katrakilidis e Kroupis, 2021). Secondo il *Joint Research Centre* (2015), infatti, solo il 7% dell'energia utilizzata nella produzione alimentare proviene da fonti rinnovabili. Questa dipendenza fa sì che una potenziale diminuzione nell'offerta di petrolio sia in grado di mettere a rischio l'accessibilità e la stabilità dell'offerta alimentare; è quindi possibile aumentare l'efficienza energetica delle aziende agricole per proteggere il sistema da questo genere di *shock*.

Le principali misure attuate al fine di ottimizzare i consumi energetici del settore riguardano l'aumento della percentuale di energia rinnovabile sul totale consumato e il miglioramento dell'efficienza energetica dei processi produttivi.

Uno strumento in via di sperimentazione per aumentare la produzione di energia rinnovabile è dato dai sistemi agrovoltaici, che coniugano all'interno della stessa area la produzione di cibo e di energia grazie all'utilizzo di pannelli fotovoltaici posti diversi metri sopra la superficie di un campo coltivato (Weselek et al., 2021). Una delle preoccupazioni primarie connesse all'utilizzo di questi sistemi è data dal loro potenziale impatto sulle condizioni microclimatiche e di conseguenza sulla produttività dell'attività agricola. Se da un lato la presenza di pannelli fotovoltaici consente infatti di proteggere le colture dal calore eccessivo analogamente a come farebbero degli alberi (Agostini, Colauzzi e Amaducci, 2021), dall'altro la riduzione dei raggi solari in grado di raggiungere le colture sottostanti può diminuirne lo sviluppo, soprattutto nelle fasi embrionali e in climi mitigati (Weselek et al., 2021). Si deve inoltre considerare l'elevato costo connesso all'acquisto e all'installazione dei suddetti impianti, che, in assenza di contributi e finanziamenti, hanno un impatto considerevole sul bilancio di un'azienda agricola. Secondo Di Francia e Cupo (2023) l'investimento infrastrutturale iniziale, che è superiore a quello di un normale impianto fotovoltaico, è eccessivo per giustificare il mantenimento dell'attività produttiva sottostante per tutte quelle attività agricole a basso rendimento, mentre è almeno parzialmente compensato dal mantenimento del raccolto nelle attività agricole ad alto valore aggiunto. Paradossalmente però gli autori fanno notare che ha più senso implementare politiche a sostegno dell'adozione di sistemi agrovoltaici proprio in quelle aree che presentano colture poco redditizie, per contrastare fenomeni come l'abbandono della terra e l'esodo dalle aree rurali che possono derivare dall'insostenibilità economica dell'agricoltura.

Per migliorare l'efficienza energetica sono invece adottate pratiche come l'irrigazione a goccia, che consente di ridurre l'energia necessaria a pompare l'acqua; la riduzione degli input sintetici; la minor lavorazione del terreno grazie all'implementazione di pratiche conservative o *no till* (Nassi o Di Nasso et al., 2011); l'utilizzo di soluzioni innovative per lo stoccaggio; la proposta di prodotti a km0 per ridurre i trasporti. Per quanto riguarda lo stoccaggio, una soluzione peculiare e innovativa è offerta dalle celle ipogee di Melinda, un impianto posto 300 m sotto terra utilizzato per la frigo-conservazione delle mele prodotte, che presenta una temperatura

costante e consente di controllare parametri atmosferici come la concentrazione di CO<sub>2</sub>. Per evitare di realizzare nuovi scavi, sono state utilizzate le gallerie risultanti dall'attività estrattiva di un'azienda locale produttrice di materiali da costruzione. L'intenzione è inoltre quella di rendere visitabili le 34 celle, sfruttandole anche come attrazione turistica ed elemento di valorizzazione del territorio. L'energia incorporata nei fertilizzanti può invece essere ottimizzata tramite l'adozione delle migliori tecniche produttive e la minimizzazione del loro utilizzo, pur compatibilmente con il mantenimento di rese colturali soddisfacenti (JRC, 2015).

### 1.3.6 Perdite e sprechi nella filiera alimentare

Lo spreco e le perdite alimentari (*Food Loss and Waste, FLW*) rappresentano un ostacolo sempre più rilevante nel perseguimento degli obiettivi di sviluppo sostenibile, dal momento che causano problemi relativi alla tutela delle risorse naturali e al raggiungimento della *food security* (Capone et al., 2014) e della sostenibilità ambientale ed economica del settore agroalimentare (Xue e Liu, 2019). Gettare via il cibo significa infatti sprecare anche gli input utilizzati per produrlo, elemento che non è trascurabile in un mondo caratterizzato da risorse scarse e da una crescente attenzione verso la sostenibilità delle attività produttive (Vittuari et al., 2019). Come già evidenziato nel corso del presente elaborato, la produzione alimentare richiede l'utilizzo di ingenti quantità di risorse in termini di carburanti fossili, utilizzati per attività come la lavorazione del terreno con macchine agricole, il trasporto dei prodotti, ... (vedi paragrafo 1.3.5), di acqua (vedi paragrafo 1.3.3) e di input esterni come fertilizzanti e pesticidi, ma anche sensori e macchinari di varia natura. Perdite e sprechi alimentari rappresentano inoltre un doppio spreco di energia poichè «*on one hand the chemical energy contained in food, and, on the other hand the production energy inputs are wasted alongside with food*» [Vittuari, De Menna e Pagani, 2016, p. 2]. Lo spreco alimentare è inoltre connesso a doppia via con i cambiamenti climatici in corso sul pianeta: da un lato fattori quali le temperature più elevate, la crescente concentrazione di CO<sub>2</sub> e di altri gas serra in atmosfera e la maggior frequenza di eventi meteorologici estremi provocano l'aumento delle perdite agricole e della complessità delle attività di stoccaggio post-raccolta; dall'altro lato gli sprechi stessi contribuiscono ad amplificare i problemi ambientali connessi al sovrautilizzo delle risorse (Parmar, 2019). Per rendere



sostenibile il settore agricolo è pertanto indispensabile costruire un sistema che comprenda «*more diversified cultivars that are more nutritious, reduce soil degradation, have lower or no dependence on unsuitable external inputs (fertilizers, pesticides), have resistance to current and emerging pests, [...] have increased adaption to the changing climate*» [Parmar, 2019, p. 110] e che minimizzi lo spreco e le perdite alimentari.

Per quanto riguarda la quantificazione del fenomeno, secondo le stime del progetto FUSIONS<sup>17</sup> ogni anno nell'Unione Europea vengono sprecati 88 milioni di tonnellate di alimenti, corrispondenti al 20% della produzione totale e con un costo complessivo che si aggira intorno ai 143 miliardi di euro (FUSIONS, 2016). A livello globale invece, secondo diversi autori (FAO, 2011; Gomiero, 2019; Bhat e Jöudu, 2019), circa un terzo del cibo prodotto per il consumo umano viene perso o sprecato ogni anno. Le stime possono tuttavia variare notevolmente in relazione alla definizione presa a riferimento e ai metodi utilizzati per effettuare le misurazioni. Tra le definizioni più autorevoli in materia di spreco alimentare si annoverano quelle fornite dalla FAO, che si sono evolute e ampliate nel tempo. Una prima definizione fornita nel 1981 comprende «*any change in the availability, edibility, wholesomeness or quality of the food that prevents it from being consumed by people*» [FAO, 1981, p. 44]. Nei paesi sviluppati è causato soprattutto dalle tecnologie utilizzate per la raccolta, che possono lasciare parte della produzione in campo o provocare danni meccanici ai prodotti, e dagli standard di peso, forma e colore che gli alimenti devono rispettare per essere immessi sul mercato (FAO, 1981). Nel 2011 la definizione di *Food Loss and Waste* è stata aggiornata al fine di introdurre la distinzione tra perdite (*food loss*) e spreco alimentare (*food waste*). La diminuzione di massa o qualità nutrizionale della porzione edibile della produzione agricola che si verifica nelle fasi di produzione, post-raccolta e trasformazione è definita *food loss*, mentre le perdite che si verificano nelle fasi più a valle della filiera alimentare (*retail* e consumo finale) sono classificate come spreco alimentare (FAO, 2011).

Le perdite alimentari sono provocate da fattori naturali (malattie, condizioni meteorologiche avverse, ambiente di stoccaggio inadeguato, ...) o umani (limiti logistici o infrastrutturali) e possono essere suddivise in (Xue e Liu, 2019):

---

<sup>17</sup> Il progetto FUSIONS (*Food Use for Social Innovation by Optimising Waste Prevention Strategies*) è stato un progetto europeo attivo tra il 2012 e il 2016 con il fine di:

- armonizzare il monitoraggio di perdite e sprechi alimentari tra i Paesi membri dell'UE;
- comprendere come ridurre gli sprechi attraverso l'innovazione sociale;
- sviluppare delle linee guida per una politica comune europea relativa a perdite e sprechi alimentare.

- perdite in campo (*farm losses*), che avvengono durante la produzione e la raccolta quando «*edible crops are left in field, ploughed into soil, eaten by birds or rodents, or because timing of harvest is not optimal*» [Gomiero, 2019, p. 35];
- perdite post-raccolta (*postharvest losses*), che si verificano durante le fasi di manipolazione, stoccaggio, trasformazione e distribuzione. Comprendono la degradazione fisiologica, che è dovuta a processi naturali (es. produzione di etilene nei frutti climaterici) e il decadimento patologico, che è correlato a infezioni da parte di funghi e batteri e può essere accelerato dalla presenza di danni fisici in grado di fungere da punti di ingresso per i patogeni (Parmar, 2019). Sono influenzate dalle condizioni ambientali di trasporto e stoccaggio, specialmente per i beni deperibili, in cui i processi fisiologici di deperimento avvengono molto rapidamente (es. temperatura troppo elevata può accelerare il processo di respirazione) (Baruffaldi et al., 2019).

Lo spreco alimentare è al contrario causato da errati comportamenti di acquisto e consumo, tra cui: gli acquisti troppo abbondanti a livello di retailer o singolo consumatore, la preparazione di porzioni eccessive e la scarsa attenzione alle date di scadenza o alle condizioni di conservazione ideali. La porzione di spreco connessa ai consumi domestici rappresenta la componente maggioritaria sul totale delle perdite e sprechi alimentari nei paesi sviluppati (Xue e Liu, 2019).

La definizione di spreco e perdite alimentari viene ulteriormente aggiornata dalla FAO nel 2014 per includere (FAO, 2014):

- tutti i flussi di risorse destinati al consumo umano, inclusi sottoprodotti o prodotti secondari, che non possono essere trasformati in specifiche filiere;
- gli alimenti idonei ad entrare nella filiera agroalimentare, ma che vengono intenzionalmente scartati o reindirizzati verso un uso non alimentare nella fase pre-raccolta;
- i cibi che non vengono raccolti pur essendo maturi e rimangono in campo a deteriorarsi;
- gli alimenti idonei ad entrare nella filiera agroalimentare, ma che vengono reindirizzati verso un uso non alimentare o, pur non essendo degradati, vengono scartati nella fase post-raccolta di smistamento e classificazione;

- i cibi che vengono utilizzati per alimentare gli animali o come compost.

A livello europeo, lo spreco alimentare è stato definito dal progetto FUSIONS come «*the fraction of food, and inedible parts of food, removed from the food supply chain to be recovered or disposed, including composted, crops ploughed in/not harvested, anaerobic digestion, bio-energy production, co-generation, incineration, disposal to sewer, landfill or discarded to sea*» (FUSIONS, 2014, p. 19). In questo caso viene pertanto inclusa all'interno della definizione anche la porzione non edibile della produzione agricola. Altri accademici hanno a loro volta ampliato ulteriormente i confini del fenomeno, considerando parte dello spreco anche il consumo alimentare che eccede le esigenze nutrizionali (Serafini e Toti, 2016) o l'ottenimento di rese colturali inferiori rispetto a quelle potenziali a causa di eventi atmosferici estremi, parassiti, malattie o pratiche agricole inadeguate (Gomiero, 2019).

Al fine di ridurre perdite e sprechi alimentari lungo tutta la filiera, devono essere messe in atto delle apposite soluzioni ad ogni stadio della produzione. In fase di pianificazione della stessa è innanzitutto possibile utilizzare dei sistemi elettronici automatizzati di pianificazione che basino le proprie decisioni sulle previsioni della domanda, in modo da minimizzare la sovrapproduzione (Aramyan et al., 2021). Si deve quindi dedicare attenzione alla scelta delle varietà da piantare, che deve tener conto sia delle condizioni ambientali che degli interessi del mercato obiettivo (Parmar, 2019). Anche in questa fase si rivelano utili i modelli automatizzati di supporto alle decisioni, dal momento che sono in grado di indirizzare le scelte dei produttori sulla base di simulazioni condotte prendendo in considerazione un ampio numero di variabili (Ahumada e Villalobos, 2019) (vedi paragrafo 3.3). Per minimizzare le inefficienze che possono essere fonte di perdite e sprechi è inoltre necessario ottimizzare le logiche organizzative (ottimizzazione dei flussi di merci, riorganizzazione delle relazioni di filiera, ...) e le pratiche agronomiche adottate (fertilizzazione, irrigazione, ...). Tale ottimizzazione dovrebbe avere lo scopo di ridurre al minimo la presenza di fattori di stress abiotici e biotici che possono influire negativamente sul livello qualitativo degli alimenti (Parmar, 2019). Gli stress idrici in campo sono ad esempio connessi con una maggiore riduzione del peso durante lo stoccaggio in diversi frutti e ortaggi e una minore *shelf life* del prodotto. L'utilizzo di pesticidi, erbicidi e regolatori della crescita richiede inoltre particolare attenzione, poiché può intaccare la qualità fisica (es.

bruciature da fertilizzante), sensoriale e di sicurezza (residui tossici) del prodotto. L'adozione di pratiche quali l'agricoltura di precisione, che prevede l'utilizzo di sensori e decisioni *data-based* (vedi paragrafo 2.2), può aiutare a ottimizzare gli interventi sulle colture, fornendo informazioni sul loro stato di salute o sui livelli di umidità e nutrienti presenti nel suolo, minimizzando le perdite in campo dovute agli stress di varia natura (Aramyan et al., 2021). La raccolta deve essere effettuata quando il raccolto è nello stadio ottimale di maturazione (se troppo acerbo potrebbe danneggiarsi o presentare attributi sensoriali insoddisfacenti, se troppo maturo potrebbe essere troppo morbido e difficile da manovrare e avere una minore *shelf life*) e con condizioni atmosferiche adeguate, per evitare possibili danni ai prodotti causati da temperature eccessivamente basse o elevate. Inoltre, eventi quali pesanti precipitazioni o forti venti che precedono il momento della raccolta possono danneggiare i prodotti già maturi ma ancora in campo. Per questi motivi, la corretta programmazione del momento della raccolta è cruciale. Anche in questa fase i modelli predittivi in grado di effettuare analisi basate su grandi quantità di dati possono supportare le decisioni degli agricoltori, rendendo l'attività più efficiente (Ahumada e Villalobos, 2019). La raccolta può inoltre avvenire in modo completamente manuale o può essere parzialmente o totalmente automatizzata. Nel caso in cui vi sia una componente meccanica, questa deve essere progettata e implementata in modo da non danneggiare i prodotti che vengono raccolti. Risultano fondamentali in questo ambito le innovazioni in corso in ambito di robotica e *machine vision* (vedi paragrafi 3.2 e 3.3). Nelle fasi post-raccolta, è particolarmente importante controllare la temperatura e l'umidità dell'ambiente, soprattutto per la conservazione e il trasporto degli alimenti deperibili (Baruffaldi et al., 2019). Da qui in poi ogni azione effettuata può solo rallentare il processo di deterioramento, ma non è più possibile aumentare la qualità del prodotto (Parmar, 2019). È infine cruciale il modo in cui i prodotti sono presentati ai consumatori finali: evitare di fissare date di scadenza inferiori a quelle reali per far aumentare il livello qualitativo percepito e non pretendere standard estetici eccessivamente elevati può evitare l'esclusione dalla filiera di prodotti perfettamente sani, sicuri e nutrienti (Aramyan et al., 2021). Chiaramente affinché tali azioni abbiano un impatto è necessario sensibilizzare i consumatori in merito all'impatto dello spreco alimentare e all'importanza di minimizzarlo.

## 1.4 Agricoltura e dimensione sociale

### 1.4.1 L'impatto delle attività agricole sulla dimensione sociale

Per indirizzare l'evoluzione del settore agricolo verso una reale sostenibilità, non è possibile prescindere dall'analisi degli impatti che esso ha sulla sfera sociale. Particolarmente rilevanti sono a tal proposito le conseguenze che le modalità di strutturazione e gestione del settore agricolo hanno sulla qualità di vita degli agricoltori e sulla sua l'attrattività nei confronti di quei lavoratori qualificati che potrebbero apportare contributi innovativi indispensabili ad assicurare all'agricoltura un florido futuro (vedi paragrafo 1.4.2).

Altro aspetto di fondamentale importanza è la relazione degli agricoltori con i consumatori, che sono i principali fautori del successo di un'azienda. La capacità di prevedere le evoluzioni della domanda e di adattarsi ad esse, unita all'abilità nella comunicazione, consente di aumentare la fedeltà dei clienti, migliorando la solidità aziendale. La creazione di un canale diretto di comunicazione con i consumatori permette inoltre di intraprendere attività di formazione ed educazione volte a far comprendere loro quali siano gli effetti delle loro scelte alimentari (vedi paragrafo 1.4.3).

L'impatto del settore agricolo deve infine essere analizzato in ottica più ampia, considerando tutte le dimensioni legate al territorio, dalla conservazione delle tradizioni e del patrimonio culturale, all'impatto sulla qualità di vita delle comunità rurali, alla creazione di un indotto di cui beneficiano anche altri attori esterni al settore (vedi paragrafo 1.4.4).

### 1.4.2 Sostenibilità del lavoro nel settore agricolo

Le modalità di strutturazione e gestione delle attività agricole hanno un impatto innanzitutto su chi lavora all'interno del settore. La qualità di vita degli agricoltori può infatti essere notevolmente influenzata da fattori quali l'apertura ai mercati internazionali, le sfide ambientali e la continua evoluzione delle esigenze dei consumatori. È pertanto necessario affrontare attivamente questi cambiamenti, adattando le attività produttive alle nuove condizioni ambientali e considerandoli come

opportunità da cogliere e non come fattori negativi da subire passivamente. Ciò consente non solo di mantenere elevata la produzione alimentare nel Paese e tutelare i posti di lavoro correlati, ma anche di salvaguardare le tradizioni e la cultura alimentare italiana di cui il settore agricolo e l'intero comparto agroalimentare sono elementi fondanti. La sostenibilità del lavoro nel settore agricolo deve pertanto essere innanzitutto di tipo economico, al fine di consentire agli agricoltori e alle loro famiglie di condurre una vita dignitosa e di svolgere la loro professione senza essere posti al margine della società. A questa si deve poi affiancare un concetto di sostenibilità più ampio, che coinvolga aspetti quali la salvaguardia dell'ambiente, fortemente impattato dalle attività agricole (vedi paragrafo 1.3); della salute degli agricoltori, spesso minacciata dal contatto con sostanze chimiche dannose (vedi paragrafo 1.2.2), e del valore culturale dell'agricoltura. Le pratiche agricole tradizionali rappresentano infatti un patrimonio culturale prezioso, che concorre a plasmare i paesaggi rurali caratteristici del Paese diventati simboli dell'italianità nel mondo. Tale valore si riflette anche all'esterno del settore agricolo e può dare un importante contributo allo sviluppo del territorio nel suo complesso (vedi paragrafo 1.4.4).

Per quanto riguarda la sostenibilità economica, il mercato del lavoro nel settore agricolo italiano è caratterizzato da una forte stagionalità e da un'elevata eterogeneità nelle condizioni di lavoro. La manodopera impiegata presenta in genere una scarsa qualificazione professionale, che si riflette in una remunerazione economica inferiore a quella di altri settori. Prevalgono inoltre all'interno del settore le aziende a carattere artigianale e familiare, in cui i membri della famiglia rappresentano la quota maggioritaria della forza lavoro impiegata (Nomisma, 2020). Il risultato di ciò è un tessuto produttivo polverizzato e incentrato su aziende di piccole dimensioni, anche se si sta verificando una ristrutturazione del settore a vantaggio di quelle aziende più strutturate, con dimensioni fisiche ed economiche più sostenibili e un forte orientamento al mercato (CREA<sup>18</sup>, 2022). L'età media dei capi d'azienda è piuttosto elevata, secondo le analisi del CREA (2022) il 57% degli imprenditori agricoli ha più di 60 anni e solo il 2% ne ha meno di 29. Questo elemento, in combinazione con il progressivo abbandono delle aree rurali, richiede una tempestiva linea di intervento per invertire il trend e assicurare un futuro più roseo al settore (Muench et al., 2022). I

---

<sup>18</sup> CREA è l'acronimo che indica il Consiglio per la Ricerca in agricoltura e l'analisi dell'Economia Agraria, che è il più importante ente di ricerca italiano in ambito agroalimentare.

giovani agricoltori presentano infatti un livello di istruzione più elevato della media e prestano maggiore attenzione alle questioni ambientali (es. più elevata quota di produzione biologica), all'associazionismo e all'integrazione con altre imprese (sia in verticale che in orizzontale) e alla diversificazione produttiva, che consente di aumentare la redditività aziendale (CREA, 2022). Per aumentare l'attrattività del lavoro agricolo agli occhi di questa fascia di popolazione giovane e istruita che potrebbe apportare al settore un grande contributo in termini di avanzamento e innovazione, è necessario tuttavia ridefinire il ruolo dell'azienda agricola, che non può più limitarsi ad essere poco più di una terzista che fornisce *commodity* ai grandi attori a valle della filiera a prezzi e condizioni contrattuali da loro definiti. Le caratteristiche strutturali appena descritte (aziende di piccole dimensioni, età elevata degli agricoltori, basso livello di istruzione degli operatori, ...) sono il risultato delle politiche che si sono susseguite negli anni (vedi paragrafo 1.5), che hanno indirizzato le scelte degli agricoltori tramite incentivi e sussidi, riducendone l'orientamento al mercato e l'imprenditorialità, intesa come «*the capacity and capability to identify new business opportunities and to successfully bring that opportunity to market and generate superior (or at least acceptable) financial performance.*» [Gunderson et al., 2014, p. 67]. A tal proposito Mann (2018) rileva come più della metà degli agricoltori in Spagna – ma risulta difficile pensare che i risultati in Italia possano essere differenti – si considera prima di tutto un lavoratore e non un imprenditore, nonostante gestisca e possieda un'azienda agricola. Appare pertanto evidente come la capacità innovativa delle aziende agricole non sia stata incentivata nel tempo, producendo come risultato un settore che deve contare sugli incentivi e i finanziamenti pubblici per rimanere in piedi ed evolversi. Se un tempo questo genere di politiche dettate dall'alto poteva essere giustificabile in virtù dell'importanza del raggiungimento della *food security*, oggi si dimostrano del tutto inadeguate ad affrontare l'incertezza e la rapidità che caratterizzano il nostro tempo.

Contribuiscono inoltre a limitare la libertà degli agricoltori – in termini ad esempio di varietà coltivate, modalità produttive e parametri da rispettare – fattori quali i livelli di integrazione verticale e di concentrazione del settore. L'integrazione verticale dipende dal numero di passaggi che ogni singolo attore svolge all'interno della filiera. Quando l'integrazione verticale è bassa ogni attore si occupa di una sola fase produttiva, quando è elevata un unico attore svolge più attività, ricoprendo più ruoli all'interno della stessa. Nel caso delle filiere agroalimentari i principali ruoli presenti sono il

produttore/agricoltore, che è responsabile della coltivazione in campo; il fornitore, che funge da intermediario e compra le materie prime da più produttori per rivenderle ai trasformatori secondo le loro esigenze; il trasformatore, che lavora le materie prime agricole per ottenere prodotti finiti e il rivenditore, che è responsabile della fase di vendita al dettaglio (Havas e Watts, 2014). Un maggior livello di integrazione verticale aumenta i costi che l'impresa deve sostenere, ma le consente anche di ottenere una percentuale maggiore del valore aggiunto complessivo e diminuisce i vincoli a cui deve sottostare. Forme tipiche di associazionismo quali cooperative e consorzi sono talvolta utilizzate al fine di raggiungere la massa critica necessaria a integrare con profitto fasi a monte o a valle della filiera (acquisto di macchinari in comune, utilizzo di un unico impianto di trasformazione, ...), aumentando l'efficienza dell'attività, oppure per acquisire il potere necessario a negoziare con i grandi attori presenti nelle fasi della filiera con concentrazione più elevata. Anche tali forme di coordinamento orizzontale hanno tuttavia lo svantaggio di limitare ulteriormente la libertà decisionale dei singoli imprenditori, con effetti variabili in relazione alle specifiche modalità di coordinamento.

Il grado di concentrazione di un settore rappresenta il numero delle imprese presenti al suo interno e il modo in cui le vendite sono distribuite tra loro. Un elevato grado di concentrazione indica la presenza di poche grandi imprese dominanti, mentre è basso quando il tessuto aziendale è molto frammentato. Per quanto riguarda il comparto agroalimentare, il grado di concentrazione è ridotto a livello agricolo, mentre è particolarmente elevato in altre fasi della filiera (es. trasformatori, ma anche fornitori di pesticidi, sementi e macchinari agricoli) e questo *«leaves farmers with fewer and fewer choices which products to buy and to which buyer to sell»* [Mann, 2018, p. 88]. Appare pertanto evidente che una singola azienda agricola, soprattutto se di dimensioni ridotte, difficilmente presenterà un potere negoziale tale da poter dettare le proprie condizioni nel rapporto con i grandi attori del settore. I piccoli agricoltori devono allora trovare delle modalità alternative di gestione dei rapporti o dei canali paralleli a quello della grande distribuzione, in cui sia possibile per loro creare un rapporto diretto con i consumatori, sia esso consentito dalla vicinanza geografica o da tecnologie abilitanti quali internet, in tutte le sue evoluzioni (vedi capitolo 3). I dati sull'andamento del mercato agroalimentare negli ultimi anni indicano che gli agricoltori stanno cogliendo tali opportunità e mostrano *«una tendenza al riavvicinamento alle modalità tradizionali e dirette di approvvigionamento dei prodotti e, contemporaneamente, all'emergere di*



*sistemi di distribuzione innovativi e sostenibili che rafforzano il collegamento diretto tra produttori e consumatori finali»* [CREA, 2022, p. 310]. Sono infatti in aumento i fenomeni della vendita diretta e le filiere corte, che consentono ai produttori agricoli di svincolarsi dalle logiche di mercato tradizionali e comunicare meglio il proprio valore (CREA, 2022). Tra le forme di vendita diretta assumono particolare rilevanza i punti vendita presso l'azienda o *online* e la partecipazione ai mercati regionali e ai *farmers' market*; nell'ambito della filiera corta si stanno diffondendo i gruppi di acquisto solidale (GAS), i negozi in partnership fra agricoltori e commercianti e l'aggregazione di più produttori in *marketplace* gestiti da un intermediario. Tali canali distributivi, pur presentando altri limiti (può ad esempio risultare difficile raggiungere un volume di vendita soddisfacente), offrono in genere migliori possibilità per gli agricoltori di valorizzare il proprio lavoro, aumentando così la redditività aziendale.

Per migliorare la capacità dell'impresa di produrre reddito, in particolar modo nelle aree rurali o svantaggiate, e per proteggersi dalle fluttuazioni delle rese colturali e dei prezzi dei prodotti è altresì possibile ricorrere a delle strategie di diversificazione (Henke, Cimino e Vanni, 2022). Il peso della diversificazione è stimato oggi intorno al 20% del valore totale della produzione agricola italiana ed è in continua crescita (CREA, 2022) e comprende sia le attività di supporto (o servizio) che quelle secondarie (vedi figura 1.4). Le prime includono tutte quelle attività che non rientrano direttamente nel processo produttivo, ma sono intrinsecamente legate alla produzione agricola in senso stretto, quali le lavorazioni delle sementi, le attività agricole per conto terzi, la prima lavorazione dei prodotti agricoli e la manutenzione del terreno. Le attività secondarie comprendono invece quelle attività che non sono agricole in senso stretto, ma sono inseparabili dall'agricoltura e sono integrate con essa in modo più o meno stretto. Vi rientrano ad esempio la trasformazione dei prodotti vegetali, l'agriturismo, la produzione di energia rinnovabile (vedi paragrafo 1.3.5) e di mangimi, la vendita diretta e la sistemazione di parchi e giardini.

Secondo la classificazione di Henke, Cimino e Vanni (2022) le attività di diversificazione possono invece essere classificate come attività di approfondimento (*deepening*) e di ampliamento (*broadening*). La prima categoria include le azioni finalizzate all'integrazione verticale lungo la filiera (es. lavorazione dei prodotti agricoli e marketing), mentre la seconda comprende le attività non direttamente correlate alla

produzione agricola dell'impresa, ma che ne utilizzano le risorse (es. produzione di energia rinnovabile, agriturismo, attività educative e ricreative).

**Figura 1.4 - Attività di supporto e secondarie dell'agricoltura - produzione a valori correnti**

	2020	2021	Distr. % 2021
<b>ATTIVITÀ DI SUPPORTO</b>			
Lavorazione sementi per la semina	243	258	3.6
Nuove coltivazioni e piantagioni	187	198	2.8
Attività agricole per conto terzi	3 194	3 300	45.9
Prima lavorazione dei prodotti agricoli <sup>1</sup>	2 154	2 354	32.7
Manutenzione del terreno in buone condizioni agricole ed ecologiche	608	638	8.9
Attività di supporto all'allevamento del bestiame <sup>2</sup>	216	233	3.2
Altre attività di supporto	195	215	3.0
Peso % sul valore della produzione agricola	12	11.9	
<b>ATTIVITÀ SECONDARIE</b>			
Acquacoltura	8.3	9.8	0.2
Trasformazione dei prodotti vegetali (frutta)	171.9	188.6	3.5
Trasformazione del latte	297.7	323.9	6.1
Agriturismo, comprese le attività ricreative e sociali e le fattorie didattiche	802.3	991.2	18.6
Trasformazione dei prodotti animali (carne)	312.1	306.1	6.8
Produzione di energia rinnovabile	2 205.6	2 253.9	47.7
Artigianato (lavorazione del legno)	56.1	64.3	1.2
Produzione di mangimi	180.9	206.9	3.9
Sistemazione di parchi e giardini	273.9	310.5	5.8
Vendite dirette / commercializzazione	278.8	331.7	6.2
Peso % sul valore della produzione agricola	8.1	8.8	
<b>TOTALE SUPPORTO E SECONDARIE (% SUL VALORE DELLA PRODUZIONE AGRICOLA)</b>	<b>20.1</b>	<b>20.7</b>	

<sup>1</sup> È esclusa la trasformazione di prodotti agricoli

<sup>2</sup> Sono esclusi i servizi veterinari

FONTE: adattato da CREA [2022, p. 277]

L'adozione di una strategia di diversificazione può essere il risultato dell'intraprendenza di una nuova generazione di agricoltori, che guarda alle opportunità disponibili con occhi nuovi e maggiori competenze, oppure può essere una strategia di sopravvivenza per quelle piccole aziende che vogliono superare la situazione di stagnazione o declino in cui si trovano. I fattori principali che influiscono sulla volontà di intraprendere una strategia di diversificazione sono (Henke, Cimino e Vanni, 2022):

- la dimensione economica e fisica dell'azienda: l'indice di diversificazione è nettamente maggiore per le aziende che presentano un'elevata superficie coltivata, ma una dimensione economica inferiore alla media;
- la presenza di *policy* pubbliche (es. pagamenti diretti e finanziamenti) che le incentivano.

L'adozione di una strategia di diversificazione, oltre a migliorare la redditività dell'attività agricola, *«could also play a significant role in helping the small-scale agricultural sector to meet the ambitious goals set in the Farm to Fork strategy and, to some extent, the new Green Deal»* [Henke, Cimino e Vanni, 2022, p. 33]. Esiste infatti una connessione tra la diversificazione delle attività agricole nelle aree rurali e la sostenibilità complessiva del settore primario, dal momento che la diversificazione può aumentare l'efficienza di consumo delle risorse naturali.

Date le previsioni future sulla progressiva riduzione della disponibilità di acqua e sul contemporaneo aumento delle temperature medie e dei fabbisogni idrici delle colture, considerate congiuntamente all'impatto del settore agricolo sull'ambiente che potrebbe accentuare tali problematiche (vedi paragrafo 1.3), è indispensabile inoltre adottare delle strategie a tutela delle rese colturali. È infatti molto probabile che nei prossimi anni, soprattutto durante la stagione estiva, i fabbisogni idrici delle colture superino in alcune aree l'acqua disponibile per l'utilizzo agricolo. Per affrontare tale problematica, è importante che le scarse risorse idriche disponibili siano dedicate alle colture a più elevato valore aggiunto e ad alta produttività. Le colture a basso rendimento devono essere progettate in modo da occupare il più possibile le aree non irrigate, che non prosciugano le riserve idriche e richiedono meno lavoro (Cortignani Dell'Unto e Dono, 2021). L'obiettivo di questa riprogettazione è quello di mantenere quanto più elevate possibile le rese di quelle colture che contribuiscono in maggior misura a formare il reddito delle aziende agricole, limitando le perdite economiche per gli agricoltori in caso di siccità. Il rischio in questo scenario è tuttavia quello che le colture meno produttive, collocate spesso in aree rurali e marginali che presentano elevati tassi di disoccupazione, siano definitivamente abbandonate, esasperando le problematiche sociali già presenti. Per limitare tale rischio è importante prevedere dei percorsi alternativi che possono essere intrapresi in tali luoghi, come *«changing land use by expanding autumnal and winter crops, when climate models simulate limited rises in irrigation needs, and only slight declines of water availability»* [Cortignani Dell'Unto e Dono, 2021, p. 8].

Per comprendere se una strategia come quella appena descritta possa essere conveniente o per valutare l'impatto di un'attività di diversificazione risulta sempre più spesso utile ricorrere ad apposite tecnologie, in grado di creare modelli e simulazioni

che prevedono i possibili risultati di un'attività. Il ricorso a modelli predittivi basati sui dati e l'utilizzo dell'intelligenza artificiale per prevedere trend e impatti possono infatti consentire agli imprenditori agricoli di effettuare scelte più ponderate, fornendo loro degli strumenti per meglio affrontare l'incertezza che caratterizza i nostri tempi. Le potenzialità connesse all'impiego della tecnologia nel settore agricolo non sono tuttavia limitate al miglioramento delle attività di previsione e pianificazione, ma possono essere integrate con successo all'interno del processo produttivo vero e proprio. È il caso ad esempio degli strumenti tecnologici impiegati nell'agricoltura di precisione a supporto delle operazioni agricole (vedi paragrafo 2.2) o dell'integrazione nelle filiere agroalimentari di strumenti innovativi come la *blockchain* e gli *smart contract*, che possono aumentarne la trasparenza e migliorare la gestione dei rapporti tra i diversi attori coinvolti (vedi paragrafo 3.4). Affinché queste soluzioni siano implementate con successo è fondamentale tuttavia che gli agricoltori *in primis* siano coinvolti nel loro sviluppo e ricevano una formazione adeguata a riguardo, poiché «*The farmers' relationship with technologies, knowledge, and trust in them, as well as the competencies to use them, are at heart of success and effectiveness of smart farming<sup>19</sup> and its contribution to sustainable development*» [Checchinato et al., 2023, p. 164].

### 1.4.3 La relazione con i consumatori

Instaurare una relazione diretta con i consumatori comporta per gli attori del settore agricolo una serie di vantaggi quali la capacità di prevedere e adattarsi tempestivamente alle esigenze della domanda; la possibilità di ricevere feedback e migliorare la propria attività; la creazione di una comunicazione onesta e trasparente, che aumenta la fiducia e la fedeltà da parte dei clienti, e l'opportunità di formare i consumatori, aumentando la loro consapevolezza sull'impatto che le loro scelte hanno sull'ambiente e sulla sostenibilità del settore agricolo.

La capacità di prevedere e soddisfare la domanda in modo adeguato e tempestivo è essenziale in qualsiasi settore, dal momento che sono le scelte dei consumatori a decretare il successo o il fallimento di un'impresa (EIT Food<sup>20</sup>, 2021). La presenza di una

---

<sup>19</sup> Il termine *smart farming* indica quell'insieme di strumenti, tecniche e strategie che coniugano agricoltura tradizionale e nuove soluzioni digitali e tecnologiche al fine di rendere più efficiente e sostenibile la produzione agricola.

<sup>20</sup> L'*European Institute of Innovation and Technology* è un organismo dell'Unione Europea che si occupa di identificare, co-finanziare e coordinare attività integrate di alta formazione, ricerca e innovazione, che

relazione diretta con i consumatori consente agli agricoltori di acquisire dati aggiornati e accurati sulle preferenze e le tendenze di consumo, che possono poi essere utilizzati per supportare le decisioni di pianificazione delle attività a breve e lungo termine al fine di formulare un'offerta adeguata alle richieste. È possibile inoltre ricevere feedback diretti sulla qualità dell'offerta e l'esperienza di acquisto, che possono essere utilizzati per migliorare la produzione agricola, adattandola ai desideri dei consumatori. Le attività di raccolta e analisi dei dati sulle preferenze e i trend di consumo sono sempre più spesso supportate da tecnologie quali *Internet of Things* (IoT), Intelligenza Artificiale (IA) e *Machine Learning* (ML), che consentono di scambiare ed elaborare in tempo reale un'elevata mole di informazioni (vedi capitolo 3).

Una delle ragioni che spingono i consumatori a instaurare una relazione diretta con i produttori agricoli è connessa alla ricerca di una maggiore trasparenza sulle filiere alimentari. I consumatori vogliono infatti sapere da dove provengono i cibi che acquistano, come sono stati prodotti e quali sono gli impatti ambientali e sociali legati alla loro produzione. Gli agricoltori che improntano una comunicazione con i consumatori basata su onestà e trasparenza possono pertanto guadagnare la loro fiducia. Tecnologie innovative come la *blockchain*, che è definita da alcuni come una macchina per creare fiducia (Ferri, 2020) possono aiutare a raggiungere questo obiettivo, aumentando la credibilità delle informazioni condivise (vedi paragrafo 3.4).

Migliorare la comunicazione con i consumatori, oltre ad aumentare la fiducia che essi ripongono nei produttori agricoli, consente inoltre di incrementare i livelli di informazione e consapevolezza sull'impatto delle loro scelte sul sistema agroalimentare. La condivisione di informazioni su aspetti quali le sfide che gli agricoltori devono affrontare, le pratiche sostenibili da loro adottate e i benefici dei prodotti locali sono essenziali ai fini della creazione di un settore agricolo in grado di portare benefici all'ambiente, l'economia e la società (Toussaint, Cabanelas e González-Alvarado, 2021).

La maggiore fiducia e l'aumentata consapevolezza che si ottengono come risultato di una comunicazione più onesta e organica, possono infatti contribuire a incrementare la sostenibilità economica delle aziende agricole locali, consentendo loro di raggiungere una migliore stabilità e prosperità finanziaria nel lungo termine e di veder riconosciuto il proprio valore. Le scelte di acquisto dei consumatori, quando sono

---

coinvolgono università, centri di ricerca e imprese. Tali attività riguardano diversi settori, tra cui quello del *food*, e indagano in particolare le loro possibili evoluzioni in termini scientifici e tecnologici.

rivolte verso prodotti con elevate prestazioni ambientali e sociali, possono infatti contribuire alla sostenibilità del sistema agroalimentare locale (JRC, 2015). La crescente attenzione che si riscontra nei confronti di aspetti quali l'impronta ecologica, la provenienza e i processi produttivi degli alimenti dimostrano infatti che è essenziale condividere queste informazioni per guidare le scelte di acquisto verso le alternative più sostenibili (Scozzafava, Mauracher e Gerini, 2022). Si tratta di un elemento fondamentale, dal momento che «*agricultural production, including agritourism or conservation, will always depend on the level of appreciation by the general population*» [Mann, 2018, p. 92]. Dallo studio di Toussaint, Cabanelas e González-Alvarado (2021) emerge a tal proposito che una porzione significativa di consumatori è sensibile a tali questioni, ma che non sempre essa dispone di informazioni adeguate a prendere una decisione di acquisto informata.

La crescente diffusione delle informazioni in merito all'impatto ambientale e sociale dei prodotti consumati, assieme alla sempre più elevata importanza attribuita alle componenti di salute e benessere associate all'alimentazione (vedi paragrafo 1.2.3), stanno modificando le esigenze dei consumatori, facendo emergere nuovi trend. Sono a tal proposito in crescita:

- la domanda di prodotti con elevati standard qualitativi e di sicurezza e basso impatto ambientale (Sabbadini et al., 2021). Spiccano in questo senso i prodotti locali (JRC, 2015) e quelli biologici, che vengono percepiti come più salutari, grazie a caratteristiche quali «*higher nutritional value and free from agrochemical residues and potentially unhealthy chemicals added in the food processing phase, free from added hormones and antibiotics*» [Gomiero, 2018, p. 716];
- le persone che seguono diete *plant-based*, vegetariane o vegane<sup>21</sup> (Bhat e Jōudu, 2019) e scelgono di ridurre o eliminare carne e derivati animali per motivi etici o di sostenibilità (Mann, 2018).

Per rispondere a tali richieste, emergeranno sempre più frequentemente modelli agricoli nuovi e diversificati, che saranno in grado di soddisfare le esigenze dei consumatori senza danneggiare l'ambiente e la società (Muench et al., 2022).

---

<sup>21</sup> Le differenze tra dieta vegetariana, vegana e *plant-based* riguardano per lo più l'estensione dell'esclusione dei prodotti di origine animale. La dieta vegetariana prevede l'eliminazione della carne e del pesce, ma consente il consumo di prodotti lattiero-caseari e/o uova, mentre quella vegana esclude completamente tutti i prodotti di origine animale. La dieta *plant-based* è la più flessibile delle tre poiché è basata sulla prevalenza degli alimenti vegetali, ma non esclude la presenza di alimenti di origine animale.

#### 1.4.4 Impatto dell'agricoltura sullo sviluppo del territorio

Le zone rurali sono fondamentali per la produzione alimentare, la gestione e la protezione delle risorse naturali, i servizi ecosistemici ad esse correlate, le attività ricreative e il turismo di un Paese; a livello dell'Unione Europea, ospitano quasi il 30% della popolazione e rappresentano oltre l'80% del territorio (Commissione Europea, 2021). Nelle aree rurali coltivate il paesaggio è plasmato da tre principali componenti: l'ambiente naturale, le attività agricole svolte dall'uomo e il tempo (CREA, 2021). Grazie all'elevata eterogeneità territoriale e alla radicata tradizione agricola, l'Italia gode di un'enorme ricchezza in termini di varietà dei paesaggi agrari, che può essere utilizzata come elemento di valorizzazione e arricchimento delle aree rurali. Le specificità territoriali che ne emergono rappresentano infatti di frequente siti dall'elevato valore estetico e culturale, apprezzati dai turisti per la bellezza dell'ambiente naturale e la cultura enogastronomica in essi presente. Ciò consente agli agricoltori di adottare strategie di diversificazione che comprendono attività di agriturismo e preparazione di piatti tipici, migliorando la redditività e la stabilità della propria impresa (vedi paragrafo 1.4.2), in accordo con il principio di multifunzionalità delle aziende agricole caldeggiato dalla PAC. Il maggior numero di turisti che visitano il territorio in seguito all'introduzione tali attività contribuisce inoltre ad aumentare le vendite di prodotti tipici della zona, nonché a *«far conoscere le bellezze naturalistiche e artistiche del territorio all'esterno, innescando, in tal modo, un meccanismo di sviluppo economico e culturale»* [INEA, 2014, p. 23] che giova a tutti i residenti grazie al suo indotto.

La graduale meccanizzazione e standardizzazione delle attività agricole verso un modello unico di agricoltura intensiva, con tutte le conseguenze che ciò comporta in termini di deforestazione ed erosione del suolo, sta tuttavia compromettendo i tradizionali assetti paesaggistici, diminuendo la tipicità e la funzionalità e aumentando la fragilità delle aree rurali. Tali modifiche nelle modalità di gestione del territorio ne hanno infatti aumentato il livello di frammentazione, riducendo la continuità di ecosistemi, habitat e unità di paesaggio, a favore di una maggiore espansione urbana. Si tratta di un fenomeno la cui entità non è trascurabile, dal momento che nel 2019 circa il 36% del territorio italiano presentava un grado di frammentazione elevato o molto elevato e in Veneto e Lombardia oltre il 20% della superficie aveva un livello di frammentazione molto elevato (CREA, 2021). A ciò si aggiungono poi i cambiamenti

sociali ed economici causati negli ultimi decenni da fenomeni quali la globalizzazione, l'urbanizzazione e l'invecchiamento della popolazione, che modificano il ruolo delle zone rurali e impattano sulla qualità di vita in tali aree, riducendo le opportunità di lavoro, il reddito medio pro capite e l'accesso a infrastrutture e servizi (Commissione Europea, 2021).

Così come le attività agricole della tradizione hanno contribuito a plasmare i paesaggi agricoli, allo stesso modo infatti le azioni e le tendenze attuali rappresentano gli elementi che daranno forma ai territori nei decenni a venire. Per salvaguardare la funzionalità di un territorio e le sue tradizioni è possibile sfruttare le opportunità che emergono dalla transizione digitale ed ecologica, in cui le zone rurali svolgono un ruolo attivo *«attraverso la produzione sostenibile di alimenti, la conservazione della biodiversità e la lotta contro i cambiamenti climatici»* [Commissione Europea, 2021, p. 2]. È a tal fine indispensabile che l'implementazione delle nuove tecnologie non prescindano dal rispetto delle peculiarità territoriali e delle pratiche tradizionali, che rappresentano un patrimonio di inestimabile valore.

Nella progettazione di politiche e attività territoriali trovano ad esempio applicazione i modelli di simulazione e previsione *data-based*, che calcolano l'impatto a lungo termine che queste avranno sull'estetica e la funzionalità del luogo. Tale analisi preventiva deve necessariamente precedere interventi evidenti quali la deforestazione di un'area o lo sbancamento del terreno, ma deve essere effettuata anche per tenere sotto controllo aspetti che potrebbero passare sottotraccia quali l'entità e la natura dei trattamenti chimici applicati in determinate colture e i potenziali danni che possono causare alle comunità limitrofe in termini ad esempio di danni alla salute e inquinamento delle falde acquifere. I risultati ottenuti dalle simulazioni possono inoltre essere utilizzati per migliorare la comunicazione con i residenti del luogo, dal momento che gli studi indicano che, nell'introduzione di una nuova azienda agricola sul territorio, *«information offered to the local population increased trust and perceived benefits while reducing scepticism»* [Mann, 2018, p. 93]. Chiaramente gli interventi devono essere progettati in modo che l'impatto complessivo per la comunità rurale in cui si inseriscono sia positivo e le informazioni comunicate ai residenti devono essere corrette e trasparenti, pena la perdita della fiducia riposta nel progetto proposto e in quelli futuri. L'introduzione di innovazioni tecnologiche più flessibili aprono inoltre alla possibilità di adottare nuove soluzioni modulari, che consentono agli agricoltori di adattare le



tecniche e gli strumenti utilizzati al proprio territorio, senza imporre loro l'utilizzo di soluzioni standardizzate e poco rispettose delle specificità territoriali. È possibile infine utilizzare tecnologie come la *blockchain* per migliorare la trasparenza delle comunicazioni con i consumatori e la tracciabilità dei prodotti agroalimentari, evidenziando il territorio da cui provengono.

Preservare e valorizzare l'agricoltura tradizionale e sostenibile, anche grazie all'adozione di innovazioni con essa compatibili, è importante non solo perché garantisce la qualità e l'autenticità dei prodotti alimentari e la sostenibilità del settore agricolo, ma anche per la conservazione del patrimonio culturale italiano.

## 1.5 Policy europee e italiane su agricoltura, sostenibilità e innovazione

L'ingente rilevanza degli interventi pubblici è un fattore consolidato all'interno del settore alimentare, che viene giustificata in virtù della necessità di assicurare che l'offerta raggiunga livelli quantitativi e qualitativi adeguati a soddisfare la domanda e che gli agricoltori ottengano un reddito sufficiente a garantire la continuità dell'attività agricola. Sempre più spesso accade inoltre che le policy pubbliche siano volte anche a disegnare le traiettorie future del settore, con l'obiettivo di incentivare l'adozione di pratiche e modelli innovativi e competitivi sul mercato globale (Gunderson et al., 2014). Al fine di non creare distorsioni eccessive del mercato, che possono risultare dannose e problematiche, tali interventi devono essere calibrati e implementati prestando elevata attenzione ai loro potenziali impatti sui diversi attori.

Il seguente paragrafo sarà focalizzato sull'approfondimento delle principali politiche europee e italiane che riguardano nello specifico lo sviluppo del settore agricolo in termini di sostenibilità e innovazione. A livello europeo, i recenti interventi fondamentali in materia sono l'*European Green Deal* e la nuova programmazione PAC per il quadriennio 2023-2027. La nuova programmazione PAC è quindi recepita a livello nazionale mediante il Piano Strategico della PAC 2023-2027, attuato grazie anche alle sinergie con gli interventi previsti nel Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza.

### ***European Green Deal***

L'*European Green Deal* è un documento volto a favorire il raggiungimento degli obiettivi di sviluppo sostenibile (o *Sustainable Development Goals*, SDGs) dettati dall'Agenda ONU per il 2030 (Commissione Europea, 2019).

Per quanto riguarda il settore agroalimentare, vengono definiti al suo interno la strategia *Farm to Fork* e la strategia di tutela della biodiversità. La strategia *Farm to Fork* è stata sviluppata con lo scopo di accelerare la transizione del sistema alimentare europeo verso la sostenibilità, grazie al raggiungimento di una serie di ambiziosi obiettivi entro il 2030. I principali obiettivi prefissati riguardano:

- la riduzione del 50% dell'uso dei pesticidi chimici e del rischio ad essi correlato;
- la riduzione del 20% dell'utilizzo di fertilizzanti, garantendo al contempo il mantenimento o l'aumento della fertilità del suolo;
- la destinazione di almeno il 25% della superficie agricola utilizzata (SAU) all'agricoltura biologica;
- il garantire la presenza di connessione veloce a banda larga in tutte le zone rurali entro il 2025, rendendo possibile l'utilizzo dell'innovazione digitale come fattore abilitante per il raggiungimento della sostenibilità.

### **Politica Agricola Comunitaria (PAC)**

Dalla sua nascita a oggi la PAC si è evoluta notevolmente<sup>22</sup>. Nasce infatti nel 1962 come strumento per garantire la sicurezza degli approvvigionamenti e assicurare un tenore di vita equo agli agricoltori grazie al ricorso a misure di sostegno dei prezzi, basate sul modello del sostegno accoppiato (erogazioni proporzionali alle quantità prodotte), e a misure di regolazione del mercato, che garantivano agli agricoltori l'ottenimento di un prezzo minimo predefinito. A causa delle distorsioni causate da tale politica in termini di esborso finanziario ed eccedenze produttive, con la riforma Macsharry del 1992 il modello del sostegno accoppiato viene definitivamente abbandonato, in favore di una misura di sostegno diretto al reddito. Vengono inoltre introdotto nuovi obblighi per gli agricoltori in materia di protezione ambientale e qualità dei prodotti. Per rispondere alle criticità riscontrate nel settore, nel 1999 viene creato il secondo pilastro della PAC, che è dedicato allo sviluppo rurale. Si evidenzia così la volontà di adottare un approccio più olistico all'agricoltura e alle politiche per lo sviluppo delle aree rurali. Nascono in questo periodo i primi pagamenti condizionati al

---

<sup>22</sup> Ulteriori informazioni su: [www.consilium.europa.eu/it/policies/cap-introduction/timeline-history/](http://www.consilium.europa.eu/it/policies/cap-introduction/timeline-history/)

rispetto di specifici requisiti ambientali e gli incentivi alla multifunzionalità dell'azienda agricola. Riconoscendo l'importanza del suolo per il settore agricolo e per l'umanità nel complesso e il rischio di erosione causato dalle attività antropiche (vedi paragrafo 1.3.4), viene inoltre introdotto l'obbligo per gli Stati membri di produrre report annuali sul contenuto di sostanza organica e sull'erosione idrica dei suoli agricoli (CREA, 2022).

Nel 2003 la riforma Fischler introduce il pagamento unico aziendale, che dipende dalla superficie posseduta e coltivata o mantenuta in buone condizioni agronomiche e ambientali ed è condizionato al rispetto di alcuni requisiti obbligatori in termini di ambiente, sicurezza alimentare, salute degli animali e delle piante e benessere animale (CREA, 2022). La programmazione 2014-2020 prevede un sostegno aggiuntivo per le aziende agricole di piccole dimensioni e incentivi per i giovani che intendono intraprendere una carriera nel settore agricolo. Viene inoltre lasciato per la prima volta agli Stati membri un piccolo margine di flessibilità affinché possano adattare gli strumenti previsti alle caratteristiche della propria agricoltura e del proprio territorio. La programmazione 2023-2027 procede in questa direzione, consentendo agli Stati membri di elaborare in autonomia il proprio Piano Strategico Nazionale (PSN), purché sia in linea con gli obiettivi definiti a livello europeo. È in questo modo possibile adattare le misure adottate alle specificità locali senza compromettere la loro natura comunitaria. Il nuovo modello è inoltre maggiormente orientato ai risultati, che vengono valutati periodicamente sulla base di un set comune di indicatori. Vengono definiti tre obiettivi generali (OG), che si articolano a loro volta in nove obiettivi specifici (OS), a cui si aggiunge un obiettivo trasversale finalizzato all'ammodernamento del sistema agricolo (vedi figura 1.5). Particolare attenzione è dedicata ai requisiti ecologici e alla sostenibilità sociale. Tra i principali obiettivi della più recente programmazione della PAC c'è infatti quello di promuovere *«a sustainable and competitive agricultural sector that can support farmers' livelihoods while providing society with healthy and sustainable food and dynamic rural communities»* [Doukas, Maravegias e Chrysomallidis, 2022, p. 92], contribuendo così al raggiungimento degli obiettivi stabiliti dall'*European Green Deal* (Commissione Europea, 2022a). Il 25% delle risorse destinate ai pagamenti diretti (primo pilastro) sono infatti erogati a fronte del rispetto dei cosiddetti Eco-schemi, che sono criteri a cui gli agricoltori possono liberamente aderire e che sono volti a premiare coloro che introducono *«pratiche e metodi produttivi ambientalmente sostenibili, che vadano oltre gli obblighi già sanciti dalla normativa in vigore»* [CREA, 2021, p. 437].

**Figura 1.5 - Gli obiettivi della PAC 2023-2027**



FONTE: adattato da CREA [2022, p. 439]

Le Politiche per lo Sviluppo Rurale che rappresentano il secondo pilastro della PAC comprendono gli interventi per (CREA, 2021):

- impegni in materia di ambiente e clima, finalizzati al raggiungimento degli obiettivi della strategia *Farm to Fork*;
- aree con vincoli naturali o altri vincoli territoriali specifici;
- aree che presentano svantaggi territoriali specifici derivanti da determinati requisiti obbligatori;
- investimenti volti a sostenere l'ammodernamento e la diversificazione delle aziende agricole;
- insediamento dei giovani agricoltori e dei nuovi agricoltori, e l'avvio di imprese rurali. L'intervento mira a promuovere la vitalità e l'imprenditorialità nei territori rurali, visto il recente trend negativo a riguardo (vedi paragrafo 1.4.2);
- strumenti per la gestione del rischio, per favorire azioni di prevenzione e l'adesione a schemi assicurativi che fungono da copertura;
- cooperazione per l'innovazione, per l'aumento della qualità alimentare, per lo sviluppo intelligente e innovativo delle comunità locali e per favorire l'insediamento dei giovani agricoltori e il ricambio generazionale;
- scambio di conoscenze e diffusione dell'informazione, che è un elemento sempre più critico anche in virtù degli sviluppi tecnologici che stanno investendo il settore (vedi capitolo 3).

Affinché si raggiungano gli obiettivi posti dalla nuova PAC è indispensabile che gli Stati membri intraprendano parallelamente delle valide strategie di digitalizzazione, che consentano di utilizzare le nuove tecnologie come fattori abilitanti per il raggiungimento degli obiettivi di sostenibilità definiti dalla PAC. Tale sinergia è evidenziata anche all'interno della Relazione di previsione strategica 2022 (Comunità Europea, 2022b), che evidenzia l'importanza della cosiddetta *Twin Transition*, che consiste nello sfruttare le sinergie che si creano dall'accoppiamento di transizione verde e transizione digitale (vedi paragrafo 1.6). L'analisi della situazione attuale in merito non è propriamente incoraggiante: si riscontra ancora una considerazione troppo limitata delle nuove tecnologie come strumenti abilitanti per il raggiungimento degli altri obiettivi definiti dalla PAC, specialmente per quanto riguarda il rispetto dell'ambiente, il contrasto ai cambiamenti climatici e lo sviluppo delle aree rurali; di conseguenza vi è anche una scarsa focalizzazione sullo sviluppo delle competenze digitali che consentirebbero di sfruttare al meglio le opportunità offerte da questi strumenti e ridurre il divario (in termini di reddito, attrattività, ...) tra aree rurali e urbane (Brunori, 2022).

### **Piano Strategico della PAC (PSP) 2023-2027**

Le priorità di intervento individuate all'interno del PSP sono sintetizzate in una serie di obiettivi specifici (OS) così riassumibili (Mipaaf e Rete Rurale Nazionale, 2022):

- OS1: Sostenere il reddito agricolo e garantire la resilienza del settore al fine di rafforzare la sicurezza alimentare a lungo termine, la diversità agricola e la sostenibilità economica della produzione agricola.
- OS2: Migliorare l'orientamento al mercato e aumentare la competitività delle aziende agricole italiane nel breve e nel lungo periodo, anche attraverso una maggiore attenzione alla ricerca, alla tecnologia e alla digitalizzazione.
- OS3: Migliorare la posizione degli agricoltori nella catena di valore.
- OS4: Contribuire alla mitigazione dei cambiamenti climatici e all'adattamento a essi, attraverso attività quali la riduzione delle emissioni di gas serra, il miglioramento del sequestro del carbonio, e la produzione di energia da fonti rinnovabili.
- OS5: Favorire lo sviluppo sostenibile e la gestione efficiente di risorse naturali quali l'acqua, il suolo e l'aria.
- OS6: Fermare e invertire la perdita di biodiversità, migliorare i servizi ecosistemici e preservare gli habitat e i paesaggi.

- OS7: Attirare e sostenere i giovani agricoltori e i nuovi agricoltori e facilitare lo sviluppo imprenditoriale sostenibile nelle zone rurali.
- OS8: Promuovere l'occupazione, la crescita, la parità di genere, l'inclusione sociale e lo sviluppo locale nelle zone rurali.
- OS9: Migliorare la risposta dell'agricoltura dell'UE alle esigenze della società in materia di alimentazione e salute. È necessario a tal fine produrre alimenti di alta qualità, sani, nutrienti e sostenibili; ridurre gli sprechi alimentari; migliorare il benessere degli animali e contrastare le resistenze antimicrobiche.
- OS10: Modernizzare l'agricoltura e le zone rurali promuovendo e condividendo le conoscenze, l'innovazione e la digitalizzazione.

### **Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza (PNRR)**

Il PNRR si articola in sei missioni, delle quali due in particolare sono connesse all'agricoltura e riguardano *'Digitalizzazione, innovazione, competitività, cultura e turismo'* e *'Rivoluzione verde e transizione ecologica'* (CREA, 2021). Il perseguimento di questi due obiettivi e soprattutto la loro intersezione, rappresentata dalla doppia transizione ecologica e digitale (o *twin transition*), aprono a una serie di opportunità per il settore agricolo, connesse alla creazione di nuovi modelli di business innovativi e progettati attorno alla necessità di salvaguardare l'ambiente, la società e la funzionalità nel lungo periodo del sistema agricolo stesso. All'interno della missione *'Rivoluzione verde e transizione ecologica'* è prevista infatti una specifica linea d'azione relativa all'innovazione e alla meccanizzazione del sistema agricolo, nella quale si incentiva l'utilizzo delle più recenti innovazioni, comprese quelle digitali.

#### **1.6 Stato della letteratura su transizione ecologica e digitale in agricoltura**

La traiettoria tracciata dalle politiche europee e nazionali sull'utilizzo della tecnologia come strumento abilitante per il raggiungimento degli obiettivi di sostenibilità viene ulteriormente analizzata e sviluppata dalla letteratura incentrata sulla *twin transition*, che sottolinea l'importanza di sfruttare le sinergie che emergono quando la transizione ecologica e quella digitale vengono appaiate (Muench et al., 2022). Dalla rilevazione delle loro connessioni e interdipendenze nasce pertanto l'idea che esse non debbano solo procedere in parallelo, ma intraprendere un vero e proprio sentiero

comune di sviluppo: da un lato le tecnologie digitali consentono di ideare nuove soluzioni per affrontare e limitare i fenomeni connessi a cambiamenti climatici e degrado ambientale; dall'altro gli obiettivi di sostenibilità ambientale e sociale devono essere utilizzati per guidare l'innovazione, assicurando così un utilizzo responsabile delle tecnologie digitali. Particolare attenzione deve essere dedicata in tal senso alla regolamentazione della transizione digitale, poiché da ciò dipende il suo impatto complessivo sulla sostenibilità del sistema. Mentre la transizione ecologica per essere messa in atto richiede un supporto attivo da parte delle forze politiche e sociali, quella digitale, al contrario, è un processo guidato dal settore privato e dalle forze di mercato, che procede indipendentemente dal sostegno pubblico, ma che deve essere correttamente indirizzato affinché a beneficiarne siano l'umanità intera e il pianeta. In breve, «*in many areas the green and digital transitions can reinforce each other, but they do not necessarily always align*» [Muench et al., 2022, p. 9] e gli interventi in materia dovrebbero essere mirati ad ampliare il più possibile tale area di allineamento. È a tal fine necessario ridurre il più possibile le esternalità connesse alle attività agricole, internalizzando i costi ambientali e premiando le esternalità positive (elemento introdotto ad esempio dagli eco-schemi della PAC, vedi paragrafo 1.5), incentivando tutti gli attori del settore a pianificare attività e investimenti sulla base di una visione a lungo termine (Muench et al., 2022). Affinché tale obiettivo venga raggiunto è fondamentale che i contributi della letteratura non si limitino ad analizzare specifiche tecnologie o singoli elementi (nello specifico, spesso ci si concentra unicamente sull'aspetto economico o su quello ambientale), ma che vengano sviluppate analisi sistemiche e integrate, al fine di evitare che aziende e organi legislativi basino le proprie decisioni su una visione troppo semplicistica del fenomeno e dei suoi potenziali impatti (Rolandi et al., 2021; Checchinato et al., 2023).

Tra le principali tecnologie che possono fungere da fattori abilitanti per l'attuazione della *twin transition* Ortega-Gras et al. (2021) individuano: la robotica, i *big data*, l'intelligenza artificiale, l'*Internet of Things*, la manifattura additiva e la *blockchain*. Le caratteristiche essenziali, lo stadio di avanzamento e le potenzialità applicative di ciascuno di questi strumenti saranno trattati più nel dettaglio all'interno del capitolo 3. Il loro utilizzo può comportare una serie di vantaggi, tra cui (Brunori, 2022; Checchinato et al., 2023; Rolandi et al., 2021):

- la riduzione delle emissioni e dell'impatto ambientale connessi al settore agricolo, ottenuti grazie alla maggiore efficienza nell'impiego di input esterni quali fertilizzanti e pesticidi, ma anche acqua ed energia;
- una migliore capacità di gestione della complessità e del rischio, dovuta all'aumento in termini quantitativi e qualitativi dei dati disponibili (su condizioni agro-ecologiche del sistema, previsioni meteo, ...) e alla maggiore capacità di elaborarli e utilizzarli. Grazie a ciò è possibile inoltre aumentare il grado di diversificazione dei sistemi, con conseguenze positive sulla loro resilienza e sulla loro capacità di fornire servizi ecosistemici;
- un aumento nella qualità e nella sicurezza degli alimenti prodotti, grazie all'adozione di pratiche agricole in grado di arricchire il suolo e i suoi frutti e alla maggior precisione e frequenza dei controlli che è possibile effettuare;
- una maggiore redditività dell'attività agricola, ottenuta grazie all'aumento dell'efficienza produttiva conseguente alla diminuzione del numero di interventi che è necessario svolgere.

nella produzione ottenuta tramite un minor numero interventi mirati e svolti nel momento migliore, ma anche alla maggiore capacità di leggere i trend di mercato ed evidenziare il valore dei prodotti;

- l'eliminazione della necessità di svolgere lavori fisici pesanti e pericolosi, o quanto meno la diminuzione della loro entità o il supporto a tali attività, che conducono a un miglioramento generale delle condizioni di lavoro degli addetti coinvolti e migliorano la vivibilità delle aree rurali;
- la semplificazione degli adempimenti amministrativi, grazie all'automazione di una serie di attività di compilazione e trasmissione delle informazioni a basso valore aggiunto;
- il miglioramento della comunicazione interna ed esterna al settore, grazie a strumenti di condivisione della conoscenza che siano in grado di accelerare la diffusione delle innovazioni e aumentare la trasparenza delle trasmissioni. Affinché tale obiettivo venga raggiunto, è fondamentale inoltre affiancare all'adozione di specifiche tecnologie un maggior grado di collaborazione tra agricoltori, altri attori della filiera, ricercatori, legislatori, ONG, consumatori e intermediari, al fine di combinare i dati e le informazioni a disposizione di



ciascuno di essi e costruire un sistema unico in cui questi confluiscono (Doukas, Maravegias e Chrysomallidis, 2022).

In parallelo ai numerosi benefici che la *twin transition* può apportare al settore agricolo, vi sono alcuni problemi e criticità che devono essere affrontati e non è possibile ignorare, i principali dei quali riguardano (Brunori, 2022; Checchinato et al., 2023; Doukas, Maravegias e Chrysomallidis, 2022; Muench et al., 2022; Rolandi et al., 2021):

- l'eventualità – per nulla remota – che i benefici siano assorbiti da pochi attori di grandi dimensioni, il cui modello basato su monoculture e specializzazione è la principale causa dei problemi ecologici e sociali che il sistema si trova oggi ad affrontare. Tale rischio è accentuato dal fatto che è più semplice proporre soluzioni tecnologiche adatte a un modello molto specializzato (es. macchinari e algoritmi devono essere in grado di interagire con un numero limitato di varietà agricole) e che le aziende di grandi dimensioni sono anche quelle che dispongono dei capitali necessari per effettuare investimenti in tecnologie all'avanguardia;
- l'elevata entità dell'investimento che è necessario effettuare per prendere parte ai processi di digitalizzazione in termini di strumenti da acquistare e competenze da acquisire, ma anche di costi affondati associati all'abbandono di metodi e macchinari attualmente in uso. Tali costi rappresentano un'importante barriera all'ingresso soprattutto per quelle aziende di piccole dimensioni collocate in aree disagiate che più avrebbero bisogno di essere incluse nella transizione;
- le disparità di accesso alle tecnologie digitali, che possono essere causate ad esempio dalle carenze infrastrutturali presenti nelle aree rurali (es. assenza di strutture per la connessione ad alta velocità) o dalle difficoltà ad apprendere nuovi paradigmi che caratterizzano alcuni gruppi sociali (es. anziani, che rappresentano una percentuale rilevante degli agricoltori, hanno scarse competenze digitali);
- la dipendenza dalle soluzioni digitali che si verifica quando l'intero processo produttivo vi si affida per la sua corretta esecuzione. Un eventuale fallimento – anche temporaneo – del sistema tecnologico può infatti provocare ingenti danni all'azienda, specialmente quando i lavoratori non sono più in possesso delle conoscenze necessarie a svolgere il proprio lavoro senza il supporto della

- tecnologia. L'eccessivo affidamento alle soluzioni digitali proposte da realtà terze può inoltre aumentare la dipendenza degli agricoltori dai sottostanti algoritmi e standard tecnologici, limitando la loro libertà nella gestione aziendale, rendendoli ancora una volta più simili a lavoratori dipendenti che a imprenditori;
- l'impatto sui lavoratori del settore, dal momento che *«automatized agriculture significantly improves the lives of farmers and workers who can utilize digital technologies, creating new job opportunities, but also a radically bifurcated labor market increasing social asymmetries»* [Rolandi et al., 2021, pp. 4]. Il rischio è allora quello di creare un enorme divario tra i lavoratori altamente qualificati che sapranno utilizzare le nuove tecnologie per aumentare la propria efficienza e produttività e i lavoratori meno qualificati che operano principalmente in campi serre e magazzini e che vedranno le nuove tecnologie come mezzi di controllo e sorveglianza o come strumenti che toglieranno loro il lavoro;
  - le tecnologie impiegate, anche quando vengono utilizzate al fine di raggiungere obiettivi di sostenibilità, hanno una propria impronta ecologica che non è trascurabile ed è connessa alle fasi di produzione e smaltimento e all'energia consumata durante l'utilizzo. L'adozione di una nuova soluzione tecnologica deve pertanto essere preceduta da un'attenta analisi costi-benefici capace di evidenziare l'impatto complessivo associato al suo ciclo di vita e indirizzare la scelta verso la soluzione più sostenibile. Si stima ad esempio che *«the massive use of digital solutions could increase the world electricity demand up to 20% by 2030, and that without changes in the energy sector (increasing renewables and energy efficiencies) the ecological footprint of human activities will grow considerably.»* [Rolandi et al., 2021, pp. 4].

Le criticità analizzate sottolineano quindi la necessità di un'accorta attività di pianificazione della *twin transition*, al fine di assicurare l'effettivo allineamento tra la dimensione ambientale e quella digitale. È necessario a tal fine stabilire piani strategici di implementazione, policy e programmi di finanziamento in grado di indirizzare l'adozione delle innovazioni tecnologiche desiderabili; supportare le attività di ricerca e sviluppo che possono accelerare la loro applicazione al fine di creare sistemi circolari e sostenibili e sostenere le attività di formazione necessarie a fornire le conoscenze e competenze necessarie a utilizzare questi nuovi strumenti in modo consapevole e

responsabile (Ortega-Gras et al., 2021). Si deve inoltre prendere coscienza del fatto che fino ad oggi le attività di ricerca e le *policy* da esse derivanti si sono focalizzate soprattutto sulla dimensione ambientale della sostenibilità – anche a causa della relativa facilità nel trovare e quantificare degli appositi indicatori di performance –, che ha messo talvolta in ombra le questioni sociali (Checchinato et al., 2023). È invece fondamentale prestare attenzione alle disparità che possono verificarsi in seguito all'introduzione di nuove tecnologie e che rischiano di rendere negativo il bilancio complessivo della transizione digitale (Rose et al., 2021). Il potenziale impatto sulla dimensione sociale è talmente rilevante che autori come Caro-González et al. (2023) suggeriscono la necessità di perseguire una *triple transition*, in cui la sfera sociale diviene un vero e proprio terzo pilastro, con pari importanza e dignità rispetto a quelli ambientale e digitale.

## 2. Modelli agricoli per l'evoluzione del settore

### 2.1 Garantire la sostenibilità dei modelli agricoli

Il settore agricolo si trova in questo momento a dover affrontare i problemi ambientali e sociali descritti nel corso del Capitolo 1. Affinché tali problematiche vengano risolte è indispensabile che le pratiche utilizzate per la produzione alimentare si evolvano, passando da un modello di sovrasfruttamento e depauperazione delle risorse a uno capace di preservare «*the natural resource base, especially soil and water, by [...] offsetting the disturbances caused by cultivation and harvest, while being economically and socially viable*» [Gomiero, 2016, p. 26-27]. Si tratta di un obiettivo che può essere raggiunto in più modi, a seconda delle peculiarità e delle esigenze locali:

- l'agricoltura di precisione (vedi paragrafo 2.1) si focalizza ad esempio sull'utilizzo della tecnologia per migliorare l'efficienza delle attività svolte e il loro impatto ambientale;
- la coltivazione indoor e quella verticale (vedi paragrafo 2.2) sono utilizzate per minimizzare il consumo di suolo dell'attività agricola, aumentando la superficie che è possibile lasciare incolta e separando completamente la produzione di alimenti e di servizi ecosistemici;
- l'agricoltura biologica (vedi paragrafo 2.3) propone di eliminare il ricorso agli input di sintesi, al fine di ridurre i danni all'ambiente e alle comunità circostanti da essi provocati;
- l'agricoltura rigenerativa – biologica e non – (vedi paragrafo 2.4) si basa sulla volontà di non limitarsi a preservare le risorse naturali, ma di rigenerarle e valorizzarle, massimizzandone la prosperità;
- l'aridocoltura (vedi paragrafo 2.5) ricerca infine le migliori soluzioni per massimizzare le rese colturali nelle aree aride e semiaride, prestando particolare attenzione all'efficienza di utilizzo dell'acqua.

I diversi modelli proposti offrono soluzioni differenti al problema della produzione agricola sostenibile. A prescindere dal modo in cui queste si declinano, per

garantire la sostenibilità di un paradigma agricolo, è tuttavia necessario che esso affronti i problemi relativi a (Barilla Center for Food and Nutrition, 2011):

- controllo di malattie e agenti infestanti, al fine di garantire rese stabili e sicurezza alimentare;
- corretta gestione di acqua (scelta delle varietà più adeguate al clima, efficienza nell'irrigazione, ...) e suolo (rotazioni colturali, riduzione degli interventi meccanici, copertura continua, ...);
- elevata qualità organolettica e nutrizionale degli alimenti prodotti;
- resilienza del sistema, che deve essere garantita attraverso la tutela della biodiversità e dello stato di salute del suolo;
- minimizzazione di perdite e sprechi di cibo;
- sostenibilità economico-sociale dell'attività.

## 2.2 Agricoltura di precisione

### 2.2.1 Cos'è l'agricoltura di precisione, tecnologie utilizzate e benefici

Il primo riferimento all'agricoltura di precisione risale agli anni '80, quando si descrive per la prima volta una modalità di campionamento delle proprietà chimiche del suolo basata su griglia che poteva essere utilizzata per l'applicazione a tasso variabile dei fertilizzanti. La sua effettiva diffusione inizia tuttavia soltanto negli anni '90, quando la possibilità di accedere alla rete GPS (*Global Positioning System*) apre alla possibilità di mappare con estrema precisione la posizione dei macchinari e dei sensori in campo, consentendo il monitoraggio della variabilità interna alle aree coltivate (Zachariah, 2019). Il termine agricoltura di precisione indica oggi un approccio alla gestione dell'azienda agricola in cui i dati e le misurazioni ottenuti in campo sono utilizzati per guidare l'attività decisionale e migliorare la resa e la qualità delle colture. Ad esempio, invece di trattare l'intero campo con un erbicida in risposta a poche infestazioni localizzate, l'agricoltura di precisione prevede l'applicazione tempestiva del trattamento unicamente alle zone colpite.

È una modalità di gestione *site-specific*, poiché le attività svolte e la loro intensità vengono calibrate in relazione alle specifiche esigenze delle diverse porzioni di campo. L'estensione precisa delle singole unità gestionali dipende dalla dimensione delle zone

per cui è possibile – ed economicamente conveniente – ottenere misurazioni distinte (Zachariah, 2019). Si tratta pertanto di un sistema che integra informazione e produzione al fine di fornire soluzioni tecnologiche innovative in grado di aumentare l'efficienza e la redditività della produzione agricola e minimizzare gli impatti negativi sull'ambiente (Bucci et al., 2019; CREA, 2021). Il suo obiettivo primario è infatti quello di consentire una crescita agricola sostenibile per la sicurezza alimentare nonostante i cambiamenti climatici in corso (Vecchio et al., 2020).

Al netto della variabilità intrinseca al modello, che dipende dalle peculiarità del luogo di applicazione, l'agricoltura di precisione prevede il susseguirsi di una serie di fasi che compongono quello che il CREA (2021) definisce 'il ciclo dell'agricoltura di precisione' (vedi figura 2.1).

Il ciclo inizia con il rilievo dei confini parcellari, che definiscono il campo d'azione. Si procede quindi con la mappatura del terreno per identificare la variabilità interna in termini di pH, contenuto di sostanza organica, umidità, stato di salute del suolo, ... Tale attività è resa possibile dall'utilizzo di specifici sensori per l'acquisizione dei dati – che sfruttano tecnologie quali «l'induzione elettromagnetica, i raggi infrarossi, i sensori ottici, gli spettrofotometri a raggi gamma» [CREA, 2021, p. 274] – e consente di definire il perimetro delle zone da trattare in modo omogeneo.

---

**Figura 2.1 - Il ciclo dell'agricoltura di precisione**



FONTE: adattata da CREA [2021, p. 274]

---

Segue la programmazione dei sistemi di guida automatica, che si servono della tecnologia GPS per pianificare i passaggi dei vari mezzi meccanici in campo «*evitando sovrapposizioni di lavorazioni e risparmiando tempo e input produttivi*» [CREA, 2021, p. 274]. È previsto poi lo svolgimento di operazioni a tasso variabile (concimazione, semina, irrorazione di prodotti fitosanitari e irrigazione), in cui la quantità di input applicata dipende dalle specifiche esigenze dell'area.

Per pianificare le attività a tasso variabile è indispensabile quantificare gli stress biotici e abiotici a cui le piante sono sottoposte e individuare le relative soluzioni. I sensori che raccolgono i dati grezzi devono pertanto essere affiancati da adeguati Sistemi di Supporto alle Decisioni (o DSS, *Decision Support System*), ossia da specifici algoritmi utilizzati nella fase decisionale per incrementare la capacità del management di tener conto della variabilità spaziale e temporale nei sistemi di produzione agricola (O'Shaughnessy e Rush, 2014).

Si concludono infine le attività con un report finale sulle rese ottenute e sugli altri effetti (economici, ambientali, ...) derivanti dalle modifiche nella gestione. Tali informazioni fungeranno poi da base per l'impostazione del successivo ciclo produttivo.

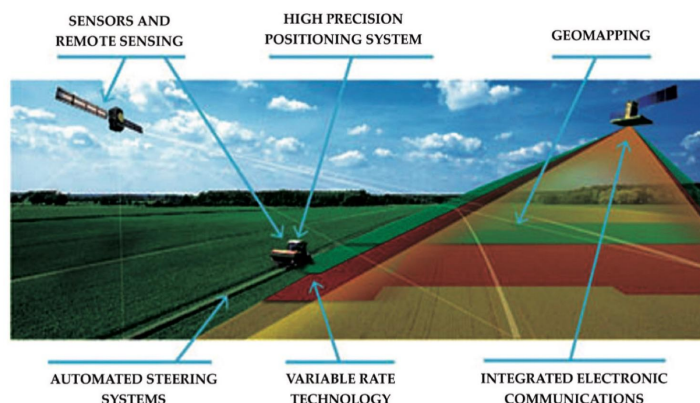
Ciascuna fase del ciclo richiede l'utilizzo di specifiche tecnologie a supporto delle attività da svolgere. L'agricoltura di precisione non consiste infatti in un'unica soluzione tecnologica omni-funzionale, ma comprende una serie di tecnologie che lavorano congiuntamente per fornire il supporto necessario all'agricoltore. Assumono a tal proposito particolare rilievo: la rete GPS (*Global Positioning System*), i sensori, i droni, le soluzioni robotiche, i GIS (*Geographical Information System*), i Sistemi di Supporto alle Decisioni e le tecnologie di applicazione a tasso variabile (vedi figura 2.2).

### **GPS o *Global Positioning System***

Il GPS è un sistema di posizionamento globale che utilizza una rete di satelliti per determinare la posizione precisa di un oggetto sulla Terra. Il suo utilizzo consente di mappare con estrema precisione la posizione di attrezzature, veicoli e aree di interesse, dando origine a sistemi di posizionamento ad alta precisione.

---

**Figura 2.2 - Tecnologie utilizzate nell'agricoltura di precisione**



FONTE: Zachariah [2019, p. 26]

---

Per quanto riguarda i veicoli agricoli, è possibile individuare tre livelli di automazione (Zachariah, 2019):

1. ausili alla navigazione (*navigation aids*), utilizzati dagli operatori per visualizzare la propria posizione rispetto ai precedenti passaggi in campo. Se ci si discosta dalla traccia notificano al guidatore la necessità di sterzare, al fine di evitare inefficienti sovrapposizioni delle lavorazioni. Rendono inoltre possibile le uscite in campo anche in condizioni di scarsa visibilità causate da fattori quali il buio o la nebbia;
2. guida autonoma (*auto guidance*), in cui l'operatore prende il controllo del mezzo solo durante le manovre, mentre attiva la modalità di guida automatica nei rettilinei. L'operatore può in questo modo dedicare parte del tempo alla supervisione delle azioni svolte dai macchinari;
3. robot da campo (*field robots*) che si occupano in autonomia dell'intera operazione. Scontano ad oggi numerosi problemi relativi alla gestione degli imprevisti e delle irregolarità del terreno, per cui la loro adozione è limitata.

## **Sensori**

Sensori di vario tipo vengono utilizzati nell'agricoltura di precisione per la raccolta di dati in campo. A seconda della variabile da analizzare, del budget e della scala di misurazione desiderata è possibile usare sensori a terra, aerei o satellitari. Le



misurazioni effettuate possono riguardare fattori come la temperatura dell'aria e del suolo, l'umidità, l'altezza delle piante, le condizioni del vento, il livello di nutrienti, l'intensità luminosa, l'intensità e la quantità delle precipitazioni, ... I dati così raccolti vengono poi localizzati grazie all'integrazione con la tecnologia GPS.

Il ricorso a sensori multispettrali consente inoltre di monitorare lo stato di salute delle colture in modo più preciso rispetto alla semplice osservazione a occhio nudo. È infatti stato a tal proposito rilevato che «*stressed plants reflect different wavelengths of light that are not quite the same as healthy plants*» [Zachariah, 2019, p. 36]. I sensori multispettrali sono in grado di identificare tali differenze nelle lunghezze d'onda luminose riflesse, fornendo agli agricoltori la possibilità di intervenire in modo tempestivo per risolvere il problema prima che peggiori.

## **Droni**

I droni (o UAV, *Unmanned Aerial Vehicles*) sono utilizzati per l'acquisizione di immagini aeree ad alta risoluzione. Le immagini così catturate permettono l'identificazione di variazioni nella copertura vegetale e di rilevare l'eventuale presenza di problemi nelle colture (malattie, infestazioni di parassiti, carenze nutrizionali, stress idrici, ...). Alcuni droni sono inoltre attrezzati in modo da poter applicare in modo mirato e preciso vari tipi di input agricoli (Zachariah, 2019). Si tratta di una tecnologia particolarmente utile nella gestione delle colture localizzate in aree difficili da raggiungere (es. terreni collinari o ripidi), poiché riduce la necessità di lavoro manuale e ne semplifica il monitoraggio.

## **Robotica**

Il ricorso a robot e macchine agricole autonome consente di automatizzare attività quali la semina, la raccolta e il monitoraggio delle colture, senza rinunciare alla precisione e all'efficienza. Si riduce in questo modo la necessità per gli agricoltori di svolgere lavori manuali pesanti e di entrare in contatto con sostanze potenzialmente dannose per la loro salute. La classificazione dei robot agricoli in funzione delle loro dimensioni identifica (CREA, 2021):

- robot di piccole dimensioni, utili per i lavori che richiedono precisione e delicatezza;

- robot di medie dimensioni, che possono eseguire lavori gravosi come il diserbo meccanico;
- robot di grandi dimensioni, adatti alle lavorazioni del suolo più pesanti.

### **GIS o *Geographical Information System***

I dati acquisiti dalle diverse fonti (satelliti, droni, sensori, questionari, ...) e localizzati dalla tecnologia GPS sono quindi trasmessi dai sistemi elettronici di comunicazione integrata ai *Geographical Information System*. I GIS sono quindi in grado di raccogliere, conservare, recuperare, analizzare e visualizzare in forma simile a una mappa informazioni geografiche con riferimenti spaziali specifici (Zachariah, 2019). Le mappe digitali risultanti possono anche includere strati di dati sovrapposti, per consentire la realizzazione di analisi più approfondite e integrate.

Si tratta di una fase essenziale per massimizzare l'utilità delle informazioni raccolte, poiché consente di impiegarle per migliorare la fase decisionale. È ad esempio possibile raccogliere e osservare i dati sulla distribuzione delle rese nelle diverse aree del campo, aumentando la comprensione delle loro caratteristiche e sfruttando tale conoscenza per la pianificazione delle stagioni successive. Le informazioni ottenute possono inoltre essere utilizzate per simulare le conseguenze delle diverse strategie adottabili. È infine possibile effettuare campionamenti del suolo collegando ogni campione raccolto alle coordinate corrispondenti, al fine di suddividere i campi in zone omogenee in base ai valori risultanti dalle analisi (Zachariah, 2019).

### **DSS o *Decision Support System***

I Sistemi di Supporto alle Decisioni (DSS) sono «*algoritmi di supporto agli imprenditori agricoli nelle scelte decisionali in merito alla difesa, alla concimazione, l'irrigazione, nonché nell'alimentazione animale e nella gestione dei dati dell'azienda stessa per monitorare le performance*» [CREA, 2021, p. 275]. Utilizzano i dati provenienti da diverse fonti (sensori, droni, GIS, serie storiche, ...) per fornire analisi, modelli previsionali e raccomandazioni a supporto di specifiche decisioni.

Per migliorare le capacità analitiche e predittive dei DSS, tali sistemi possono essere integrati con l'intelligenza artificiale. L'IA può infatti essere utilizzata per analizzare grandi quantità di dati con livelli di rapidità ed efficienza altrimenti irraggiungibili, al fine di identificare modelli, relazioni o anomalie che potrebbero

sfuggire all'occhio umano (vedi paragrafo 3.3). È inoltre possibile utilizzare tali algoritmi per sviluppare modelli predittivi basati sui dati storici e sulle relazioni identificate che consentano agli agricoltori di visualizzare diversi possibili scenari futuri. L'insieme delle informazioni ottenute può infine essere usata per sviluppare algoritmi di ottimizzazione che aiutino i DSS a identificare le migliori soluzioni per un determinato problema.

### **Tecnologie di applicazione a tasso variabile**

Le tecnologie di applicazione a tasso variabile (o VRT, *Variable Rate Technology*) sono utilizzate nell'agricoltura di precisione per applicare gli input in modo differenziato e personalizzato in base alle specifiche esigenze delle diverse aree del campo. Un tipico sistema di VRT «*include a computer controller, GPS receiver, and GIS map database*» [Zachariah, 2019, p. 38]. Il *controller* regola l'erogazione degli input sulla base delle indicazioni fornite dal GIS nella mappa di erogazione, mentre il ricevitore GPS comunica costantemente la posizione all'interno del campo, consentendo di rispettare quanto pianificato. Il piano di erogazione dipende dalle caratteristiche di ogni area e può essere realizzato con un approccio *map-based* o *sensor-based*. Nell'approccio *map-based* l'erogazione è preceduta da una fase di campionamento i cui risultati vengono utilizzati per programmare la quantità di input da applicare. Nell'approccio *sensor-based* l'erogazione si basa invece sui dati raccolti in campo in tempo reale (*'on the go'*).

L'utilizzo di tecnologie di applicazioni a tasso variabile consente di ottimizzare la quantità di input applicati alle colture, riducendo gli sprechi e migliorando l'efficienza delle operazioni agricole (Bucci et al., 2019).

Il ricorso a questa serie di tecnologie è fondamentale per il raggiungimento della sostenibilità del settore agricolo. È infatti impensabile pensare di risolvere i problemi relativi alla sicurezza alimentare e alla degradazione degli ecosistemi continuando a perpetuare il modello di agricoltura tradizionale che li ha causati. La diffusione dell'agricoltura di precisione fornisce una possibile soluzione alla questione, dal momento che consente di accrescere sia la produttività dell'attività agricola, sia lo stato di salute dell'ambiente in cui è applicata. Le maggiori rese risultanti dalla sua adozione provengono infatti dal miglioramento della qualità del suolo e della gestione agricola e non dal sovrasfruttamento delle risorse naturali presenti. Tali risultati sono infatti

ottenuti grazie all'integrazione di processi naturali benefici e moderne pratiche agricole (Zachariah, 2019). I principali benefici connessi all'utilizzo dell'agricoltura di precisione riguardano l'ottimizzazione della gestione, il minor impatto ambientale e il miglioramento della dimensione economica (Zachariah, 2019).

Per quanto riguarda la gestione dell'attività agricola i principali benefici coinvolgono:

- l'aumento delle rese colturali, che deriva dalla migliore gestione dello stato di salute e della fertilità del suolo. L'applicazione di input a tasso variabile e le lavorazioni calibrate in base alle reali esigenze dell'area possono infatti migliorare lo stato del suolo in termini di compattazione, erosione, capacità di trattenere l'acqua e di drenaggio dei liquidi in eccesso, aumentando la produttività del terreno;
- il miglioramento nelle decisioni relative alle attività di semina. La densità di semina e la scelta delle varietà da piantare possono trarre vantaggio dalle informazioni riguardanti le condizioni specifiche del sito. È possibile ad esempio favorire le varietà più resistenti agli stress idrici nei versanti esposti a sud. L'ottimizzazione della scelta può avvenire inoltre prendendo in considerazione anche gli effetti della decisione sull'ecosistema circostante, ad esempio utilizzando sementi che richiedono meno fertilizzanti nelle vicinanze dei bacini idrici per ridurre la dispersione di fosforo e azoto e i conseguenti danni ambientali;
- una migliore gestione dei parassiti, grazie all'individuazione tempestiva delle aree colpite e alla possibilità individuare la miglior risposta con estrema rapidità;
- la capacità di automatizzare alcune attività di gestione (es. programmazione degli interventi) grazie all'adozione di un Sistema di Supporto alle Decisioni. Ciò consente di aumentare l'efficienza delle attività e di migliorare il timing relativo alle attività «*time-sensitive and heavily influenced by the weather*» [Zachariah, 2019, p. 2] come la semina, la fertilizzazione e la raccolta. È possibile ad esempio evitare di distribuire fertilizzanti o pesticidi se nei giorni immediatamente successivi sono previste precipitazioni, evitando i fenomeni di lisciviazione e riducendo i costi correlati alla necessità di applicare nuovamente gli input.
- la maggior precisione nel monitoraggio dei parametri fisico-chimici del suolo e delle piante garantita dall'attività dei sensori che misurano elementi come la

conduttività elettrica, la temperatura, il tasso di evapotraspirazione e l'umidità di foglie e suolo;

- l'ottenimento dei dati rilevati in tempo reale, grazie all'attività di monitoraggio continuo svolta dai sensori;
- il risparmio di tempo e costi conseguente all'integrazione delle informazioni all'interno di un server centrale a cui è possibile accedere in ogni momento attraverso computer, tablet o smartphone;
- il miglioramento del posizionamento percepito e le ulteriori possibilità di valorizzazione dell'impresa. Comunicare in modo adeguato le soluzioni di precisione adottate consente infatti di veder riconosciuti gli sforzi effettuati per migliorare la produzione in termini di qualità, efficienza e attenzione all'ambiente. Il maggior numero di dati e informazioni a disposizione dell'azienda possono inoltre essere condivise con i consumatori per sviluppare le attività di gestione del rischio e tracciabilità alimentare (Bucci, Bentivoglio e Finco, 2018);
- la capacità di valutare l'adeguatezza dell'area in relazione allo svolgimento di specifici progetti. Mappare le caratteristiche e la produttività del suolo consente ad esempio di prendere una decisione in merito alle aree da lasciare incolte per rispettare gli eco-schemi della PAC che minimizzi allo stesso tempo la riduzione del reddito;
- la possibilità di applicare modalità di gestione distinte in terreni non omogenei;
- la diminuzione delle perdite in campo, grazie alla risposta tempestiva ai segnali di stress mandati dalle piante e all'adeguata programmazione degli interventi (irrigazione, raccolta, ...).

Dal punto di vista ambientale, l'agricoltura di precisione consente di:

- ridurre l'utilizzo di acqua grazie alla modulazione delle attività di irrigazione in base alle esigenze del terreno e alle informazioni disponibili sulle condizioni meteorologiche future;
- applicare i nutrienti in modo più preciso, rispettando le reali esigenze della pianta e riducendo la loro dispersione nell'ambiente. L'applicazione dei nutrienti deve a tal fine seguire il principio delle 4 R: la giusta sostanza (*right source*), nella quantità corretta (*right rate*), al momento (*right time*) e nel posto migliore (*right place*). Il corretto bilanciamento nella concentrazione dei principali nutrienti

(NPK) consente inoltre di aumentare la resistenza delle piante a malattie e attacchi dei patogeni (Zachariah, 2019);

- erogare i pesticidi solo nelle aree che ne hanno bisogno, migliorando le prestazioni ambientali e riducendo i tempi di contatto degli agricoltori con sostanze potenzialmente dannose per la loro salute;
- pianificare le attività di lavorazione del suolo sulla base dei dati estratti dai sensori posizionati in campo, al fine di verificare che si trovi nelle condizioni ideali di umidità per non subire danni e facilitare le lavorazioni, ossia che il terreno sia 'in tempera'.

I benefici economici comprendono infine:

- la riduzione dei costi necessari all'acquisto di erbicidi, pesticidi e fertilizzanti;
- la riduzione dei costi di applicazione degli input;
- l'aumento del margine di profitto garantito anche dall'aumento delle rese;
- una maggior stabilizzazione della redditività, ottenuta grazie all'incremento nella capacità di gestire la variabilità [CREA, 2021, p. 273]

Ci si attende inoltre che le innovazioni tecnologiche emergenti in termini di complessità degli algoritmi di ottimizzazione, gestione dei *big data* e incremento della potenza di calcolo siano in grado di migliorare ulteriormente l'efficacia e l'efficienza dei sistemi agricoli di precisione (Huang e Brown, 2019). I continui sviluppi in materia di intelligenza artificiale e *deep learning* – che consentono di ottenere algoritmi decisionali sempre più complessi e precisi – potranno ad esempio essere sfruttati per migliorare i sistemi di guida autonoma, il riconoscimento precoce dei segnali di stress e l'automazione delle operazioni in campo, mentre la crescente capacità di raccolta, elaborazione e analisi dei dati in tempo reale potrà aumentare l'utilità dei sistemi di supporto alle decisioni.

## 2.2.2 Stato dell'arte in Italia

In Italia la percentuale di superficie agricola gestita attraverso tecniche agricole di precisione è compresa tra l'1 e il 4% (Bucci et al., 2020; CREA, 2021). Gli investimenti effettuati dagli agricoltori «*riguardano principalmente i mezzi tecnici e le attrezzature*

(36%) e i macchinari connessi (30%), seguiti dai software gestionali (13%), i sistemi di monitoraggio in campo da remoto (8%), i DSS (5%), i sistemi per la mappatura (4%) e la robotica (2%)» [CREA, 2021, p. 276]. Il tasso di adozione è più elevato nelle aziende agricole di maggiori dimensioni e in quelle gestite da «*young, well-educated and full-time farmers*» [Vecchio et al., 2020, p. 2].

Soprattutto in passato, la diffusione dell'agricoltura di precisione era limitata dal fatto che le tecnologie proposte si adattassero meglio alle aziende di elevate dimensioni, capaci di sostenere elevati investimenti iniziali, maggiori costi fissi e lunghi *payback period* (Zachariah, 2019; Vecchio et al., 2020). Si tratta tuttavia di un mercato che negli ultimi anni sta crescendo anche in Italia, grazie alla diffusione di soluzioni tecnologiche più adeguate alle piccole realtà che caratterizzano il tessuto agricolo del Paese (Bucci et al., 2020; Zachariah, 2019). Si stanno infatti diffondendo soluzioni che prevedono l'utilizzo di app per lo smartphone, droni e cloud computing o soluzioni del tipo *technology as a service*, in cui le tecnologie per la mappatura del campo o i DSS sono messi a disposizione degli agricoltori dietro pagamento di quote annuali definite in funzione dei servizi richiesti. Si riducono in questo modo le barriere all'ingresso a tali tecnologie – in termini sia economici che di competenze –, consentendo la loro diffusione anche tra quegli agricoltori che non possiedono le risorse necessarie a svolgere il lavoro in autonomia (Bucci et al., 2020). Le soluzioni del tipo *technology as a service* possono incentivare l'adozione dell'agricoltura di precisione, ma portano con sé potenziali problemi in termini di proprietà dei dati e volontà di condivisione degli stessi (Muench et al., 2022).

Pur essendo ancora presente una scala produttiva minima per l'adozione dell'agricoltura di precisione, tale dimensione non è fissa, ma dipende dalla produttività del sistema e dunque dalla coltura presa in considerazione, dalle caratteristiche dell'area (es. piana vs collinare) e dalle modalità di lavorazione del terreno (*minimum* o *no tillage* vs lavorazioni profonde). Diversi studi (Bucci et al., 2019; Bucci et al., 2020) hanno dimostrato la possibilità anche per le piccole aziende agricole italiane di adottare soluzioni di precisione con successo e profittabilità. Affinché ciò accada è tuttavia necessario che l'adozione delle soluzioni di precisione sia preceduta da un'attenta valutazione di costi e benefici, che variano in relazione a «*the farm size, the type of crop, the technology adopted, the degree of spatial variability of soil attributes (e.g. soil types, fertility and organic matter) and yield response*» [Bucci et al., 2019, p. 239]. È pertanto

indispensabile innanzitutto identificare il percorso di sviluppo più adatto alla propria situazione e integrare solo le soluzioni tecnologiche più confacenti alle proprie esigenze. In questa fase è importante non lasciarsi trascinare dall'entusiasmo per l'ultima moda del momento, anche in virtù dell'irreversibilità di molti costi correlati a tali attività.

Ulteriori elementi che rallentano la diffusione dell'agricoltura di precisione in Italia sono connessi a:

- incertezza degli agricoltori in merito ai guadagni economici e ai miglioramenti ambientali ottenibili dall'adozione di queste tecnologie, che accresce la loro diffidenza nei confronti delle nuove tecnologie (Bucci et al., 2019; Bucci et al., 2020; CREA, 2021). Tale incertezza è inoltre amplificata dalla necessità di raccogliere un'elevata mole di dati prima di poter osservare le effettive potenzialità del sistema, dal momento che la formazione di un database utilizzabile ai fini previsionali può richiedere alcuni anni;
- assenza di un'adeguata infrastruttura per la connettività nelle aree rurali, che rende inutilizzabili quelle soluzioni che richiedono elevate velocità di comunicazione (Muench et al., 2022). Risolvere questo problema è fondamentale al fine di rallentare il trend di abbandono delle aree rurali e per consentire loro di attrarre quei lavoratori altamente qualificati che potrebbero migliorare la redditività, la produttività, la sostenibilità del settore e lo sviluppo economico complessivo della zona (Bucci, Bentivoglio e Finco, 2018);
- *«incompatibilità tra tecnologie disponibili e specificità territoriali»* [CREA, 2021, p.497]. Le soluzioni proposte finora sono spesso sviluppate *«for standardised processes in highly mechanised large-scale farms»* [Muench et al., 2022, p. 29], mentre le caratteristiche del settore agricolo in Italia richiedono un altro tipo di approccio. La variabilità e l'imprevedibilità presenti rendono infatti impossibile la creazione di un sistema di supporto alle decisioni che comprenda tutti gli aspetti gestionali e si adatti a qualsiasi azienda agricola. È invece possibile sviluppare sistemi per la definizione di strategie focalizzate su aspetti specifici, che vengano poi inseriti in un piano di gestione generale a carattere altamente tacito. Per migliorare la sostenibilità ambientale del settore, inoltre, le soluzioni digitali devono supportare l'adozione di modelli agricoli diversificati e rispettosi delle risorse naturali e delle peculiarità territoriali (Bucci, Bentivoglio e Finco, 2018); limitarsi a incrementare l'efficienza dei modelli gestionali già consolidati



non è più sufficiente se l'obiettivo è quello di invertire il trend di degradazione ambientale che caratterizza i terreni agricoli italiani.

Nonostante i limiti appena elencati, la digitalizzazione del settore agricolo ha elevate potenzialità in termini di aumento della produttività e diminuzione dell'impatto ambientale del settore. Per questo motivo l'agricoltura di precisione è «*considerata uno degli strumenti principi per conseguire gli obiettivi di una Europa più verde e digitale*» [CREA, 2021, p. 496] e sono state introdotte policy a supporto del suo sviluppo. Vecchio et al. (2020) sottolineano a tal proposito come «*policies over the years have pushed for adoption of innovation with economic incentives*» [Vecchio et al., 2020, p. 11], mentre è oggi necessario prendere in considerazione ulteriori fattori, tra i quali spiccano la disponibilità delle informazioni e la consapevolezza sui benefici ottenibili. È pertanto sempre più importante che gli interventi politici si focalizzino anche sulla diffusione della conoscenza in materia, prevedendo la realizzazione di apposite attività divulgative e formative.

## 2.3 Coltivazione indoor e verticale

### 2.3.1 Coltivazione indoor

Il termine 'coltivazione indoor' è utilizzato per indicare tutte quelle tecniche che consentono di far crescere prodotti agricoli in ambienti chiusi. La coltivazione può svilupparsi in verticale o in orizzontale, su suolo o in modalità *soilless*, e può essere localizzata all'interno di serre, fabbricati industriali, container, ristoranti o supermercati (si parla in questo caso di *in-store farming*) (Butturini e Marcelis, 2020).

L'agricoltura indoor nasce quando si iniziano a realizzare delle serre per proteggere le colture dagli eventi atmosferici estremi, per allungare la stagione di coltivazione e per ampliare il ventaglio di prodotti che è possibile ottenere in un determinato territorio (Avgoustaki e Xydis, 2020). Tali strutture vengono costruite con materiali trasparenti come il vetro o il polietilene, che consentono di trattenere l'umidità e il calore pur continuando a sfruttare la luce prodotta dal sole e possiedono di solito un impianto di illuminazione artificiale utilizzato al fine di velocizzare la crescita delle colture (Beacham, Vickers e Monaghan, 2019).

In relazione al livello di isolamento dall'ambiente esterno si possono distinguere: serre a circuito aperto, semichiuso e chiuso (Avgoustaki e Xydis, 2020). Le serre a circuito aperto utilizzano in genere modalità di coltivazione *soil-based* e non raccolgono l'acqua drenata dal terreno al fine di riutilizzarla. Hanno un basso livello di efficienza nell'utilizzo delle risorse, poiché il drenaggio costante ad opera del terreno comporta la perdita di acqua e la dispersione nell'ambiente circostante dei fertilizzanti presenti al suo interno. Queste serre utilizzano inoltre l'apertura delle finestre come unico metodo di deumidificazione e raffrescamento, consentendo all'umidità di fuoriuscire e aumentando ulteriormente la perdita di acqua.

Le serre a circuito semichiuso si caratterizzano invece per la combinazione di apertura delle finestre e sistemi di ventilazione e raffrescamento meccanizzati. Il sistema di irrigazione riutilizza *«the drained nutrient solution by collecting it to a tank that is constantly topped-up with fresh water»* [Avgoustaki e Xydis, 2020, p. 10-11]. In alcuni casi tale soluzione nutritiva può essere filtrata e purificata prima di essere reimpressa in circolo, al fine di evitare la diffusione di malattie nelle colture.

Le serre a circuito chiuso infine rinfrescano, deumidificano e trattano l'aria sfruttando unicamente soluzioni meccanizzate e l'impianto di irrigazione è progettato come *«a close loop that allows the collection, recycle and re-distribution of the irrigation water both for irrigation purposes but also for cooling and heating purposes»* [Avgoustaki e Xydis, 2020, p. 11]. L'assenza di finestre aperte consente di mantenere elevati livelli di umidità, così da diminuire l'evotraspirazione delle foglie e aumentare l'efficienza di utilizzo delle risorse idriche, che può superare quella di una serra a circuito aperto del 10-50% (Avgoustaki e Xydis, 2020).

Nonostante i vantaggi in termini di efficienza e possibilità produttive, l'utilizzo di serre come strutture agricole comporta una serie di limiti connessi a (Stein, 2021):

- elevati investimenti necessari per acquistare apparecchiature di riscaldamento e raffreddamento che siano in grado di mantenere stabili i valori di temperatura e umidità. Il basso valore  $R^{23}$  dei materiali utilizzati per la loro costruzione rende infatti l'isolamento termico molto poco efficiente;

---

<sup>23</sup> Il valore R indica la resistenza termica di un materiale, che è influenzata dallo spessore dello strato utilizzato (S) e dalla trasmittanza termica propria del materiale ( $\lambda$ ). Può essere espressa come  $R = S/\lambda$

- limitata possibilità di sviluppare la coltivazione in verticale, dal momento che la maggior parte della luce utilizzata proviene dall'alto e non sarebbe distribuita omogeneamente tra i diversi piani di coltivazione;
- assenza di un isolamento completo dall'ambiente esterno, che lascia spazio alla possibilità per i patogeni provenienti dall'esterno di intaccare le colture.

L'adozione di approcci innovativi alla gestione dell'attività agricola e la sua integrazione con gli strumenti tecnologici oggi a disposizione consentono di superare, almeno parzialmente, i limiti appena elencati. Ciò è reso possibile dall'utilizzo di strutture ad ambiente controllato (o CEF, *Controlled Environment Facility*), edifici «*thermally well-insulated and nearly airtight [...] that are covered with opaque walls*» [Avgoustaki e Xydis, 2020, p. 21] capaci di isolare quasi completamente le colture dalle condizioni esterne. La coltivazione in ambiente controllato consente un controllo totale sulle variabili ambientali che influenzano la crescita delle piante, tra cui l'intensità luminosa, il fotoperiodo, la temperatura, l'umidità, l'irrigazione, la quantità di nutrienti disponibile e la concentrazione di CO<sub>2</sub> (Ampim, Obeng e Olvera-Gonzalez, 2022). Oltre a ciò, l'isolamento dall'ambiente circostante consente di abbattere il rischio di contaminazioni e di eliminare pertanto l'utilizzo di pesticidi ed erbicidi, risparmiando sui costi di produzione e aumentando la *food safety*. L'illuminazione è completamente artificiale e può pertanto essere progettata in modo da consentire la coltivazione su più livelli (Stein, 2021) e da fornire alle colture il tipo di luce ottimale, che è quella con lunghezza d'onda compresa tra i 400 e gli 800 nm. La capacità della pianta di svolgere le proprie funzioni dipende infatti dalla tipologia di radiazioni luminose che riceve (Dou e Niu, 2020): la luce rossa (600–699 nm) favorisce la fotosintesi, la crescita della pianta e l'accumulo di biomassa nei suoi tessuti; la luce blu (400–499 nm) riduce la lunghezza degli internodi – dando vita a piante più compatte –, regola l'apertura e chiusura degli stomi – influenzando l'assorbimento dell'anidride carbonica –, e aumenta la produzione di polifenoli in specie come prezzemolo, basilico, pomodoro e lattuga; la luce verde (500–599 nm) e quella rosso lontano (700–799 nm), pur essendo considerate ininfluenti fino qualche anno fa, sono oggi ritenute capaci di penetrare in profondità nei tessuti vegetali e stimolare la fotosintesi e la crescita vegetativa. La necessità di sopperire all'assenza di luce solare mediante un impianto di illuminazione artificiale aumenta i costi relativi all'energia, ma: 1) è possibile utilizzare fonti luminose LED, che

hanno durata elevata, consumo energetico ridotto e producono una luce stabile e la cui intensità e lunghezza d'onda sono regolabili in relazione alle esigenze (Mitchell e Sheibani, 2020); 2) i maggiori costi connessi all'illuminazione sono compensati dal risparmio sul riscaldamento e il raffrescamento ottenuto grazie all'elevato isolamento termico delle strutture (Beacham, Vickers e Monaghan, 2019). Il ricorso a sensori, IoT, robotica e sistemi di controllo basati sulla *machine vision* consente inoltre di automatizzare molte delle operazioni che sono necessarie alla crescita delle piante, massimizzandone l'efficienza (Stein, 2021).

A prescindere dalla specifica soluzione adottata (serra o CEF, sviluppo verticale o orizzontale, ...), l'agricoltura indoor nasce come risposta alla necessità di incrementare la produzione agricola per garantire la sicurezza alimentare senza intensificare ulteriormente l'utilizzo delle risorse naturali. Le coltivazioni indoor possono infatti aiutare a ridurre l'impatto ambientale del settore agricolo, grazie alla maggior efficienza di utilizzo di acqua e suolo, alla riduzione o all'eliminazione dei pesticidi e all'eliminazione della dispersione di fertilizzanti nell'ambiente circostante. La possibilità di controllare l'ambiente di crescita delle colture garantisce inoltre la continuità della produzione, con effetti positivi in termini di stabilità della catena di fornitura e dei prezzi (Stein, 2021). In più, la possibilità di standardizzare il processo produttivo permette di ottenere prodotti con qualità organolettiche e caratteristiche sempre omogenee (Stein, 2021). Si tratta di un elemento in contrasto con le politiche di valorizzazione del territorio e di rispetto della stagionalità che alcuni organismi (es. Slow Food) perseguono, ma che è molto apprezzato da altri attori del comparto agroalimentare quali la GDO e le imprese trasformatrici, per cui l'omogeneità dei lotti nel corso del tempo contribuisce ad aumentare la qualità percepita.

Le tecniche di coltivazione indoor presentano tuttavia anche una serie di limiti e problemi che devono ancora essere completamente risolti. Tra questi, gli elevati investimenti iniziali necessari a finanziare la costruzione della struttura che ospiterà le colture e l'ingente consumo di energia elettrica. A tal proposito, in uno studio che compara le risorse impiegate per la coltivazione di lattuga con metodo tradizionale e idroponico, Lages Barbosa et al. (2015) hanno evidenziato come, nonostante la resa

(kg/m<sup>2</sup>) del sistema idroponico fosse solo 11 volte superiore a quella dell'agricoltura convenzionale, la sua produzione richiedeva 82 volte più energia.

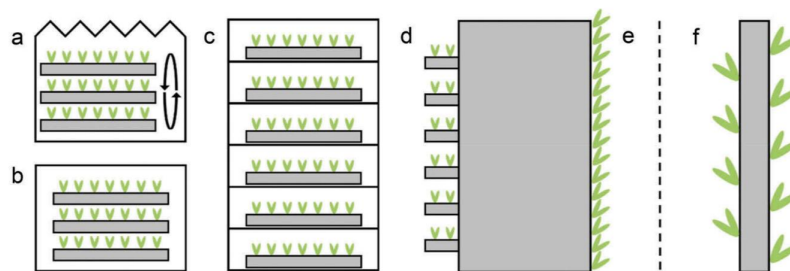
Un ulteriore punto critico riguarda l'isolamento dagli agenti esterni che, se da un lato protegge le piante da patogeni ed eventi climatici estremi, dall'altro aumenta le probabilità di ottenere prodotti dallo scarso valore nutrizionale. Molte delle sostanze che presentano effetti benefici per i consumatori (es. antociani, flavonoidi, carotenoidi e glutazione) sono infatti prodotte come strategie di difesa dalla pianta quando questa è sottoposta a lievi stress. Se questi fattori di stress vengono a mancare, la pianta non avrà più bisogno di tali sostanze e ne sospenderà la produzione. Al fine di mantenere elevato il contenuto di nutrienti, le coltivazioni devono pertanto essere sottoposte a leggeri stress artificiali come l'aumento delle radiazioni UV per un determinato periodo di tempo prima della raccolta (Dou e Niu, 2020).

### 2.3.2 Coltivazione verticale

La coltivazione verticale nasce con l'obiettivo di massimizzare la resa per unità di terreno occupato, al fine di ridurre la pressione sull'ambiente causata dall'eccessiva percentuale di suolo utilizzata per l'agricoltura. Può avvenire sia in ambiente che – più spesso – interno e comprende due principali categorie di soluzioni: «*those comprising multiple levels of traditional horizontal growing platforms, and those where the crop is grown on a vertical surface*» [Beacham, Vickers e Monaghan, 2019, p. 277]. I principali sistemi di coltivazione verticale sono illustrati più in dettaglio dalla figura 2.3. Si tratta di una modalità di coltivazione particolarmente adatta alle piccole verdure a foglia, che consentono di massimizzare la redditività dell'attività agricola grazie al minor spazio occupato e ai cicli produttivi più brevi. Il rapido turnover delle colture aumenta inoltre la flessibilità del sistema produttivo, consentendo un più rapido adattamento alle esigenze della domanda o alle contrazioni dell'offerta che possono verificarsi in seguito a malattie o fenomeni atmosferici che provocano la perdita di un raccolto (Beacham, Vickers e Monaghan, 2019).

---

**Figura 2.3 - Principali sistemi di coltivazione verticale**



*Stacked horizontal systems*: più piani orizzontali di coltivazione vengono impilati l'uno sull'altro all'interno di serre (a) o di strutture ad ambiente controllato (b). Talvolta anche i balconi degli edifici possono essere utilizzati per tale scopo (d).

Nelle *multi-floor towers* i piani orizzontali sono invece completamente isolati gli uni dagli altri (c).

*Vertical growing surface*: le colture vengono fatte crescere in superfici verticali posizionate sulle pareti degli edifici (*green wall*, e), o su apposite unità di crescita cilindriche (f).

FONTE: Beacham, Vickers e Monaghan [2019, p. 278]

---

Le piante possono essere coltivate in vasi contenenti del normale terriccio oppure, come accade più di frequente, fuori dal suolo (*soiless*). Le principali tecniche che è possibile adottare per la coltivazione senza suolo sono (Beacham, Vickers e Monaghan, 2019; Avgoustaki e Xydis, 2020; Stein, 2021):

- idroponica, in cui le piante sono inserite direttamente nella soluzione nutritiva. La semina avviene in un materiale inerte come lana di roccia o torba, che viene irrigato con acqua ricca di sostanze nutritive. Le piante possono immergere le radici direttamente nella soluzione nutritiva e di conseguenza assorbire i nutrienti più velocemente e più facilmente rispetto all'agricoltura basata su suolo. Si deve prestare particolare cura nel definire le caratteristiche della soluzione nutritiva per evitare che gli alimenti così prodotti abbiano un contenuto di zuccheri inferiore rispetto ai corrispettivi cresciuti nel suolo e siano per questo meno nutrienti e percepiti come meno saporiti dai consumatori (Gomiero, 2018);
- acquaponica, in cui la coltivazione di piante in idroponica è affiancata all'allevamento di pesci che avviene all'interno della vasca che funge da serbatoio/drenaggio della soluzione nutritiva. Le sostanze di scarto prodotte dai

pesci vengono trasformate da specifici batteri al fine di renderle assorbibili dalle colture. L'acqua filtrata e arricchita di tali sostanze viene quindi utilizzata come soluzione nutritiva per le piante prima di tornare nuovamente nella vasca di drenaggio e ripetere il ciclo;

- aeroponica, in cui la soluzione nutritiva non è direttamente a contatto con le radici, ma viene irrorata sulle stesse con ugelli ad alta pressione.

L'elevata efficienza in termini di utilizzo del suolo e delle risorse idriche rende la coltivazione verticale una modalità produttiva particolarmente adeguata alle regioni con scarsità di acqua e suolo o per implementare progetti di agricoltura urbana. La localizzazione degli impianti nei pressi dei centri urbani consente infatti di ridurre le emissioni connesse al trasporto degli alimenti, anche se l'impatto di tale azione potrebbe rivelarsi limitato, dal momento che *«it has been calculated that of the total greenhouse gas (GHG) emission of food systems, production accounts for 83%, while transport only accounts for 11%»* [Beacham, Vickers e Monaghan, 2019, p. 281].

La diffusione su larga scala della coltivazione verticale in quelle aree che potrebbero beneficiarne è subordinata alla risoluzione di una serie di problemi, tra cui:

- la difficoltà di ottenere condizioni omogenee in termini di luce, temperatura, umidità, etc. tra i diversi livelli, che ha come conseguenza un'eccessiva variabilità dell'output prodotto. Uno studio condotto sulla coltivazione di fragole fuori suolo ha ad esempio riscontrato *«significant differences in a number of growth parameters between levels, with plants on the top tier showing higher yield and quality than those on lower levels»* [Beacham, Vickers e Monaghan, 2019, p. 278]. Affinché ciò non accada, le strutture in cui avviene la coltivazione devono essere attentamente progettate e gestite da personale appositamente formato;
- il limitato numero di coltivazioni che possono essere inserite in un sistema verticale. Le strutture ad oggi operative sono infatti adatte per gli ortaggi a foglia e i micro-ortaggi, ma non sono in grado di gestire piante dal fusto robusto o con radici profonde. A causa di ciò, tali tecniche si pongono oggi più come soluzioni complementari all'agricoltura convenzionale che come suoi possibili sostituti;
- gli elevati investimenti iniziali necessari alla costruzione dell'impianto, che fungono da barriera all'ingresso. La volontà di localizzare le strutture in aree urbane aumenta ulteriormente il problema, dato che i terreni vicini alle città

hanno un costo più elevato. Al fine di ridurre i costi iniziali è possibile tuttavia utilizzare luoghi che altrimenti non sarebbero adatti alla produzione alimentare, come «*depleted or heavy metal-contaminated ground containing poor or unsuitable soil, or ex-industrial sites where the ground surface has been replaced with concrete or brick*» [Beacham, Vickers e Monaghan, 2019, p. 280].

### 2.3.3 *Plant Factory with Artificial Lighting*

Il termine *Plant Factory with Artificial Lighting* (PFAL) è utilizzato soprattutto in Asia per indicare le strutture che ospitano molteplici piani di coltivazione impilati verticalmente all'interno di un ambiente termicamente isolato e quasi ermetico (Kozai, Niu e Takagaki, 2020). In Europa il termine è poco diffuso e si tende a definire questi impianti semplicemente come *vertical farm* o *indoor farm*, anche quando presentano in realtà caratteristiche congiunte di entrambi i modelli. Tale tendenza «*might be correlated with the fact that the European consumers favor the term "farm" rather than "factory" for association with fresh products*» [Butturini e Marcelis, 2020, p. 77].

Queste strutture sono fornite di condizionatori e ventilatori per il raffrescamento e la circolazione dell'aria, di unità di erogazione per la CO<sub>2</sub> e per le soluzioni nutritive e di unità di controllo ambientale. Sono inoltre progettate in modo da minimizzare il consumo di acqua ed energia – per quanto ciò sia possibile all'interno di un sistema completamente artificiale – attraverso il ricorso a impianti a circuito chiuso (es. per il ricircolo dell'acqua) e a tecnologie a basso consumo (es. LED regolabili per l'illuminazione) (Stein, 2021). Nonostante ciò, ad oggi circa l'80% dell'energia impiegata dalle PFAL è utilizzata per mantenere in funzione l'impianto di illuminazione, con un notevole impatto sui costi (Kozai, Niu e Takagaki, 2020). Avgoustaki e Xydis (2020) evidenziano a tal proposito la possibilità di impostare i fotoperiodi in modo che i picchi di consumo siano concentrati in quelle fasce orarie in cui il costo per unità di energia è inferiore (ad esempio di notte), al fine di aumentare la redditività dell'azienda senza intaccare in alcun modo la qualità degli alimenti prodotti.

Rispetto alla coltivazione convenzionale o in serre, le PFAL richiedono la capacità di controllare uno spazio tridimensionale e che varia nel tempo, con l'obiettivo di mantenerlo quanto più possibile stabile e omogeneo in termini di luminosità, temperatura, umidità, ... Per riuscire a governare la complessità che caratterizza il



sistema e garantire livelli adeguati di produttività e sostenibilità, è pertanto necessario integrare all'interno degli impianti di coltivazione delle soluzioni tecnologiche in grado di supportare le decisioni e automatizzare una parte delle attività di regolazione. Le principali tecnologie impiegate a tal fine sono l'IoT, l'intelligenza artificiale e le repliche digitali della struttura, note come *digital twin*, che consentono di realizzare modelli e simulazioni utili a migliorare la gestione (Monteiro et al., 2022). Si tratta per lo più di soluzioni che si trovano ancora nelle prime fasi di sviluppo, ma che, se adeguatamente sviluppate, offrono immense potenzialità per il miglioramento dei sistemi di coltivazione verticale indoor.

I principali benefici connessi all'utilizzo delle PFAL riguardano:

- la minimizzazione delle risorse naturali utilizzate e dell'impatto sull'ambiente grazie all'efficienza degli impianti e all'assenza di materiale disperso nei territori e bacini idrici circostanti (Kozai, Niu e Takagaki, 2020);
- i livelli costanti di produzione – poiché indipendente dalle stagioni e dagli eventi atmosferici – e la vicinanza ai centri urbani, che contribuiscono a garantire la *food security*;
- l'assenza di patogeni e contaminanti, che è garantita dall'isolamento dall'ambiente esterno ed elimina l'esigenza di utilizzare pesticidi o ricorrere a tripli lavaggi dei prodotti post-raccolta. Ne consegue una maggior efficienza di impiego delle risorse (l'acqua che sarebbe necessaria per la pulizia viene risparmiata) e un livello più elevato di *food safety* (Kozai, Niu e Takagaki, 2020)
- il calo della carica batterica riscontrabile nei prodotti e – se l'impianto produttivo è localizzato nei pressi di un centro urbano – del *time to market*, che aumentano la *shelf life* e riducono lo spreco alimentare (Avgoustaki e Xydis, 2020).

Quando si valuta l'impatto dei sistemi di coltivazione verticale indoor devono tuttavia essere considerati anche i limiti relativi a:

- l'incertezza in merito a «*the cause-effect relationship between the environment and taste/nutrition [...] for a particular vegetable*» [Kozai e Niu, 2020, p. 26]. Il processo di controllo delle condizioni ambientali per garantire una produzione sana e di qualità procede ancora per tentativi di prova ed errore, con conseguente instabilità nelle proprietà degli alimenti prodotti;

- gli elevati livelli di diffidenza da parte dei cittadini, che manifestano «*low levels of acceptance for innovative forms of urban agriculture with connotations of intensive or high-tech agriculture*» [Butturini e Marcelis, 2020, p. 77], poiché gli alimenti così prodotti sono percepiti come poco naturali e con basso valore nutritivo. La percentuale minoritaria di persone che trova accettabile il ricorso a soluzioni iper-tecnologiche basa in genere la propria convinzione sulla base della sostenibilità e dell'efficienza di impiego delle risorse promessa da questo genere di soluzioni (Avgoustaki e Xydis, 2020);
- gli ingenti investimenti iniziali e gli elevati costi operativi, che superano quelli della coltivazione in serra. Secondo van Horen (2019) in Olanda i costi di produzione in una PFAL sono in media il doppio di quelli per la produzione in serra. Tali costi sono giustificabili per l'azienda solo se i consumatori sono disposti a pagare un *premium price* per gli alimenti prodotti. L'impossibilità per i prodotti provenienti da coltivazioni indoor e senza suolo di essere classificati come biologici in Europa riduce tuttavia ad oggi la possibilità di posizionarli nella fascia di prezzo più elevata (Butturini e Marcelis, 2020; Gomiero, 2018; van Horen, 2019);
- la scalabilità e la sostenibilità (ambientale, ma anche economica) delle coltivazioni verticali indoor sono ancora incerte e i risultati finora ottenuti sembrano variare di molto in relazione ai siti e ai casi considerati (Butturini e Marcelis, 2020)
- la necessità di far fronte al rischio che sporco e batteri vengano trasferite dagli operatori alle colture nelle attività pre- o post-raccolta o che vi giungono attraverso bassi livelli di pulizia e sicurezza dell'acqua utilizzata per l'irrigazione o mediante una soluzione nutritiva contaminata da sostanze chimiche indesiderate (Avgoustaki e Xydis, 2020).

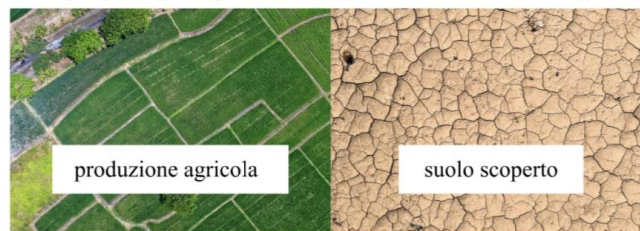
Nel complesso, la coltivazione verticale indoor si basa sull'idea che sia auspicabile disaccoppiare le attività di produzione alimentare da quelle necessarie a mantenere in salute gli ecosistemi. Kozai e Niu (2020) evidenziano a tal proposito come ricorrere a questo modello produttivo consenta di ridurre l'utilizzo di suolo, ampliando la superficie terrestre che può essere riconvertita ad aree verdi e foreste (vedi figura 2.4). Si tratta di un presupposto condivisibile – e probabilmente inevitabile – se il

modello di produzione alimentare considerato è quello convenzionale, che impoverisce il suolo e contribuisce alla distruzione degli ecosistemi in cui si inserisce, ma che non è necessariamente la scelta ottimale nel momento in cui emergono dei modelli agricoli alternativi in grado di coniugare la produzione alimentare e la salvaguardia del pianeta. La creazione di un ambiente artificiale completamente isolato dall'esterno richiede infatti ingenti quantità di energia e lavoro, che potrebbero non essere giustificabili se l'agricoltura riuscisse ad essere non solo un mezzo di sostentamento, ma anche una modalità di arricchimento del luogo in cui viene praticata.

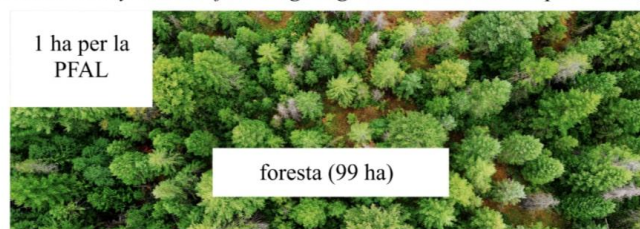
---

**Figura 2.4 - Impatto sul consumo di suolo delle PFAL e dell'agricoltura tradizionale a confronto**

A) 100 ha di campo aperto per la produzione agricola, ma che rimane scoperto per metà anno



B) 1 ha di *Plant Factory with Artificial Lighting* e 99 ha di foresta e spazi verdi pubblici



FONTE: adattata da Kozai e Niu [2020, p. 31]

---

## 2.4 Agricoltura biologica

### 2.4.1 Cos'è l'agricoltura biologica

Il metodo di produzione biologico viene normato per la prima volta dal regolamento CEE n. 2092/1991, al fine di promuovere un modello agricolo che rispetti gli equilibri naturali, riduca l'inquinamento, salvaguardi la diversità biologica e valorizzi

le risorse naturali locali (Pilati, 2004). Da allora, l'evoluzione del panorama legislativo e le peculiarità del territorio hanno condotto l'Italia a collocarsi tra i primi paesi in Europa per la produzione biologica, con un'incidenza complessiva pari al 17,4% della superficie agricola utilizzata (CREA, 2022). La recente legge n. 23/2022 presenta la produzione biologica come «*un sistema globale di gestione dell'azienda agricola e di produzione alimentare basato sull'interazione tra le migliori prassi in materia di ambiente e azione per il clima e di salvaguardia delle risorse naturali [...] [, che] contribuisce alla qualità dei prodotti, alla sicurezza alimentare, al benessere degli animali, allo sviluppo rurale, alla tutela dell'ambiente e dell'ecosistema, alla salvaguardia della biodiversità e al raggiungimento degli obiettivi di riduzione dell'intensità delle emissioni di gas a effetto serra*» [l. n. 23/2022, art. 1, c. 2].

Trattandosi di una certificazione di processo, affinché un prodotto sia classificabile come 'proveniente da agricoltura biologica' il suo processo produttivo deve essere conforme ai regolamenti in materia. Il mero rispetto dei requisiti legislativi non assicura tuttavia la sostenibilità del sistema produttivo; come scrivono Wachter e Reganold (2014) infatti «*just because a farm is organic does not mean that it is sustainable*» [Wachter e Reganold, 2014, p. 277]. Per assicurare che un sistema agricolo sia effettivamente sostenibile, è necessario che questo: fornisca prodotti abbondanti e accessibili, sia redditizio, arricchisca le risorse naturali utilizzate e contribuisca al benessere degli agricoltori e delle comunità rurali. La Federazione internazionale dei movimenti per l'agricoltura biologica (o IFOAM, *International Federation of Organic Agriculture Movements*) individua quindi i quattro principi su cui deve poggiare una produzione biologica sostenibile<sup>24</sup>, che sono:

- salute (*health*). L'agricoltura biologica deve tener conto del fatto che la salute delle persone è connessa a quella degli ecosistemi, dal momento che un suolo in salute produce raccolti sani e sicuri che contribuiscono a mantenere in salute chi li consuma. Affinché un ecosistema sia resiliente e in salute è necessario preservarne la biodiversità e l'equilibrio tra gli elementi, trattandolo non come una somma di parti indipendenti l'una dall'altra, ma come un organismo vivente e integrato;
- ecologia (*ecology*). L'agricoltura biologica dovrebbe lavorare in sinergia con i cicli naturali e i sistemi ecologici viventi, emularli e contribuire al loro sostentamento.

---

<sup>24</sup> Le informazioni in materia sono reperibili all'interno del sito web dell'IFOAM ([www.ifoam.bio](http://www.ifoam.bio))

Pur essendo questi cicli universali, le modalità di gestione e adattamento devono adattarsi alle specifiche condizioni locali in termini di risorse disponibili, necessità, dimensione dell'area, ... Per rispettare i sistemi ecologici, i sistemi agricoli devono inoltre essere progettati in modo da minimizzare la necessità di input esterni e preservare la diversità genetica e agricola;

- giustizia (*fairness*). Le relazioni tra gli attori del comparto devono assicurare giustizia ed equità a tutte le parti coinvolte. L'equità deve inoltre essere garantita in termini intergenerazionali, valutando le conseguenze sul lungo periodo delle azioni che si intende intraprendere;
- cura (*care*). La consapevolezza di possedere una comprensione incompleta delle variabili che influenzano gli ecosistemi e l'agricoltura deve evidenziare l'importanza dei principi di precauzione e responsabilità. La necessità di evolvere i sistemi agricoli per renderli più efficienti e produttivi non può infatti avvenire a discapito della salute del sistema.

Sulla base dei principi appena elencati, la produzione biologica prevede importanti restrizioni riguardo agli input utilizzabili, la cui applicazione deve essere minimizzata e quando risulta indispensabile deve essere limitata a «*inputs from organic production, natural or naturally derived substances*» [Kahl et al., 2012, p. 7261]. Essendo vietato l'uso di fertilizzanti ed erbicidi di sintesi (con rare eccezioni), la gestione del campo deve sfruttare pratiche alternative più compatibili con l'ambiente e concentrarsi sulle azioni preventive (Wachter e Reganold, 2014; Gomiero, 2018). Il controllo delle erbe infestanti può ad esempio avvenire attraverso la rotazione delle colture, l'utilizzo di pacciamatura o di colture di copertura, il diserbo manuale e metodi meccanici come il diserbo a fiamma. La lotta ai parassiti può a sua volta sfruttare: pratiche agro-ecologiche quali la rotazione colturale, le consociazioni e la corretta gestione del suolo; l'immissione in campo di agenti di controllo biologico come predatori e concorrenti dei parassiti target o l'erogazione di composti naturali caratterizzati da bassa tossicità per i mammiferi ed elevata velocità di degradazione.

«*The result is a farming system that is more knowledge intensive than resource intensive*» [Wachter e Reganold, 2014, p. 265]. Eliminando i protocolli standardizzati, rispettando i cicli naturali e valorizzando le peculiarità locali si ottiene infatti un sistema caratterizzato da elevata variabilità e complessità. Ciò da un lato aumenta la difficoltà e

le competenze necessarie per la gestione, ma dall'altro incrementa la resilienza del sistema e la sua capacità di far fronte agli eventi estremi (Monbiot, 2022). Diventa pertanto indispensabile recuperare e valorizzare il sapere tradizionale, che, per massimizzarne l'utilità, deve tuttavia essere affiancato alle nuove tecnologie quanto queste si rivelano compatibili con i principi del biologico (Arbenz, Gould e Stopes, 2016). Nonostante lo scetticismo diffuso verso tutto ciò che è innovativo e tecnologico all'interno del comparto biologico infatti, se l'analisi costi-benefici di un'innovazione – effettuata tenendo conto del suo impatto sul lungo periodo e su dimensioni quali la qualità del suolo, la tutela della biodiversità, ... – si rivela positiva, la sua applicazione dovrebbe essere caldeggiata. L'adesione al metodo di produzione biologico non deve infatti essere vista come un rifiuto della modernità e dell'innovazione, ma come «*an intensification of farming by biological and ecological means in contrast to chemical intensification by mineral fertilizers and synthetic pesticides*» [Vogt, 2007, p. 12].

#### 2.4.2 Vantaggi e limiti

I principali vantaggi dei prodotti biologici evidenziati dai consumatori sono correlati alla percezione degli stessi come alimenti più salutari e rispettosi dell'ambiente, dall'elevata qualità nutrizionale ed organolettica e più sicuri per la salute (Kahl et al., 2012; Wachter e Reganold, 2014; Seufert, 2019), mentre i fattori che ne limitano l'acquisto sono «*high prices, limited availability, distrust of product claims, food appearance, not being aware of organic food, and being content with existing choices.*» [Wachter e Reganold, 2014, p. 269].

Per quanto riguarda l'impatto ambientale, l'agricoltura biologica presenta numerosi benefici, tra cui: il miglioramento della qualità del suolo, l'aumento della materia organica, la riduzione dell'erosione, il minor consumo energetico e un aumento della biodiversità sopra e sottoterra (Gomiero, Pimentel e Paoletti, 2011; Wachter e Reganold, 2014). La maggiore percentuale di materia organica presente all'interno del suolo incrementa inoltre la sua capacità di drenaggio e di immagazzinare acqua, migliorando la capacità del sistema di fronteggiare gli stress idrici (Giampieri et al., 2022), mentre il divieto di utilizzare pesticidi di sintesi e fertilizzanti inorganici contrasta il problema di inquinamento dei bacini idrici conseguente alla loro

dispersione nell'ambiente circostante. Le prestazioni dei sistemi biologici sembrano essere migliori anche in materia di lisciviazione di nitrati e fosforo ed emissioni di gas a effetto serra, se misurate per unità di superficie coltivata. La minor produttività media dei sistemi biologici fa tuttavia sì che tale vantaggio si riduca o scompaia quando la misurazione avviene per unità di prodotto (Wachter e Reganold, 2014; Giampieri et al., 2022). La minor produttività per unità di superficie influenza anche l'impatto complessivo dell'agricoltura biologica sulla biodiversità: da un lato è maggiore all'interno delle aree a coltivazione biologica rispetto alle colture convenzionali, dall'altro è necessario occupare un'area più ampia per ottenere la stessa resa in valore assoluta, diminuendo la superficie che può rimanere incolta e in cui i livelli di biodiversità sarebbero massimi (Giampieri et al., 2022). Riuscire ad aumentare la produttività dei sistemi biologici è pertanto importante al fine di diminuire il loro impatto ambientale complessivo e incentivare l'acquisto dei prodotti biologici.

In merito al valore nutrizionale degli alimenti biologici le opinioni sono invece discordanti: mentre alcuni studi evidenziano la superiorità dal punto di vista nutrizionale dei prodotti biologici (Gomiero, 2018; Rempelos et al., 2021; ), altri sono più scettici poiché non ritengono sufficientemente convincenti le evidenze raccolte a causa dell'ampia variabilità dei risultati ottenuti (Giampieri et al., 2022; Barański et al., 2014). Tale variabilità, che impedisce di giungere a conclusioni definitive e condivise da tutti, è legata alla natura stessa della certificazione biologica. Essendo una certificazione di processo essa controlla infatti il modo in cui avviene la produzione, ma non prende in considerazione una serie di altre variabili che possono influenzare il risultato quali le caratteristiche e lo stato di salute del suolo, le condizioni meteorologiche, le modalità di gestione delle colture confinanti che possono contaminare l'area, etc. (Barański et al., 2014; Giampieri et al., 2022). È invece sempre più ampio il consenso relativo al fatto che il ricorso all'agricoltura biologica riduca la dispersione nell'ambiente e l'esposizione ai residui di pesticidi, sia in termini quantitativi (la quantità rilevata è pari a circa un terzo rispetto all'agricoltura convenzionale) che qualitativi (minor pericolosità delle sostanze rilevate) (Barański et al., 2014; Wachter e Reganold, 2014; Gomiero, 2018).

Dal punto di vista dei produttori agricoli, la transizione al biologico può comportare vantaggi economici e avere ricadute positive sulla salute degli operatori

impegnati nelle attività in campo. Per quanto concerne la salute dei lavoratori agricoli, l'agricoltura biologica potrebbe infatti diminuire i danni genetici e le alterazioni immunologiche provocate dall'esposizione a pesticidi di sintesi a cui sono sottoposti nell'agricoltura convenzionale (Costa et al., 2014); mentre per quanto riguarda i vantaggi economici, «*There is growing evidence in the literature that adoption of organic farming systems produces financial benefits*» [Wachter e Reganold, 2014, p. 280], anche se il periodo di transizione corrispondente ai primi 3 anni «*can be economically challenging and more information intensive*» [Wachter e Reganold, 2014, p. 280] e le piccole imprese possono trovare proibitivi i costi connessi all'ottenimento della certificazione. Trascorso tale periodo la stabilizzazione delle rese ottenuta grazie al miglioramento dello stato di salute del sistema, la minore spesa per l'acquisto degli input produttivi, l'ottenimento di un *premium price* e degli appositi sussidi erogati dalla PAC assicurano in genere una resa per ettaro pari o superiore all'agricoltura convenzionale (Wachter e Reganold, 2014; Giampieri et al., 2022).

Alcuni studi (Connor e Mínguez, 2012; Seufert, 2019) mettono tuttavia in dubbio la sostenibilità del metodo biologico quando viene impiegato su larga scala, a causa dei minori livelli medi di produttività rispetto all'agricoltura convenzionale. La più bassa resa per ettaro aumenta infatti i prezzi al consumo e la superficie che è necessario dedicare all'agricoltura per riuscire a soddisfare la domanda. L'effettivo gap tra la resa di un sistema di produzione biologico e quella di un sistema convenzionale varia in relazione alle caratteristiche dell'area e della gestione e «*range from 5% lower organic yields (rain-fed legumes and perennials on weak-acidic to weak-alkaline soils), 13% lower yields (when best organic practices are used), to 34% lower yields (when the conventional and organic systems are most comparable)*» [Seufert, Ramankutty e Foley, 2012, p. 229], con una media che si attesta attorno tra il -19 e il -25% (Seufert, 2019). Tra i principali fattori limitanti vi è la quantità di azoto disponibile per le colture, che nell'agricoltura convenzionale è fornito da appositi fertilizzanti inorganici. Il rilascio di N da parte di quelle fonti organiche ammesse nella produzione biologica (es. colture di copertura, compost e letame) è lento e spesso non riesce a soddisfare pienamente la domanda delle colture durante il periodo di massima crescita (Seufert, Ramankutty e Foley, 2012). I problemi sono pertanto legati per lo più «*to asynchrony between crop N demand and crop N availability rather than due to insufficient N inputs*» [Seufert, 2019, p. 201].



Affinché le rese dell'agricoltura biologica si avvicinino a quelle dell'agricoltura convenzionale devono sussistere condizioni quali «*good management practices, particular crop types and growing conditions*» [Seufert, Ramankutty e Foley, 2012, p. 229]. Si deve inoltre tenere presente come i cultivar più diffusi siano stati selezionati per adattarsi a un'agricoltura di tipo convenzionale e siano quindi più abili a utilizzare l'azoto proveniente da fonti inorganiche. Riscoprire le varietà antiche e locali, che si adattano maggiormente alle peculiarità del luogo e alle modalità di coltivazione *low-input* può dunque contribuire a migliorare la resa del sistema agricolo.

A ciò si aggiunge l'importante contributo che può essere fornito dalle tecnologie digitali, che si rivelano particolarmente utili per colmare le esigenze di previsione e programmazione degli interventi più adatti alla situazione. Il divieto di utilizzare pesticidi e fertilizzanti di sintesi e il conseguente impiego di azioni preventive richiede infatti un'elevata capacità di raccolta e analisi dei dati, che consenta di individuare i potenziali problemi e intervenire in modo tempestivo, prima che questi intacchino il raccolto in modo significativo. È possibile quindi integrare nel modello produttivo strumenti quali i sistemi di supporto alle decisioni e i sistemi di gestione della conoscenza che agevolino il lavoro degli agricoltori e migliorino le performance delle colture.

Al fine di massimizzare la produttività del terreno, pur rispettando gli standard imposti dal biologico, l'agricoltura può inoltre assumere le connotazioni del bio-intensivo. Questo metodo disegna lo spazio produttivo (alternanza di aiuole di coltivazione e passerelle) in modo da massimizzarne la funzionalità e sfrutta le simbiosi che si possono instaurare tra le diverse colture per coltivare in contemporanea specie differenti sullo stesso appezzamento di terreno, pratica nota anche come consociazione.

### 2.4.3 Le consociazioni

La consociazione (o *intercropping*) consiste nel coltivare simultaneamente diverse specie vegetali nello stesso campo per almeno una parte del loro ciclo vitale (Stomph et al., 2020). Gli effetti di tale pratica dipendono dalle relazioni di competizione, complementarità e compensazione che si creano tra le diverse colture (Raseduzzaman e Jensen, 2017). Il maggiore vantaggio correlato al suo utilizzo è infatti dato dalla capacità del sistema agricolo di sfruttare le risorse disponibili con maggiore

efficienza, aumentando le rese per unità di superficie. Affinché l'impatto complessivo sulla produzione agricola sia positivo, è necessario che la consociazione sia progettata in modo da «*maximize the complementarity of resource use between the crops, minimize intercrop competition, and maximize interference with weeds, such as shading out emergent weeds and crowding out weed roots*» [Wachter e Reganold, 2014, p. 276].

Al fine di minimizzare la competizione e massimizzare la complementarietà è importante pianificare con attenzione quali specie piantare, in quale momento e con quale densità, in base alle caratteristiche del terreno, alle loro esigenze nutrizionali («*different resource acquisition in time or space*» [Stomph et al., 2020, p. 8]), alla loro dimensione («*differential canopy architecture*» [Raseduzzaman e Jensen, 2017, p. 27]) e all'apparato radicale che sviluppano («*different rooting depth*» [Raseduzzaman e Jensen, 2017, p. 27]). Per quanto riguarda la compensazione, la maggior variabilità che si crea «*make the system more resilient to environmental perturbations, pests and diseases, thus enhancing food security*» [Raseduzzaman e Jensen, 2017, p. 27]. Aumentano infatti le probabilità che di fronte a un evento indesiderato almeno una delle due colture sopravviva o non subisca danni ingenti, ad esempio perché un patogeno attacca solo una delle due o perché quando un evento atmosferico indesiderato colpisce l'area le due specie si trovano in fasi differenti del loro ciclo di vita.

Nonostante le performance dei sistemi consociati siano generalmente migliori delle monocolture in termini di acquisizione di nutrienti, rese per ettaro, etc., se si associano specie incompatibili o non si rispettano i tempi e gli spazi adeguati alla loro crescita ottimale, possono verificarsi peggioramenti di tali parametri a causa della competizione per le risorse che si instaura (Yin, 2020; Stomph et al., 2020). Anche se nell'*intercropping* è in genere possibile aumentare la densità d'investimento<sup>25</sup> rispetto alle corrispondenti monocolture esistono infatti dei limiti che devono essere rispettati per evitare l'insorgere di «*adverse phenomena in plant morphology, physiology, and ecology [...] such as premature senescence, slow leaf growth, decreased panicle grain number, decreased chlorophyll content, and decreased interception of photosynthetic active radiation of the panicle leaf layer and sublayer*» [Yin, 2020, p.7]. È inoltre importante considerare che il rapporto tra competizione e complementarietà non è stabile, ma dipende dallo stadio di crescita in cui le due colture si trovano: «*resource*

---

<sup>25</sup> Per densità d'investimento si intende la quantità di piante agrarie presenti in una coltivazione per unità di superficie.

*competition in the early growth stage of intercropping crops may evolve into complementary effect of sharing resources in later growth stages, especially following the harvest of an early-maturity intercrop» [Yin, 2020, p. 4].*

I principali vantaggi legati all'utilizzo di consociazioni riguardano:

- la salvaguardia delle colture da patogeni e malattie: nella meta-analisi condotta da Stomph et al. (2020) emerge come l'*intercropping* abbia ridotto l'incidenza di malattie legate a funghi, oomiceti, virus, batteri, nematodi e piante parassite nel 79% dei casi. La compresenza di specie differenti diminuisce infatti la superficie contigua attaccabile dai patogeni, formando delle barriere fisiche che ne ostacolano la diffusione. L'effetto degli essudati radicali può inoltre modificare il «*the soil micro-ecological environment (such as rhizosphere microflora, community structure and diversity as well as soil enzyme activities)*» [Stomph et al., 2020, p. 27], impedendo la formazione delle condizioni ottimali alla proliferazione dei patogeni (Raseduzzaman e Jensen, 2017);
- la maggior efficienza nell'acquisizione e nella conversione in biomassa di risorse quali l'acqua, la luce e i nutrienti. L'efficacia di acquisizione della luce può essere aumentata combinando specie che coprono il suolo e captano le radiazioni luminose durante periodi diversi della stagione (Stomph et al., 2020).

Per quanto riguarda l'utilizzo di acqua, l'effetto varia in relazione alle specifiche del sistema (specie utilizzate, periodo e densità di semina, ...) e alle condizioni ambientali (Yin et al., 2020). L'efficienza è aumentata da fattori quali la maggiore densità degli apparati radicali nello strato superficiale del suolo, che diminuisce l'evaporazione dell'acqua, o dalla combinazione di specie con radici più e meno profonde, che consentono di acquisire le risorse idriche presenti negli strati inferiori del suolo, altrimenti inaccessibili alla specie con le radici più superficiali. Nella consociazione tra mais e leguminose, queste ultime possono ad esempio «*obtain the water below the root zone of maize and increase the water supply of maize by water lifting* » [Yin, 2020, p. 7].

L'*intercropping* ha inoltre mostrato effetti positivi sulla capacità di acquisire nutrienti (quali azoto, fosforo, potassio, ferro, zinco, ...) dal terreno e convertirli in sostanze funzionali (Stomph et al., 2020). Ad esempio, nei sistemi che

- uniscono colture cerealicole e leguminose, la capacità di queste ultime di fissare l'azoto atmosferico aumenta la quota di N disponibile per la coltura cerealicola;
- il miglioramento dello stato di salute del suolo: la maggior diversità del sistema aumenta le riserve di carbonio del suolo e la biomassa radicale totale (Stomph et al., 2020). Cong et al. (2015) rilevano a tal proposito un contenuto di C organico nei primi 20 cm di suolo maggiore del  $4\% \pm 1$  rispetto alle rispettive monoculture e un incremento nella presenza di azoto dell' $11 \pm 1\%$ . È utile notare a tal proposito che si tratta di un aspetto importante anche per l'agricoltura convenzionale, dal momento che consentirebbe di ridurre il ricorso agli input chimici, diminuendo il rischio di lisciviazione e inquinamento dei bacini idrici;
  - la massimizzazione delle rese e della loro stabilità nel tempo.

Le consociazioni incidono infatti sulla resa potenziale (*potential yield*), realizzabile (*attainable yield*) ed effettiva di un'area coltivata (*actual yield*). La resa potenziale «*can be changed through an extension of the growing season, resulting in greater light capture*» [Stomph et al., 2020, p. 4], mentre quella realizzabile – che dipende dai reali livelli di acqua e nutrienti disponibili – può essere aumentata «*by complementarity between species in the timing of water demand [...], the depth of water extraction, different modes of nitrogen acquisition (with legumes fixing nitrogen from air) or recirculation of nitrogen in the soil-plant system*» [Stomph et al., 2020, p. 4]. La resa effettiva è infine incrementata dal miglioramento nel controllo di patogeni e malattie e dalla differente risposta delle specie vegetali agli stress biotici e abiotici che possono interessare l'area.

Tale variabilità nelle reazioni agli eventi diminuisce la probabilità di perdere completamente il raccolto e aumenta la stabilità delle rese nel tempo. Secondo Raseduzzaman e Jensen (2017) nel 43% dei casi la resa complessiva è più stabile di entrambe le singole monoculture, mentre nel 46% dei casi la resa della consociazione è più stabile di una sola delle singole colture (Raseduzzaman e Jensen, 2017);

- la miglior qualità nutrizionale degli alimenti: la maggiore efficienza di assorbimento e utilizzo dei nutrienti presenti all'interno del suolo aumenta la loro densità all'interno degli alimenti (Martin-Guay et al., 2018) e riduce le carenze nutrizionali legate all'insufficiente assunzione di micronutrienti nota come *hidden hunger*.

Abbandonare il modello delle monocolture in favore di un basato sulle consociazioni, oltre a migliorare le prestazioni ecologiche, può incrementare la redditività dell'attività agricola. Martin-Guay et al. (2018) rilevano a tal proposito un aumento del 33% del reddito lordo a parità di superficie e – nel caso dell'agricoltura convenzionale – una minor dipendenza dai fertilizzanti industriali. Dallo studio emerge tuttavia anche che la maggiore complessità di gestione ne ostacola la diffusione in assenza di specifici incentivi per gli agricoltori.

## 2.5 Agricoltura rigenerativa

### 2.5.1 Definizioni, obiettivi e strumenti

Il termine agricoltura rigenerativa nasce negli Stati Uniti durante gli anni '70 per indicare un modello agricolo in grado di rispettare e rigenerare l'ambiente tramite l'aumento della biodiversità, l'arricchimento del suolo e il miglioramento dei servizi ecosistemici (Giller et al., 2021). Il suo obiettivo principale è dunque «*to increase soil quality and biodiversity in farmland while producing nourishing farm products profitably*» [LaCanne e Lundgren, 2018, p. 2].

Sin dalla sua origine, non vi è un'unica definizione del termine, ma coesistono visioni anche molto differenti tra loro. Infatti, mentre per alcuni si tratta necessariamente di una forma di agricoltura biologica, che vieta l'utilizzo di sostanze di sintesi come fertilizzanti inorganici e pesticidi (tant'è che viene spesso utilizzato il termine agricoltura organica rigenerativa, dall'inglese *organic*, biologico), altri sono aperti all'utilizzo di prodotti agrochimici, purché sia ridotto al minimo e sia volto a facilitare la transizione dell'ecosistema verso uno stato di maggiore salute (Rempelos, Kabourakis e Leifert, 2023). Questa flessibilità nella definizione ha permesso all'agricoltura rigenerativa «*to be championed by what many consider opposing sides of the food and agriculture debate—NGO's and civil society, as well as major multinational companies*» [Gordon, Davila e Riedy, 2022, p. 817]. Pur con le contraddizioni che caratterizzano molte grandi imprese, infatti, anche le principali multinazionali del

comparto agroalimentare (es. Danone<sup>26</sup> e Nestlé<sup>27</sup>) hanno intuito che è necessario ricorrere a un modello agricolo alternativo per salvaguardare il pianeta e i propri interessi economici connessi alla stabilità (quantitativa e qualitativa) delle forniture. Per quanto riguarda Nestlé ad esempio, se le temperature continuano ad aumentare come hanno fatto finora, entro il 2050 «*up to 33% of the current coffee area in Sao Paulo and Minas Gerais in Brazil (two main coffee producer states) may be lost*» [Vergara et al., 2014, p. 7], con evidenti impatti sulla capacità dell'azienda di svolgere la sua attività.

Non essendo presente un quadro giuridico e normativo ufficiale in materia di agricoltura rigenerativa, il termine funge ad oggi da 'ombrello' per una serie di pratiche utilizzate allo scopo di ripristinare la salute del suolo (con particolare attenzione alla percentuale di materia organica) e invertire la perdita di biodiversità sopra e sotto terra (Magistrali et al., 2022). La presenza di una percentuale adeguata di materia organica e il ripristino della biodiversità consentono infatti di aumentare la quantità di carbonio e nutrienti che viene stoccata all'interno del suolo, contribuendo alla mitigazione dei cambiamenti climatici e alla fornitura dei servizi ecosistemici necessari a supportare la vita senza il bisogno di ricorrere a input di sintesi (Moyer et al., 202).

A ciò si aggiunge inoltre la consapevolezza che l'attività agricola si inserisce in un sistema vivente nidificato e complesso, che non può essere semplificato eccessivamente senza eroderne la resilienza e la capacità di auto-organizzarsi (Gordon, Davila e Riedy, 2022) e che non sempre esiste una soluzione ideale, poiché vi sono numerosi trade-off che devono essere riconosciuti e affrontati. È ad esempio possibile che «*agronomic practices which benefit one aspect of soil health (such as soil life) [...] have negative effects on other functions (such as nitrate leaching, primary production or GHG emissions)*» [Giller et al., 2021, p. 17]. La comprensione della necessità di adattare il sistema agricolo all'ambiente circostante e l'eterogeneità di intenti e definizioni fanno sì che non vi sia un'indicazione univoca sulle *best practice* da seguire in materia di agricoltura rigenerativa. Vengono invece proposti una serie di strumenti di cui servirsi nelle modalità e nella misura necessaria alle condizioni iniziali e agli obiettivi prefissati.

Tra i principali strumenti e tecniche individuati dalla letteratura vi sono (LaCanne e Lundgren, 2018; Lal, 2018; EIT Food, 2020; Moyer et al., 2020; Rempelos, Kabourakis e Leifert, 2023):

---

<sup>26</sup> [www.regenerative-agriculture.danone.com/](http://www.regenerative-agriculture.danone.com/)

<sup>27</sup> [www.nestle.com/sustainability/nature-environment/regenerative-agriculture](http://www.nestle.com/sustainability/nature-environment/regenerative-agriculture)

- l'utilizzo di varietà resistenti agli stress abiotici e biotici presenti nel luogo. Come già evidenziato in relazione all'agricoltura biologica (vedi paragrafo 2.4), si tratta di un elemento ad oggi poco esplorato, dal momento che la maggior parte delle ricerche si concentra sulla selezione e la creazione di varietà adatte a modelli agricoli convenzionali. Il fatto che «*regenerative and organic production methods generate very different soil physical, chemical, and biological background conditions compared with intensive farming systems*» [Rempelos, Kabourakis e Leifert, 2023, p. 4] rende tuttavia necessario individuare delle varietà che siano in grado di prosperare in queste diverse condizioni. Tali varietà devono essere caratterizzate da: capacità di competere con le erbacce, resistenza ai patogeni, impiego efficiente delle risorse ed elevata qualità organolettica e nutrizionale;
- la diversificazione delle rotazioni colturali con l'inclusione di leguminose capaci di fissare l'azoto, così da bilanciare le sostanze prelevate da e fornite al suolo. Un'accurata pianificazione delle rotazioni, assieme all'incremento della biodiversità e all'utilizzo di consociazioni, consente inoltre di ridurre la presenza di parassiti grazie ai meccanismi di competizione e predazione che si instaurano;
- il ricorso a colture di copertura e piante perenni per ridurre al minimo i periodi in cui il suolo rimane nudo (vedi paragrafo 2.5.2). È infatti sempre più chiaro come la rigenerazione del suolo richieda di fornire «*continuous and diverse inputs, and that mostly comes from living roots*» [Moyer et al., 2020, p. 13] sotto forma di essudati radicali e che quindi un suolo senza copertura vegetale è privo di quelle sostanze utili al suo mantenimento in salute;
- la ritenzione in campo dei residui colturali, che coprono il terreno prevenendo i fenomeni erosivi, inibiscono la crescita delle erbacce, moderano gli sbalzi di temperatura del suolo, riducono l'evaporazione dell'acqua e forniscono nutrienti agli organismi che abitano l'ecosistema;
- la creazione e la conservazione di aree incolte specificamente adibite al mantenimento della biodiversità animale e vegetale, che, assieme alla ritenzione in campo dei residui colturali, aumentano la capacità del sistema di sequestrare il carbonio dall'atmosfera e preservarne le scorte all'interno del suolo, riducendo la concentrazione di CO<sub>2</sub> atmosferica;
- l'utilizzo di fonti naturali di fertilizzanti, come il letame animale e/o il compost a base di rifiuti organici, i quali favoriscono il sequestro del carbonio nel suolo,

alimentando i microbi responsabili di tale processo, diminuiscono la dipendenza dai fornitori di input di sintesi e sono più efficienti dal punto di vista energetico rispetto alla produzione *ex novo* di fertilizzanti (National Research Council, 2010). Tali materiali devono essere gestiti con cautela, dal momento che «*they are also more prone to nutrient losses*» [Giller et al., 2021, p. 21] e, quando non sono prodotti internamente, possono essere difficili da reperire o presentare un basso livello qualitativo;

- l'integrazione controllata di colture e bestiame, attraverso tecniche di pascolamento che prevedono rotazioni ad alta frequenza in grado di lasciare il tempo alla vegetazione di ricrescere tra un passaggio e l'altro e di evitare il sovrapascolamento;
- la riduzione di frequenza e profondità delle lavorazioni del terreno o la previsione di specifiche attività volte a ricostruire le comunità sotterranee dopo gli interventi più invasivi, al fine di minimizzare i danni agli ecosistemi sotterranei conseguenti alla rottura degli aggregati di suolo, alla distruzione delle reti micorriziche, all'aumento dell'evapotraspirazione dell'acqua e all'incremento dei tassi di erosione ad opera di acqua e vento. Si tratta di un'attività che da sola non aumenta la capacità del sistema di sequestrare il carbonio dall'atmosfera, ma che limita «*the speed by which soil carbon loss and soil degradation occur*» [Moyer et al., 2020, p. 18]. Nella pianificazione di tali interventi è importante tenere presente che la maggior integrità del suolo può favorire la proliferazione di erbacce indesiderate, a cui alcuni agricoltori rispondono intensificando il ricorso agli erbicidi, con un impatto netto negativo sulla salute dell'ecosistema. È fondamentale dunque comprendere quali altri strumenti utilizzare affinché la crescita della vegetazione selvatica non intacchi le colture;
- la minimizzazione o l'eliminazione dei prodotti agrochimici, che evitano l'insorgere di problemi legati allo sviluppo di patogeni resistenti ai pesticidi e riducono l'impatto negativo dell'agricoltura sulla biodiversità e sull'equilibrio dei bacini idrici.

Le principali barriere che limitano l'adozione dell'agricoltura rigenerativa riguardano (Rempelos, Kabourakis e Leifert, 2023): le inferiori rese e/o i maggiori costi produttivi che possono caratterizzare l'agricoltura organica rigenerativa; la dipendenza



dai prodotti agrochimici nei sistemi rigenerativi non biologici e l'ingente mole di nuove conoscenze e competenze da sviluppare perché la transizione a un sistema rigenerativo avvenga con successo. È importante evidenziare tuttavia come le opinioni dei diversi studiosi in merito all'impatto di tali fattori sulla sostenibilità di un sistema agricolo siano discordanti. Data l'eterogeneità nelle definizioni di 'agricoltura rigenerativa', nelle situazioni di partenza, nelle condizioni ambientali che ci si trova ad affrontare e nelle pratiche implementate non stupisce affatto che sia così.

Per quanto riguarda le rese dei sistemi agricoli rigenerativi e il relativo gap con l'agricoltura convenzionale, i principali fattori che intervengono sembrano essere:

- il superamento di un primo periodo di transizione della durata di 1-2 anni in cui le rese si riducono e il lavoro svolto serve più a incrementare lo stato di salute e la resilienza dell'ecosistema che a produrre una quantità di output soddisfacente (EIT Food, 2020);
- le condizioni ambientali in campo. Infatti, quando le colture sono sottoposte a elevati livelli di stress (es. siccità prolungata) la maggiore resilienza dei sistemi rigenerativi consente di eguagliare o addirittura superare le rese dei sistemi convenzionali (EIT Food, 2020);
- la vicinanza del modello adottato alle pratiche convenzionali. In generale, più il sistema adottato è simile a quello agricolo convenzionale (ma con minor quantità di input esterni), più il gap nelle rese è evidente. Per funzionare bene un sistema organico rigenerativo deve basarsi su un approccio olistico, «*not simply replacing conventional chemicals with organic-approved chemicals*» [Moyer et al., 2020, p. 26]. Quando un sistema organico rigenerativo è progettato in modo ottimale, le sue rese medie superano quelle dell'agricoltura tradizionale per quasi tutte le colture alimentari tra cui mais, frumento, riso, soia e girasole (Moyer et al., 2020).

In contrasto con i maggiori costi produttivi riscontrati da Rempelos, Kabourakis e Leifert (2023), LaCanne e Lundgren (2018) evidenziano una minor incidenza di tali costi nei sistemi rigenerativi. Dalla loro ricerca emerge in particolare una minor incidenza dei costi per l'acquisto di sementi e fertilizzanti, dal momento che «*32% of the gross income went into these inputs on conventional fields, versus only 12% in regenerative fields*» [LaCanne e Lundgren, 2018, p. 5]. Questo elemento, assieme alla possibilità di godere di un *premium price* per i prodotti provenienti da agricoltura

(biologica e) rigenerativa, può consentire di ottenere una maggiore redditività anche in caso le rese siano inferiori (LaCanne e Lundgren, 2018; EIT Food, 2020).

## 2.5.2 La copertura del suolo

Per mantenere il suolo in salute è essenziale evitare di lasciarlo scoperto a lungo, dal momento che l'esposizione all'aria e alle intemperie ne velocizza i processi di degradazione (vedi paragrafo 1.3.4). I principali strumenti utilizzati per garantire un'adeguata copertura del terreno sono le colture di copertura, eventualmente utilizzate anche come pacciamatura al termine del loro ciclo vitale, e le piante perenni.

### **Colture di copertura**

Le colture di copertura (o *cover crops*) sono piante erbacee che vengono piantate in alternanza alla coltura principale per prevenire l'erosione del suolo, ridurre l'evaporazione dell'acqua, controllare le erbe infestanti e fornire nutrienti alle colture successive (National Research Council, 2010; Quintarelli et al., 2022). Grazie alla loro funzione di copertura e isolamento del terreno, queste colture riescono inoltre a ridurre l'evaporazione dell'acqua dal suolo e l'escursione termica tra giorno e notte, garantendo la stabilità necessaria a favorire la vita dei microrganismi del sottosuolo. Il conseguente aumento della materia organica all'interno del suolo, unito alla maggior stabilità degli aggregati che lo compongono, consente di aumentare le riserve di carbonio sotterranee, con effetti positivi sulla riduzione della CO<sub>2</sub> atmosferica. Secondo Moyer et al. (2020) se l'adozione delle colture di copertura fosse globale, «~4% of annual CO<sub>2</sub> emissions might be sequestered» [Moyer et al., 2020, p. 10]. Si tratta di uno strumento particolarmente utile in ambienti molto aridi e con problemi di compattazione del terreno, dal momento che gli apparati radicali delle colture di copertura creano dei canali sotterranei che possono poi essere sfruttati dalla coltura principale per giungere più velocemente alle riserve di acqua e nutrienti collocate in profondità nel sottosuolo (Williams e Weil, 2004). Si ottiene così un terreno maggiormente areato e strutturato, capace di assorbire maggiori quantità di acqua e di ridurre la dispersione dei nutrienti nell'ambiente.

Dal momento che il loro obiettivo principale è quello di proteggere e arricchire il suolo, le colture di copertura non vengono in genere raccolte al termine del loro ciclo vitale, ma vengono lasciate in superficie come pacciamatura o interrate nei primi

centimetri di suolo (Research Council, 2010). In alternativa, è possibile utilizzarle come alimenti per il bestiame che viene fatto pascolare nei campi a riposo, o, se hanno un proprio valore commerciale, raccoglierle e venderle (EIT Food, 2020).

Il loro impatto sulla resa della coltura principale è difficile da quantificare, ma le ricerche in materia sembrano indicare una relazione positiva tra rese colturali e utilizzo di colture di copertura adeguate, mentre si riduce la necessità di ricorrere a fertilizzanti minerali (Research Council, 2010). Affinché si riscontrino tali benefici è tuttavia indispensabile che la scelta delle specie di copertura non sia casuale, ma sia coerente con gli obiettivi e le peculiarità ambientali (Quintarelli et al., 2022). Se si tratta di una copertura temporanea è ad esempio possibile favorire le specie che colonizzano il terreno molto velocemente, mentre se la coltura di copertura e quella principale devono coesistere si devono prediligere specie poco aggressive. Al fine di massimizzare le complementarità e minimizzare la competizione tra le due colture, è necessario inoltre valutare la stagione di crescita, il consumo idrico, i nutrienti assorbiti e rilasciati e i possibili patogeni della coltura di copertura in relazione alla natura e alle necessità di quella principale. Le specie più utilizzate per la copertura del suolo appartengono in genere a (Quintarelli et al., 2022):

- leguminose: catturano azoto dall'atmosfera e lo fissano nel terreno, contribuendo al riciclo dei nutrienti e riducendo la necessità di ricorrere a fertilizzanti inorganici. Il loro apparato radicale a fittone riesce inoltre ad arieggiare i suoli compattati e ad estrarre i nutrienti stoccati in profondità;
- graminacee: hanno un elevato contenuto di cellulosa – e quindi di carbonio – negli steli, che decomponendosi favorisce la formazione di sostanza organica nel sottosuolo. L'ampia estensione superficiale del loro apparato radicale fascicolato riesce a contenere i fenomeni di erosione e a controllare la crescita delle erbacce;
- brassicacee: sono in grado di limitare lo sviluppo di nematodi e funghi senza alterare la salute del suolo. Il loro apparato radicale a fittone consente inoltre di creare cavità all'interno del suolo che ne riducono la compattazione.

### **Piante perenni**

Le piante perenni sono piante che sopravvivono per più anni e forniscono più di un raccolto prima di terminare il loro ciclo vitale (Marti, Rahardjo e Ismail, 2019). Rispetto alle colture annuali coprono il suolo più a lungo, riducono la necessità di

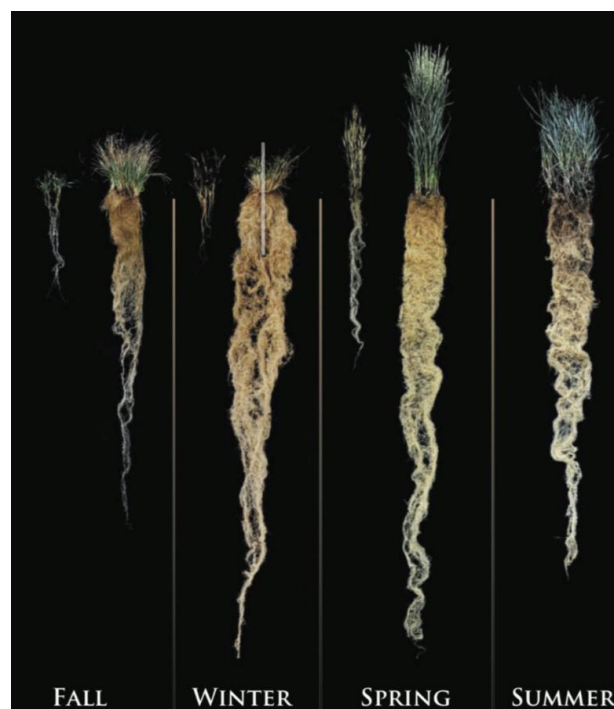
lavorazione del terreno, hanno radici più profonde (vedi figura 2.5) e raggiungono quindi più facilmente l'acqua immagazzinata in profondità, utilizzano risorse come l'acqua e la luce con maggiore efficienza, riducono l'erosione del suolo e aumentano la capacità del terreno di immagazzinare carbonio (Glover, 2010; National Research Council, 2010; DeHaan and Ismail, 2017; Marti, Rahardjo e Ismail, 2019; Giller et al., 2021).

I due modi principali in cui le piante perenni sono integrate in un sistema agricolo sono: 1) come coltura principale, eventualmente selezionando delle varietà perenni che siano in grado di sostituire quelle annuali, o 2) affiancando delle piante perenni alla coltura principale, nel qual caso si parla di agroforestazione.

I potenziali benefici connessi al loro utilizzo hanno spinto diversi ricercatori a selezionare delle colture perenni capaci di sostituire le controparti annuali. Sono state pertanto identificate diverse varietà di cereali (grano, riso, sorgo, erba di grano intermedia), semi oleosi (girasole) e legumi utili allo scopo (DeHaan and Ismail, 2017; Giller et al., 2021).

---

**Figura 2.5 - Radici del grano annuale (a sx) e dell'erba di grano intermedia (a dx) a confronto**



FONTE: Glover [2010, p. 1639]

---

La selezione avviene in base a proprietà quali (Glover, 2010):

- rese e qualità organolettiche e nutrizionali elevate e stabili nel tempo;
- elevata resistenza agli stress biotici e abiotici che l'ambiente può presentare;
- sviluppo sincrono, indispensabile per l'organizzazione delle attività di raccolta;
- capacità di ritenzione dei semi (resistenza al distacco), che devono rimanere sulla pianta fino al momento della raccolta;
- facilità di coltivazione e raccolta.

Particolare rilievo assumono in questo ambito una specifica varietà di riso sviluppata in Cina e l'erba di grano intermedia (*Thinopyrum intermedium*) distribuita sotto il nome Kernza® dal *Land Institute* (DeHaan and Ismail, 2017). I risultati ad oggi ottenuti sono notevoli: una pianta di riso perenne consente di ottenere otto raccolti in quattro anni con rese e qualità paragonabili alla controparte annuale (Zhang et al., 2023), mentre il Kernza® ha una vita produttiva pari a circa quattro anni, anche se le performance della farina da esso ottenuta non sono ancora paragonabili a quelle della farina tradizionale. Nonostante l'elevata quota proteica, utilizzarla nei prodotti da forno rimane ancora una sfida «*due to inferior gluten forming ability and lower starch content compared to wheat*» [Marti, Rahardjo e Ismail, 2019, p. 400], da cui la forza relativamente bassa che presenta. La natura delle proteine contenute al suo interno e l'elevata percentuale di fibre ostacolano infatti la formazione della maglia glutinica indispensabile per la panificazione. I benefici che può apportare all'ambiente la rendono tuttavia una coltura interessante: il suo profondo apparato radicale sembra ridurre la lisciviazione dell'azoto dell'86% e aumentare il sequestro di carbonio del 13% rispetto al grano annuale (Marti, Rahardjo e Ismail, 2019).

Tra i limiti più rilevanti che devono essere affrontati affinché le colture perenni possano trovare una più ampia diffusione vi sono:

- la possibilità che siano più deboli di fronte a patogeni e malattie, dal momento che la loro permanenza pluriennale in campo offre minori possibilità di contrastare la loro diffusione (Giller et al., 2021). È vero tuttavia anche che la maggior estensione dell'apparato radicale consente una maggiore interazione con il suolo e con il 'sistema immunitario esterno' formato da organismi e funghi;

- le rese troppo basse per competere con le controparti annuali, anche se il lavoro di selezione compiuto negli ultimi anni sta riducendo il gap. È necessario inoltre comprendere quanti anni possono trascorrere prima che la pianta diventi improduttiva e come si configura il trade-off tra produttività e longevità (Glover et al., 2010);
- la necessità di selezionare piante di dimensioni ottimali (Lubofsky, 2016). Aumentare la grandezza della pianta – e in parallelo del seme – è infatti importante per rendere più semplici le operazioni di raccolta e aumentare le rese; d’altro canto però, con la maggiore altezza aumenta anche il rischio di allettamento delle colture, che si piegano sotto il peso del vento o della pioggia;
- l’esigenza di comunicare i vantaggi apportati dalle colture perenni e creare una domanda per questo genere di prodotti, dal momento che «*farmers [...] are reluctant to plant a crop if there is not a strong market demand*» [Marti, Rahardjo e Ismail, 2019, p. 400]
- la necessità di velocizzare la ricerca in tale ambito (Glover, 2010): nonostante vi siano diversi programmi di selezione in corso, lo sviluppo di una varietà pronta all’utilizzo in campo può richiedere fino a 20 anni (National Research Council, 2010). Il tempo di selezione può essere ridotto ricorrendo a forme di agricoltura indoor che ottimizzano la temperatura, l’umidità, l’intensità luminosa e la lunghezza d’onda della luce fornita al fine di velocizzare i cicli di sviluppo della pianta (*speed breeding*; Alahmad et al., 2022). È in questo modo possibile ottenere fino a sei generazioni all’anno per specie che altrimenti richiederebbero un intero anno per ogni ciclo riproduttivo (Langridge, 2019).  
Può inoltre rivelarsi utile a tale scopo implementare dei modelli di simulazione che svolgano parte del lavoro di selezione.

### **Agroforestazione**

L’agroforestazione (o *agroforestry*) è una pratica che prevede «*the purposeful growing of trees and crops in interacting combinations for a range of objectives including both a variety of products or commodities and a vast array of environmental and other ecological services*» [Nair, 2014, p. 271] e che talvolta include anche la presenza di animali. I diversi componenti del sistema possono coesistere simultaneamente o fare parte di una rotazione che ne prevede l’alternanza. Come accade per l’agricoltura

rigenerativa, anche l'agroforestazione non ha una definizione ufficiale e univoca, ma una serie di definizioni parzialmente sovrapposte fornite dai diversi attori.

I principali motivi che spingono ad adottare sistemi di agroforestazione nei paesi sviluppati sono connessi al miglioramento dell'impatto ambientale che è possibile ottenere con un'agricoltura di questo tipo (Nair, 2014): gli alberi possono fornire ombra, protezione dal vento e nutrimento al suolo, migliorando la fertilità e la resa delle colture. Ciò favorisce inoltre la conservazione del suolo, la tutela della biodiversità e la mitigazione dei cambiamenti climatici, poiché gli alberi assorbono il carbonio dall'atmosfera e lo stoccano all'interno del terreno. Tra i possibili modelli agronomici adottabili, *«agroforestry in its many shapes and forms perhaps has the greatest potential to contribute to climate change mitigation through C capture both above- and below-ground»* [Giller et al., 2021, p. 20].

La presenza di alberi con apparati radicali ben sviluppati in profondità consente infatti di stoccare la materia organica negli strati più profondi del suolo e di riciclare i nutrienti in modo da renderli nuovamente disponibili per le colture (Mosquera-Losada et al., 2022). Affinché si riscontrino tali benefici, il sistema deve essere progettato in modo da essere produttivo (produzione alimentare e di servizi ecosistemici), sostenibile e apprezzato dagli agricoltori, che altrimenti non saranno interessati ad implementarlo. Le principali pratiche utili a tal fine nei paesi dal clima temperato (Nair, 2014) sono:

- *alley cropping*: forma di consociazione in cui la coltivazione di seminativi avviene tra file di arbusti e alberi (*«Fast-growing, preferably leguminous, woody species»* [Nair, 2014, p. 273]), che vengono periodicamente potati in modo da consentire alle piante sottostanti di ricevere la luce necessaria alla loro crescita. La biomassa ricavata dalle potature è quindi mantenuta in campo come pacciamatura, o utilizzata come foraggio per gli animali. Nasce dalla volontà di ottenere *«benefits of natural long-term fallows such as recycling nutrients, suppressing weeds, and controlling erosion on sloping land»* [Nair, 2014, p. 274] pur continuando la produzione alimentare nell'area. I principali problemi connessi all'*alley cropping* riguardano la sua adattabilità all'ambiente e l'elevato lavoro richiesto. Per fornire nutrienti tramite la pacciamatura, le specie lignee utilizzate devono produrre biomassa sufficiente e di buona qualità. Se le condizioni ecologiche non lo consentono (es. in climi aridi), l'adozione di questa pratica non dimostra benefici percepibili. È inoltre richiesto molto lavoro per potare le piante e preparare la

pacciamatura e possono sorgere problemi di competizione tra le piante per risorse quali i nutrienti, l'acqua e la luce. L'insieme di questi fattori contribuisce alla scarsa diffusione di questa pratica;

- fasce ripariali, quando sono poste tra seminativi e bacini idrici «*to protect continental waters where high inputs of fertilizers are usually applied causing heavily contaminated water*» [Mosquera-Losada et al., 2022, p. 2];
- alberi utilizzati come barriere antivento, che proteggono il terreno dall'erosione e le colture dall'allettamento;
- *ancient tree-based agriculture* (es. con olive, fichi, castagne, ...), che inserisce alberi nei campi di produzione agricola al fine di ottenere frutta, foraggio, legna da ardere e legname.

La commistione di agricoltura e silvicoltura è un elemento tipico del sistema agricolo italiano tradizionale, in cui le specie lignee erano spesso integrate con arbusti e seminativi, assumendo configurazioni come l'alberata tosco-umbro-marchigiana e la piantata padana (Paris et al., 2019). In tempi più recenti tale tradizione è andata perdendosi a causa della diffusione di un modello agricolo basato sulle monoculture, gli elevati input di sintesi e le lavorazioni pesanti. Le aree gestite secondo i principi dell'agroforestazione rappresentano oggi soltanto l'8.8% della superficie agricola totale europea, nonostante i benefici che tale approccio potrebbe portare in termini di capacità di affrontare la calura e la siccità estiva (Paris et al., 2019). Quando è presente, l'*agroforestry* nell'area mediterranea si focalizza sulla compresenza di seminativi e ulivi (42.86%), querce (21.43%), meli (10.1%) e altri alberi da frutto (10.7%) (Mosquera-Losada et al., 2022). Si tratta di un modello adottato soprattutto in Basilicata, Campania e Toscana (Mosquera-Losada et al., 2022).

Il recupero dell'agroforestazione potrebbe aprire a nuove possibilità colturali relative all'introduzione sotto gli oliveti e i frutteti di piante medicinali, di colture tipiche del luogo con potenziale valore economico o di specie in grado di attrarre gli insetti impollinatori, nonché alla volontà di sfruttare i sistemi agroforestali per migliorare il paesaggio e valorizzare il potenziale turistico delle aree rurali (Paris et al., 2019).



## 2.6 Aridocoltura

Le regioni aride e semiaride sono un ecosistema chiave del bacino Mediterraneo, di cui rappresentano un'elevata percentuale della superficie complessiva, per lo più dedicata all'agricoltura (Moreno-Jiménez et al., 2021). La crescente desertificazione di tali aree (vedi paragrafo 2.3.3) unita all'elevato fabbisogno idrico dell'attività agricola (vedi paragrafo 2.3.4) mette perciò a rischio il mantenimento delle rese colturali e di conseguenza della sicurezza alimentare della zona. A causa della carenza di acqua (stagionale o continuativa) a cui queste regioni sono sottoposte, il suolo presenta in genere bassi livelli di umidità, sostanza organica, attività biologica e fertilità. Tali caratteristiche aumentano la probabilità di incorrere in problemi di compattamento del suolo, erosione, salinizzazione, desertificazione e degradazione generale, con conseguenze negative sulla capacità produttiva dell'area (Arrúe et al., 2019).

L'aridocoltura nasce dunque nel tentativo di ideare una soluzione in grado di ridurre i fabbisogni idrici delle colture, pur mantenendo elevate le rese colturali. Il termine aridocoltura indica infatti un insieme di pratiche che consentono di ottenere una produzione alimentare soddisfacente in ambienti caratterizzati da piogge scarse o pressoché assenti e suoli con proprietà chimico-fisiche non ottimali (es. troppo sabbiosi o argillosi, degradati, ...), facendo affidamento unicamente sulle precipitazioni e sulle riserve di acqua verde che si formano in seguito ad esse (Stewart, 2016; Lovelli, 2019). Tali pratiche si focalizzano su tre aspetti principali:

1. aumentare le riserve idriche a cui le colture possono accedere, migliorando la capacità del suolo di immagazzinare l'acqua piovana e ampliando la porzione di terreno raggiungibile dall'apparato radicale delle piante (Stewart, 2016);
2. ridurre le perdite di acqua dal terreno per scorrimento superficiale o evapotraspirazione grazie a tecniche quali la pacciamatura, la sarchiatura<sup>28</sup> o l'installazione di frangivento vivi o inerti che proteggono il suolo dalla siccità e dall'erosione causata dal vento (Lovelli, 2019);
3. impiegare specie e varietà arido-resistenti, che spesso corrispondono alle varietà autoctone, evolute in modo da adattarsi al meglio alle condizioni ambientali locali (Arrúe et al., 2019).

---

<sup>28</sup> Lavorazione superficiale del suolo (3-4 cm di profondità) che, isolando i canali sotterranei formati da radici e microrganismi, interrompono la risalita dell'acqua che altrimenti avverrebbe per capillarità, aumentando la capacità del terreno di trattenere l'umidità.

Tra tutte le possibili soluzioni attuabili, *«the most important management practice that has a positive effect on increasing water use efficiency is keeping the soil covered to reduce evaporation from the soil surface»* [Stewart, 2016, p. 7]. È quindi fondamentale utilizzare colture di copertura o materiali quali residui colturali, paglia, fieno, ramaglie, ma anche appositi teli (utilizzati soprattutto nelle zone in cui i residui colturali prodotti sono insufficienti per coprire il terreno; Stewart, 2016) per realizzare una pacciamatura che non lasci mai il terreno scoperto. L'esposizione diretta del suolo all'aria, specialmente in presenza di vento, consentirebbe infatti alle correnti d'aria di continuare ad asciugare lo strato più superficiale del terreno, riducendone le riserve idriche. Assieme all'umidità, l'azione del vento porta inoltre con sé parte del suolo, specialmente quando non è formato da aggregato grandi e stabili, riducendo la materia organica (Arrúe et al., 2019). Il mantenimento della materia organica è indispensabile per la salute del suolo (vedi paragrafo 2.3.3), in particolare negli ambienti aridi e semiaridi, in cui è fondamentale la capacità di resistere all'erosione e alla compattazione e di immagazzinare l'acqua in profondità.

L'accumulo di acqua negli strati più profondi del suolo è un asset prezioso, poiché *«it stimulates the development of a deep root system for greater water extraction from the soil, therefore reducing evaporation losses»* [Arrúe et al., 2019, p. 536]. Le pratiche tradizionali di gestione dei suoli aridi prevedono di effettuare frequenti lavorazioni del terreno che, interrompendo i canali attraverso cui l'acqua sale in superficie, ne riducono l'evaporazione (Lovelli, 2019). Si deve tuttavia tenere presente che ogni lavorazione profonda del terreno aumenta la velocità di decomposizione della materia organica che viene esposta all'aria (Stewart, 2016). Prima di effettuare lavorazioni eccessive è pertanto necessario valutare attentamente i costi e i benefici ottenibili da tale attività, quando possibile ripiegando su operazioni meno invasive. Indispensabile è infine il controllo delle erbe spontanee, dal momento che per svilupparsi sottraggono acqua e nutrienti alla coltura principale (Lovelli, 2019).

Un notevole vantaggio di questa pratica è dato dal sapore dei prodotti ottenuti, che è in genere più intenso in virtù della minor percentuale d'acqua contenuta al loro interno. Si verifica inoltre una riduzione del rischio di infezioni fungine, dal momento che la siccità superficiale del terreno ne inibisce la crescita.

I principali svantaggi riguardano invece (Arrué et al., 2019):

- la resa inferiore rispetto alle colture irrigate, dovuta alla minor densità di semina necessaria a minimizzare la competizione tra le singole piante;
- la possibilità di utilizzare solo le specie capaci di sopportare stress idrici moderati o elevati. Esistono a tal proposito apposite tecnologie che, attraverso i cosiddetti studi  $G \times E \times M$ , abbinano i tratti fisiologici della coltura (G) e le modalità di gestione (M) agli ambienti più adatti (E) (Rodriguez, de Voil e Power, 2016);
- la necessità di favorire le colture a ciclo autunno-primaverile, che sfruttano al meglio il periodo più freddo e piovoso dell'anno, mentre la coltivazione in estate (ciclo primaverile-estivo) è possibile solo in contesti non troppo aridi o con varietà particolarmente resistenti;
- l'elevata incertezza relativa alle condizioni atmosferiche e alle interrelazioni tra i diversi elementi del sistema, che non consentono di effettuare previsioni attendibili a medio-lungo termine. Per aumentare la capacità di raccogliere informazioni ed elaborarle, riducendo così la complessità di gestione, è possibile ricorrere a modelli previsionali appositamente progettati per contribuire alla creazione di sistemi agricoli produttivi e resilienti (Rodriguez, de Voil e Power, 2016). Tali modelli consentono di gestire al meglio l'incertezza e i rischi, ad esempio ricorrendo a «*long-term climate records and seasonal climate forecasts*» [Rodriguez, de Voil e Power, 2016, p. 245] per prevedere le condizioni atmosferiche future.

Utilizzare strumenti tecnologici che aumentano la conoscenza del sistema e forniscono supporto alle decisioni è indispensabile per aumentare la flessibilità dell'azienda agricola e per rispondere in modo efficiente ai cambiamenti climatici, assicurandone la sostenibilità economica (Rodriguez, de Voil e Power, 2016).

## 3. Innovazioni tecnologiche nel settore agricolo

### 3.1 Le principali innovazioni e il loro scopo

L'innovazione è un driver importante «*per rispondere in maniera adeguata e tempestiva ai continui mutamenti del mercato, alla crescente pressione competitiva estera nonché al cambiamento dei modelli e processi produttivi sempre più vocati alla sostenibilità ambientale e sociale*» [Nomisma, 2020, p. 54] che stanno coinvolgendo il settore agricolo. Affinché ciò accada è tuttavia indispensabile che l'innovazione, in accordo con i principi della *twin transition* (vedi paragrafo 1.6), mantenga il focus sui problemi ambientali e sociali del nostro tempo e rispetti i più elevati standard di sostenibilità, non limitandosi a imporre un modello standardizzato che giova soltanto alle grandi aziende che dispongono dei capitali necessari a effettuare ingenti investimenti nella tecnologia e nel suo sviluppo. L'innovazione e la digitalizzazione del settore agricolo infatti, se ben indirizzate, possono contribuire a preservare l'ambiente e migliorare le condizioni lavorative e di vita di tutti gli agricoltori (Maffezzoli et al., 2022). Le principali tecnologie utilizzate in ambito agricolo che verranno prese in considerazione nel corso del presente capitolo sono:

- robot, sensori e *Internet of Things*, che consentono di monitorare le condizioni ambientali e i parametri fisico-chimici delle colture, di fornire informazioni precise in tempo reale e di automatizzare lo svolgimento delle operazioni (vedi paragrafo 3.2);
- l'intelligenza artificiale, che consente di analizzare i dati raccolti ed effettuare simulazioni e previsioni, al fine di migliorare la qualità e la velocità delle attività di *decision-making* (vedi paragrafo 3.3);
- *blockchain* e *smart contracts*, utilizzati al fine di garantire l'integrità dei dati e rendere più efficienti le transazioni (vedi paragrafo 3.4).

## 3.2 Agriculture automation system

### 3.2.1 La robotica in agricoltura

I robot sono «*perceptive machines that can be programmed to perform specific tasks, make decisions and act in real time*» [Bechar e Vigneault, 2016, p. 96]. Vengono introdotti nel settore con lo scopo di sostituire i pesanti macchinari dall'elevato fabbisogno energetico e dagli ingenti costi di manutenzione e utilizzo che caratterizzavano l'automazione agricola negli anni '90 e che trovano tuttora ampia diffusione (Bechar e Vigneault, 2016).

I principali vantaggi apportati dalla robotica riguardano la possibilità di utilizzare macchinari più maneggevoli, leggeri e intelligenti, capaci di offrire prestazioni migliori in termini di sostenibilità ambientale e qualità della produzione e di ridurre i costi operativi (Edan, Adamides e Oberti, 2023). Il peso ridotto e le dimensioni contenute che li caratterizzano consentono infatti di diminuire il consumo energetico, di ridurre i tempi di movimento grazie alla maggiore manovrabilità, di minimizzare la compattazione del suolo causata dal passaggio dei macchinari in campo e di migliorare la precisione di esecuzione delle operazioni. Per massimizzarne la flessibilità di utilizzo, molti prototipi di robot agricoli hanno inoltre una configurazione variabile di carreggiata e altezza. Si tratta di un elemento che deve essere gestito con cautela, dal momento che può minare la capacità del robot di rimanere in equilibrio nei terreni con elevata pendenza, specialmente quando il baricentro viene innalzato eccessivamente (Pedersen et al., 2017).

L'attuale diffusione dei robot agricoli si concentra soprattutto sulle coltivazioni in serra o in ambiente controllato e su quei prodotti che presentano elevato valore unitario, bassi volumi di produzione e ingente impiego di manodopera. Ciò consente da un lato di operare in ambienti più stabili e prevedibili, in cui la complessità di gestione è ridotta ed è possibile ricorrere a soluzioni con mobilità limitata (es. robot che si muovono su binari o rotaie) (Lowenberg-DeBoer et al., 2020), e dall'altro di giustificare l'investimento economico iniziale in virtù del risparmio ottenibile dall'automazione del lavoro (Grieve et al., 2019). Per ampliare l'ambito di adozione anche alle *commodity* come cereali e legumi, le soluzioni proposte devono invece essere economicamente

accessibili anche a quelle imprese che non dispongono di elevati capitali da investire a causa della bassa redditività della loro attività.

Affinché sia applicabile in campo aperto, un sistema automatizzato deve inoltre essere capace di far fronte all'elevata complessità e ai continui cambiamenti che caratterizzano i prodotti biologici e l'ambiente. I prodotti agricoli sono infatti organismi viventi con un alto grado di variabilità derivante dalle diverse condizioni ambientali, di crescita e genetiche che li caratterizzano, mentre l'ambiente circostante «*is complex and loosely structured with high variations between seasons, fields, and even within the same field*» [Edan, Adamides e Oberti, 2023, p. 1056].

A ciò si aggiunge poi la necessità di soluzioni abbastanza robuste da poter operare in condizioni ostili, caratterizzate dalla presenza di polvere, fango, umidità e temperature elevate, e di componenti «*washable and reliable against leakage of contaminations.*» [Edan, Adamides e Oberti, 2023, p. 1056] in modo da garantire la *food safety*. Infine, rivestono particolare importanza gli aspetti legati alla sicurezza di utilizzo e all'affidabilità dei sistemi, dal momento che devono risultare adeguati all'utilizzo da parte di personale non specializzato in materia (Edan, Adamides e Oberti, 2023). A causa della complessità di progettazione di un sistema che rispetti tutti i parametri stabiliti, l'applicazione commerciale delle soluzioni di automazione è ad oggi limitata.

Ogni robot è composto da un *hardware* – che gli garantisce la capacità di eseguire un set di operazioni di manipolazione e/o movimento predeterminate grazie ai componenti elettrici, meccanici e idraulici che lo compongono – e da una controparte operativa e di controllo composta di parti elettroniche e da un'interfaccia *software*, che garantisce la flessibilità e l'indipendenza che caratterizza i sistemi robotici (Fouda, 2021). L'operatività congiunta di questi due sistemi fornisce ai robot le abilità di base necessarie al corretto svolgimento delle operazioni agricole, che sono (Fouda, 2021; Edan, Adamides e Oberti, 2023):

- abilità sensoriali: un insieme di sensori misura le proprietà fisiche e biologiche del sistema (piante, suolo e ambiente) per fornire dati ai DSS e per rilevare gli ostacoli ambientali e prevenire le collisioni con persone, alberi e strutture. È di fondamentale importanza garantire un elevato livello qualitativo dei dati raccolti, poiché ciò aumenta la capacità di identificare le criticità e soddisfare i fabbisogni delle colture;

- abilità intellettuali, garantite dai moduli relativi alla memoria e alle attività di *decision making*, che processano i dati ottenuti dai sensori per individuare la risposta più adeguata alla situazione specifica. Quanto più i dati di partenza sono accurati e gli algoritmi di elaborazione sono validi, tanto migliori saranno le decisioni che il sistema è in grado di suggerire o prendere;
- abilità meccaniche, garantite da un attuatore che controlla forza e movimento del robot, mettendo in atto le decisioni prese. La precisione nello svolgimento delle operazioni meccaniche è imprescindibile per garantire una qualità dei prodotti agricoli sufficiente a ottenere una *shelf life* adeguata alle esigenze, specialmente per i frutti e gli ortaggi più delicati o che devono affrontare lunghi viaggi per giungere ai consumatori (Bechar e Vigneault, 2016).

I requisiti richiesti a un robot per operare in modo completamente autonomo sono molteplici e complessi. La possibilità di avviare una gestione totalmente automatizzata dell'azienda agricola appare pertanto ad oggi ancora lontana. Per un primo periodo è probabile che umani e robot si troveranno perciò a collaborare e suddividersi i compiti. Questa collaborazione viene spesso indicata con il termine 'Co-robotics' o 'Cobots' (Lowenberg-DeBoer et al., 2020).

## **Applicazioni**

I robot agricoli sono coinvolti in tutte le operazioni in campo che seguono il ciclo di sviluppo delle colture: preparazione del suolo, semina, irrigazione, fertilizzazione, controllo delle erbe spontanee, protezione delle colture, raccolta e trasporto. Alcuni robot sono multifunzionali e, grazie alla possibilità di montare attrezzi differenti alle loro estremità, sono adatti a svolgere più operazioni, mentre altri sono specializzati in una sola attività. Nonostante le similarità di base (necessità di raccogliere dati, elaborarli, prendere una decisione e attuarla), le funzionalità di ogni robot sono quindi sviluppate in modo specifico in relazione al suo campo di applicazione.

I robot utilizzati per il controllo automatizzato delle erbe spontanee sfruttano ad esempio tecnologie quali il GPS, la *machine vision* (vedi paragrafo 3.3) e l'*hyperspectral imaging*<sup>29</sup> per individuare le specie da rimuovere anche quando queste sono mescolate

---

<sup>29</sup> L'*imaging* iperspettrale (o *hyperspectral imaging*) è una tecnica di analisi delle immagini in grado di raccogliere ed elaborare informazioni provenienti da tutto lo spettro elettromagnetico e non solo dai

alla coltura principale. A ciò si affianca una sistema che si occupa della rimozione di precisione delle infestanti attraverso interventi meccanici, termici, chimici o elettrici.

I robot utilizzati per nebulizzare sostanze sulle colture combinano invece sistemi di navigazione, di individuazione dell'obiettivo e di applicazione (Edan, Adamides e Oberti, 2023) e possono essere suddivisi in macchinari terrestri (*ground-based*) e aerei (*aerial*). I sistemi di applicazione terrestri sono per lo più «*tractor-mounted systems, which have low profiles and can better control application performance*» [Huang e Brown, 2019, p. 290], mentre quelli aerei possono essere posizionati su aerei ad ala fissa, elicotteri o droni. I sistemi aerei hanno il vantaggio di coprire rapidamente vaste aree indipendentemente dalle condizioni del campo (pendenze elevate, tassi di umidità non ottimali per il passaggio di mezzi pesanti, etc.), ma le loro prestazioni sono influenzate dalle condizioni meteorologiche e dalla dinamica dell'aria. La loro attività deve pertanto essere programmata in modo da compensare i parametri rilevati in merito a velocità del vento, pressione atmosferica, etc. Ciò richiede una comunicazione immediata tra sensori che raccolgono i dati necessari, algoritmi che elaborano tali dati e regolano l'attività di conseguenza e attuatori che controllano l'applicazione degli input sulla base delle indicazioni ricevute da remoto. La difficoltà di ottenere una risposta immediata ai comandi ricevuti complica ad oggi lo sviluppo delle soluzioni aeree, che si trovano ancora nella fase di ricerca e prototipazione (Huang e Brown, 2019).

L'utilizzo di robot apre inoltre a nuove possibilità di gestione delle coltivazioni, tra cui la semina precoce delle colture e la risemina localizzata. La semina precoce, che consente in genere di aumentare le rese (Pedersen et al., 2017), è possibile grazie alle ridotte dimensioni dei robot agricoli, che consentono loro di passare in campo quando il suolo è ancora troppo umido per sostenere il peso dei macchinari convenzionali (Lowenberg-DeBoer et al., 2020). La risemina localizzata si applica invece in caso di germinazione ridotta o quando le piante appena emerse vengono distrutte da inondazioni, insetti o altri problemi. Si tratta di un'azione impossibile da compiere utilizzando i macchinari convenzionali, poiché i danni alla coltura sarebbero troppo ingenti. L'utilizzo della *machine vision* consentirebbe inoltre di automatizzare anche la fase di identificazione delle zone in cui la risemina è necessaria. L'insieme di queste due pratiche può aumentare le rese complessive fino al 5% – anche se il dato varia in

---

colori primari, al contrario dei sistemi RGB. Utilizzata assieme ad appositi algoritmi consente di identificare materiali e oggetti con elevata precisione.



relazione alla specifica annata –, mentre per raggiungere il *break even point* è sufficiente un aumento del 2% circa (Pedersen et al., 2017).

Gli studi che riguardano l'introduzione di soluzioni robotiche in ambito agricolo non sempre considerano la sostenibilità economica delle innovazioni analizzate, nonostante si tratti di aspetto essenziale, poiché «*without profitability crop robots will not be widely used and the expected environmental, social and food safety benefits will not be achieved*» [Lowenberg-DeBoer et al., 2020, p. 280]. Le ricerche condotte in materia evidenziano la possibilità di ottenere un effetto positivo sulla redditività dell'attività agricola, anche se il risultato finale dipende da fattori quali il costo del lavoro agricolo nell'area, la regolamentazione nazionale e internazionale (ad esempio, se per ragioni di sicurezza un addetto umano deve sempre trovarsi in campo quando un robot esegue un lavoro, il vantaggio economico si riduce drasticamente), il periodo di raccolta della coltura (più è lungo, più adottare una soluzione automatizzata è in genere conveniente), etc. (Lowenberg-DeBoer et al., 2020). È importante tuttavia notare che la maggior parte delle ricerche effettuate in materia è stata condotta con i pochi dati ad oggi disponibili, facendo riferimento per lo più a simulazioni e tecniche di *partial budgeting*<sup>30</sup>.

Per rendere più accessibili le soluzioni proposte anche ai piccoli imprenditori agricoli, i produttori di robot possono inoltre valutare un modello del tipo *Pay Per Use* in cui gli agricoltori prenotano i servizi di cui hanno bisogno attraverso internet e il robot più vicino si reca in campo e svolge le operazioni stabilite senza che sia necessario acquistare le attrezzature utilizzate. Una proposta del genere ridurrebbe sia l'investimento iniziale necessario, sia il rischio legato all'acquisto di macchinari che potrebbero diventare rapidamente obsoleti in questa prima fase di sviluppo (Lowenberg-DeBoer et al., 2020).

Una volta appurata l'effettiva bontà delle soluzioni robotiche, è necessario inoltre trovare un modo per superare le altre difficoltà che impediscono la loro diffusione su vasta scala, come la complessità percepita da parte dei lavoratori agricoli. L'intervento può a tal proposito essere bidirezionale: da un lato è necessario puntare su attività di formazione che consentano ai lavoratori di comprendere sfruttare a pieno le

---

<sup>30</sup> Il *partial budgeting* è uno strumento utilizzato per valutare l'impatto economico di un cambiamento nelle fasi di pianificazione e *decision-making*, che considera unicamente i costi e i ricavi emergenti e cessanti in seguito alla sua introduzione.

potenzialità della tecnologia, dall'altro è possibile migliorare l'interfaccia delle soluzioni proposte, rendendole di più semplice utilizzo (Bellon Maurel e Huyghe, 2017).

Lo sviluppo e l'adozione di soluzioni robotiche per l'agricoltura sono caldeggiati da politiche come la *twin transition* in virtù dei loro potenziali effetti positivi sull'ambiente e sulla società. I principali benefici ambientali connessi all'utilizzo della robotica riguardano la riduzione dell'utilizzo di pesticidi, la minor compattazione del suolo grazie alla riduzione dei mezzi pesanti in campo e la capacità di coltivare attorno ad alberi, rocce, ruscelli e altre caratteristiche del paesaggio naturale, preservandone le peculiarità (Lowenberg-DeBoer et al., 2020). La loro diffusione ridurrebbe inoltre il vantaggio dei campi ampi e rettangolari nella coltivazione di *commodity*, rendendo più competitiva la produzione in aree (come l'Italia) che presentano suoli di qualità e facile accesso ai mercati, ma anche campi coltivabili di piccole dimensioni e forme irregolari, difficilmente sfruttabili appieno con i grandi macchinari agricoli convenzionali.

La flessibilità e le dimensioni ridotte dei robot agricoli consentono inoltre di mescolare colture diverse – che saranno poi raccolte separatamente grazie a selezionatori meccanici o ottici – o di unire colture e copertura arborea, migliorando la gestione della biodiversità e la resilienza dell'ecosistema (Bellon Maurel e Huyghe, 2017). Dai dati finora raccolti non è chiaro tuttavia se utilizzare robot agricoli sia il modo più efficiente di ottenere tali benefici e sono pertanto necessarie ulteriori ricerche che comparino la riduzione dell'impatto ambientale ottenibile attraverso tali tecnologie e il loro impatto complessivo con quelli che caratterizzano altre modalità di gestione.

L'impatto sulla sostenibilità sociale del comparto agricolo riguarda invece principalmente la possibilità di sollevare gli operatori dalle operazioni più faticose e/o dannose per la salute, riducendo i tempi di esposizione a sostanze potenzialmente pericolose (Checchinato et al., 2023). Questo, oltre a rendere più attrattivo il lavoro nel settore agricolo e modificarne la struttura (Lowenberg-DeBoer, 2020), consentirebbe agli agricoltori di dedicare parte del proprio tempo allo svolgimento di attività di conoscenza e cura del territorio a maggior valore aggiunto (Ditzler e Driessen, 2022).

## **Limiti**

Un importante limite delle soluzioni robotiche proposte finora è il modello di agricoltura per cui sono state sviluppate. Mentre ci si aspetta che i robot rivoluzionino le

attività agricole in campo, «*these visions remain wedded to optimizing monocultural farming systems. Meanwhile there is little pull for automation from ecology-based, diversified farming realms*» [Ditzler e Driessen, 2022, p. 1]. Dal momento che sono ampiamente riconosciuti gli ingenti danni ambientali che l'agricoltura intensiva basata su monoculture sta provocando al nostro pianeta, sarebbe invece opportuno sviluppare delle soluzioni tecnologiche che non si limitino a migliorare l'efficienza operativa all'interno del modello agricolo convenzionale, ma che contribuiscano a rimodellare radicalmente il modo in cui il cibo è prodotto.

Le caratteristiche chiave dei robot agricoli già presentate (peso ridotto, modularità, multifunzionalità, mobilità, autonomia e capacità di apprendimento) ben si adeguano alle maggiori complessità ed eterogeneità auspicabili per la salute degli ecosistemi (Ditzler e Driessen, 2022). La difficoltà di intraprendere questa strada è in parte influenzata dal fatto che la gestione delle consociazioni pone molte più sfide in termini tecnici e agronomici rispetto a una monocultura, mentre in parte ciò è legato alla diffusa diffidenza nei confronti della tecnologia da parte degli agricoltori più vicini ai temi della sostenibilità ambientale (Bellon Maurel e Huyghe, 2017). Ciò nonostante, gli agricoltori interessati ad aumentare la diversità nei loro campi citano l'assenza di strumenti appropriati come una barriera sostanziale che impedisce loro di cambiare modalità di coltivazione e il bisogno di sviluppare tali strumenti appare pertanto presente e sentito (Ditzler e Driessen, 2022).

Affinché i robot sviluppati siano in grado di gestire la maggiore complessità risultante, è essenziale sviluppare un sistema di comunicazione e coordinamento – noto come *Internet of Things* – che coinvolga i diversi dispositivi in campo e consenta loro di trasmettere e ricevere dati in tempo reale e di utilizzarli per indirizzare e regolare le operazioni agricole svolte.

### 3.2.2 *Internet of Things*

Il termine *Internet of Things* (IoT) è stato introdotto nel 1999 da Kevin Ashton per descrivere un sistema in cui molteplici oggetti (*Things*) sono connessi tra loro tramite reti cablate o wireless (es. Internet) e sono in grado di interagire l'uno con l'altro e di cooperare per raggiungere un obiettivo comune (Edan, Adamides e Oberti, 2023). L'IoT connette infatti gli oggetti reali con il mondo virtuale, «*enabling anytime, anywhere*

*connectivity for anything and not only for anyone*» [Bucci, Bentivoglio e Finco, 2018, p. 114], creando un network diffuso che comprende persone, animali, oggetti di ogni tipo e dimensione (computer, smartphone, droni, sensori, attuatori, ...) e interi sistemi (es. edifici), ciascuno identificato da un apposito codice univoco (Patel e Patel, 2016; Colizzi et al., 2020). Grazie a questo metodo di identificazione, le comunicazioni e il trasferimento di dati tra i nodi della rete può avvenire anche in assenza di intervento umano, tramite delle connessioni dirette *machine-to-machine* (Elijah et al., 2018). Per fare ciò, l'*Internet of Things* integra diverse tecnologie già esistenti all'interno di uno stesso network (es. RFID<sup>31</sup>, LAN e WAN<sup>32</sup>, *cloud computing*, ...), sfruttando le interdipendenze che esse presentano e le nuove possibilità a cui aprono (Elijah et al., 2018; Muench et al., 2022). Le principali attività svolte da tali sistemi riguardano (Patel e Patel, 2016):

- l'acquisizione delle informazioni contestuali, che avviene ad opera di appositi sensori, per lo più sensori di posizione, ottici, meccanici, elettrochimici e di flusso d'aria (Elijah et al., 2018);
- l'elaborazione delle informazioni raccolte. Un oggetto appartenente alla rete che è in grado di elaborare dati relativi al proprio stato o a quello dell'ambiente circostante e di prendere delle decisioni più o meno complesse in base alle informazioni così ottenute è definito *smart*. Questi oggetti consentono di analizzare un'enorme quantità di dati – strutturati e non – provenienti da molteplici fonti, tra i quali dati meteorologici storici, previsioni meteo, dati sulle caratteristiche del suolo e immagini del campo e di estrarne le informazioni necessarie a supportare l'organizzazione e ottimizzarne le attività decisionali con appositi consigli e approfondimenti (Colizzi et al., 2020);
- la sicurezza e la privacy del sistema, senza le quali la diffusione dell'IoT verrebbe fortemente limitata dall'assenza di fiducia da parte dei potenziali utilizzatori.

---

<sup>31</sup> I tag RFID (*Radio Frequency Identification*) sono microchip che contengono dati sulla natura e la localizzazione dell'entità a cui vengono associati e che possono trasmettere tali informazioni a dei lettori posti nelle vicinanze sotto forma di segnali radio a corta distanza. I lettori trasmettono quindi i dati ricevuti a un *host* computer, che ne consente la lettura, l'archiviazione, la comunicazione e l'analisi. Sono uno degli strumenti più spesso utilizzati nella gestione della *supply chain*, anche grazie al buon rapporto costo-benefici che presentano (Laudon e Laudon, 2022).

<sup>32</sup> Le LAN (Local Area Network) sono reti informatiche che presentano un'estensione spaziale limitata (es. un'azienda, un'abitazione, un complesso di edifici adiacenti, ...), mentre le WAN (*Wide Area Network*) coprono invece aree geografiche molto vaste.

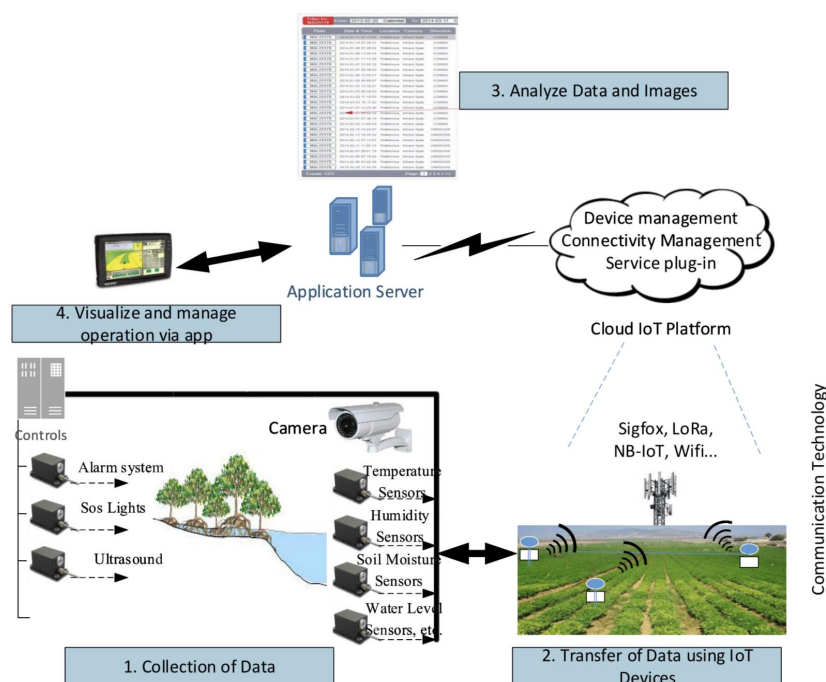
I benefici che il settore agricolo potrebbe trarre dall'introduzione dell'IoT sono tangibili e sono principalmente connessi alla riduzione del costo di acquisizione dei dati, alla maggior capacità di comprendere gli eventi in corso e al miglioramento della qualità decisionale (Brewster et al., 2017). L'impiego di sensori, attuatori, droni, robot agricoli, sistemi di navigazione, satelliti per il monitoraggio remoto, sistemi di gestione dei dati in cloud e di tecnologie per l'analisi dei dati tutti connessi tra loro all'interno di una stessa rete fornisce infatti migliori strumenti a supporto delle decisioni e maggiori possibilità di automazione che potrebbero significativamente cambiare il lavoro nel settore (Edan, Adamides e Oberti, 2023).

Questi dispositivi IoT producono infatti dei flussi di dati in tempo reale che, se combinati con altre fonti (dati aziendali, dati geospaziali, immagini, etc.), possono essere utilizzati per realizzare delle analisi puntuali sull'andamento dell'azienda agricola. Inoltre, l'integrazione di diverse serie storiche di dati può servire a creare dei modelli previsionali sempre più utili e accurati (Bimonte et al., 2021). I quattro principali componenti di un sistema agricolo IoT sono (Elijah et al., 2018) (vedi figura 3.1):

- dispositivi IoT: sistemi integrati che interagiscono con sensori e attuatori e richiedono una connessione wireless. Sono utilizzati per monitorare e misurare variabili e fattori critici per la gestione dell'attività agricola (es. contenuto di umidità e nutrienti del suolo, dati meteorologici). Per essere adeguati all'utilizzo agricolo devono essere energeticamente e computazionalmente efficienti, trasportabili, durevoli, affidabili, economicamente accessibili e devono possedere una memoria adeguata agli scopi;
- tecnologie della comunicazione, che possono variare per standard utilizzato (comunicazioni a corto o lungo raggio), frequenza dello spettro utilizzata (banda con o senza licenza) e per scenario di applicazione (dispositivi che fungono da nodi - trasmettendo pochi dati a corta distanza - o da reti di *backhaul*, che supportano volumi di dati elevati e lunghe distanze);
- Internet, che costituisce il livello centrale della rete, dove vengono definiti i percorsi per trasportare e scambiare dati tra le diverse sottoreti. La connessione a Internet dei dispositivi IoT consente ai dati di essere accessibili ovunque e in qualsiasi momento;
- unità per l'elaborazione e l'archiviazione dei dati. L'agricoltura *data-based* richiede la gestione di enormi moli di dati dinamici e complessi, che possono

prendere la forma di testi, immagini, audio o video. L'utilizzo del *cloud computing*, reso possibile dalla connessione a Internet, consente di gestire tali dati senza necessità di acquistare le costose infrastrutture altrimenti richieste.

**Figura 3.1 - Principali componenti di un'architettura IoT**



FONTE: Elijah et al. [2018, p. 3759]

## Applicazioni in campo

Le principali applicazioni dell'*Internet of Things* in agricoltura riguardano il monitoraggio dei campi e delle colture, la tracciabilità e la rintracciabilità dei prodotti<sup>33</sup>, l'utilizzo di macchinari agricoli e robot, la produzione in serra e la gestione delle attività di stoccaggio e trasporto.

La produzione agricola è influenzata da numerosi fattori, tra i quali la quantità di pioggia, la temperatura, l'umidità, la radiazione solare, la presenza di parassiti e le attività umane; il loro costante monitoraggio consente perciò di comprendere meglio i

<sup>33</sup> La distinzione tra tracciabilità (*tracking*) e rintracciabilità (*tracing*) dei prodotti riguarda la direzione delle informazioni raccolte. Infatti, mentre la tracciabilità affianca il processo produttivo e le informazioni raccolte partono dalle materie prime e terminano con il prodotto finito, la rintracciabilità procede in senso opposto, ripercorrendo il processo produttivo una volta terminato, iniziando dal prodotto finito e terminando con le materie prime utilizzate per la sua realizzazione.

pattern e i processi che caratterizzano la crescita delle colture, minimizzando i rischi e massimizzando i profitti. Avere costantemente accesso a una panoramica aggiornata della situazione consente infatti di ridurre le perdite alimentari, nonché di migliorare la qualità della produzione e di aumentare l'efficienza di impiego di risorse quali elettricità, acqua, etc., con ricadute positive anche sull'ambiente (Patel e Patel, 2016; Bimonte et al., 2021).

Le informazioni sulla radiazione solare consentono ad esempio di comprendere se le piante sono correttamente esposte al sole o se invece sono sotto- o sovraesposte (Elijah et al., 2018), mentre conoscere e ottimizzare il contenuto di umidità del suolo permette di ridurre il rischio che le piante sviluppino delle malattie o di contenere la proliferazione di funghi o altri contaminanti microbici, rendendo più semplice anche l'adozione di pratiche agricole ambientalmente desiderabili quali la pacciamatura e il compostaggio (Patel e Patel, 2016). È inoltre possibile combinare un attuatore posto su un elettrovalvola con un *software* che elabora le previsioni meteorologiche e i dati sull'umidità del suolo ottenuti da un sensore igrometrico posizionato all'interno del campo per automatizzare l'apertura e la chiusura dell'impianto di irrigazione in base ai livelli misurati di umidità del suolo e alle piogge previste nei giorni successivi, minimizzando l'impiego di acqua (Colizzi et al., 2020).

È infine possibile sfruttare le reazioni naturali di difesa delle piante per minimizzare l'utilizzo dei pesticidi di sintesi. Quando le piante circostanti o le micorrize nel sottosuolo rilasciano determinate sostanze, atte a segnalare la presenza di patogeni nell'ambiente, le piante sono infatti in grado di effettuare «*defensive physical changes to plant tissue and generate phenolic insect-toxins, e.g. tannins or furanocoumarins*» [Grieve et al., 2019, p. 119] per proteggersi da tali attacchi. Un sistema automatizzato in grado di rilevare i patogeni e mimare i processi di segnalazione della loro presenza potrebbe pertanto innescare la risposta naturale di difesa delle colture, riducendo la necessità di ricorrere a pesticidi di sintesi, pur non sostituendoli completamente (Grieve et al., 2019).

La tracciabilità e la rintracciabilità dei prodotti agricoli lungo la catena di fornitura consentono ai consumatori di conoscere la storia del prodotto, aumentando la loro fiducia in materia di sicurezza alimentare (Elijah et al., 2018). Tra i fattori che possono essere tracciati vi sono l'ambiente di coltivazione, le condizioni di produzione, lo stato di salute della coltura nel tempo, i fattori di gestione, le condizioni di stoccaggio

e trasporto e il *time-to-market*. Al fine di garantire l'integrità delle informazioni comunicate e la loro provenienza, i dati raccolti dai sensori che compongono l'ecosistema IoT sono spesso inseriti in degli appositi registri distribuiti noti come *blockchain* (vedi paragrafo 3.4).

Per quanto riguarda l'integrazione di macchinari agricoli e robot con l'ecosistema IoT, da un lato le informazioni raccolte da sensori in campo e satelliti, se considerate congiuntamente, consentono di controllarne la traiettoria da remoto o di attivare sistemi di guida autonoma; dall'altro i macchinari stessi possono raccogliere ulteriori dati da utilizzare per la pianificazione delle operazioni agricole (Elijah et al., 2018). La migliore conoscenza delle condizioni ambientali, ottenuta grazie all'integrazione dei dati raccolti, consente inoltre di ottimizzare il microclima presente all'interno delle serre, massimizzando la quantità e la qualità dei prodotti agricoli ottenuti al loro interno, nonché di ridurre i consumi di energia e il lavoro necessario (Patel e Patel, 2016).

Un quantità elevata di prodotti agricoli vengono in genere persi a causa di una cattiva gestione delle condizioni di stoccaggio e trasporto. La presenza di temperature o livelli di umidità inadeguati, assieme alla contaminazione da parte di insetti, microrganismi o roditori possono infatti influenzare in negativo la qualità degli alimenti. Al fine di ridurre le perdite alimentari, è possibile allora utilizzare degli appositi sensori che monitorano le condizioni ambientali degli impianti di stoccaggio, avvisano l'agricoltore se rilevano la presenza di patogeni e prendono decisioni in merito all'ottimizzazione di parametri quali la temperatura e l'umidità (Elijah et al., 2018). Dei dati accurati sui livelli di prodotti stoccati consentono inoltre ai consumatori, con riferimento a quelle aziende agricole che hanno un canale di vendita diretto, di conoscere con precisione e tempestività i prodotti disponibili per l'acquisto o di essere avvertiti non appena il prodotto da loro desiderato è disponibile.

## **Limiti**

L'adozione dell'*Internet of Things* in ambito agricolo è ad oggi limitata principalmente dagli elevati investimenti e dalle competenze necessarie, dalla carenza di infrastrutture per la connettività nelle aree rurali, dalla limitata interoperabilità tra i moduli del sistema e dai conflitti nella definizione del modello di governance dei dati.



Ad oggi, implementare un sistema IoT non è un'azione semplice per le piccole e micro imprese che caratterizzano il tessuto agricolo italiano a causa degli elevati costi connessi a tale attività. Si tratta nello specifico di (Elijah et al., 2018):

- costi di installazione, che rappresentano l'esborso necessario all'acquisto dell'*hardware* utilizzato (dispositivi IoT, *gateway*, ...);
- costi di gestione, che comprendono elementi quali gli abbonamenti a servizi centralizzati o piattaforme IoT di raccolta dati; le spese per la gestione dei dispositivi IoT acquistati e per la condivisione di informazioni, nonché i costi connessi al consumo di energia e quelli di manutenzione.

La difficoltà di adozione è inoltre accentuata dalle elevate competenze tecniche necessarie, non sempre semplici da acquisire per una piccola azienda a conduzione familiare in un settore con margini di profitto particolarmente ridotti (Edan, Adamides e Oberti, 2023). A tal proposito, gli agricoltori si suddividono in due fazioni contrapposte: l'una è composta da quegli agricoltori che si muovono sulla base dell'esperienza pratica, ritenendo di non aver bisogno di tali tecnologie per svolgere al meglio il proprio lavoro e di non avere tempo per imparare a conoscerle e utilizzarle; mentre l'altra comprende quei giovani agricoltori tecnicamente alfabetizzati che collaborano con professionisti e appassionati di tecnologia per trovare le migliori applicazioni agricole delle innovazioni digitali più promettenti, con lo scopo di rendere più interessante e soddisfacente il lavoro nel settore (Brewster et al., 2017). Concentrarsi sull'istruzione e la formazione dei lavoratori agricoli, aumentando la dimensione di questo secondo gruppo, è perciò di vitale importanza affinché queste tecnologie siano utilizzate al meglio.

Migliorare la formazione dei lavoratori agricoli consente inoltre di ridurre gli investimenti economici necessari all'adozione di un sistema IoT. Ci sono infatti «*two possible ways for developing or concretely using an IoT system dedicated to smart agriculture: acquiring a technology developed ad hoc or tapping into the countless opportunities that the open source world offers*» [Colizzi et al., 2020, p. 9]. Mentre il primo metodo – l'acquisto di una soluzione progettata *ad hoc* – richiede ingenti investimenti ed è quindi ad appannaggio delle realtà più grandi e strutturate, la seconda opzione – costruirla da sé partendo da dispositivi con software *open source* quali Arduino o Raspberry Pi – è praticabile anche da piccole imprese con un budget limitato, purché possiedano le necessarie competenze.

Data l'elevata mole di dati da trasmettere e analizzare generata da un sistema IoT, è inoltre necessario affrontare la carenza di connettività che spesso caratterizza le aree rurali (es. reti ADSL e wi-fi di bassa qualità), costruendo le infrastrutture necessarie a gestire il traffico di dati che si verrebbe a creare se l'*Internet of Things* trovasse maggiore diffusione in ambito agricolo (Bimonte et al., 2021). Dato l'esponenziale aumento di volume dei dati generati dai sistemi IoT, è inoltre necessario disporre di strumenti capaci di gestirli ed estrarne informazioni utili. Uno strumento particolarmente utile in tal senso è rappresentato dagli algoritmi di intelligenza artificiale appositamente sviluppati (Subeesh e Mehta, 2021).

Un'ulteriore sfida è posta dalla natura stessa dell'*Internet of Things*: dal momento che non si tratta di una singola tecnologia, ma di un sistema composto da una molteplicità di elementi differenti che interagiscono tra loro e operano in modo coordinato sfruttando Internet come mezzo di comunicazione, è necessario che tutti i componenti del sistema utilizzino lo stesso standard o, in alternativa, una serie di standard compatibili tra loro. Il sistema deve perciò essere caratterizzato da interoperabilità, ossia i suoi componenti devono essere capaci di scambiarsi informazioni, nonché di comprendere e processare tali informazioni al fine di servirsene nella propria attività. L'interoperabilità deve essere (Elijah et al., 2018):

- tecnica, che riguarda lo sviluppo di protocolli e infrastrutture che consentano ai dispositivi IoT di comunicare;
- sintattica, associata con il formato dei dati trasmessi (es. *extensible markup language, XML; java script object notation, JSON; comma separated variables, CSV*)
- semantica, che ha a che fare con l'interpretazione dei dati trasmessi da parte degli umani coinvolti nel processo;
- organizzativa, che riguarda la capacità delle diverse aziende di trasmettere dati e utilizzare al meglio le informazioni ricevute.

Il rischio di non-interoperabilità delle soluzioni IoT è aumentato dalle previsioni del suo sviluppo come network «*heterogeneous, multi-vendors, multi-services and largely distributed*» [Patel e Patel, 2016, p. 6127].

La fondamentale rilevanza dei dati e la loro continua condivisione con altri attori o moduli del sistema IoT comportano inoltre degli inevitabili problemi in materia di governance e proprietà dei dati. Nonostante l'*Internet of Things* sia nato con l'ambizione di «*[empower] farmers with the decision tools and automation technologies that*

*seamlessly integrate products, knowledge and services for better productivity, quality, and profit*» [Elijah et al., 2018, p. 3758], i fornitori di *hardware* e *software* – che hanno in genere dimensioni, capitali e potere contrattuale più elevati delle aziende agricole loro clienti – stanno infatti acquisendo delle posizioni di potere che non forniscono loro alcun incentivo a supportare quei cambiamenti radicali che consentirebbero agli agricoltori di acquisire maggior autonomia e controllo sui propri dati (Brewster et al., 2017).

Per migliorare le condizioni di lavoro all'interno del settore agricolo, è invece necessario sviluppare dei nuovi modelli di business, che garantiscano il livello di riservatezza e controllo sui dati desiderato dagli agricoltori, ma che allo stesso tempo consentano loro di monetizzare i dati che producono se lo desiderano. Affinché ciò sia possibile, è necessario che gli agricoltori coinvolti diventino «*active prosumers of agri-data, rather than passive consumers of data analyzed by other parties*» [Brewster et al., 2017, p. 30]. Essi devono perciò divenire produttori primari non solo di alimenti, ma anche di dati agricoli da rendere disponibili tramite piattaforme *open data* o da condividere dietro compenso con singoli attori pubblici e privati.

Affinché tale evoluzione abbia luogo, un'adeguata formazione degli agricoltori e un incremento della loro capacità imprenditoriale è un presupposto fondamentale, dal momento che consente loro di comprendere il valore (anche potenziale) delle informazioni generate e di essere più consapevoli del proprio ruolo e delle opportunità offerte dall'evoluzione tecnologica, se adeguatamente sfruttata. Si tratta di un cambiamento di mentalità che non è semplice ottenere e il rischio che i grossi *player* si appropriino dei dati prodotti senza riconoscere alcun corrispettivo agli agricoltori è ad oggi piuttosto elevato.

### 3.3 Intelligenza artificiale nel settore agricolo

#### 3.3.1 Definizione e principali applicazioni

L'intelligenza artificiale (o IA) è una disciplina che si occupa della costruzione di sistemi informatici '*smart*' in grado di svolgere compiti che tipicamente richiedono l'intelligenza umana (Edan, Adamides e Oberti, 2023). Grazie all'intelligenza artificiale infatti, «*intelligent computers can process natural language or visual information, making*

*decisions and interacting with humans and external environments autonomously*» [Gosciu, Brunetta e Annosi, 2020]. Per trovare soluzioni ottimali a situazioni complesse, l'IA combina pertanto discipline quali la logica, la statistica, la probabilità, la linguistica e l'informatica e al fine di costruire macchine che possiedano abilità quali la percezione, il *problem-solving*, il ragionamento, l'apprendimento e l'utilizzo del linguaggio (Kutyauripo, Rushambwa, Chiwazi, 2023).

Si tratta di una tecnologia che assume un ruolo di rilievo nella fase intermedia tra la raccolta dei dati e l'attuazione delle azioni, in cui contribuisce a conferire significato alle informazioni acquisite attraverso attività di integrazione, analisi e comprensione dei dati, oltre che di apprendimento da essi (Edan, Adamides e Oberti, 2023). La possibilità dei sistemi di IA di basare le proprie decisioni su una moltitudine di parametri, ponderati in base alla loro importanza, rende così possibile la creazione di macchinari capaci di svolgere in autonomia compiti complessi in condizioni ambientali non standardizzate, elemento che – come si è già visto (vedi paragrafo 3.2) – è fondamentale per l'automazione delle operazioni agricole. Inserendo specifiche considerazioni sulla conservazione ambientale o la sostenibilità sociale tra i criteri decisionali è inoltre possibile integrare tali dimensioni all'interno della gestione ordinaria in modo sistemico e sistematico, ad esempio pianificando le operazioni agricole in modo da non utilizzare pesticidi durante la stagione di fioritura per salvaguardare gli insetti impollinatori o da minimizzare l'impatto sulla salute delle persone residenti nelle comunità circostanti.

Le principali branche dell'IA includono tecnologie quali *machine vision* (vedi paragrafo 3.3.2), *machine learning* (vedi paragrafo 3.3.3), *Natural Language Processing*<sup>34</sup>, algoritmi per la programmazione dei robot e dei veicoli a guida autonoma ed *Expert Systems*<sup>35</sup> (Gosciu, Brunetta e Annosi, 2020; Kutyauripo, Rushambwa, Chiwazi, 2023).

## Applicazioni

In ambito agricolo, l'intelligenza artificiale consente di sviluppare robot, di

---

<sup>34</sup> Con il termine *Natural Language Processing* (NLP) si indicano quegli algoritmi di intelligenza artificiale che consentono ai computer di analizzare, generare e manipolare il linguaggio umano. Si tratta di un elemento molto utile per migliorare la comunicazione diretta tra tecnologia e utente. Grazie ai modelli NLP è ad esempio possibile fornire agli agricoltori un'assistente virtuale alla quale è possibile porre domande e ricevere risposte basate sui dati raccolti dai sensori in campo o dall'interfaccia con altri sistemi (es. previsioni meteo raccolte da uno specifico *provider* esterno) (Sharma et al., 2021).

<sup>35</sup> Gli *Expert Systems* sono sistemi in grado di fornire «*site-specific, integrated and interpreted advices*» [Eli-Chukwu, 2019, p. 4380] a problemi complessi. In virtù della loro specializzazione in una determinata area – che li rende per l'appunto dei sistemi 'esperti' – presentano un campo d'azione limitato, in merito al quale possiedono però un'ampia base di conoscenza.

monitorare il suolo e le colture, di effettuare analisi predittive, di ottimizzare le attività di manutenzione e di implementare un controllo automatizzato delle operazioni a tasso variabile (Gosciu, Brunetta e Annosi, 2020; Kutyauripo, Rushambwa, Chiwazi, 2023).

I robot agricoli guidati da algoritmi di intelligenza artificiale sono capaci di gestire in autonomia lo svolgimento di compiti quali la semina, la gestione delle colture e il raccolto. Grazie alla capacità di analizzare l'ambiente circostante, questi robot sono ad esempio in grado di procedere con la raccolta selettiva, in cui le informazioni riguardanti «*fruit/crop size, skin color, firmness, taste, quality, maturity stage, market window, fruit detection and classification*» [Meshram et al., 2021, p. 4] possono essere utilizzate per definire il momento ottimale di raccolta per ogni singola unità (per frutta od ortaggi) o per ogni porzione di campo (per cereali o legumi).

Il monitoraggio del suolo e delle colture sfrutta soluzioni hardware per la raccolta dei dati in combinazione con tecnologie come la *machine vision*, e il *machine learning* per la loro elaborazione (Gosciu, Brunetta e Annosi, 2020).

Per quanto riguarda il monitoraggio del suolo, è possibile rilevare dati relativi alla sua struttura e ai principali rischi ad essa connessi per predire le conseguenze delle attività agricole in termini di variazione di texture, % di materia organica, presenza di nutrienti, capacità di trattenere l'umidità, dispersione nell'ambiente di azoto o altre sostanze indesiderate, etc. È in questo modo possibile generare una serie di alternative plausibili, simulare le conseguenze di ciascuna e valutare quale soddisfa meglio i desideri dell'utente in relazione a multipli criteri ponderati in base alle sue richieste (Eli-Chukwu, 2019), riducendo l'incertezza che tipicamente caratterizza l'attività agricola (Gunderson et al., 2014).

Allo stesso modo, le informazioni raccolte sono utilizzate per individuare le colture migliori da piantare in un determinato luogo e anno e le date migliori per le attività di semina e raccolta in una specifica area, nonché per prevedere le rese colturali in questo modo ottenibili (Eli-Chukwu, 2019). L'intelligenza artificiale può essere inoltre utilizzata per ottimizzare l'impiego delle risorse idriche, individuando i tempi ottimali di irrigazione e la quantità corretta di acqua da erogare sulla base delle informazioni raccolte su suolo, colture e meteo. È così possibile variare i piani di irrigazione di anno in anno e di periodo in periodo in base al reale fabbisogno idrico delle colture (Ahuja et al., 2014).

Le analisi predittive sfruttano invece gli algoritmi di IA per estrarre informazioni dai dati raccolti, riconoscendo i pattern e i trend che emergono dalla loro osservazione al fine di rilevare potenziali problemi relativi all'impatto ambientale, alle sementi, alla resa e al raccolto delle colture. L'osservazione di una variabile nel tempo consente di classificarla come (Petropoulos e Carver, 2019):

- variabile *level-only*, se il livello rilevato è costante tra i periodi presi in analisi;
- variabile *seasonal-only*, se si rileva un pattern stagionale ricorrente;
- variabile *trend-only*, se si rileva una variazione positiva o negativa ricorrente;
- variabile *trend and seasonal*, se stagionalità e trend coesistono.

Tali analisi richiedono la capacità di generare, raccogliere ed analizzare enormi quantità di dati<sup>36</sup> in tempo reale relativi a suolo, acqua, temperatura e meteo (Gosciu, Brunetta e Annosi, 2020). L'IA è infatti in grado di filtrare, analizzare e organizzare tali dati, restituendo all'utente una serie di informazioni condensate utili a prendere decisioni. La capacità degli agricoltori di utilizzare i *big data* al fine di diminuire l'incertezza e gestire la variabilità spaziale e temporale che caratterizza l'attività agricola, consente di contenere i costi e ridurre l'impatto ambientale del settore (Edan, Adamides e Oberti, 2023). Prevedere i possibili sviluppi futuri del mercato e individuare i trend che governano i comportamenti dei consumatori è infatti essenziale «*in shaping marketing strategies, anticipating sale trends, and better managing the supply chain*» [Gosciu, Brunetta e Annosi, 2020]. È così possibile ottimizzare i volumi di produzione e di vendita in base al prezzo di mercato riconosciuto nei diversi periodi dell'anno o ai livelli di domanda previsti, migliorando la redditività dell'azienda agricola e diminuendo perdite e sprechi alimentari dovuti alla sovrapproduzione.

Per quanto concerne l'applicazione dell'intelligenza artificiale alla pianificazione delle attività di manutenzione dei macchinari, l'integrazione di piani di manutenzione, dati storici riguardanti le anomalie e i guasti dei macchinari e informazioni sul loro stato

---

<sup>36</sup> Per indicare grandi set di dati complessi si utilizza in genere il termine *big data*. Perché si parli di *big data*, i set di dati devono essere caratterizzati da 5 V (Shrivastava e Marshall-Colon, 2019):

- volume: la quantità di dati raccolti è elevata;
- varietà: la natura dei dati è eterogenea (testi, immagini, audio, video, ...). Coesistono dati strutturati e non strutturati;
- velocità: i dati vengono generati e raccolti molto rapidamente, spesso in tempo reale;
- variabilità: i dati variano costantemente e presentano elevata dispersione;
- valore: i dati nascondono un valore sottostante che emerge quando vengono utilizzati per effettuare previsioni e prendere decisioni migliori.

di salute agevola l'implementazione di un sistema di manutenzione predittiva automatizzata. Tale sistema ottimizza le attività di manutenzione programmate al fine di minimizzare il rischio di guasti e di garantire la continuità delle operazioni agricole e l'efficienza dei processi (Gosciu, Brunetta e Annosi, 2020). Appare opportuno sottolineare come i sistemi di manutenzione predittiva non si limitino a migliorare le dimensioni operative ed economiche, ma contribuiscano anche a ridurre l'impatto ambientale dei macchinari attraverso l'estensione della loro vita utile. Questa riduzione deriva da un lato dal minor consumo di risorse associato al mantenimento dei macchinari in condizioni ottimali e dall'alto dalla possibilità di distribuire le emissioni connesse alla produzione e allo smaltimento dei macchinari su un periodo più esteso.

L'intelligenza artificiale interviene inoltre nella gestione delle operazioni a tasso variabile (vedi paragrafo 2.2). Vengono a tale scopo impiegati degli appositi modelli colturali, che, conoscendo sia le condizioni ambientali attuali che quelle ottimali di sviluppo delle diverse specie, determinano il tasso corretto di applicazione degli input. Tali modelli colturali possono essere generici o progettati per occuparsi di specie specifiche. Nel primo caso, al fine di adattarsi alle circostanze, *«i modelli si possono 'calibrare' per qualsiasi condizione (ambientale e di sistema di coltura) e specie (ma anche varietà) con le opportune 'parametrizzazioni' (modifica dei parametri colturali)»* [Mastrorilli, 2015, p. 8].

È infine possibile utilizzare l'intelligenza artificiale per monitorare e preservare la biodiversità dell'ecosistema, identificando e conservando le colture tradizionali e promuovendo la diversità genetica. La capacità di gestire sistemi complessi e di integrare molteplici parametri all'interno del sistema decisionale consente infatti di pianificare dei sistemi agricoli in cui trovano posto anche specie vegetali tradizionali ed erbe spontanee importanti per l'ecosistema, contribuendo alla loro tutela.

## **Limiti**

I principali problemi connessi all'utilizzo dell'IA in agricoltura riguardano: la difficoltà di sviluppare sistemi con prestazioni soddisfacenti; i limiti tecnici relativi alle tecnologie abilitanti e alle infrastrutture di supporto; l'assenza di conoscenze e competenze e la ridotta consapevolezza degli agricoltori in materia.

Per quanto concerne le prestazioni, i principali limiti riguardano la flessibilità dei sistemi e il *trade-off* tra velocità e precisione delle risposte (Edan, Adamides e Oberti,

2023). Nonostante i progressi compiuti negli ultimi anni in materia di applicazione dell'IA a particolari compiti isolati, infatti, rimane difficile la costruzione di una tecnologia capace di interfacciarsi ai diversi sottosistemi di un ambiente complesso e integrato come quello agricolo. Come risultato, la flessibilità delle soluzioni ad oggi proposte è limitata e i sistemi realmente utilizzabili hanno un campo d'azione molto ridotto (es. funzionano solo con una specifica varietà, identificano un set limitato di malattie, ...). La necessità di analizzare ampi *dataset* per giungere a una risposta crea inoltre un problema in termini di *trade-off* tra accuratezza e rapidità. Un'analisi attenta dei dati a disposizione richiederebbe infatti troppo tempo in relazione alle esigenze di gestione, mentre i risultati ottenibili in tempi più brevi possono risultare troppo approssimativi. Perché i sistemi di IA siano in grado di prendere decisioni in autonomia o di supportare adeguatamente le decisioni dell'agricoltore, è pertanto fondamentale che nei prossimi anni gli algoritmi di ricerca ed elaborazione dei dati migliorino abbastanza da minimizzare questo *trade-off*.

Affinché ciò sia possibile, parallelamente agli algoritmi di ricerca devono essere potenziate le tecnologie e le infrastrutture che lavorano in sinergia con essi. Per garantirne il corretto funzionamento, saranno infatti necessari un'elevata potenza di calcolo, un'ampia disponibilità di dati e di strutture per la loro conservazione, una diminuzione nei costi di trasferimento e stoccaggio dei dati, la costruzione di adeguate infrastrutture di rete per le telecomunicazioni – che spesso scarseggiano nelle aree rurali –, lo sviluppo di sensori più accessibili e precisi e un avanzamento nella robotica e nella diffusione dell'IoT (Gosciu, Brunetta e Annosi, 2020; Edan, Adamides e Oberti, 2023). Particolare attenzione deve essere prestata alla creazione di *dataset* su cui effettuare il *training* dei modelli di IA. La capacità di questi modelli di filtrare le informazioni in entrata senza per questo trascurare gli eventi importanti o inattesi dipende infatti dal volume e dalla qualità dei dati utilizzati in questa fase.

Infine, per quanto riguarda la formazione e l'attitudine degli agricoltori nei confronti dell'IA, la situazione è paragonabile a quella che caratterizza l'innovazione digitale in generale. Si riscontra infatti una diffusa mancanza di competenze e conoscenze in materia, nonché una generale diffidenza nei confronti delle nuove soluzioni immesse sul mercato (Edan, Adamides e Oberti, 2023). Il principale pericolo che deriva da questa situazione è connesso alla possibilità che gli agricoltori subiscano delle perdite a causa del ritardo nell'adozione o dell'utilizzo poco consapevole di tale



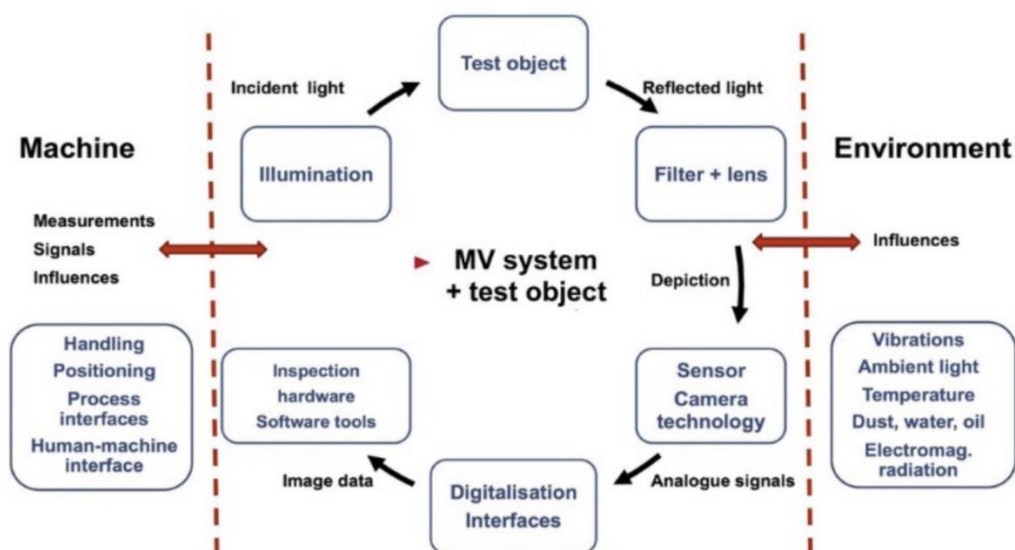
tecnologia. È ad esempio possibile che gli utenti, appoggiandosi a soluzioni di IA fornite da grossi *player* del mercato, seguano consigli o prendono decisioni parzialmente basate sugli interessi di tali attori più che sulle loro reali necessità. I servizi di analisi dei dati e di supporto delle decisioni offerti da queste aziende sono infatti spesso legati ai prodotti da esse venduti. Il programma FieldScripts ad esempio – che apparteneva a Monsanto – raccoglieva dati dai campi in tempo reale attraverso appositi sensori a terra e identificava quale dei semi ibridi presenti nel catalogo dell'azienda si adattava meglio alle condizioni del campo. L'algoritmo forniva inoltre delle raccomandazioni sui prodotti chimici offerti dall'azienda da acquistare in combinazione con le sementi per un raccolto ottimale (Shrivastava e Marshall-Colon, 2019). Appare pertanto evidente come il confine tra decisioni basate sui dati e messaggi promozionali sia potenzialmente molto labile, specialmente nelle situazioni in cui gli agricoltori coinvolti non dispongono di conoscenze tecniche e aziendali adeguate a valutare il contenuto del messaggio e la sua reale natura.

### 3.3.2 *Machine Vision*

I sistemi di *machine vision* (o visione artificiale) combinano strumenti per l'acquisizione di immagini e algoritmi di *image processing* per consentire alle macchine di 'vedere', ossia di identificare, tracciare e misurare degli oggetti al fine di prendere decisioni basate sulle informazioni in tal modo acquisite (vedi figura 3.2) (Tian et al., 2020). I componenti principali di un sistema di *machine vision* sono: un impianto di illuminazione, una o più camere o sensori ottici e un computer dotato di una scheda di acquisizione video adeguata e di appositi algoritmi di elaborazione delle immagini (Chen, Chao e Kim, 2002).

Un sistema di illuminazione adeguato è fondamentale per il corretto funzionamento della visione artificiale, dal momento che il processo di acquisizione ed elaborazione delle immagini risulta molto più accurato ed efficiente in condizioni di illuminazione ottimali (Chen, Chao e Kim, 2002). Si tratta tuttavia di un elemento che, pur essendo applicabile con successo in aree chiuse, non ottiene gli stessi risultati nelle operazioni in campo aperto, a causa delle costanti variazioni di luminosità dell'ambiente.

Figura 3.2 - Rappresentazione schematica di un sistema di *machine vision*



FONTE: Fouda [2021, p. 118]

Gli algoritmi di *image processing* svolgono tre principali funzioni (Chen, Chao e Kim, 2002):

1. *image enhancement*: gli algoritmi di questo tipo sono applicati alle immagini digitali per correggere problemi come lo scarso contrasto o l'eccessivo rumore causati da condizioni di illuminazione inadeguate o non uniformi o da una messa a fuoco non ottimale;
2. *image feature extraction*: procedure statistiche applicate alle immagini corrette e utilizzate per estrarne le caratteristiche desiderate;
3. *image feature classification*: tecniche numeriche di vario tipo che vengono utilizzate per classificare le immagini in base agli elementi identificati dagli algoritmi di *image feature extraction*.

In base al budget a disposizione e alle prestazioni desiderate si possono utilizzare diversi tipi di fotocamere. Le più semplici ed economiche sono le fotocamere RGB, che tuttavia presentano importanti limiti in termini di elaborazione del colore poiché «*intensity is not decoupled from the chromaticity and there is a high connection among the components*» [Fouda, 2021, p. 131-132]. A causa di ciò, i risultati ottenuti

sono pesantemente influenzati dalle condizioni di illuminazione ambientali e la loro disomogeneità può produrre risultati inconcludenti nonostante le possibili operazioni di normalizzazione e correzione messe in atto per arginare il problema.

In alternativa, è possibile utilizzare fotocamere multispettrali o iperspettrali, che «*besides imaging objects in the visible (VIS) color region, [...] are also able to inspect these objects in light invisible to humans, such as ultraviolet (UV), near-infrared (NIR), and infrared (IR)*» [Chen, Chao e Kim, 2002, p. 174]. I risultati così ottenuti sono migliori poiché oggetti che appaiono dello stesso colore – e sono dunque difficili da distinguere per una fotocamera RGB – possono presentare una riflettanza diversa nelle regioni non visibili dello spettro elettromagnetico (Fouda, 2021). Tali informazioni si rivelano particolarmente utili per determinare il livello di maturità delle colture e per identificare malattie o stati di stress in fase pre-raccolta, nonché per testare la qualità e la sicurezza alimentare dei prodotti nelle operazioni post-raccolta in modo rapido e non distruttivo (Chen, Chao e Kim, 2002). Rispetto alle fotocamere RGB risultano tuttavia più costose e pertanto il loro utilizzo non è sempre conveniente.

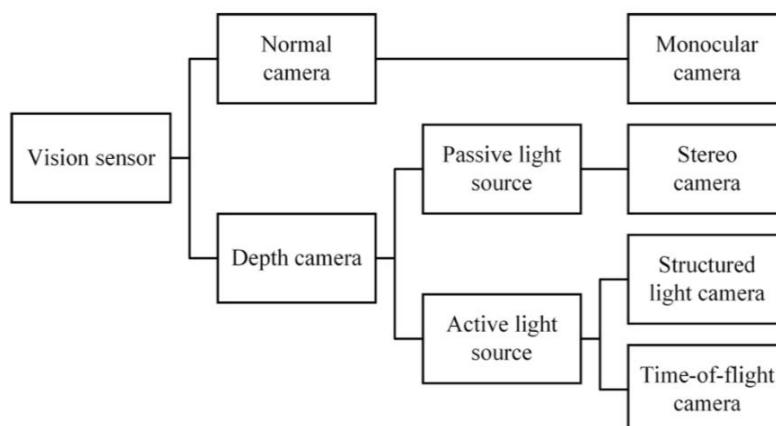
Infine, è possibile utilizzare fotocamere stereoscopiche, che consentono di ottenere una rappresentazione tridimensionale dell'ambiente circostante. Sono in genere utilizzate nelle operazioni di separazione delle specie colturali e di monitoraggio delle piante e delle colture (Fouda, 2021).

Se la suddivisione delle fotocamere viene effettuata in base alla loro capacità di misurare la profondità, possono invece essere suddivise in fotocamere normali e di profondità (Wang et al., 2022)(vedi figura 3.3). Le fotocamere normali si configurano in genere come fotocamere monoculari, dei sistemi *low cost* e con un basso fabbisogno energetico in grado di raccogliere dati sul colore e la texture del soggetto. Si possono in questo modo ottenere informazioni sulla distanza relativa tra due oggetti oppure, utilizzando un video o una sequenza di scatti, calcolare la distanza assoluta tra essi. In entrambi i casi la tecnologia presenta evidenti limiti connessi all'elevato ammontare di calcoli necessari a misurare le distanze, alla bassa stabilità in ambienti complessi e all'impossibilità di utilizzo in ambienti scuri o scarsamente illuminati.

Le fotocamere di profondità sono a loro volta suddivise in fotocamere stereoscopiche, scanner a luce strutturata e telecamere a tempo di volo (Wang et al., 2022).

---

**Figura 3.3 - Tipi di camere in relazione alla loro capacità di percepire la profondità**



FONTE: Wang et al. [2022, p.2]

---

Le fotocamere stereoscopiche sono composte in genere da due o più fotocamere monoculari collocate in modo da mimare il processo di riconoscimento della profondità dell'occhio umano. Le due fotocamere ottengono più immagini del soggetto da angolazioni differenti e le combinano per realizzare una scansione tridimensionale dello stesso. Essendo composte unicamente da fotocamere monoculari sono relativamente economiche, ma il processo di elaborazione delle immagini è piuttosto lungo. Affinché sia possibile effettuare la scansione è inoltre necessario che vi siano adeguate differenze in termini di colore e texture tra il soggetto e lo sfondo e che vi sia sufficiente luce.

Gli scanner a luce strutturata uniscono due o più fotocamere monoculari e un proiettore, che proietta nell'ambiente circostante una serie di pattern noti. Le informazioni sulla profondità sono quindi elaborate a partire dal grado di deformazione di tali pattern rilevato dalle fotocamere. I principali svantaggi di questa tecnologia sono connessi ai suoi costi elevati e alla bassa affidabilità in ambienti fortemente illuminati o che presentano superfici lucide a causa del fatto che «*light emitted by the projector is easily affected by ambient lighting and object reflectivity*» [Wang et al., 2022, p. 3].

È infine possibile utilizzare telecamere a tempo di volo o *Time-of-Flight (ToF)*, che emettono onde infrarosse, misurano il tempo necessario al segnale per tornare indietro e calcolano la profondità sulla base di tali dati. Tra i loro principali svantaggi si possono ricordare il costo elevato e la risoluzione ridotta, nonché l'inaccuratezza delle misure ottenute in ambienti fortemente illuminati o per distanze particolarmente lunghe.

## Applicazioni

I principali ambiti di applicazione della *machine vision* nelle operazioni agricole riguardano il monitoraggio della crescita delle colture, la prevenzione di malattie e il controllo delle erbe spontanee, la raccolta automatizzata, la classificazione dei prodotti e il controllo qualità e la capacità dei robot agricoli di muoversi e agire in autonomia (Tian et al., 2020).

Per quanto riguarda il monitoraggio delle condizioni di crescita delle colture, si tratta di un'attività che ha l'obiettivo di ottimizzare l'ambiente di sviluppo al fine di massimizzare le rese e la qualità dei prodotti agricoli. L'applicazione della *machine vision* a questa operazione consente di identificare i sottili cambiamenti nelle colture dovuti a carenze nutrizionali (es. ingiallimento delle foglie dovuto a una carenza di azoto) o a condizioni ambientali inadeguate molto prima che siano visibili ad occhio nudo e in modo non invasivo, offrendo così agli agricoltori la possibilità di intervenire tempestivamente. È possibile inoltre sfruttare le stesse telecamere per controllare e migliorare lo stato di salute del suolo, monitorando parametri quali il contenuto di materia organica, il tasso di umidità o la composizione in termini di dimensioni delle particelle (nota come *texture* del suolo), che ne influenza la capacità di trattenere acqua e nutrienti. Una volta raccolti e rielaborati, tali dati possono fornire informazioni preziose sulla sostenibilità dell'attività agricola, consentendo agli agricoltori di visualizzare e mappare le conseguenze delle proprie azioni sulla salute dell'ambiente (Edan, Adamides e Oberti, 2023).

La prevenzione e il controllo di erbe spontanee, malattie e insetti nocivi si basa sulla capacità di individuare i segnali della loro presenza in modo automatizzato (Fouda, 2021). È ad esempio possibile identificare le variazioni di colore e texture che caratterizzano una pianta malata o sfruttare le camere multispettrali per individuare gli insetti non appena questi iniziano a diffondersi nell'area coltivata. A seconda delle deviazioni rilevate rispetto alla norma, è possibile inoltre specificare il tipo di problema che affligge la coltura effettuando una vera e propria diagnosi ed evidenziando le soluzioni più appropriate alla situazione. La rilevazione delle erbacce è relativamente semplice nei momenti che precedono la semina, poiché la differenza cromatica tra suolo nudo è evidente anche per una fotocamera RGB. Identificare le erbe spontanee quando si mischiano alla coltura principale è invece molto più complesso e richiede – in

particolar modo per le piantine nelle prime fasi di sviluppo – «*high-resolution measurements for potential single plant scale data processing*» [Edan, Adamides e Oberti, 2023, p. 1060]. Sono spesso utilizzate in questo caso delle telecamere iperspettrali, che, una volta perfezionati gli appositi algoritmi, consentono di ottenere una precisione di discriminazione compresa tra l'80 e il 90% (Edan, Adamides e Oberti, 2023).

Il processo di raccolta automatizzata comprende invece l'identificazione dei prodotti da raccogliere in base allo specifico grado di maturazione di ogni unità, la determinazione della loro posizione in campo e il calcolo della sequenza di raccolta ottimale. Si tratta di un'operazione in cui «*noise is extremely challenging [...] due to the harsh weather conditions, changes in brightness and the presence of dust, insects and other unavoidable sources of noise*» [Tian et al., 2020, p. 11]. Il ricorso alla *machine vision* consente inoltre di contare i frutti in campo al fine di effettuare previsioni sulle rese. Ad oggi, tuttavia, una serie di problemi irrisolti relativi alla conta dei frutti sovrapposti o coperti da rami e foglie – che nell'analisi delle immagini acquisite non vengono identificati – rendono tale attività troppo poco precisa per essere realmente utile. Questi limiti emergono in particolar modo nella fase iniziale dello sviluppo colturale, a causa delle dimensioni ridotte dei frutti e del colore tendenzialmente simile allo sfondo (Fouda, 2021).

Una volta raccolti, i prodotti agricoli possono essere classificati in base a parametri quali il livello di maturazione, la dimensione, il grado di integrità o la forma (Fouda, 2021). L'automazione di tali operazioni mediante l'utilizzo della *machine vision* consente non solo di abbattere i costi e ridurre i tempi di esecuzione, ma anche di ridurre notevolmente gli errori e di migliorare la coerenza qualitativa dell'offerta. L'utilizzo di lenti multispettrali e di appositi algoritmi per il controllo qualità permette inoltre di identificare problemi che non potrebbero altrimenti essere osservati senza danneggiare il prodotto (es. cuore nero nella patata o danni meccanici interni nei mirtilli; Tian et al., 2020). I principali limiti della tecnologia in materia riguardano ad oggi il ristretto campo di applicazione e la ridotta portabilità.

Per muoversi in autonomia all'interno della propria area di competenza, i robot agricoli ricorrono a una combinazione di sistemi satellitari globali di navigazione (o *GNSS, Global Navigation Satellite System*; in genere si tratta del sistema GPS, ma non è l'unico), sistemi di navigazione inerziale (o *INS, Inertial Navigation System*), *Light Detection and Ranging* (LiDAR) e *machine vision* (Wang et al., 2022). La sola tecnologia

GNSS, oltre a non rilevare gli ostacoli, non consentirebbe infatti di automatizzare quelle attività che richiedono dati particolarmente precisi sulla posizione in campo del robot dal momento che la tolleranza media delle misurazioni è troppo elevata (la precisione del sistema GPS si attesta ad esempio attorno ai 50 cm; Fouda, 2021). La precisione inoltre diminuisce ulteriormente in caso di maltempo o quando il robot si trova sotto la chioma delle piante o all'interno di una serra.

I sistemi di navigazione inerziale integrano invece i dati relativi al movimento angolare e lineare del robot per ottenere informazioni su assetto, velocità di movimento e posizione del macchinario in questione. Anch'essi tuttavia non sono in grado di rilevare gli ostacoli, né di mantenere misurazioni precise per lunghi periodi.

Il LiDAR è uno strumento di telerilevamento che utilizza impulsi laser per registrare la distanza dall'oggetto target (in questo caso un ostacolo) e collocarlo spazialmente nell'ambiente circostante. La misurazione può però essere alterata dalla polvere che si solleva durante le operazioni in campo e i sensori utilizzati non sono in grado di distinguere i diversi tipi di ostacoli, poiché non raccolgono informazioni su parametri quali il colore o la texture degli oggetti circostanti. La loro diffusione è inoltre limitata dagli ingenti costi dei sensori.

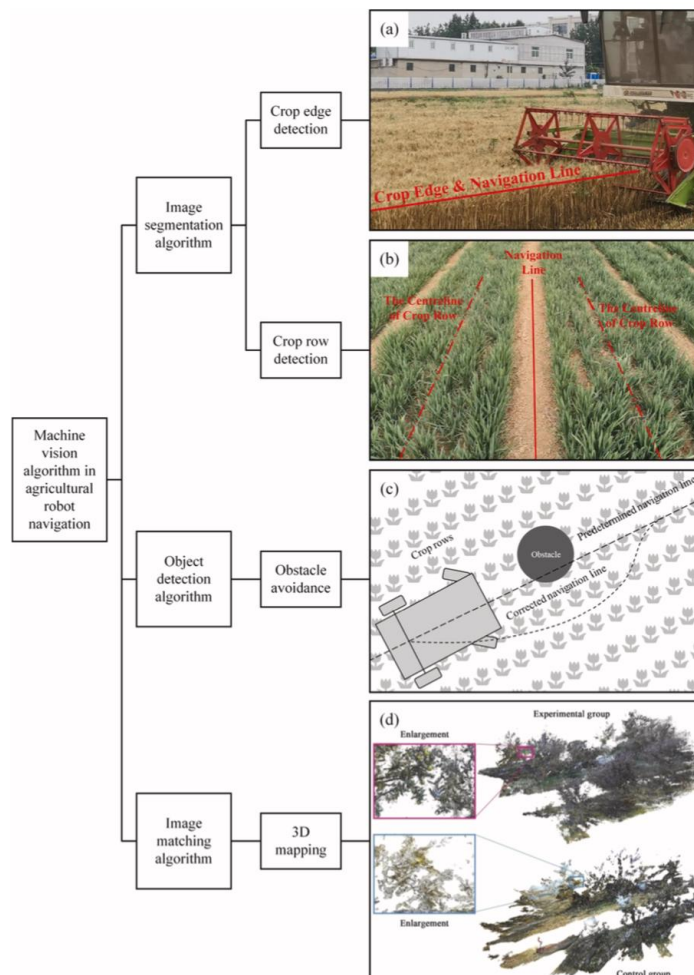
La *machine vision* è frequentemente utilizzata in combinazione con le altre tecnologie «*due to the advantages of low cost, easy maintenance, wide applicability, and high level of intelligence*» [Wang et al., 2022, p. 1]. I principali algoritmi utilizzati in questo ambito riguardano la segmentazione delle immagini (suddivisione in aree che corrispondono a colture, terra, ...) per la rilevazione dei confini del campo e dei filari, l'identificazione di oggetti perché i robot muovendosi siano in grado di evitarli e l'*image matching* (processo di ricerca della corrispondenza di pixel e regioni tra due immagini della stessa scena) per la mappatura 3D (vedi figura 3.4). Altri algoritmi sono utilizzati per calcolare il percorso di navigazione più efficiente in base alla posizione delle piante o dei filari nel campo (Edan, Adamides e Oberti, 2023). È possibile in tal modo ridurre il tempo necessario a portare a termine le operazioni e diminuire i relativi costi (es. minor spesa per il carburante)(Fouda, 2021).

## **Limiti**

Le tecnologie di *machine vision* sono spesso caratterizzate da costi ridotti, basso margine di errore, elevata efficienza e buona robustezza, ma presentano anche

numerosi limiti correlati all'incapacità di garantire stabilità e versatilità in ambienti complessi. Nonostante gli eccellenti risultati ottenuti in laboratorio o in condizioni sperimentali, infatti, le prestazioni deludono talvolta le aspettative nei test in campo (Tian et al., 2020). Le principali difficoltà che emergono sono correlate all'irregolarità del terreno (Wang et al., 2022), alle variazioni nelle condizioni di illuminazione – che possono alterare i colori percepiti – e alla similarità tra colorazione del target e dello sfondo – che diminuisce la capacità di suddividere i due elementi (Fouda, 2021).

**Figura 3.4 - Scopo dei principali algoritmi utilizzati nei sistemi di navigazione autonoma**



FONTE: Wang et al. [2022, p. 4]



### 3.3.3 Machine Learning

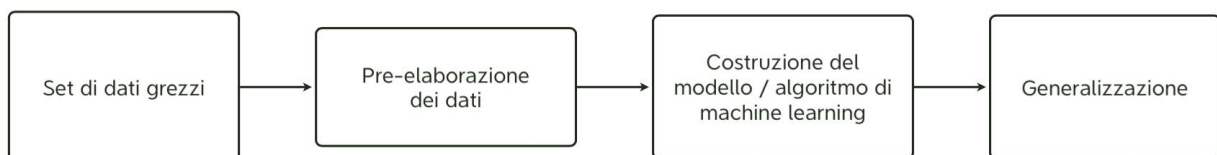
Il termine *Machine Learning* (ML) è stato coniato nel 1959 dallo scienziato americano Arthur Lee Samuel per indicare il ramo dell'intelligenza artificiale che si occupa di creare computer in grado di imparare tramite l'esperienza, apprendendo abilità per cui non sono stati esplicitamente programmati (Samuel, 1959). Una macchina (o un programma) intelligente è infatti capace di estrarre autonomamente da un set di dati le informazioni necessarie a realizzare un *framework* che le consenta di fare previsioni o prendere decisioni. Il processo di *machine learning* è quindi suddiviso in tre fasi principali (vedi figura 3.5) (Sharma et al., 2021):

1. immissione e pre-elaborazione dei dati, dai quali l'algoritmo estrarrà poi *pattern* e *trend* sottostanti;
2. costruzione del modello/algoritmo mediante una fase di *training*, che può configurarsi come apprendimento supervisionato, non supervisionato o con rinforzo (vedi figura 3.6);
3. generalizzazione, che è il momento in cui l'algoritmo prevede l'output corretto per input a cui non è mai stato sottoposto prima.

L'apprendimento supervisionato utilizza set di dati etichettati, in cui a ogni dato di input è associata la risposta corretta, in modo da consentire alla macchina di imparare da tali esempi e ricavare poi l'output corretto anche da input sconosciuti. Si tratta di una tecnica utilizzata soprattutto per i processi di classificazione o regressione.

---

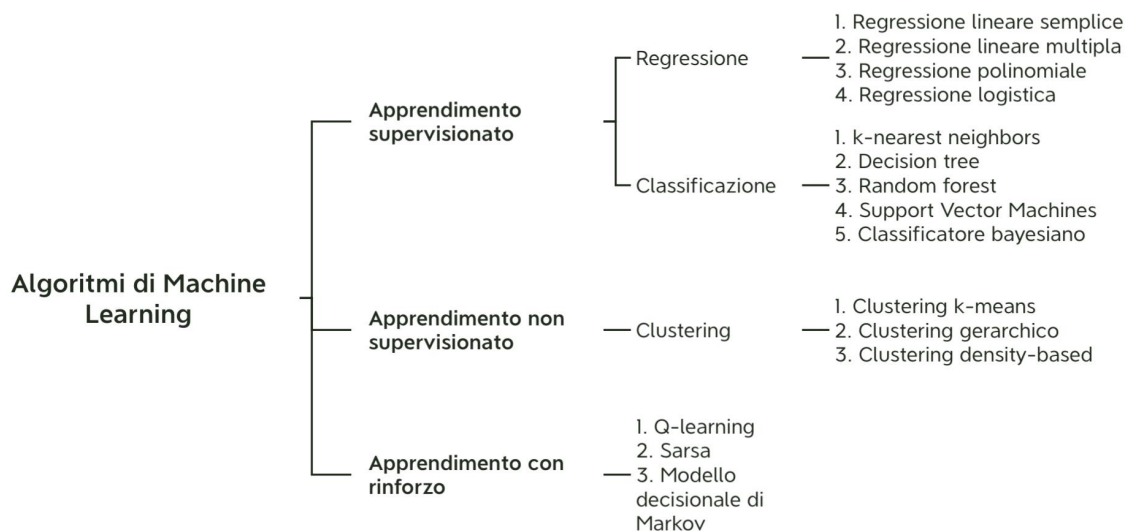
**Figura 3.5 - Fasi del processo di *machine learning***



FONTE: adattata da Sharma et al. [2021, p. 4847]

---

Figura 3.6 - Principali algoritmi di *machine learning*



FONTE: adattata da Sharma et al. [2021, p. 4848]

La classificazione è «*the process of converting an input set of instances  $P$  into a unique set of attributes  $Q$ , also known as target attributes or labels*» [Jagtap et al., 2022, p. 794] (es. riconoscere se un frutto è una mela o una banana in base a forma e colore). Le principali tecniche di apprendimento supervisionato per la classificazione sono (Sharma et al., 2021; Jagtap et al., 2022):

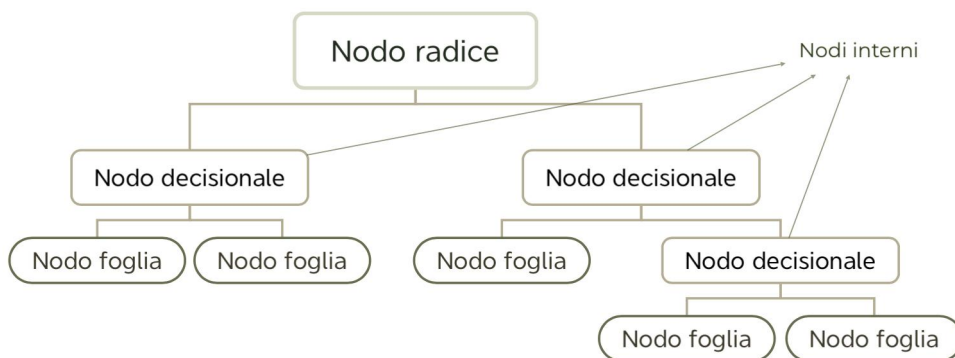
- gli alberi decisionali (vedi figura 3.7). Un albero decisionale è un grafico composto da nodi e rami, in cui i primi rappresentano le possibili istanze di classificazione e i secondi i valori che il nodo da cui originano può assumere. Nella decisione, la classificazione delle istanze inizia dal nodo radice e procede verso i nodi foglia. Il data set iniziale viene in genere suddiviso in due insiemi: il *training set*, sulla base del quale si crea la struttura dell'albero, e il *test set*, che viene utilizzato in seguito per testare l'accuratezza del modello generato;
- i classificatori bayesiani, che sono utilizzati per determinare «*probabilistic relationships between the attribute set and the class label*» [Jagtap et al., 2022, p. 794];
- le reti neurali artificiali, che sono reti di nodi interconnessi la cui struttura si ispira alle reti neurali biologiche che compongono i cervelli animali. Quando un

nodo riceve un segnale, lo elabora e poi lo trasmette a un altro nodo tramite un collegamento diretto tra i due a cui è assegnato uno specifico peso. Man mano che il processo di apprendimento procede, tali pesi vengono variati fino a trovare la combinazione che fornisce i risultati attesi;

- i classificatori *k-nearest neighbor*, che nella fase di addestramento suddividono i dati etichettati in classi con output omogenei e poi classificano ogni nuovo input basandosi sulla classe più comune tra i *k* oggetti con le caratteristiche a lui più simili (*k* è un numero intero positivo, in genere piuttosto basso);
- le foreste casuali (o *random forest*), che si ottengono tramite l'aggregazione di più alberi decisionali. La classe finale di un input è assegnata calcolando la media dei risultati forniti dai singoli alberi ed è quindi in genere più accurata;
- le *support vector machines*, che rappresentano i dati di input come punti collocati all'interno di uno spazio multidimensionale in cui i dati appartenenti alla stessa categoria si trovano vicini, mentre quelli appartenenti a categorie differenti sono separati da uno spazio il più ampio possibile (vedi figura 3.8). I nuovi input sono quindi mappati all'interno dello stesso spazio e la predizione della categoria alla quale appartengono viene fatta sulla base della vicinanza ad altri dati.

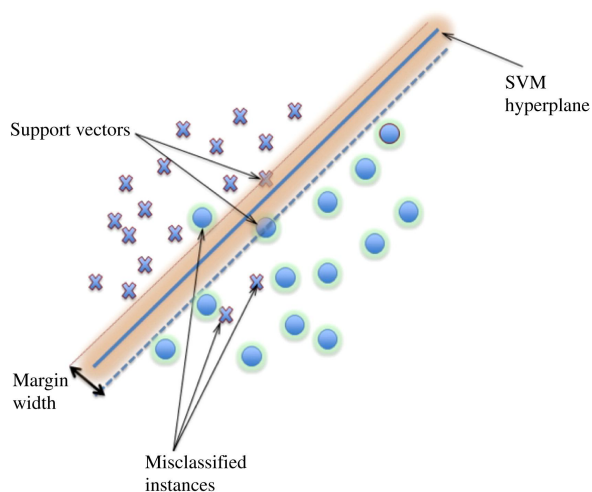
---

**Figura 3.7 - Struttura di un albero decisionale**



---

**Figura 3.8 - Esempio di *support vector machine***



FONTE: Mountrakis, Im e Ogole [2011, p. 248]

---

Nella regressione invece l'output non appartiene a un insieme discreto di categorie, ma è un valore numerico funzione dell'input (es. calcolare il prezzo di vendita di un prodotto agricolo). In base alla natura della relazione tra input e output, è possibile distinguere (Sharma et al., 2021):

- regressione lineare semplice, utilizzata per identificare la relazione lineare – corrispondente a una retta – tra l'input, noto come regressore, e l'output;
- regressione lineare multipla, usata quando è necessario studiare l'effetto contemporaneo di più regressori sull'output;
- regressione polinomiale, che è utilizzata quando l'insieme di dati fornito è troppo complesso per rientrare in una regressione lineare. Le regressioni polinomiali permettono infatti una maggiore curvatura della linea di regressione e dunque una migliore approssimazione della relazione tra output e input;
- regressione logistica, che restituisce un valore compreso tra 0 e 1 per indicare la probabilità che un determinato evento – rappresentato dall'input – accada.

L'apprendimento non supervisionato utilizza al contrario set di dati non etichettati all'interno dei quali l'algoritmo ricerca pattern nascosti per dare loro un senso (Jagtap et al., 2022). È utilizzato specialmente per le attività di clustering, «*the task of grouping a set of objects so that objects in one group are more similar to each other*

*than objects in another*» [Jagtap et al., 2022, p. 795]. Le attività di *clustering* differiscono da quelle di classificazione per il fatto che nelle prime i gruppi vengono suggeriti dalla macchina in base alla natura dei dati, mentre nelle seconde i dati vengono inseriti in classi note fornite al modello dall'utente. Le principali tipologie di *clustering* sono (Sharma et al., 2021):

- *clustering k-means*, in cui i dati sono raggruppati in cluster distinti attraverso una procedura iterativa che ha l'obiettivo di minimizzare la varianza varianza totale intra-gruppo. Ogni dato di input può appartenere a un unico cluster;
- *clustering gerarchico*, nel quale i dati di input sono raggruppati in gruppi connessi tra loro da una struttura gerarchica ad albero. Il processo di clustering può procedere in modo agglomerativo (bottom-up) o divisivo (top-down);
- *clustering density-based*, che opera esaminando l'intorno di ogni punto nello spazio (con raggio fissato) e la concentrazione di punti al suo interno.

È infine possibile ricorrere alle tecniche di apprendimento per rinforzo, in cui un sistema di premi e penalità costituisce la funzione di rinforzo che indirizza le decisioni del modello in base all'esperienza passata e alle prestazioni attuali con l'obiettivo di massimizzare la ricompensa (Sharma et al., 2021). È un metodo utilizzato per le decisioni sequenziali, nelle quali l'azione corretta è influenzata dallo stato attuale del sistema e ne determina quello futuro.

## **Applicazioni**

Gli algoritmi di *machine learning* – utilizzati in combinazione con l'IoT che si occupa della raccolta dei dati e con i robot che implementano le decisioni prese dal modello (Meshram et al., 2021) – sono indispensabili per risolvere problemi complessi che non saremmo altrimenti in grado di affrontare o automatizzare (Jagtap et al., 2022). Il ML ambito agricolo trova molteplici applicazioni distribuite lungo l'intero processo produttivo.

Nelle fasi che precedono la raccolta, sono utilizzati «*to capture the parameters of soil, seeds quality, fertilizer application, pruning, genetic and environmental conditions and irrigation*» [Meshram et al., 2021, p. 2], al fine di minimizzare i costi e le perdite alimentari. È possibile ad esempio catalogare e prevedere le proprietà del suolo che ne determinano il livello di fertilità come il pH e la % di materia organica, individuando poi

le modalità di gestione ottimali per ogni singolo appezzamento. Si limitano in questo modo i costi connessi all'utilizzo di fertilizzanti e la necessità di ricorrere a esperti per effettuare analisi del suolo, con effetti positivi sulla redditività dell'attività agricola e sull'ambiente. La possibilità di effettuare previsioni basandosi unicamente sulle immagini aeree del terreno riduce inoltre la necessità di acquistare costosi sensori da posizionare in campo.

La stessa tecnologia si dimostra particolarmente utile nelle coltivazioni fuori suolo, in cui la gestione della soluzione nutritiva è un'attività particolarmente critica e complessa. La sua composizione deve infatti presentare valori di pH, concentrazione di nutrienti e temperatura coerenti con i fabbisogni delle colture, poiché le prestazioni delle coltivazioni fuori suolo sono fortemente influenzate da questi parametri (Sharma et al., 2021).

In aggiunta, i modelli di *machine learning* possono effettuare una programmazione delle attività giornaliere e stagionali «*with considering carefully information about the life cycle of flora and fauna species living in the area (reproduction period, rarity, disturbance tolerance, bird migration key zones, etc.) and the intactness of their habitats to better preserve and restore the milieu*» [Berti-Equille e Raimundo, 2022, p. 2]. Data la fitta rete di interrelazioni tra gli attori dell'ecosistema, si tratta di un'attività che non può essere svolta senza prendere in considerazione una molteplicità di parametri spaziali, temporali, contesto- e soggetto-dipendenti. Un altro elemento di complessità consiste poi nel coniugare con successo l'attenzione all'ambiente e delle condizioni che consentano di coltivare con successo e in modo redditizio. La capacità del ML di effettuare analisi complesse e multifattoriali può in futuro aprire a nuove strade in tal senso, che forniscano soluzioni per una migliore coesistenza di questi due elementi.

Un'ulteriore applicazione degli algoritmi di *machine learning* nella fase pre-raccolta riguarda l'automazione del calcolo del tasso di germinazione delle sementi e la loro successiva classificazione, che diminuisce sia il tempo necessario a svolgere tale attività che il potenziale di errore a essa connesso (Meshram et al., 2021). I dati raccolti relativi alle condizioni ambientali e alla qualità di suolo e sementi possono poi essere utilizzati per prevedere le rese colturali e per comprendere come massimizzarle. I modelli ML, quando applicati sistematicamente, agiscono come controllo *feedforward* e anticipano i fattori che potrebbero diminuire la produzione, consentendo di mettere in

atto azioni correttive «*before even an anomaly hits the crop production*» [Sharma et al., 2021, p. 4851].

Il controllo delle condizioni ambientali per massimizzare le rese colturali si rivela un'attività particolarmente efficace nelle coltivazioni in serra, in cui tali parametri possono più facilmente essere controllati e ottimizzati. L'avanzamento negli algoritmi di elaborazione delle immagini – che sono utilizzati nella *machine vision* – ha inoltre consentito una più vasta applicazione dei modelli di *machine learning* al controllo delle malattie e delle erbe spontanee, con soluzioni che raggiungono un'accuratezza del 99% (Sharma et al., 2021).

Oltre a ciò, l'utilizzo di modelli di *machine learning* per automatizzare la fase di raccolta consente agli agricoltori di ridurre le perdite alimentari e aumentare l'efficienza di esecuzione (Meshram et al., 2021). Gli algoritmi utilizzati variano in relazione alla specie per cui sono realizzati: mentre per alcune colture è sufficiente considerare la dimensione dell'alimento (es. asparagi), nella maggior parte dei casi è indispensabile utilizzare un sistema più complesso, capace di analizzare anche il colore del prodotto (Sharma et al., 2021).

## **Limiti**

Le principali sfide che devono essere affrontate nell'implementazione degli algoritmi di ML in agricoltura riguardano (Meshram et al., 2021; Sharma et al., 2021):

- la gestione dei dati, che sono essenziali per il *training* dei modelli di ML. I principali problemi che si riscontrano a tal proposito riguardano «*lack of data, unavailability of data in required format, poor quality of data, data may contain extraneous features, etc.*» [Meshram et al., 2021, p. 9]. Se i dati richiesti non sono disponibili, può essere necessario creare da zero un *dataset* coerente con le proprie esigenze. Inoltre, affinché i dati possano essere utilizzati come input nelle fasi di *training*, test e validazione dell'algoritmo, devono in genere essere condotte delle adeguate operazioni di pre-elaborazione dei dati (es. ridurre il rumore o aumentare il contrasto nelle immagini);
- la necessità di costruire modelli capaci di adattarsi alle caratteristiche locali (es. per la previsione delle condizioni meteorologiche) e di operare in scenari reali nonostante l'elevata complessità e l'incertezza che li caratterizza;

- l'incapacità degli utenti di utilizzare le soluzioni proposte a causa della carenza di competenze tecnologiche. Per minimizzare questo genere di problemi è indispensabile prestare particolare attenzione al design delle soluzioni proposte, affinché risulti quanto più possibile *user-friendly*;
- l'elevato consumo energetico dei modelli *machine learning*, causato dall'elevata potenza computazionale necessaria al loro funzionamento;
- l'implementazione di sistemi poco accurati (es. per il riconoscimento dei prodotti maturi al momento della raccolta) può causare perdite economiche anche ingenti. Il timore di quest'evenienza rende gli agricoltori diffidenti verso questo genere di soluzioni tecnologiche e ne disincentiva l'utilizzo.

### 3.4 Blockchain e web3

#### 3.4.1 Blockchain

Il concetto di *blockchain* appare per la prima volta nel 1991, quando Stuart Haber e W. Scott Stornetta pubblicano l'articolo '*How to Time-Stamp a Digital Document*', ma raggiunge un'ampia diffusione solo nel 2008, in seguito alla pubblicazione del *white paper* '*Bitcoin: A Peer-to-Peer<sup>37</sup> Electronic Cash System*' da parte di uno o più individui sotto lo pseudonimo di Satoshi Nakamoto. Si tratta di un tipo particolare di *Distributed Ledger Technologies* (DLT)<sup>38</sup>, caratterizzato da una catena di blocchi aggiunti in modo sequenziale e all'interno dei quali sono conservate informazioni sulle transazioni eseguite dagli utenti (vedi figura 3.9). La sequenzialità dei blocchi e la loro immutabilità sono garantite da una prova matematica nota come *hash* generata mediante l'utilizzo della crittografia (Chiap, Ranalli e Bianchi, 2019). La crittografia è inoltre usata per:

- generare indirizzi che identifichino gli utenti in modo univoco;

---

<sup>37</sup> Il termine Peer-to-Peer (o P2P) fa riferimento all'architettura di una rete in cui uno stesso nodo può svolgere sia la funzione di client che quella di server (Kurose e Ross, 2022)

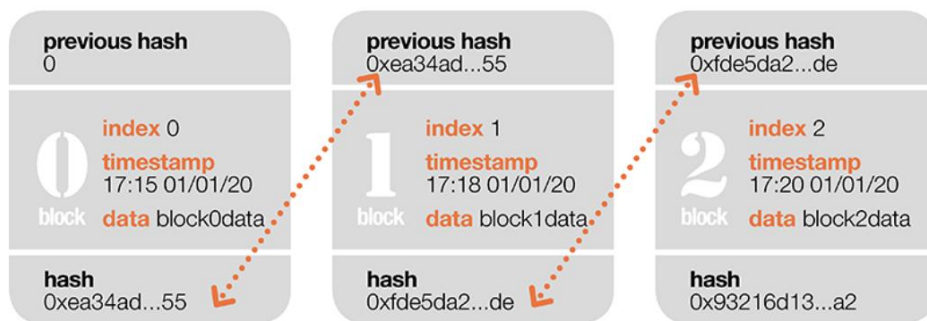
<sup>38</sup> *Distributed Ledger Technologies* (DLT) è un termine ombrello per indicare tutte quelle tecnologie che si basano su un registro (*ledger*) distribuito per elaborare, registrare e verificare transazioni in una rete aperta. Tale registro può assumere diverse forme, tra cui:

- una catena di blocchi (da cui il termine *blockchain*), ciascuno dei quali contiene al suo interno numerose transazioni;
- un grafo aciclico diretto, in cui ogni nodo è connesso ad altri tramite collegamenti diretti e nell'intera rete non sono presenti cicli. È una struttura utilizzata spesso per la validazione di transazioni *machine-to-machine* nell'IoT in virtù della sua scalabilità;
- una catena di singole transazioni.



- far apporre a tali utenti la propria firma digitale su ogni comunicazione o transazione a cui prendono parte, in modo da identificare le parti coinvolte;
- garantire la riservatezza delle comunicazioni. È ad esempio possibile criptare il contenuto di uno *smart contract* in modo tale da renderlo incomprensibile ai terzi che non dispongono della chiave di cifratura.

**Figura 3.9 - Struttura di una *blockchain***



FONTE: Ferri [2020, p. 41]

La crittografia utilizzata dalle *blockchain* è di tipo asimmetrico e prevede perciò l'utilizzo di una chiave privata, generata casualmente e nota solo al proprietario, e di una chiave pubblica, derivata matematicamente dalla prima e liberamente comunicata a chiunque (Kurose e Ross, 2022). Il mittente di un messaggio utilizza la chiave pubblica del destinatario per criptarne il contenuto, rendendolo di fatto incomprensibile per chiunque non possieda la chiave privata del destinatario che è necessaria a decifrarlo. Nel caso delle *blockchain*, l'indirizzo univoco che identifica ogni utente corrisponde a una versione compressa della sua chiave pubblica, mentre la chiave privata, che è nota solo a lui, è utilizzata per firmare le transazioni che compie. La sicurezza del sistema è garantita dal fatto che calcolare la chiave pubblica di un utente a partire da quella privata è piuttosto semplice, mentre l'operazione inversa è pressoché impossibile anche per macchine che dispongono di un'elevata potenza di calcolo.

La crittografia da sola, pur verificando l'identità del mittente e garantendo la riservatezza delle comunicazioni, non è tuttavia in grado di impedire che un terzo, anche senza comprendere il messaggio, ne modifichi il contenuto. Per evitare che ciò accada ci si serve dunque delle già citate funzioni di *hash*. L'*hash* è una «funzione algoritmica

*informatica non invertibile che mappa una stringa di lunghezza arbitraria in una stringa di lunghezza predefinita» [Bellini, 2022]. Affinché svolga la sua funzione in modo appropriato, deve essere (Kurose e Ross, 2022):*

- resistente alla preimmagine: dato un *hash* noto è impossibile risalire alla stringa di testo che l'ha generato;
- resistente alla seconda preimmagine: nota una stringa e il suo *hash*, è impossibile trovare un'altra stringa che, processata dallo stesso algoritmo, fornisca il medesimo *hash*. Qualsiasi lieve modifica nella stringa di partenza si traduce perciò in un *hash* completamente differente (operazione a valanga);
- resistente alle collisioni: non è possibile trovare due stringhe che, processate dallo stesso algoritmo, restituiscano lo stesso *hash*.

L'insieme di queste proprietà consente di convalidare e verificare l'integrità dei blocchi della *blockchain*. Ogni blocco è infatti identificato da un *hash*, che viene riportato nell'intestazione del blocco successivo e funge da garanzia contro le alterazioni dei dati. Confrontare l'*hash* del blocco con quello memorizzato sul blocco successivo è un modo molto più rapido per verificarne l'integrità rispetto al confrontare due versioni dell'intero blocco. Questi meccanismi di protezione, congiuntamente ai protocolli di consenso utilizzati, consentono unicamente di aggiungere nuovi blocchi di informazioni, ma non di modificare o rimuovere quelli già presenti all'interno della catena; si dice pertanto che le modifiche consentite sono del tipo *append-only*.

Ogni blocco è composto da due sezioni: l'intestazione (o *header*), che contiene i campi di gestione necessari al corretto funzionamento della *blockchain*, e il corpo (o *body*), all'interno del quale sono conservate le informazioni vere e proprie. Tra gli elementi presenti all'interno dell'*header* sono di fondamentale importanza il *timestamp* e il *prevhash* (Bellini, 2022). Il campo *timestamp* contiene infatti le precise coordinate temporali del momento in cui il blocco è stato inserito all'interno della catena e funge perciò da marca temporale. Il campo *prevhash* contiene invece l'*hash* del blocco precedente ed è essenziale per garantire l'integrità della *blockchain*, dal momento che ogni modifica nei dati di un blocco ne altererebbe l'*hash*, che non coinciderebbe più con quello riportato nell'intestazione del blocco successivo, rendendo evidente la manipolazione. Per nascondere tale alterazione, sarebbe infatti necessario cambiare

anche il campo *prevhash* del blocco successivo, azione che tuttavia modificherebbe l'*hash* di tale blocco e il problema si ripresenterebbe così per tutti i blocchi, fino al termine della catena. Per manomettere con successo un dato contenuto all'interno della *blockchain* sarebbe pertanto necessario:

- effettuare la modifica desiderata, alterando così l'*hash* del blocco;
- modificare a cascata tutti i blocchi successivi, inserendo il nuovo *hash* del blocco precedente nel campo *prevhash* e calcolando il nuovo *hash* dello stesso da inserire nel blocco successivo;
- applicare tale modifica contemporaneamente su tutti i nodi della rete, ossia su tutte le macchine che vi partecipano come *full node*<sup>39</sup> affinché nessuno noti la discrepanza.

Come già anticipato, un ulteriore elemento che contribuisce a bloccare i tentativi di manomissione è dato dall'algoritmo di consenso utilizzato. Affinché un nuovo blocco sia approvato dalla rete e sia quindi aggiunto alla *blockchain* infatti, i nodi che vi prendono parte devono svolgere un particolare lavoro di validazione. Tale lavoro è normato da un algoritmo di consenso, che è specifico per ogni *blockchain*. I principali algoritmi di consenso ad oggi utilizzati sono (Chiap, Ranalli e Bianchi, 2022):

- *proof of work* (PoW), in cui i nodi che ricoprono il ruolo di *miner* competono per calcolare l'*hash* del nuovo blocco. Il primo *miner* che giunge alla soluzione corretta lo comunica alla rete, la quale convalida il nuovo blocco, che si aggiunge definitivamente alla catena. È un algoritmo molto sicuro – soprattutto quando la *blockchain* assume dimensioni notevoli e diventa difficile portare a termine gli attacchi del 51%<sup>40</sup> – ma è sempre meno utilizzato a causa della sua ridotta efficienza energetica. Dal momento che un solo *miner* porta a termine

---

<sup>39</sup> È possibile partecipare a una *blockchain* come *full node* o *light node* (Chiap, Ranalli e Bianchi, 2019).

I *full node* memorizzano localmente una copia completa della catena e controllano che ogni blocco rispetti le regole del sistema, agendo in modo totalmente indipendente (es. se rilevano un'anomalia in un blocco lo rifiutano indipendentemente da ciò che fanno gli altri nodi).

I *light node*, al contrario, ricevono da un *full node* solo le informazioni necessarie a compiere determinate operazioni. Operare utilizzando un *light node* è più semplice, ma implica la delega della fiducia al *full node* che fornisce i dati, rendendo impossibile per l'utente verificare in autonomia l'integrità dei dati.

<sup>40</sup> Un attacco del 51% avviene quando un singolo attore riesce ad assicurarsi almeno il 50% + 1 della potenza di *hashing* e può quindi controllare l'intera catena in modo centralizzato (Chiap, Ranalli e Bianchi, 2019). È quasi impossibile da mettere in atto in *blockchain* molto popolate, poiché accentrare una percentuale così elevata richiederebbe investimenti troppo elevati.

l'operazione, infatti, la potenza di calcolo utilizzata da tutti gli altri viene di fatto sprecata;

- *proof of stake* (PoS), in cui un unico nodo validatore viene selezionato per la validazione di ogni blocco, riducendo in tal modo i consumi energetici necessari al funzionamento della *blockchain*. Per evitare che la scelta ricada sempre sullo stesso nodo, l'estrazione è effettuata in modo pseudo-casuale, con determinati attributi che possono aumentare le probabilità di essere scelti (es. tempo di partecipazione alla rete, quantità di moneta posseduta, ...). Il nodo validatore blocca temporaneamente una certa cifra (*stake*) all'interno della *blockchain*, a garanzia della veridicità dei suoi calcoli. Se per un determinato lasso di tempo successivo alla validazione non si riscontrano problemi, il nodo validatore rientra in possesso di tale cifra, altrimenti questa viene 'bruciata'. Pur essendo una valida soluzione per ridurre l'energia consumata dalle *blockchain*, questa soluzione obbliga all'adozione di una criptovaluta di riferimento per le attività di *staking*;
- *proof of authority* (PoA): solo alcuni nodi, previa autenticazione, sono autorizzati a validare i nuovi blocchi. A seconda della configurazione della *blockchain*, i nuovi blocchi possono essere accettati in automatico, senza alcuna forma di verifica, oppure essere approvati con voto unanime o a maggioranza degli altri nodi. Non è in questo caso necessario associare una moneta alla *blockchain* e il consumo di energia è ridotto rispetto ai protocolli PoW, ma si tratta di fatto di un sistema non decentralizzato (solo alcuni attori possono autorizzare i blocchi e quindi governare il sistema). Per questo motivo è un protocollo adottato soprattutto in *blockchain* private o consortili.

In base alle modalità di gestione dell'autorità adottate dal sistema, si possono identificare tre diverse tipologie di *blockchain*: pubbliche, private e consortili (Chiap, Ranalli e Bianchi, 2019).

Nelle *blockchain* pubbliche (o *permissionless*) chiunque può accedere alla rete, immettere nuovi dati e partecipare alla validazione dei nuovi blocchi. L'autorità è completamente decentralizzata e ogni nodo presenta i medesimi stessi diritti e doveri. Dal momento che l'accesso è consentito a chiunque, ogni informazione contenuta all'interno della *blockchain* è pubblica. Al fine di garantire la *privacy* degli utenti, ogni entità che opera sulla *blockchain* non viene presentata con il proprio nome, ma è

identificata da un indirizzo univoco. Le *blockchain* pubbliche possono presentare problemi di scalabilità quando gli utenti e il volume delle operazioni aumentano troppo velocemente. In questi casi si possono infatti formare delle congestioni che riducono la velocità di transazione (la verifica di una transazione può arrivare a richiedere anche diverse ore) e ne aumentano i costi.

Le *blockchain* private e consortili sacrificano parzialmente la decentralizzazione del sistema per ottenere in cambio un maggior controllo sugli accessi e prestazioni migliori (ottenute riducendo il volume delle transazioni). Nelle *blockchain* private il controllo e l'autorità sono attribuiti a una singola entità, elemento che le rende di fatto poco più di un semplice database condiviso (Narayanan, 2015). Le *blockchain* consortili si configurano invece come un ibrido tra *blockchain* pubbliche e private: il controllo e l'autorità sono distribuiti tra i nodi della rete, ma l'accesso al sistema è limitato a specifici utenti, previa verifica della loro identità. Sono considerate affidabili solo nella misura in cui lo sono gli attori scelti per il processo di verifica degli accessi e per la validazione delle registrazioni. Rispetto a un database distribuito forniscono più alti livelli di controllo degli errori e di validità delle transazioni (Chiap, Ranalli e Bianchi, 2019). Ad esempio, se un'organizzazione venisse *hackerata* e alcuni dati all'interno di un database distribuito fossero alterati, nessun partecipante avrebbe più accesso all'originale. I protocolli di consenso di una *blockchain* consortile, al contrario, farebbero subito emergere il problema e impedirebbero agli altri nodi di validare i dati corrotti.

Le *blockchain* aiutano quindi a «*costruire in modo trasparente un rapporto di fiducia tra [le aziende][...], abbattendo le barriere psicologiche o strategiche*» [Chiap, Ranalli e Bianchi, 2019, p. 201] che spesso ostacolano la collaborazione. La condivisione di dati risultante consente da un lato di aumentare l'efficienza operativa degli attori coinvolti, rimuovendo gli intermediari e velocizzando le comunicazioni, e dall'altro apre a nuove possibilità che sarebbero altrimenti precluse. È ad esempio possibile utilizzare una *blockchain* per «*semplificare i rapporti tra grandi, medie e piccole imprese all'interno delle filiere produttive, proteggere i prodotti dalla contraffazione, garantire maggiore trasparenza al consumatore e aiutare le altre aziende italiane a fare leva sui propri marchi per creare nuove sorgenti di guadagno nel mondo del digitale*» [Ferri, 2020, p. 14].

Per quanto riguarda l'Italia, a partire dal 2018 il Paese ha aderito alla *European Blockchain Partnership* assieme ad altri 26 Stati membri dell'UE<sup>41</sup>, un'alleanza che ha tra i principali obiettivi quello di favorire l'implementazione della *blockchain* da parte delle imprese. È utile notare inoltre che il mercato italiano relativo alla *blockchain* è in crescita (Osservatorio Blockchain & Distributed Ledger, 2023) e registra nel 2022 un +50% rispetto all'anno precedente, raggiungendo i 42 milioni di euro. Il settore più attivo è quello finanziario (35%), mentre quello agroalimentare si posiziona al quarto posto, con il 6% dei progetti totali. In aggiunta a ciò, secondo la società di ricerca Juniper Research (2019) integrare le tecnologie dell'IoT e la *blockchain* nel settore Agrifood potrebbe portare a un risparmio di circa 31 miliardi di dollari a livello globale, ottenuto grazie alla riduzione delle frodi e dei costi di *compliance*. A tal proposito, l'integrazione tra *Internet of Things*, intelligenza artificiale e *blockchain* sarà di vitale importanza per costruire dei sistemi credibili, dal momento che «*la tecnologia blockchain non è in grado - da sola - di garantire la tracciabilità di un prodotto; [...] [ma] deve invece essere inserita in un contesto più ampio di soluzioni tecnologiche al servizio della tracciabilità*» [Renga, 2019]. La principale criticità delle *Distributed Ledger Technologies* è infatti legata alla loro capacità di certificare l'integrità dei dati soltanto dal momento della loro immissione nel registro, ma se il dato inserito è sbagliato, «*l'unico beneficio di un registro digitale è aumentare la cosiddetta accountability, ovvero tenere traccia in modo non modificabile di chi ha registrato il dato sbagliato*» [Ferri, 2020, p. 75]. Si tratta del cosiddetto *problema del primo dato*, per il quale sono state identificate due possibili soluzioni:

- utilizzare l'IoT per l'inserimento automatico dei dati all'interno della *blockchain*. Far confluire in modo automatizzato i dati raccolti in campo dai sensori in merito a umidità dell'aria, temperatura, posizione GPS, etc. all'interno della *blockchain* riduce infatti la possibilità che vi vengano inseriti dati sbagliati (per errore o intenzionalmente);
- ricorrere agli oracoli, dei soggetti che fungono da collegamento tra il mondo *on-chain* e quello *off-chain* e si pongono a garanzia della veridicità e dell'integrità dei dati inseriti all'interno del registro. Affinché risultino affidabili, questi organismi devono essere indipendenti, non avere conflitti di interessi e

---

<sup>41</sup> Maggiori dettagli disponibili su: <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/news/italy-joins-european-partnership-blockchain-supporting-delivery-cross-border-digital-public>

possibilmente attingere da banche dati pubbliche, in modo tale che l'informazione inserita nella *blockchain* sia verificabile da chiunque. Si tratta di un ruolo molto delicato, dato che «*il fallimento anche solo di un oracolo può inficiare [...] la qualità dell'intero processo di tracciabilità e - soprattutto in presenza di smart contract - potrebbe innescare in automatico ripercussioni negative lungo tutta la filiera*» [Renga, 2019].

## **Applicazioni**

Le principali applicazioni della *blockchain* nel comparto agroalimentare e i relativi vantaggi comprendono: una maggior tracciabilità e trasparenza, la possibilità di verificare le informazioni sulla sostenibilità delle aziende, la tutela degli enti pubblici da frodi nell'erogazione di fondi e sussidi, l'efficientamento delle transazioni, una migliore attribuzione delle responsabilità individuali ai diversi attori della filiera e l'aumento della credibilità nella comunicazione aziendale.

Per quanto riguarda l'aumento della tracciabilità e della trasparenza, si tratta di un obiettivo che caratterizza l'86% degli applicativi analizzati dall'Osservatorio Smart AgriFood in un'indagine sulla *blockchain* (Renga, 2019). La sua rilevanza è legata al fatto che «*una delle maggiori preoccupazioni dei consumatori è quella di verificare la provenienza e la qualità del cibo che pagano*» [Ferri, 2020, p. 81] e all'elevata attenzione pubblica rivolta al tema negli ultimi anni. Tale crescente attenzione è in parte provocata dalla globalizzazione delle catene di fornitura e dalla maggiore apertura ai mercati internazionali mediante l'adozione di *free trade policy*, che, data l'eterogeneità normativa nei diversi paesi coinvolti, hanno aumentato la necessità di effettuare controlli su attributi quali l'origine, gli standard etici e qualitativi, etc. dei prodotti, per assicurare il rispetto delle normative del paese di destinazione. Nonostante l'adozione di standard internazionali quali l'HACCP e l'ISO 22000, non mancano infatti problemi relativi alla tracciabilità e alla verificabilità delle informazioni fornite che, in virtù della loro natura fungibile, riguardano soprattutto le *commodity* agricole. Utilizzare la *blockchain* offre in questi casi una possibile soluzione – anche se non del tutto priva di problemi –, poiché consente di condividere «*a traceable and transparent document for record-keeping purposes*» accessibile a tutti gli stakeholder (Bhat e Jōudu, 2019).

Implementare un adeguato sistema di tracciabilità della filiera produttiva presenta inoltre un duplice vantaggio: da un lato protegge i prodotti italiani dalle contraffazioni e dal fenomeno dell'*italian sounding*<sup>42</sup>, tutelando la professionalità dei produttori nazionali e il valore del *Made in Italy*, mentre dall'altro fornisce ai consumatori gli strumenti necessari a compiere scelte informate e consapevoli. Utilizzare la *blockchain* per monitorare le fasi produttive e logistiche, per controllare la presenza di allergeni o per rendere più efficienti le procedure di richiamo dei prodotti può infatti aumentare la *food safety* e la trasparenza in merito alla qualità degli alimenti (es. informazioni su trattamenti subiti, zona di produzione o condizioni di trasporto che ne influenzano le proprietà organolettiche) (Renga, 2019). Nei casi in cui la compromissione di un lotto determini la necessità di ritirarlo dal mercato, utilizzare la *blockchain* consente di «*avere una visibilità maggiore sull'intero percorso svolto dal prodotto e identificare le cause di non conformità, impedendo [...] che chi ha causato il danno possa modificare i dati a proprio favore ostacolando le procedure di richiamo*» [CREA, 2021, p. 404]. La possibilità di certificare l'origine degli alimenti e i trattamenti da questi subiti, riduce infine l'asimmetria informativa tra produttore e consumatore e consente alle aziende virtuose con prodotti di elevata qualità di distinguersi dalla concorrenza e vedersi riconoscere un prezzo maggiore.

Un'ulteriore applicazione della *blockchain* in ambito agroalimentare è connessa alla possibilità di sfruttare le informazioni fornite per ottenere una panoramica più dettagliata sulla sostenibilità ambientale e sociale delle aziende. Sono stati avviati ad esempio progetti per il contrasto alle pratiche di caporalato o per verificare «*il rispetto di standard internazionali a garanzia del mantenimento delle riserve naturali*» [Renga, 2019], nonché per calcolare con maggiore precisione l'impronta ecologica dei diversi alimenti in relazione alle specifiche modalità di produzione e trasporto (Commissione Europea, 2022c). La Commissione Europea sostiene a tal proposito che «*[i]nnovations in blockchain technologies are powerful enablers for collective action to fight climate change*» [Commissione Europea, 2022c].

In merito alla tutela degli enti pubblici contro le frodi, è possibile utilizzare la *blockchain* per garantire che l'erogazione di fondi e sussidi (ad esempio quelli legati alla PAC) avvenga solo in seguito alla verifica della sussistenza dei criteri di assegnazione

---

<sup>42</sup> Il fenomeno dell'*italian sounding* consiste nell'utilizzare elementi che rimandano all'Italia e ai suoi prodotti tipici (marchi, colori, immagini e riferimenti geografici) nelle attività di promozione e commercializzazione di prodotti, prevalentemente agroalimentari, che sono in realtà realizzati altrove.



(Renga, 2019). È questo uno degli obiettivi del progetto PININ<sup>43</sup>, che, mediante la tracciatura dei bovini al pascolo, consente di verificarne la posizione in tempo reale, assegnando i fondi per i bovini in alpeggio solo dopo aver accertato la loro presenza in una zona montana per un lasso di tempo sufficiente a rispettare i criteri di erogazione.

Per quanto riguarda l'efficienza della *supply chain*, la *blockchain* consente di automatizzare l'esecuzione delle transazioni mediante l'utilizzo di *smart contract* (vedi paragrafo 3.4.2), eliminando quegli intermediari a basso valore aggiunto che rendono il processo più lungo e costoso.

Infine, è possibile utilizzare la *blockchain* come strumento di attribuzione delle responsabilità di fronte a eventi indesiderati quali l'interruzione della catena del freddo. Ad oggi, infatti, vista l'impossibilità di «*risalire all'esatto istante in cui questa è stata spezzata, [...], i contratti tra fornitori e commercianti stabiliscono [spesso] un'attribuzione delle colpe di default*» [Ferri, 2020, p. 91]. In un sistema che integra *blockchain* e *Internet of Things* sarebbe tuttavia semplice stabilire l'esatto momento in cui il prodotto è stato sottoposto a temperature inadeguate e di conseguenza l'attore responsabile, evitando di attribuire colpe (e relative sanzioni) in modo arbitrario e premiando le aziende capaci di rispettare i parametri stabiliti.

## **Limiti**

Come ogni tecnologia, anche la *blockchain* presenta alcuni limiti che devono essere affrontati affinché possa trovare applicazione tra le aziende agricole. Al già citato problema relativo alla correttezza dei dati al momento dell'inserimento, si aggiungono le difficoltà di implementare una *blockchain* affidabile ed efficiente all'interno di un ecosistema frammentato e poco incline alla collaborazione come quello italiano e il ridotto valore aggiunto apportato nelle filiere corte.

Dati gli ingenti investimenti necessari, se vogliono trarre il massimo valore da questa tecnologia, gli imprenditori agricoli «*dovranno accettare un investimento comune, collaborazione, condivisione dei dati*» [Ferri, 2020, p. 59], mettendo da parte la rivalità e unendo le forze per fare sistema. Solo in questo modo è possibile ottenere una fonte unica e affidabile, che sia consultabile sia dagli attori coinvolti nella filiera che dai singoli consumatori. Si tratterebbe di un notevole cambio di paradigma rispetto alla situazione

---

<sup>43</sup> Maggiori informazioni in merito al progetto sono disponibili sul sito <http://www.pinin-project.eu/>

attuale, in cui i dati – quando vengono raccolti – sono custoditi gelosamente all’interno dei confini aziendali e i sistemi informativi utilizzati non sono predisposti per interfacciarsi e integrarsi gli uni con gli altri. Data la natura immutabile delle informazioni integrate in una *blockchain*, è inoltre necessario organizzare l’attività in modo che queste siano inserite all’interno del sistema informativo aziendale in modo preciso e tempestivo, minimizzando gli errori e la perdita di dati.

La presenza di aziende che seguono il proprio prodotto dalla semina alla commercializzazione (perché la fase di trasformazione è assente o viene svolta all’interno dei confini aziendali, come avviene spesso nelle aziende vinicole) riduce inoltre il potenziale valore aggiunto che potrebbe apportare la *blockchain*. Come nota Ferri, «*[d]el resto, come può rivelarsi utile una rete a un nodo solo?*» [Ferri, 2020, p. 90]. L’utilità e la credibilità di un registro distribuito sono infatti direttamente proporzionali al numero di nodi presenti che vi prendono parte. Si tratta pertanto di uno strumento applicabile solo alle filiere che coinvolgono un elevato volume di attori, ma che non avrebbe alcun senso adottare negli altri casi.

### 3.4.2 *Smart Contract*

Il termine *smart contract* viene introdotto per la prima volta da Nick Szabo nel 1994, che lo definisce come «*a computerized transaction protocol that executes the terms of a contract*» [Szabo, 1994]. Secondo Szabo (1994), tale automazione dell’esecuzione comporta numerosi vantaggi, tra cui l’eliminazione degli intermediari, che risultano superflui nel momento in cui viene meno la necessità di una terza parte di fiducia; la riduzione delle frodi, dato che il contratto viene eseguito «*solamente se i criteri che sono stati stabiliti e codificati sono rispettati*» [CREA, 2021, p. 404], e l’abbattimento dei costi di transazione. In seguito, grazie all’integrazione con le *Distributed Ledger Technologies*, gli *smart contract* divengono inoltre decentralizzati e immutabili. Secondo l’ordinamento italiano, «*[s]i definisce “Smart Contract” un programma per elaboratore che opera su Tecnologie basate su registri distribuiti e la cui esecuzione vincola automaticamente due o più parti sulla base di effetti predefiniti dalle stesse*» [d.l. n. 135/2018, art. 8 ter, c. 2]. Per essere validi, devono soddisfare il requisito della forma scritta. Le principali caratteristiche che è possibile riscontrare negli *smart contract* sono (Bottoni et al., 2020):

- autonomia di esecuzione. Il codice che li compone è infatti autoeseguibile, ossia, nel momento in cui verifica l'esistenza delle condizioni predefinite, produce i suoi effetti senza bisogno di alcun intervento esterno;
- natura deterministica, poiché, a parità di condizioni esterne, ogni volta che viene eseguito il risultato è il medesimo;
- natura distribuita, dato che sono replicati in tutti i nodi della *blockchain*;
- immutabilità, che è «*a constraint, as well as a guarantee for users, that directly derives from their implementation on blockchain*» [Bottoni et al., 2020, p. 4];
- personalizzazione, dal momento che gli specifici requisiti per l'esecuzione e le azioni da svolgere possono essere liberamente programmate;
- trasparenza. Il codice sorgente è infatti visibile all'interno della *blockchain* e, a meno che non venga criptato, chiunque vi abbia accesso può leggerlo;

Nel caso in cui vi siano dati sensibili da oscurare – ma spesso anche al fine di ridurre la dimensione del testo inserito nella *blockchain*<sup>44</sup> - è possibile ricorrere agli algoritmi di *hash* (vedi paragrafo 3.4.1), pubblicando solo la stringa di testo da essi risultante. In questo modo, pur rendendo pubblico il contratto, le informazioni riservate vengono mantenute private.<sup>45</sup>

## Applicazioni

Le principali applicazioni degli *smart contract* sono molteplici ed eterogenee e comprendono ad esempio le compravendite di beni senza intermediari (es. partite di grano, capi di bestiame o, potenzialmente, terreni), la regolazione dei rimborsi assicurativi e la gestione della catena di fornitura (Renga, 2019).

Con riferimento al settore assicurativo, è possibile utilizzare *smart contract* per l'erogazione automatizzata di pagamenti e indennizzi, che avverrebbe utilizzando le cosiddette *stablecoin*<sup>46</sup> (Kosior, 2021). Pur essendo applicabili a qualsiasi assicurazione, si tratta di un sistema particolarmente utile per le polizze parametriche, uno strumento introdotto negli anni '90 che «*makes the payment of compensation dependent on strictly*

---

<sup>44</sup> Nella maggior parte dei casi, inserire delle informazioni all'interno di una *blockchain* ha un costo, noto come *fee*, che è direttamente proporzionale alla dimensione della comunicazione. Ridurre il volume dei dati conservato all'interno del registro distribuito consente perciò di minimizzare tale *fee*.

<sup>45</sup> Maggiori informazioni a riguardo sono disponibili all'indirizzo [www.academy.bit2me.com/it/que-es-hash/](http://www.academy.bit2me.com/it/que-es-hash/)

<sup>46</sup> Le *stablecoin* sono criptovalute il cui valore è ancorato a quello di un asset stabile (principalmente il dollaro o l'oro) e non presenta quindi particolari oscillazioni.

*defined indices related to weather and natural phenomena, not on the calculation of damage and losses in production»* [Kosior, 2021, p. 149]. Esistono ad esempio polizze che assicurano contro le precipitazioni eccessivamente scarse o abbondanti, le temperature troppo elevate o le rese particolarmente basse. Si tratta di un'innovazione interessante perché:

- la possibilità di conoscere in anticipo l'importo dell'indennizzo e le condizioni di erogazione consente di risparmiare i costi relativi all'uscita di un perito per la stima dei danni;
- i tempi per ricevere il pagamento sono estremamente ridotti. Dal momento in cui un oracolo comunica l'avverarsi dell'evento alla *blockchain* a quello in cui l'agricoltore riceve il pagamento potrebbero infatti trascorrere solo pochi minuti, un notevole vantaggio rispetto alle diverse settimane – o talvolta mesi – necessarie oggi con le polizze tradizionali.

Per quanto riguarda la gestione dei rapporti con gli altri attori della filiera, è possibile utilizzare gli smart contract per automatizzare i pagamenti, eventualmente subordinando la loro esecuzione al rispetto di determinati requisiti. Utilizzando dei tag per la geolocalizzazione, è ad esempio possibile per gli acquirenti pagare i prodotti acquistati nell'esatto momento in cui questi giungono a destinazione, modificando la cifra in relazione alla loro freschezza e al rispetto della catena del freddo (Ferri, 2020). Se la consegna è gestita dal fornitore, è infatti possibile programmare lo *smart contract* in modo da riconoscere l'intero importo nel caso in cui la catena del freddo venga rispettata o applicare in automatico uno sconto o invalidare la transazione se si rileva il raggiungimento di temperature sub-ottimali. Quando invece ci si affida a una società terza per il trasporto, il pagamento del corriere può dipendere da parametri quali la temperatura mantenuta e la velocità di consegna.

## **Limiti**

I principali problemi connessi all'utilizzo degli *smart contract* come strumento per l'adempimento contrattuale riguardano la loro irrevocabilità e l'effettiva corrispondenza tra quanto pattuito dalle parti e quanto eseguito dal programma.

L'irrevocabilità che li caratterizza provoca infatti la paradossale situazione per cui nemmeno le parti direttamente coinvolte nell'accordo possono arrestare il

programma una volta avviato, a meno che non vengano inserite al suo interno delle esplicite clausole di annullamento (Parola, Merati e Gavotti, 2018). Come procedere perciò il seguito all'accertamento di un vizio nell'espressione della volontà tale per cui il contratto risulta nullo? Per contenere i problemi derivanti da tale caratteristica, il Parlamento Europeo con la risoluzione del 20 ottobre 2020 auspica che gli *smart contract* presentino dei «*meccanismi in grado di arrestarne e invertirne l'esecuzione, in particolare alla luce delle preoccupazioni private della parte debole o delle preoccupazioni pubbliche, per esempio quelle legate agli accordi di cartello e ai diritti dei creditori in caso di insolvenza e ristrutturazione*» [Parlamento Europeo, 2020, p. 12]. L'affermarsi di standard sui quali basare i propri *smart contract* che includano tali clausole potrebbe contribuire ad arginare il problema, ma il problema permane per i casi in cui questi standard non vengono applicati.

Dal momento che gli *smart contract* sono basati su un linguaggio informatico del tipo *if-this-then-that*, che non è adatto a tradurre alcune fattispecie qualitative (ad esempio la buona fede) e reagisce soltanto alle fattispecie preventivamente identificate e che prevedono delle specifiche azioni di risposta, «*non si può escludere il rischio che il codice non contenga una corretta trasposizione della volontà della parte contraente e vi siano discrepanze tra l'accordo contrattuale e la traduzione nell'algoritmo.*» [Parola, Merati e Gavotti, 2018, p. 686]. Si tratta di una criticità che può essere parzialmente risolta aumentando la qualità del codice utilizzato per scrivere i contratti – azione per cui risulterebbe nuovamente utile definire degli standard – ma che ad oggi non può essere del tutto eliminata.

## 4. Casi studio

### 4.1 Premesse e approccio di analisi

Nei capitoli precedenti sono state indagate le dimensioni dell'agricoltura ritenute fondamentali ai fini della presente trattazione, per poi approfondire alcune tra le principali tecniche e modelli agricoli individuati come utili per lo sviluppo e l'evoluzione dell'attività agricola e, in stretta connessione, si è operata una disamina delle principali innovazioni tecnologiche applicate o potenzialmente applicabili al settore agricolo ai fini del suo sviluppo ed evoluzione. Nello specifico, per quanto riguarda la parte relativa alle dimensioni ritenute fondamentali, si sono poste delle riflessioni in merito a quello che è (o potrebbe o, in alcuni casi, dovrebbe essere) il ruolo dell'agricoltura con riferimento a:

- alimentazione con analisi di parametri-obiettivo di impatto in termini di salute, sicurezza alimentare, qualità e capacità nutrizionale, etc.;
- ambiente e sostenibilità con trattazione di parametri-obiettivo incentrati su un rapporto sinergico positivo tra agricoltura e terra-territorio, sulla sostenibilità e sulla salvaguardia delle risorse e del suolo, sulla riduzione degli sprechi alimentari;
- società e sviluppo sociale e culturale con riflessioni sul lavoro nel campo dell'agricoltura, sulle logiche di consumo legati ai prodotti alimentari e sullo sviluppo del territorio.

In termini sostanziali attraverso un percorso di riflessione e disamina di questi punti si sono volute porre le fondamenta per quello che è l'interrogativo chiave della presente trattazione: qual è il ruolo dell'agricoltura e come può evolvere per riuscire ad assolvere a tale ruolo? Si tratta certamente di un interrogativo che trova di fronte molta complessità, una complessità fatta di diverse componenti ed estrazioni sia per la molteplicità di fattori e condizioni che concorrono a questo interrogativo, sia per le fortissime interrelazioni tra agricoltura, territorio, società, cultura e conoscenze e tecnologie disponibili.

Proprio per questo motivo, con il primo capitolo si è scelto di affrontare le diverse dimensioni proponendo una trattazione a cavallo tra lo stato attuale del mondo agricolo e una visione con obiettivi e traiettorie auspicabili.

All'interrogativo chiave posto in merito al ruolo dell'agricoltura, si è quindi risposto con la domanda: quale punto di arrivo è auspicabile per il mondo agricolo? Come potrebbe o dovrebbe essere l'agricoltura?

Seppur con i limiti legati allo scopo della presente trattazione, si è giunti al seguente desiderata, forse tanto ovvio quanto sempre più stringente e necessario: un'agricoltura che nutre, che offre cibo sicuro e in grado di esprimere i valori e l'essenza-legame con il territorio, che non sfrutta e depaupera l'ambiente, ma che anzi lo salvaguarda con percorsi di rigenerazione, un'agricoltura causa ed effetto della crescita sociale sia sul fronte produttivo e lavorativo, sia sotto il profilo del consumo e di espressione culturale, sociale e identitaria del territorio.

La stringenza e la necessità poste in evidenza sono dimostrate anche dalle evoluzioni, sia in campo normativo (vedi paragrafo 1.5) che sul fronte della ricerca e della letteratura conseguente (vedi paragrafo 1.6), come in parte rilevato a conclusione del primo capitolo.

Sulla base di quanto osservato, si è quindi posta la questione sul come, su quali possono essere i modelli e gli 'strumenti' utili a tale evoluzione individuando appunto due fronti principali: le tecniche agricole e le innovazioni tecnologiche, anche non strettamente o esclusivamente non legate al comparto dell'agricoltura, ma potenzialmente in grado di innescare 'salti' di paradigma interni al mondo agricolo.

Con riferimento al primo fronte (vedi capitolo 2), si sono individuate sia tecniche già in uso da anni, che hanno dimostrato di funzionare, sia tecniche molto più recenti e di prima attuazione, che sembrano essere potenzialmente fonte e motore dell'evoluzione ricercata e auspicata.

Per ciò che concerne il piano tecnologico (vedi capitolo 3), si sono proposte delle riflessioni a livello esplorativo con riferimento ad applicazioni legate ai campi della robotica, dell'*Internet of Things*, della *machine vision*, del *machine learning*, dell'intelligenza artificiale, della *blockchain* e degli *smart contract*.

Con il presente capitolo, che ha per oggetto l'analisi di casi studio, lo scopo è quello di comprendere, non solo in termini di riscontro, ma anche e soprattutto in termini di potenzialità, se e in che modo i fronti individuati, sul piano tecnico agricolo e

di innovazione tecnologica, possano effettivamente o meno costituire degli 'ingredienti' motore dell'evoluzione auspicata e sempre più necessaria.

A tal proposito, con il fine di poter rispondere al meglio a tale interrogativo, a tale obiettivo di ricerca, ci si è interrogati sul metodo e sulla chiave di analisi e ricerca maggiormente in grado di fornire indicazioni utili, privilegiando e scegliendo di dar maggior peso a riscontri di indirizzo e di traiettoria ('approccio normativo'), anziché rischiare con un approccio statistico ('approccio descrittivo') di non ottenere riscontri sufficientemente utili se non addirittura tautologici.

Come infatti in parte già rilevato, buona parte delle tecniche agricole, e così anche le innovazioni tecnologiche oggetto della presente trattazione, presentano applicazioni ancora poco diffuse e agli stadi iniziali del loro sviluppo. Ciò risulta essere vero in modo particolare per il contesto italiano, il cui settore agricolo in modo innegabile, seppur non esclusivo, presenta purtroppo in buona parte una situazione molto frammentata e non strutturata, soprattutto a monte della filiera: una filiera che presenta degli accentramenti, che negli anni hanno dimostrato di essere dei 'colli di bottiglia' incentrati con logiche più fondate su rendite di posizione che su concreti meccanismi virtuosi di crescita ed evoluzione del comparto produttivo, con conseguenti inerzie e ritardi verso una diffusione delle tecniche e tecnologie trattate.

Alla luce di quanto appena evidenziato, ritenendo che un metodo fondato su logiche di 'ricerca campionaria' per quanto ben strutturato condurrebbe verosimilmente a rilevare un'applicazione ancora poco diffusa e in buona parte dei casi incipiente, con evidenze tali da non fornire quella necessità di traiettoria precedentemente prospettata, si è scelto di individuare alcuni casi di pionieri che hanno applicato in modo efficace una o più delle tecniche o tecnologie individuate.

Sulla base di questi presupposti, si è quindi proceduto, seppur con i limiti e con i tempi legati alla presente trattazione, a una mappatura che ha consentito di individuare otto casi studio interessanti: Meracinque, DiCristiana, Porto Felloni, Planet Farms, Ferrari Farm, Karadrà, Feeducia e Pixelfarming Robotics. Grazie anche alla ricchezza delle informazioni presenti in relazione a questi casi (articoli, social, blog sulle loro attività, video, interviste, ...) è stato possibile condurre un'analisi in grado di porre le questioni chiave precedentemente indicate.

Nella parte che segue, con riferimento a ognuno di questi casi, con il paragrafo 4.2 si propone una panoramica che osserva i seguenti aspetti: localizzazione, tipo di



coltivazioni, metodo produttivo e dinamiche commerciali, visione, percorso di sviluppo, modelli e tecniche agricole e innovazioni tecnologiche implementate.

Forte anche di quanto osservato con il paragrafo precedente, il paragrafo 4.3, anche con l'aiuto di schemi-tabella, propone un quadro di analisi che pone in evidenza e in relazione: realtà osservate, tecniche agricole e innovazioni tecnologiche utilizzate e benefici ottenuti e potenzialmente ottenibili nel medio-breve periodo.

Infine, con il paragrafo 4.4 si ricavano, anche grazie allo sviluppo dei paragrafi precedenti, quelli che possono essere dei possibili pattern di sviluppo utili per l'evoluzione del comparto agricolo alla luce degli obiettivi posti dalla presente trattazione.

## 4.2 Le realtà considerate: una panoramica

### 4.2.1 Meracinque

#### Quadro 4.1 - Meracinque

	<b>MERACINQUE</b>	Mantova (Lombardia)	Coltivazione di riso
<b>Forma giuridica</b>	<b>Area coltivata</b>	<b>Fatturato</b>	<b>Dipendenti</b>
Società semplice	70 ettari	N.D.	0-9

FONTE: visura camerale azienda

Meracinque è il marchio attraverso cui l'azienda agricola Borgo Libero commercializza il proprio Riso Carnaroli Classico. Il valore fondante dell'intera attività è la volontà di integrare tradizione e innovazione per produrre un riso di elevatissima qualità, dando vita a una realtà in cui sostenibilità e innovazione non sono antitetiche, ma si alimentano reciprocamente (vedi R1).

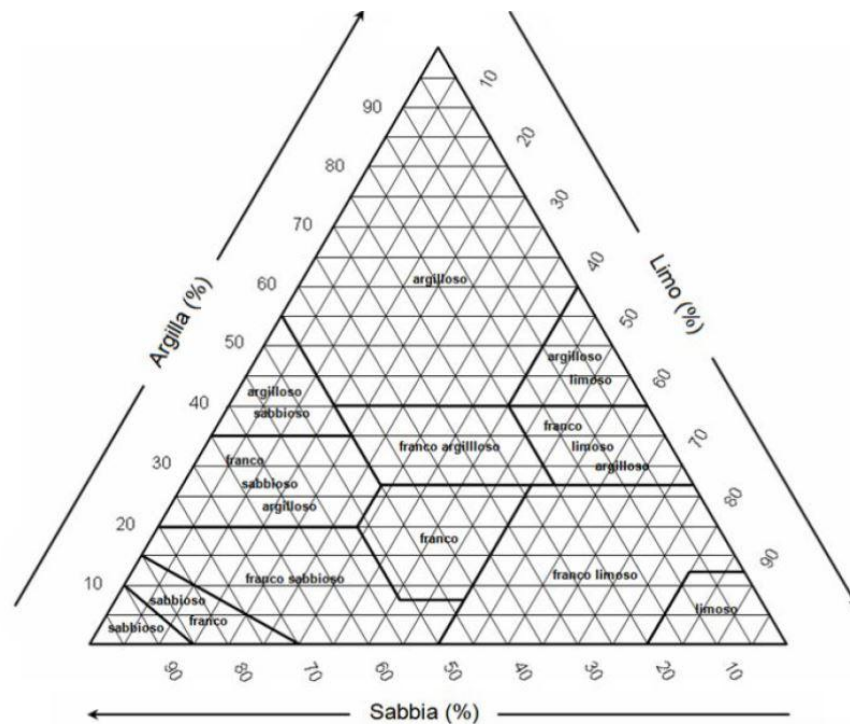
La risaia in cui il riso è coltivato si trova a Roncoferraro, in provincia di Mantova, una zona particolarmente adatta allo scopo grazie alle sue caratteristiche geo-fisiche. Si tratta infatti di un terreno franco-argilloso (vedi figura 4.1) capace di trattenere elevati volumi di acqua e minerali da cui le piante di riso possono trarre nutrimento (vedi R2).

Meracinqe è un progetto portato avanti dalle cinque sorelle Tovo, che hanno deciso di unire le loro conoscenze – una è laureata in Giurisprudenza, le altre quattro in ambito Economico-Aziendale – e le competenze maturate durante il loro percorso lavorativo – supportate dall’esperienza agronomica del padre – per prendere in mano l’azienda agricola di famiglia, partendo proprio dalla coltivazione del Riso Carnaroli e dalla creazione di questo brand (vedi R3).

Il principale canale di vendita è rappresentato dal settore Ho.Re.Ca., con particolare attenzione ai ristoranti di fascia alta che ricercano nel prodotto elevati standard qualitativi. Non mancano inoltre uno *shop online*, che si rivolge direttamente ai consumatori, e la presenza del prodotto negli scaffali (fisici o virtuali) di alcuni rivenditori selezionati.

---

**Figura 4.1 - Triangolo di tessitura del suolo**



FONTE: USDA

---

Anche grazie alle competenze maturate e ai contatti creati dalle sorelle nel corso delle loro esperienze all'estero, il riso è inoltre commercializzato in diversi Paesi Europei e l'intenzione è quella di espandere la vendita anche in Nord America.

Il processo produttivo integra diverse tecniche e tecnologie, quali l'agricoltura di precisione e quella rigenerativa, l'*Internet of Things*, la *machine vision* e la *blockchain*.

Prima di procedere con la messa a coltivazione di un campo se ne effettua un'attività di mappatura per raccogliere dati sulle sue caratteristiche (vedi figura 4.2). Le immagini satellitari e i sensori posti in campo sono utilizzati al fine di estrarre dati relativi allo stato di salute delle piante, alla temperatura dell'acqua in risaia e alle caratteristiche del suolo. Tali informazioni sono poi utilizzate al fine di analizzare il terreno e stabilire il corretto fabbisogno irriguo e nutritivo delle piante. È in questo modo possibile condurre operazioni (semina, concimazione, etc.) a tasso variabile, identificare le infestanti, prevenire le patologie e individuare il momento migliore per la raccolta.

Le operazioni in campo sono svolte da macchinari di ultima generazione, che sfruttano le tecnologie di geolocalizzazione per implementare un sistema di guida autonoma che richiede l'intervento dell'operatore solo per le manovre a fine campo.

Per prepararsi a rispondere alla carenza idrica che sta investendo la Pianura Padana, visto l'elevato fabbisogno idrico di una coltura come il riso, nel 2023 10 ettari della proprietà sono stati utilizzati per sperimentare il protocollo *Alternate Wetting and Drying* (AWD), una modalità innovativa di gestione dell'acqua in risaia. Si tratta di un sistema di irrigazione che alterna periodi di asciutta e di sommersione della risaia, consentendo un risparmio idrico medio del 25%, con picchi del 34% nel periodo estivo (giugno-luglio), senza alterare la qualità del riso e con effetti minimi sulla riduzione della quantità prodotta (vedi R4).

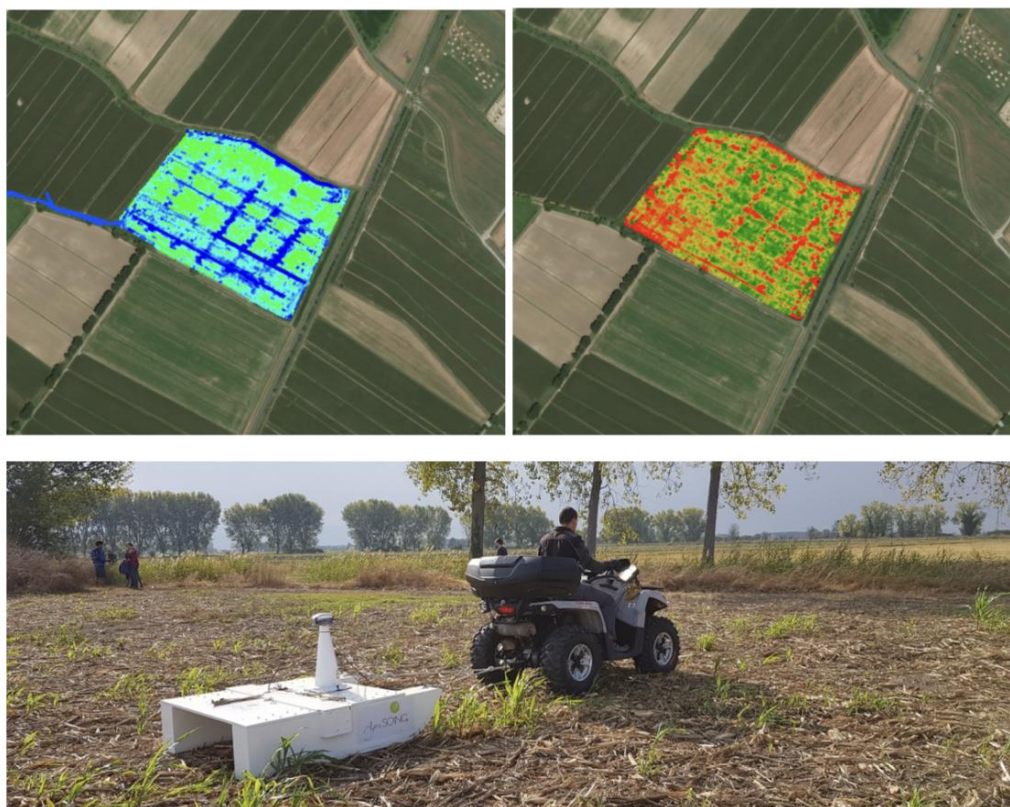
L'intero processo è condotto prendendo in considerazione la sua sostenibilità ambientale, con particolare focus sul mantenimento di uno stato di salute del suolo ottimale. Le operazioni in campo sono infatti svolte in accordo con i principi dell'agricoltura rigenerativa, che prevede l'utilizzo di colture di copertura e lunghe rotazioni dei terreni, nonché la minimizzazione delle lavorazioni del terreno.

Le rotazioni sono pianificate in modo da controllare le infestanti, assicurare alle piante i giusti micronutrienti e preservare la biodiversità. I campi in cui il riso Meracinque viene prodotto, anche grazie ai margini lasciati incolti ospitano infatti numerosi esemplari di fauna selvatica tra cui aironi, ibis e garzette (vedi R5).

Viene inoltre utilizzato il metodo Micro-Natural<sup>®</sup>, una tecnica sviluppata da un agronomo giapponese che prevede lo spargimento in campo di *Effective-Microorganisms* (vedi paragrafo 1.3.4) e polvere di roccia al momento della spigatura per rinforzare le difese immunitarie delle piante contro le malattie fungine (vedi R6). Grazie a questo trattamento è possibile aumentare la resistenza delle piante agli stress biotici senza ricorrere a sostanze inquinanti per l'ambiente o dannose per la salute.

---

**Figura 4.2 - Mappe di umidità, mappe di produzione e attrezzatura per la mappatura del suolo**



FONTE: [www.ilnuovoagricoltore.it/70-quintali-ettaro-di-riso-carnaroli-meracinque-un-successo-la-semi-na-con-geospread-e-dosi-variabili/](http://www.ilnuovoagricoltore.it/70-quintali-ettaro-di-riso-carnaroli-meracinque-un-successo-la-semi-na-con-geospread-e-dosi-variabili/)

---

## 4.2.2 DiCristiana

Quadro 4.2 - DiCristiana

	<b>DICRISTIANA</b>		
	Pavia (Lombardia)		
	Coltivazione di riso		
Forma giuridica	Area coltivata	Fatturato	Dipendenti
Impresa individuale	30 ettari	N.D.	0-9

FONTE: visura camerale azienda

L'azienda agricola DiCristiana è una realtà che produce riso biologico in Lomellina, con la volontà di dimostrare che produrre bio non significa accontentarsi di rese inferiori, ma creare un ecosistema florido e sostenibile – anche economicamente – per l'agricoltore e per l'ambiente.

A partire dal 2021 la produzione è inoltre gestita coerentemente con i principi dell'agricoltura rigenerativa, cercando di minimizzare le attività svolte, limitandosi ad accompagnare un processo gestito *in primis* dalla natura stessa, con l'obiettivo di rigenerare il suolo, arricchendolo di microrganismi benefici e rendendolo sempre più fertile (vedi R7). Il tutto viene svolto senza ricorrere a fertilizzanti chimici, pesticidi, erbicidi, agrofarmaci e lavorazioni del suolo troppo aggressive.

L'utilizzo di lunghe rotazioni, che arricchiscono il terreno e la biodiversità della fauna che lo popola, fa sì che dei 30 ettari di superficie totale, ogni anno il riso ne occupi tra i 5 e i 10 (vedi R8). Il resto della superficie è occupato da: leguminose per la produzione agricola e il fissaggio dell'azoto; altre colture (es. miglio e orzo) destinate alla vendita e piante che saranno poi utilizzate per i sovesci e i cui semi sono prodotti internamente all'azienda (produzione a ciclo chiuso). Le rotazioni colturali sono inoltre utilizzate al fine di creare un paesaggio variegato e piacevole alla vista, che possa essere un asset per il turismo del territorio.

Il ciclo di rotazione prevede inoltre la presenza di consociazioni (es. orzo-trifoglio o avena-trifoglio-camomilla-papavero) appositamente pensate per migliorare la qualità del suolo, fissare l'azoto, favorire la biodiversità e controllare le infestanti (vedi figura 4.3).

L'attenzione alla sostenibilità ambientale è poi affiancata alla ricerca della qualità del riso prodotto, guidata dalla convinzione che *'per essere buono un riso deve essere anche bello'* (vedi R8). Dei chicchi sani e uniformi indicano infatti una completa maturazione in campo e una corretta gestione del prodotto, elementi che garantiscono il mantenimento dei più elevati standard qualitativi.

La volontà di rispettare ed esaltare le peculiarità del suolo ha inoltre portato a selezionare le specifiche varietà da piantare sulla base delle caratteristiche di ogni appezzamento di terreno. È così che ad esempio il campo n. 5, il cui terreno è più povero e sabbioso, è coltivato con una varietà di Carnaroli dal ciclo più breve e dalle radici più profonde rispetto al Carnaroli Classico presente in altre aree dell'azienda. Queste caratteristiche gli consentono infatti di assorbire i nutrienti dal terreno a profondità più elevate e di prosperare anche in un suolo più sabbioso.

Vengono inoltre utilizzate e riscoperte varietà antiche, nonché nuove varietà create in collaborazione con I.R.E.S. (*Italian Rice Experiment Station*), azienda sementiera che si occupa di *green breeding* con l'obiettivo di sviluppare varietà di riso la cui coltivazione richiede minori quantità di acqua, concimi e prodotti chimici di difesa (vedi R9 e R10). È ad esempio stato introdotto nel paniere dell'azienda il riso Ebano, un riso nero che grazie al suo ciclo precoce richiede minori quantità di acqua e nutrienti, e a partire da quest'anno si sta sperimentando la varietà Rubinum, che è particolarmente resistente alle malattie e competitiva con le infestanti.

La personale convinzione dell'imprenditrice che non esista eco-agricoltura senza innovazione, la porta a condurre continue sperimentazioni al fine di migliorare anno dopo anno il prodotto e il suo impatto ambientale. La tecnologia è vista come uno strumento a supporto dell'innovazione, ma non ne è il fulcro, né il motore. Ogni fase è tracciata e inserita in un sistema *blockchain* per assicurare la massima trasparenza al consumatore, mentre le operazioni in campo non sono automatizzate e vengono per lo più svolte con un normale trattore. L'utilizzo di strumenti moderni e innovativi avviene



quando questi dimostrano di offrire particolari vantaggi in termini di rispetto del suolo e della sua struttura. L'attività di semina è ad esempio svolta utilizzando una seminatrice da sodo<sup>47</sup> finlandese che è in grado di svolgere tutte le operazioni necessarie in un unico passaggio, riducendo la compattazione del terreno (vedi R7). Le novità vengono testate in prima persona dall'imprenditrice sulla base dei suoi studi e delle sue competenze (e di quelli degli altri imprenditori con cui collabora più o meno formalmente per le fasi di ricerca e sviluppo). La volontà di avere uno spazio in cui sperimentare nuove soluzioni ha inoltre condotto a dedicare a tale scopo un apposito campo, inizialmente troppo problematico per essere utilizzato a scopi produttivi a causa del terreno troppo limoso. Una volta recuperata la capacità del terreno di assorbire correttamente l'acqua e di fornire rese soddisfacenti, si è deciso di continuare a utilizzarlo come laboratorio all'aperto per avere la possibilità di osservare le reazioni del terreno alle diverse tecniche e di implementare continue novità.

---

**Figura 4.3 - Consociazioni in campo: soia-trifoglio e orzo-trifoglio**



FONTE: [www.facebook.com/dicristiana.risobio](https://www.facebook.com/dicristiana.risobio)

---

<sup>47</sup> Le seminatrici da sodo sono macchinari in grado di seminare direttamente in terreni non lavorati, la cui superficie è ancora occupata dai residui delle colture in avvicendamento, incluse quelle di copertura.

## 4.2.3 Porto Felloni

Quadro 4.3 - Porto Felloni



**PORTO FELLONI**

Padova (Veneto)

Coltivazione di colture agricole non permanenti

Forma giuridica	Area coltivata	Fatturato	Dipendenti
Società semplice	600 ettari	> 500.000 euro	10-49

FONTE: visura camerale azienda

Porto Felloni è un'azienda agricola che si estende per 600 ettari nei comuni di Lagosanto, Massafiscaglia e Comacchio in provincia di Ferrara. È specializzata nel settore cerealicolo (mais da granella *in primis*, che rappresenta circa il 55% della produzione, e grano), in quello delle orticole industriali (pomodoro, pisello e fagiolino, questi ultimi due soprattutto come secondo raccolto nella successione annuale) e dall'inizio del 2017 anche nelle noci da frutto.

Gli alimenti prodotti sono poi conferiti a varie aziende italiane attraverso delle Organizzazioni di produttori. È inoltre presente un punto vendita aziendale per la vendita diretta delle noci.

L'azienda è stata una pioniera nell'adozione dell'agricoltura di precisione (vedi R11). In seguito all'incontro dei soci con le prime tecnologie per l'agricoltura di precisione avvenuto nel 1997 durante una loro visita a delle realtà agricole negli Stati Uniti, sono state predisposte le prime mappature delle produzioni di mais e grano grazie all'utilizzo per la raccolta di una mietitrebbia equipaggiata con sensori di resa. I dati ricavati in questo modo sulla quantità di granella raccolta venivano poi abbinati a un sistema di rilevazione satellitare che li collocava geograficamente.

A partire dal 2000 vengono inoltre effettuati periodici campionamenti dei terreni (ogni 3-4 anni), selezionando i punti da analizzare sulla base delle variazioni individuate



dalle mappe di resa. Le informazioni risultanti vengono poi elaborate con strumenti di analisi geostatistica per mappare la struttura del terreno in relazione a parametri quali la disponibilità di elementi nutritivi, il pH, la presenza di sostanza organica, etc. Le peculiarità delle diverse aree, evidenziate da tali mappe, hanno quindi gettato i presupposti per l'applicazione di tecnologie a tasso variabile nelle attività di distribuzione degli input (concimi, sementi e prodotti fitosanitari).

La volontà di poter conservare i cereali prodotti per diversi mesi, al fine di venderli solo nel momento in cui il prezzo di mercato è più favorevole, ha poi spinto alla costruzione di un essiccatoio aziendale e di magazzini refrigerati per lo stoccaggio dei prodotti.

A partire dal 2002 l'azienda si è dotata di un programma gestionale che consente di archiviare ed elaborare i dati raccolti nel corso degli anni, che oggi rappresentano il valore aggiunto del percorso di innovazione intrapreso due decenni fa. Trascorso qualche anno, le tecnologie disponibili hanno finalmente consentito all'azienda di sfruttare tali dati per realizzare le prime mappe di prescrizione<sup>48</sup> per la concimazione a dosaggio variabile. I trattori e le attrezzature ad essi collegati sono stati dotati di sistemi satellitari per la guida semi-automatica e dei monitor necessari a gestire le mappe di prescrizione. La possibilità di commisurare gli investimenti su ogni porzione di campo in relazione alla sua produttività consente perciò di limitare la quantità di concime distribuita nelle aree poco produttive. Si evita in questo modo sia di sprecare risorse, sia di disperdere nitrati non utilizzati dalle piante nell'ambiente circostante.

Grazie all'introduzione di una nuova metodologia per il campionamento del suolo, che ha aumentato la precisione e l'accuratezza delle informazioni rilevate, a partire dal 2012 la tecnologia a dosaggio variabile è stata applicata anche alle altre operazioni colturali (semina e trattamenti fitosanitari). Si tratta di un approccio particolarmente importante per l'azienda data la sua localizzazione in un'area di recente bonifica. Questo elemento fa infatti sì che i terreni coltivati siano molto diversi tra loro, con le percentuali di sabbia limo e argilla che variano notevolmente anche all'interno dello stesso appezzamento. La possibilità di aumentare il numero di piante/ettaro nei punti più fertili ha consentito di aumentare il raccolto di parecchi quintali, con un effetto nettamente positivo sul bilancio aziendale.

---

<sup>48</sup> Le mappe di prescrizione sono mappe del campo che contengono informazioni precise sulle attività da effettuare (semina, fertilizzazione, irrigazione, ...) in ogni singola area.

Negli anni più recenti l'azienda non ha mai smesso di innovare e ha introdotto tecnologie quali (vedi figura 4.4): nuove modalità di monitoraggio da drone (due droni di proprietà dotati di sensori multispettrali ad alta risoluzione) e da satellite per la rilevazione dello stato di salute delle colture e della tessitura del suolo; *software* più sofisticati per l'analisi statistica e la gestione dei dati aziendali; modelli previsionali per le malattie e la gestione agronomica basati sull'intelligenza artificiale; sonde per il rilevamento dell'umidità del suolo; cingolature innovative che minimizzano l'erosione e la compattazione del terreno riducendo la necessità di utilizzare fertilizzanti, sistemi di machine vision per la guida dei macchinari (vedi R12), etc.

Tali tecnologie, oltre a ridurre i costi di produzione, sono utilizzate al fine di ridurre l'impatto ambientale dell'attività. L'adozione dell'agricoltura di precisione ha infatti consentito all'azienda di risparmiare in media il 15-20% degli input produttivi, vedendo allo stesso tempo aumentare la propria produttività del 20-30% e migliorando le condizioni lavorative dei dipendenti, che devono svolgere attività meno pesanti dal punto di vista fisico (vedi R13).

A partire dal 2016 è stata introdotta in azienda la coltivazione in regime biologico, che coinvolge oggi il mais da granella, il frumento tenero e le noci da frutto e occupa una superficie di circa 100 ettari. Sono state inoltre introdotte nelle rotazioni annuali colture di copertura come trifoglio e senape, che contribuiscono a migliorare la struttura organica dei terreni senza inquinare e fungono da deterrenti naturali per la nascita delle erbe infestanti.

Per migliorare ulteriormente la fertilità e la salute del suolo, a partire dal 2022 si sta testando lo *strip-tillage* nella coltivazione del mais, un sistema di lavorazione minima del suolo che prevede di lavorare il terreno in modo superficiale (15 cm di profondità circa) su strisce intervallate da altre fasce in cui i residui colturali vengono lasciati in superficie. L'esistenza di un *database* aziendale contenente i dati sulle proprietà del terreno negli ultimi 25 anni consentirà quindi di confrontare i dati ottenuti con le relative serie storiche, migliorando la valutazione dei risultati ottenuti.

Nel futuro dell'azienda i soci vedono una continua innovazione, guidata sia dalla volontà di massimizzare le rese contenendo l'impatto ambientale delle attività agricole,

sia dalla consapevolezza che è fondamentale tenere presenti le sfide ambientali che l'agricoltura dovrà affrontare nei prossimi anni.

In seguito ai problemi affrontati nella prima metà del 2022 a causa della siccità, i piani colturali, le lavorazioni e gli investimenti da effettuare terranno ad esempio presente la carenza idrica che il territorio si troverà molto probabilmente ad affrontare. Pur utilizzando già numerose soluzioni che ottimizzano il consumo di acqua e hanno consentito di salvare il raccolto nell'estate 2022 (sonde per monitorare l'umidità dei suoli, sistemi di supporto alle decisioni, mappe satellitari, droni, *software*, *hardware* e impianti per l'irrigazione di precisione, etc.), non hanno infatti intenzione di farsi cogliere impreparati.

La volontà di comprendere le tendenze future e adottare soluzioni che consentano di prosperare anche negli anni a venire (agricoltura di precisione, produzione biologica, razionalizzazione degli input produttivi per far fronte a eventuali carenze) evidenzia un elevato spirito imprenditoriale, che non si riscontra di frequente in questo settore.

---

**Figura 4.4 - Misurazione della compattazione del suolo, droni e mappe del suolo**



FONTE: [www.facebook.com/profile.php?id=100063759332506](https://www.facebook.com/profile.php?id=100063759332506)

---

## 4.2.4 Planet Farms

Quadro 4.4 - Planet Farms

	<b>PLANET FARMS</b>		
Milano (Lombardia)	Coltivazione di ortaggi in foglia, a fusto, a frutto, in radici, bulbi e tuberi in colture protette		
<b>Forma giuridica</b>	<b>Area coltivata</b>	<b>Fatturato</b>	<b>Dipendenti</b>
Società a responsabilità limitata	1 ettaro	> 500.000 euro	10-49

FONTE: visura camerale azienda

Planet Farms nasce nel 2018 con la volontà di produrre più cibo e di migliore qualità utilizzando meno risorse grazie alla coltivazione verticale.

La prima *vertical farm* dell'azienda, che ricopre un'area di 10.000 metri quadrati, è localizzata a Cavenago di Brianza e dal 2020, anno in cui è entrata in attività, è specializzata nella produzione di basilico, erbe aromatiche e insalate a foglia piccola. È prevista inoltre la costruzione di due ulteriori stabilimenti in Italia, uno dei quali conterrà anche un'unità di ricerca e sviluppo, e a seguire l'espansione in tutta Europa, a partire dal Regno Unito. A ciò si aggiunge una piccola *farm* a Brusaporto gestita in collaborazione con il ristorante Da Vittorio con l'ausilio di un apposito robot (vedi figura 4.5), in cui, grazie alle competenze culinarie dei fratelli Cerea, si sperimentano nuove varietà e le loro applicazioni in cucina (vedi R14).

L'idea di introdurre in Italia la coltivazione verticale in ambiente controllato nasce dalla volontà di:

- slegare l'attività agricola dalle condizioni pedoclimatiche ed economico-sociali del territorio, consentendo ad ogni area del mondo di essere autosufficiente per quanto riguarda la produzione di cibo;
- ridurre la complessità e la lunghezza della *supply chain*. Catene di fornitura molto lunghe ed estese geograficamente aumentano infatti gli sprechi di cibo.

La volontà di garantire l'accesso a un cibo sano e accessibile a tutta la popolazione ha reso chiara fin dal principio la necessità di giungere sul mercato con un prodotto che, pur essendo di elevata qualità, fosse competitivo dal punto di vista economico. I prezzi al consumo dei prodotti Planet Farms sono infatti in linea con le corrispondenti referenze biologiche, in contrapposizione ai prezzi spropositati che caratterizzano i prodotti da agricoltura verticale in paesi come il Giappone (vedi R15). Ciò comporta chiaramente la necessità di contenere quanto più possibile i costi di produzione, pur continuando a investire in impianti produttivi e attività di ricerca e sviluppo.

Gli ortaggi prodotti sono coltivati in ambienti controllati, con zero pesticidi e un impiego ridotto di risorse. Si risparmiano in questo modo fino al 95% di acqua (anche perché non essendovi contaminazioni di alcun genere non è necessario lavare il prodotto prima di mangiarlo) e al 90% di suolo (la resa in un ettaro di terreno occupato dallo stabilimento è pari a quella di 300 ettari di campo aperto).

Le sementi utilizzate non sono trattate e sono selezionate prediligendo quelle varietà tradizionali dalle elevate qualità organolettiche (sapore, consistenza, etc.) che non vengono più coltivate all'aperto perché troppo delicate e contribuendo in questo modo a preservare la biodiversità, anche della dieta. Lavorando in ambiente controllato è infatti possibile ricreare le condizioni di sviluppo ideali anche per le colture più delicate (vedi R16).

Ogni area di coltivazione possiede un sistema di ricircolo e filtrazione dell'aria che genera un flusso d'aria uniforme e idoneo al benessere della pianta, purifica l'aria e mantiene la temperatura e l'umidità a livelli ideali. Sono inoltre utilizzate delle luci LED ad alta efficienza che replicano l'alternarsi delle giornate (es. luce blu prevalente al mattino e rossa alla sera) e delle stagioni e sono modulabili in base alla fase di crescita delle piantine.

L'intero processo produttivo è gestito in modo interamente automatizzato e integrato e non prevede l'intervento di operatori umani, risultato ottenuto anche grazie alla collaborazione con Siemens, che ha curato i sistemi di comunicazione e automazione della struttura (vedi R17). Gli impianti produttivi, oltre ad essere iper efficienti, sono progettati e costruiti in modo che il loro aspetto sia coerente con

l'ambiente circostante, utilizzando materiali naturali come il legno e forme in armonia con il paesaggio (vedi R18).

Il prodotto risultante è inoltre a km0, dal momento che la produzione avviene nello stabilimento di Cavenago e i prodotti sono in vendita in diversi supermercati del milanese. Grazie all'automazione e all'elevata efficienza operativa, dal momento del taglio a quello in cui il prodotto è disponibile per l'utilizzo da parte di consumatori e industrie trascorrono al più 48 ore, ma spesso la distribuzione avviene addirittura in giornata (vedi R19). Queste modalità di distribuzione, garantiscono un maggiore livello qualitativo (si minimizza la perdita di micronutrienti dovuta al tempo), una *shelf life* più lunga – con conseguente riduzione degli sprechi alimentari –, e minori emissioni legate al trasporto.

Un sistema di intelligenza artificiale (chiamato Gaia VF, dal nome della Terra nella mitologia greca) definisce i parametri operativi ideali sulla base delle informazioni raccolte dagli appositi sensori e traccia e documenta l'intero processo produttivo. La presenza di videocamere nelle camere di coltivazione consente ad esempio a Gaia di monitorare costantemente lo stato di salute e di sviluppo delle piante e di individuare il momento ottimale per la loro raccolta. In questo modo, ventiquattro ore dopo la semina è possibile prevedere quanto prodotto si raccoglierà e in quale giorno.

L'idea dell'azienda non è quella di sostituirsi all'agricoltura tradizionale, bensì quella di supportarla e contribuire al suo sviluppo, fungendo da laboratorio di sperimentazione di nuove tecniche e tecnologie (come avviene nella Formula 1 per l'automotive nella ricerca aerospaziale per le telecomunicazioni) (vedi R20).

Il principale modo in cui Planet Farms può restituire valore all'agricoltura secondo i fondatori è attraverso i dati. La possibilità di raccogliere dati lungo tutto il ciclo produttivo e di farlo in un ambiente completamente controllato consente infatti di comprendere meglio le relazioni di causa ed effetto che legano i diversi fattori. Le informazioni e la conoscenza risultante da tale processo di analisi possono poi essere applicate alla risoluzione di problemi in campo (vedi R14). Diventa così possibile utilizzare le *vertical farm* per proporre soluzioni alternative all'agricoltura intensiva a cui oggi si ricorre spesso e che sta causando tanti problemi al pianeta.

Il paniere di prodotti proposto dall'azienda comprende oggi 6 mix di insalate pronte e 2 pesti, ma si sta lavorando per introdurre nuove colture. Dai piccoli ortaggi (ravanelli, pomodori e *baby* carote sono già prodotti per il ristorante Da Vittorio, ma non sono ancora disponibili per la grande distribuzione, mentre la ricerca è già in fase avanzata per le zucchine) e frutti (per ora soprattutto frutti rossi e fragole, ma si tratta di prodotti difficili perché presentano ancora costi di produzione troppo elevati). Oltre a ciò, sono in fase di studio alimenti come il caffè e il grano – che rappresentano le vere sfide per il futuro anche in virtù della situazione geopolitica mondiale –, ma anche prodotti per l'industria farmaceutica, la cosmesi, il settore *wine & spirits* e quello tessile (nello specifico, cotone e lino) (vedi R21).

---

**Figura 4.5 - Il robot HB01 e l'interno delle *vertical farm***



FONTE: <https://www.facebook.com/planetfarms/>

---

## 4.2.5 Ferrari Farm

Quadro 4.5 - Ferrari Farm

		<b>FERRARI FARM</b>	
		Rieti (Lazio)	
		Coltivazione di pomacee e frutta a nocciolo	
Forma giuridica	Area coltivata	Fatturato	Dipendenti
Società a responsabilità limitata	10 ettari	100.000 - 499.999 euro	0-9

FONTE: visura camerale azienda

Ferrari Farm è un'azienda agricola di circa 10 ettari fondata nel 2004 da Giorgia Pontetti, un'ingegnera elettronica e astronautica con la passione per l'agricoltura, che si trova in provincia di Rieti. L'azienda unisce un vero e proprio laboratorio permanente sul futuro del cibo con un'azienda agricola che vende gli alimenti prodotti al suo interno.

Ferrari Farm nasce dalla volontà di salvaguardare e tramandare la tradizione agricola locale tramite la realizzazione di un'agricoltura biologica e di qualità. Poi, a una conferenza sulle missioni spaziali, Giorgia ha sentito nominare per la prima volta la coltivazione idroponica e ha subito intravisto la possibilità di unire i suoi due mondi, l'agricoltura e l'ingegneria, facendo rivivere quelle stesse tradizioni sotto una nuova veste (vedi R22).

È nata così l'idea di realizzare delle serre per la coltivazione idroponica completamente ermetiche, sterili e automatizzate, con condizioni pari alle camere bianche utilizzate per gli interventi chirurgici o i laboratori di ricerca, che possano essere utilizzate in qualsiasi ambiente (vedi figura 4.6). Si tratta di un'innovazione che era già stata studiata senza successo nei Paesi Bassi e che ha quindi incontrato inizialmente diverse resistenze (esperti che l'hanno definita un'impresa impossibile, difficoltà a raccogliere finanziamenti, ...). Giorgia per realizzare le sue serre ha quindi guardato alle tecnologie presenti in paesi come Israele e Giappone, che conducono le ricerche e possiedono le soluzioni più avanzate in materia.



---

**Figura 4.6 - Pomodori e basilico in idroponica**



FONTE: <https://www.facebook.com/FerrariFarmSocietaAgricolaSr>

---

Il processo produttivo non prevede l'utilizzo di sostanze chimiche come pesticidi ed erbicidi e consente inoltre di garantire l'assenza di nichel, metalli pesanti e allergeni come l'istamina all'interno degli alimenti prodotti, rendendoli accessibili anche agli individui che presentano allergie a tali elementi (vedi R23).

Grazie alle tecnologie impiegate, il consumo idrico può essere ridotto fino al 90% rispetto all'agricoltura convenzionale, mentre l'utilizzo dello spazio è ottimizzato grazie al fatto che le piante sono poste molto vicine le une alle altre. Aria e acqua vengono riciclate e riutilizzate in un'ottica di economia circolare. Le luci a LED utilizzate sono realizzate direttamente da Giorgia, che sfrutta la sua formazione ingegneristica per realizzare in prima persona le tecnologie adottate all'interno dell'azienda. Essendo ermetica e ben coibentata, la serra è in grado di minimizzare l'energia necessaria alla regolazione termica e di mantenere la temperatura costante per 24 ore anche in assenza di elettricità (vedi R24).

La capacità di garantire condizioni ambientali costanti fornisce inoltre la possibilità di salvaguardare e recuperare sementi e varietà tipiche anche in presenza di cambiamenti climatici, ricreando le esatte condizioni che servono al loro sviluppo. La

tecnologia viene utilizzata per mantenere in vita tradizioni che a causa dell'inquinamento e dei mutamenti ambientali e sociali in corso andrebbero altrimenti perdute (vedi R25).

Alle coltivazioni in serra si aggiungono poi un frutteto e un orto a coltivazione biologica, in cui vengono piantate solo varietà tradizionali della zona senza l'utilizzo di sostanze chimiche di sintesi. Il solo fertilizzante utilizzato è il letame proveniente da aziende zootecniche certificate bio. In questo modo si preserva la sostanza organica del suolo e si ottengono prodotti di altissima qualità, sia in termini organolettici che nutrizionali (vedi R26).

In accordo con quanto auspicato dalle politiche comunitarie (vedi paragrafo 1.5), alla coltivazione di frutti e ortaggi sono inoltre state affiancate diverse attività che contribuiscono a rendere Ferrari Farm un'azienda multifunzionale. L'azienda comprende infatti (vedi R27):

- un laboratorio di trasformazione agroalimentare, in cui avviene la produzione semi-automatizzata e senza conservanti né additivi di confetture, succhi di frutta, passate di pomodoro, pesti, verdure sott'aceto e sott'olio e liquori, che vengono esportati anche in Germania e Regno Unito (vedi R28). Si tratta di un elemento introdotto per evitare di sprecare i prodotti freschi provenienti dalle coltivazioni;
- una fattoria didattica;
- un agriturismo con camere e ristorante;
- un centro benessere rurale.

## 4.2.6 Karadrà

Quadro 4.6 - Karadrà

		<b>KARADRÀ</b>	
		Lecce (Puglia)	
		Coltivazione di ortaggi in foglia, a fusto, a frutto, in radici, bulbi e tuberi in piena aria	
Forma giuridica	Area coltivata	Fatturato	Dipendenti
Società cooperativa	10 ettari	< 50.000 euro	0-9

FONTE: visura camerale azienda

La Società Cooperativa Agricola Karadrà è un'impresa nata nel 2014 dall'unione di 8 giovani imprenditori per creare un movimento culturale che riavvicini alla terra e valorizzi il territorio salentino, consentendo una migliore qualità di vita ai suoi abitanti e recuperando la bellezza dei luoghi. L'agricoltura è vista come un elemento che, oltre al suo compito primario di produzione alimentare, ha la funzione di unire la comunità, tutelare il patrimonio culturale e naturale di un territorio e ridisegnarne le linee (vedi R29). Questa visione sottostante ha condotto alla ricerca di un dialogo con le comunità locali ed è alla creazione di una rete di piccole realtà del territorio che collaborano per raggiungere questi obiettivi.

In accordo con i valori espressi, la cooperativa ha iniziato la propria attività recuperando e bonificando 8 ettari di terreno che erano incolti e abbandonati da decenni, inizialmente concessi loro in usufrutto in cambio del lavoro di bonifica. L'usufrutto, una volta avviata l'attività e raccolti i necessari capitali, è stato poi trasformato in un affitto, consentendo anche al proprietario di beneficiare del progetto.

L'elemento che ha dato origine a questa attività consiste nella volontà dei fondatori di evitare l'estinzione di una varietà di pomodoro tipica del Salento, il pomodoro giallo d'inverno di Aradeo (vedi figura 4.7). Si tratta di un pomodoro dal colore giallo-arancio che, se conservato in grappoli appesi al soffitto e tenuti assieme

grazie a un filo noti come ramosole, conserva intatte le proprie caratteristiche organolettiche fino a dieci mesi, consentendone il consumo nel periodo invernale.

I primi semi da cui è partita l'attività sono stati recuperati dagli anziani di un piccolo comune del Salento, che, oltre a donare i semi, già da tempo non più reperibili sul mercato, hanno fornito supporto ed elargito consigli sulla sua coltivazione (vedi R30). Anche le modalità produttive e di conservazione utilizzate seguono infatti quelle della tradizione, in accordo con le caratteristiche pedoclimatiche della zona.

L'assenza di un acquedotto e le precipitazioni ridotte hanno condotto alla decisione di utilizzare la tradizionale tecnica dell'aridocoltura. Al fine di minimizzare l'evaporazione dell'acqua, le orticole vengono coperte con una pacciamatura fatta di paglia e vengono annaffiate sotto lo strato di copertura in orari serali. Non si utilizzano inoltre sostanze chimiche per la lotta ai parassiti e alle infestanti, preferendo l'impiego di elementi naturali come il macerato di ortica o propoli, al fine di rispettare la terra e portare sul mercato prodotti sani e di qualità (vedi R31). Al fine di arricchire il suolo e aumentarne il contenuto di materia organica, sono inoltre state adottate tecniche tipiche dell'agricoltura rigenerativa quali le rotazioni. Come da tradizione, il pomodoro è inoltre coltivato in consociazione con legumi e piante di ulivo, a cui si aggiungono la coltivazione delle orticole e del grano (vedi R32).

---

**Figura 4.7 - Pomodori e campi della cooperativa**



FONTE: <https://www.facebook.com/PomodoriDiAradeo>

---

I prodotti vengono poi venduti attraverso lo spaccio aziendale, i gruppi di acquisto e le botteghe della zona, nonché attraverso le forniture ad alcuni ristoranti. La volontà per il futuro è quella di aprire un sito di vendita online, per portare i prodotti al di fuori della Puglia senza avvalersi di troppi passaggi intermedi.

L'attenzione alla sostenibilità sociale che caratterizza tutte le attività di Karadrà ha condotto alla collaborazione con la cooperativa Adelfia per l'inserimento di persone con disabilità mentali nel sistema lavorativo, nonché alla progettazione dell'orto in modo che sia facilmente accessibile anche a chi ha problemi di deambulazione. La principale forma di innovazione presente è di tipo sociale, di recupero di un territorio e di una comunità che stavano perdendo la propria vitalità, con la consapevolezza che oltre a costruire nuove conoscenze e tecnologie è fondamentale recuperare e conservare quelle del passato.

In ambito agricolo, ma non solo, il *know-how* accumulato nel tempo è infatti un patrimonio inestimabile (es. aridocoltura per affrontare la siccità negli anni a venire, ma anche varietà autoctone adatte alle caratteristiche dei luoghi che rischiano di estinguersi) e viene tuttavia sempre più spesso perso nel passaggio a nuove modalità produttive. La cooperativa Karadrà inverte questa tendenza, facendo un lavoro di recupero e integrazione delle conoscenze tradizionali con quelle più attuali, trovando una sintesi che riesce a trarre il meglio da entrambe.

## 4.2.7 Feeducia

Quadro 4.7 - Feeducia

	<b>FEEDUCIA</b>		
	Treviso (Veneto)		
	Coltivazione di ortaggi in foglia, a fusto, a frutto, in radici, bulbi e tuberi in piena aria		
Forma giuridica	Area coltivata	Fatturato	Dipendenti
Impresa individuale	< 1 ettaro	< 50.000 euro	0-9

FONTE: visura camerale azienda

Feeducia è un'azienda agricola localizzata a Colle Umberto in provincia di Treviso, la cui produzione avviene nel rispetto dei principi dell'agricoltura organica rigenerativa.

Il progetto ha preso forma all'inizio del 2020, quando, durante il *lockdown*, Antonio Segat – il fondatore – ha riscoperto la passione per il lavoro all'aria aperta. La volontà di costruirsi un lavoro più in linea con i propri valori e quella di contribuire alla transizione ecologica dell'agricoltura sono stati gli elementi che hanno guidato la realizzazione dell'azienda, che ha inizialmente coinvolto un'area poco più grande di mezzo ettaro di proprietà del nonno (vedi R33). L'attività è ispirata ai principi dell'agricoltura organica rigenerativa e della coltivazione bio-intensiva, elementi che hanno permesso di iniziare a coltivare senza dover effettuare ingenti investimenti iniziali per l'acquisto di ampi terreni o macchinari.

La conformazione delle aree coltivate e delle passerelle per l'accesso pedonale e la disposizione delle piante in campo sono realizzate secondo i principi della coltivazione bio-intensiva, che massimizza le rese per unità di superficie, elemento essenziale in un'azienda di dimensioni ridotte. Lo spazio tra le aiuole di coltivazione utilizzato per il passaggio degli operatori viene ricoperto con cippato di ramaglie, che ne diminuisce il compattamento e aiuta l'assorbimento dell'acqua dopo le precipitazioni, evitando la formazione di fango (vedi figura 4.8). Inoltre, trattandosi di materiale



naturale, quando si decompone funge anch'esso da nutrimento per il terreno. Non vengono in questo modo effettuati rivoltamenti e lavorazioni del suolo, mantenendo intatta e in salute la fauna sotterranea ed evitando il rilascio di CO<sub>2</sub> (vedi R34).

La programmazione della produzione avviene nel rispetto dei fabbisogni del suolo, effettuando lunghe rotazioni all'interno delle aiuole, e pianificando l'utilizzo delle specie utilizzate in modo da sfruttarne a pieno il potenziale. Il Pak Choi è ad esempio raccolto d'inverno in serra e sotto una rete anti-insetto, mentre d'estate, in virtù della sua elevata capacità di attrarre l'altica (un minuscolo coleottero noto anche come pulce degli orti) viene 'sacrificato' affinché le colture circostanti vengano lasciate in pace dal suddetto coleottero. Altre piante dalla crescita rapida e l'apparato radicale profondo come il Vetiver sono invece utilizzate per rendere più permeabile il terreno tramite i cunicoli creati al suo interno dalle radici e per portare in superficie i nutrienti, che saranno poi ridistribuiti all'ecosistema nel momento in cui la pianta viene tagliata e utilizzata come pacciamatura (vedi R35).

---

**Figura 4.8 - La produzione orticola di Feeducia**



FONTE: <https://www.feeduciaazagr.it/metodi.php>

---

La volontà di trovare soluzioni efficaci alle sfide che si trova ad affrontare hanno portato Antonio a osservare le soluzioni messe in atto in altri luoghi, capendo poi come adattarle alla propria situazione. Per quanto riguarda l'utilizzo di acqua ad esempio, che si è spesso rivelata insufficiente ai fabbisogni idrici delle colture, ha studiato e testato i metodi che vengono messi in pratica in zone del pianeta dove le precipitazioni sono molto più scarse e i periodi di siccità più lunghi e drastici, costruendosi un proprio sistema di raccolta e redistribuzione dell'acqua piovana (vedi R35).

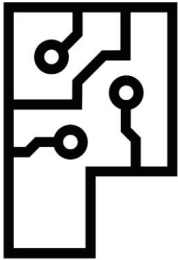
Lo studio e l'attenta progettazione del sistema agricolo vogliono essere inoltre un modo per contribuire a evolvere il concetto di contadino e di agricoltore, che non può più essere visto solo come una figura scarsamente qualificata e senza altre possibilità lavorative, ma che diventa un professionista che si prende cura della terra – migliorandone lo stato di salute – e della comunità – a cui fornisce cibo sano e gustoso – in un sistema capace di garantire un reddito soddisfacente a chi ci lavora.

Gli alimenti prodotti vengono venduti principalmente attraverso un punto vendita diretto collocato nei pressi dell'orto. Inoltre, dalla volontà di creare legami più stretti e stabili con i consumatori e la comunità circostante, è stata predisposta la creazione di appositi abbonamenti della durata di 4 o 8 settimane per la ricezione settimanale di una cassetta di verdura di stagione secondo i principi della CSA (*Community Supported Agriculture*). I clienti abituali che supportano l'attività possono in questo modo ricevere dei benefici (sconto del 10% rispetto al prezzo al dettaglio, precedenza sulla disponibilità dei prodotti), mentre l'agricoltore può programmare con maggiore precisione le colture da piantare, riducendo gli sprechi, e utilizzare i pagamenti che vengono effettuati in anticipo per ridurre la sua esposizione finanziaria.



## 4.2.8 Pixelfarming Robotics

Quadro 4.8 - Pixelfarming Robotics

	<b>PIXELFARMING ROBOTICS</b>		
	Paesi Bassi		
	Macchinari per l'agricoltura		
Forma giuridica	Area coltivata	Fatturato	Dipendenti
Besloten Vennootschap (≈ S.r.l.)	–	N.D.	10-49

FONTE: visura camerale azienda

Pixelfarming Robotics è una società olandese di produzione di attrezzature per l'agricoltura, che ha come obiettivo primario quello di fornire tecnologie in grado di supportare la transizione dell'agricoltura su larga scala verso l'agricoltura rigenerativa (vedi R36). I prodotti dell'azienda (vedi R37) comprendono:

- *Robot One*, un robot multifunzionale per l'automazione delle operazioni in campo;
- *Pixie*, un piccolo robot di supporto che può operare in sinergia con *Robot One* per trasportare prodotti e oggetti o svolgere specifiche azioni (es. spargimento di fertilizzante);
- *Vision Bar*, una barra per la *machine vision* che può essere montata su trattori o altri veicoli per analizzare il campo e le piante che vi crescono ad ogni passaggio e fornire informazioni per lo svolgimento delle operazioni.

È poi presente una piattaforma online (*Pixelfarming Academy*), in cui sono conservati tutti i dati ricavati in campo e i possessori di *Robot One* possono addestrare il proprio robot a svolgere i compiti necessari per coltivare i raccolti e tenere lontane le erbacce indesiderate (vedi R37). Qui, inserendo i dati relativi alle condizioni del suolo, alle combinazioni di piante e alle colture di copertura desiderate, viene fornito

all'agricoltore un piano di coltivazione appositamente disegnato per massimizzare le simbiosi tra le specie.

Il processo di ricerca e sviluppo di Robot One è durato dal 2016 al 2021 e ha coinvolto diversi partner pubblici e privati, tra cui l'Università di Wageningen. Nel 2021 sono iniziati i primi test in campo in 5 aziende agricole olandesi (vedi R38). Il robot oggi monta sul fondo 10 bracci meccanici indipendenti disposti su due file e regolabili in tempo reale sia sull'asse orizzontale che in quella verticale, che operano con precisione millimetrica (fino a 2mm) e possono essere equipaggiati con attrezzi differenti (laser per il diserbo laser, pinze per il diserbo meccanico, etc.). Ciò consente di utilizzare *Robot One* per automatizzare completamente attività quali la gestione delle infestanti, senza ricorrere ai prodotti chimici. La presenza di numerosi bracci e la loro disposizione consentono inoltre di svolgere più di un'operazione in un singolo passaggio, riducendo i tempi e minimizzando la compattazione del terreno.

L'energia per il suo funzionamento è fornita dai tre pannelli fotovoltaici posti sulla sua superficie superiore, che lo rendono autonomo energeticamente. *Robot One* è inoltre costruito in modo da essere modulare: ogni blocco che lo compone (fotocamere, CPU, GPU, bracci meccanici, etc.) può essere singolarmente sostituito in caso di rottura o se si desidera fare un *upgrade*, senza necessità di sostituire l'intero macchinario. In questo modo è possibile ridurre i costi, allungarne la vita e minimizzarne l'impatto ambientale.

La più grande innovazione introdotta da *Pixelfarming Robotics* è però la possibilità di utilizzare *Robot One* per coltivare secondo una tecnica nota appunto come *pixel farming* (o *pixel cropping*). Il *pixel farming* prevede la realizzazione di quadrati noti come pixel, con lati di dimensione compresa tra i 0,25 e i 2,25 m<sup>2</sup> e disposti a griglia, ciascuno dei quali può contenere una coltura differente (Ditzler e Driessen, 2022) (vedi figura 4.9).

Si abbandona in questo modo il tradizionale modello della monocoltura, impiegando tecniche agroecologiche che aumentano la biodiversità del sistema e migliorano lo stato di salute del suolo quali le rotazioni, le consociazioni e le colture di copertura. 'Spezzare' l'area di coltivazione di ogni specie vegetale ostacola inoltre la diffusione dei patogeni, facilitandone il controllo naturale.

Usando i dati presenti all'interno della *Pixelfarming Academy* è possibile realizzare dei piani di coltivazione che massimizzino le sinergie tra le diverse specie e quelle derivanti dalle specifiche sequenze di rotazione in ogni pixel e che tengano invece distanti colture che non crescono bene vicine.

---

**Figura 4.9 - Robot One in un campo coltivato secondo il metodo *pixel farming***



FONTE: [www.pixelfarming.eu](http://www.pixelfarming.eu)

---

## 4.3 Le tecniche agricole e le innovazioni tecnologiche implementate

### 4.3.1 L'obiettivo di analisi: approfondire percorsi e benefici

Quanto emerso dalla disamina dei casi condotta nel paragrafo precedente ha posto le basi per approfondire le tecniche agricole e le innovazioni tecnologiche applicate. In particolare, diventa possibile osservare con riferimento a ogni caso le applicazioni implementate, le condizioni e il percorso che hanno condotto e reso possibili tali applicazioni, nonché i benefici ottenuti e i vantaggi potenzialmente ottenibili.

### 4.3.2 Percorsi e peculiarità nelle applicazioni

Partendo dalle applicazioni implementate (vedi tabella 4.1), con riferimento all’ambito tecnico-agricolo, Meracinqe ha introdotto un sistema di agricoltura di precisione che prevede la definizione del tasso ottimale di semina e concimazione sulla base delle informazioni ricavate dalla mappatura del suolo, dalle immagini satellitari e dai sensori posti in campo. La tecnologia utilizzata consente all’azienda di rendere più omogenea la produttività delle diverse aree del campo, riducendo gli effetti provocati dalla variabilità del terreno e permettendo di raggiungere una resa media di 70 quintali per ettaro (vedi R39).

In accordo con i principi dell’agricoltura rigenerativa, vengono utilizzate delle colture di copertura che evitano di lasciare il suolo scoperto e si effettua una programmazione delle rotazioni che massimizza i benefici per il suolo.

**Tabella 4.1 - Tecniche agricole e innovazioni tecnologiche utilizzate dalle diverse aziende**

Azienda	Agricoltura di precisione	Agricoltura verticale indoor	Agricoltura biologica	Agricoltura rigenerativa	Aridocoltura	Robotica	Automazione e IoT	IA e Machine Vision	Blockchain
Meracinqe	x			x			x	x	x
DiCristiana			x	x					x
Porto Felloni	x		x				x	x	
Planet Farms		x				x	x	x	
Ferrari Farm		x	x				x		
Karadrà					x				
Feeducia			x	x					
Pixelfarming						x		x	

Per evitare l’impiego di prodotti fitosanitari di sintesi, la difesa dai parassiti viene inoltre effettuata con il metodo Micro-Natural<sup>®</sup>, che utilizza una miscela di diversi ceppi batterici (*effective microorganisms*) abbinati ad appositi prodotti naturali per proteggere le piante di riso e rafforzarne le difese naturali.

L’elemento che ha indotto le sorelle Tovo ad adottare queste modalità produttive (vedi tabella 4.2) ha origine nella volontà di preservare un territorio con cui presentano un legame innanzitutto personale e familiare, valorizzandone le risorse e conservandone la biodiversità. La volontà di utilizzare l’attività agricola per raccontare la storia della loro famiglia ha palesato dunque la necessità di ottenere un prodotto sano

e di qualità, che fosse in grado di racchiudere e farsi portavoce dei loro valori. Da questa esigenza nasce perciò la volontà di utilizzare le migliori tecnologie a loro disposizione, massimizzando la qualità e la sostenibilità della produzione.

Per quanto concerne le tecniche agricole adottate da DiCristiana (vedi tabella 4.2), queste presentano come denominatore comune l'attenzione alla tutela e alla rigenerazione dell'ambiente. Non si limita a evitare le sostanze chimiche di sintesi, ma pianifica ogni azione in modo da fornire al suolo il massimo nutrimento e le migliori condizioni possibili. Tutti gli interventi effettuati sono preceduti da un attento studio basato sull'osservazione del terreno e delle sue reazioni a ogni variazione. Le rotazioni e le consociazioni sono continuamente studiate e ottimizzate per contribuire alla rigenerazione dell'ecosistema. Le lavorazioni sono minime, perché la necessità di mantenere l'integrità strutturale del terreno e la sua biodiversità è anteposta a ogni altra esigenza. Ogni principio dell'agricoltura organica rigenerativa è applicato minuziosamente, andando oltre il semplice biologico.

L'attenzione che Cristiana – l'imprenditrice dietro l'azienda agricola omonima – dedica al tema della sostenibilità ambientale trova origine nei suoi valori e nella sua filosofia di vita. Già pioniera del biologico, che pratica dal 1998, è infatti alla continua ricerca di nuove soluzioni per migliorare il suo impatto ambientale e per rivitalizzare il territorio in cui vive.

In Porto Felloni l'intero processo produttivo è regolato sulla base delle analisi chimico-fisiche del suolo e dei dati raccolti da droni e satelliti, nonché da appositi sensori posti in campo. Le immagini e le informazioni raccolte vengono elaborate da appositi algoritmi di intelligenza artificiale, da cui si ricavano le mappe di prescrizione.

**Tabella 4.2 - Tecniche agricole e percorso di introduzione**

<b>Azienda</b>	<b>Tecnica</b>	<b>Driver</b>
Meracinque	Agricoltura di precisione	Consapevolezza dei vantaggi ottenibili dall'utilizzo della tecnologia in termini di qualità e sostenibilità del prodotto
	Agricoltura rigenerativa	Volontà di preservare il territorio e la sua biodiversità, anche in virtù del legame personale e familiare con lo stesso
DiCristiana	Agricoltura biologica	Valori personali e consapevolezza della necessità di preservare l'ambiente e vivere in equilibrio con esso
	Agricoltura rigenerativa	Volontà di andare oltre il semplice biologico che era già praticato in azienda e contribuire alla rigenerazione del territorio
Porto Felloni	Agricoltura di precisione	Ricerca di un modo per massimizzare le rese e gestire le differenti proprietà degli appezzamenti di terreno lavorati. Scoperta dell'agricoltura di precisione grazie a un viaggio negli Stati Uniti
	Agricoltura biologica	Introduzione di una nuova coltura (la noce) in collaborazione con altre realtà del territorio che presenta rese soddisfacenti anche in regime biologico.
Planet Farms	Agricoltura verticale indoor	Consapevolezza che il cibo determina lo stato di salute delle persone. Conseguente volontà di rendere accessibile a tutti degli alimenti capaci di contribuire al loro benessere.
Ferrari Farm	Agricoltura biologica	Volontà di salvaguardare le tradizioni del territorio e l'eredità familiare
	Agricoltura verticale indoor	Ricerca di un'agricoltura capace di coniugare la produzione di alimenti sani e di qualità e le competenze della fondatrice in ambito astronautico
Karadrà	Aridocoltura	Volontà di ridare vitalità al proprio territorio di origine, creando un circolo virtuoso di sostenibilità ambientale e sociale
Feeducia	Agricoltura biologica	Riscoperta della felicità derivante dal lavoro all'aperto durante il lockdown e consapevolezza dell'importanza di preservare l'ambiente
	Agricoltura rigenerativa	

Queste mappe, dopo essere state ottimizzate e approvate dal tecnico agronomo – che sfrutta la propria esperienza per migliorare quanto prodotto dall’algoritmo –, vengono caricate sul trattore dal trattorista. In questo modo il trattore rilascia automaticamente

gli input solo nelle aree in cui è necessario e al tasso definito dalla mappa, mentre l'operatore deve solo effettuare le manovre a fine campo.

L'interesse per le tecnologie di precisione è sorto nei soci dell'azienda già nel 1997, in seguito ad un viaggio negli Stati Uniti (vedi tabella 4.2). La possibilità di regolare ogni operazione sulla base del reale fabbisogno dell'area è apparsa infatti da subito come una soluzione ottimale ai problemi riscontrati nella coltivazione di una zona di recente bonifica che, come tale, presenta un'elevata disomogeneità.

In tempi più recenti, riconosciute la necessità di introdurre colture a più elevato valore aggiunto e l'importanza della transizione ecologica per la redditività, la competitività e il posizionamento delle aziende agricole nel futuro, l'azienda, in collaborazione con altre realtà del territorio, ha iniziato la produzione di noci in regime biologico (vedi R40). Si è scelto di partire dalla noce perché la sua produzione biologica non presenta particolari differenze rispetto a quella convenzionale (vedi R41), ma, vista la costante crescita del mercato biologico, le conoscenze acquisite da questa nuova esperienza sono poi state impiegate per convertire anche parte della produzione di mais di frumento.

Planet Farms per i propri impianti di produzione utilizza un modello di coltivazione verticale indoor ispirato alle *Plant Factory with Artificial Lighting* giapponesi, ripensato in modo da adattarsi meglio al panorama italiano ed europeo, che presenta ad esempio costi dell'energia elettrica nettamente più elevati e un mercato che non è disposto ad accettare prezzi eccessivi per gli alimenti così prodotti.

La crescita delle piante avviene in ambiente controllato, non prevede l'impiego di prodotti chimici di sintesi e utilizza di fatto gli stessi elementi presenti in natura (luce, aria, acqua, micronutrienti, ...). Ogni input fornito alle colture viene pianificato e regolato sulla base dei loro effettivi fabbisogni, in modo da fornire loro l'ambiente di crescita ideale. Le camere di crescita sono isolate tra loro e progettate su misura per la specifica varietà coltivata al loro interno, così come il substrato organico su cui crescono, che è calibrato sulle specifiche esigenze nutrizionali delle colture. L'impianto di circolazione dell'aria, oltre a garantire un ricircolo costante, filtra l'aria in ingresso, garantendo l'assenza di patogeni o fattori inquinanti. Anche le modalità di semina, la disposizione dei semi e la distanza tra un seme e l'altro sono ottimizzate per rendere più efficiente il processo e ottimizzare lo sviluppo delle piante.

Planet Farms nasce dalla consapevolezza che il cibo ha un ruolo fondamentale nel determinare lo stato di salute delle persone e dalla conseguente volontà di rendere accessibile a tutti degli alimenti capaci di contribuire al loro benessere (vedi tabella 4.2). La scelta di iniziare la produzione dalle insalate a foglia piccola – oltre che alla loro particolare predisposizione a questo metodo di coltivazione – è infatti legata all'elevato contenuto di micronutrienti che presentano e alle loro proprietà nutraceutiche.

La produzione agricola di Ferrari Farm integra tradizione e innovazione, facendo coesistere all'interno della stessa azienda un impianto di coltivazione *indoor* in idroponica e un'area all'aperto coltivata in regime biologico.

L'impianto di coltivazione idroponica comprende tre serre completamente ermetiche, sterili e automatizzate, di cui una completamente oscurata fornisce l'opportunità di simulare condizioni ambientali avverse. Il processo produttivo al loro interno è gestito in autonomia da un computer, che regola parametri quali quantità di acqua, CO<sub>2</sub>, temperatura e umidità ambientale sulla base di una Ricetta di Coltivazione Elettronica (RCE). Il substrato organico su cui crescono le piante e la ricetta di coltivazione sono calibrati in modo da ottimizzare la presenza di micronutrienti e le qualità organolettiche degli alimenti.

A ciò si aggiungono un frutteto che conta più di 500 piante e un orto a coltivazione biologica, in cui vengono coltivate le varietà tradizionali del luogo. In queste aree la difesa delle colture è effettuata in via preventiva attraverso la selezione di varietà resistenti alle malattie e l'utilizzo di tecniche quali le rotazioni e le consociazioni.

La peculiare conformazione della produzione agricola che caratterizza Ferrari Farm nasce dalla volontà della fondatrice di coniugare la salvaguardia delle tradizioni, la produzione di alimenti sani e di qualità e le sue competenze in ambito astronautico (vedi tabella 4.2). Lo sviluppo delle serre presenti in azienda è inoltre stato guidato dalla volontà di realizzare degli impianti di produzione alimentare che potessero essere utilizzati anche nel corso delle missioni spaziali – da cui sorge la necessità di coibentare gli spazi di coltivazione e sperimentare condizioni ambientali avverse e variegata che ha portato alla costruzione della serra oscurata.

Le tecniche utilizzate da Karadrà rispecchiano i principi dell'aridocoltura, che ottimizza la produzione agricola in climi aridi – che presentano poche precipitazioni e



periodi di siccità medio-lunghi – e terreni argillosi – capaci di trattenere elevate quantità di acqua.

L'utilizzo di metodi come la pacciamatura con la paglia e la lavorazione superficiale del terreno (sarchiatura) riducono l'evaporazione dell'acqua dal terreno e la necessità di irrigazione. Anche la scelta della varietà utilizzate non è casuale: sono favorite le varietà autoctone, che si sono sviluppate in modo da tollerare le difficili condizioni della zona. Per quanto riguarda il pomodoro d'inverno coltivato da Karadrà, ad esempio, è stata scelta una varietà tradizionale salentina, che veniva in genere piantata nei piccoli orti familiari e riceveva poche cure, elemento che l'ha resa particolarmente resistente agli stress ambientali.

La volontà espressa dai fondatori di Karadrà di recuperare le varietà e i metodi di coltivazione tradizionali ha origine nel desiderio di rivitalizzare un territorio e una comunità che si stavano man mano depauperando e perdendo (vedi tabella 4.2). Ogni decisione presa, dalla localizzazione della produzione, alla scelta delle varietà da coltivare e delle modalità di vendita, tiene infatti conto del suo impatto sociale. Il percorso compiuto dalla cooperativa è quindi un unico grande tentativo di creare un circolo virtuoso di rigenerazione ambientale e sociale capace di avere un impatto reale sul territorio.

Feeducia opera coniugando i principi della coltivazione organica rigenerativa e quelli dell'orto bio-intensivo, con la volontà di contribuire a rigenerare l'ecosistema ottimizzando lo spazio a disposizione.

Per preparare il terreno, è effettuata una pacciamatura iniziale con cartone proveniente dagli scarti di aziende locali, materiale che fa morire e decomporre la vegetazione presente senza danneggiare gli altri organismi che abitano il suolo. Al di sopra viene poi depositato uno strato di compost biologico alto 10-15 cm, che funge da substrato di crescita per le piante e sarà rimpolpato ogni 2-3 anni. Grazie all'elevata capacità di ritenzione idrica del compost e all'azione del processo di compostaggio sui semi presenti al suo interno, si ottiene in questo modo un sistema che trattiene e rilascia l'acqua in modo ottimale e in cui la crescita di erbe spontanee è ridotta.

Le lavorazioni del terreno sono limitate e superficiali, al fine di mantenere integre la struttura e la fauna del suolo e agli input di sintesi sono preferite le sostanze naturali e le specie agricole in grado di contribuire al benessere dell'intero ecosistema.

Anche in questo caso, il percorso che ha portato alla fondazione dell'azienda e ha contribuito a modellare le operazioni agricole ha origine nella visione personale dell'agricoltore (vedi tabella 4.2). Riscoperta la soddisfazione derivante dal lavoro all'aria aperta durante il *lockdown* e messa in dubbio la futura carriera in ambito ingegneristico, Antonio ha infatti scelto di avviare un'azienda agricola con la volontà di crearsi un futuro più vicino ai propri valori. Il modo in cui vengono condotte le attività deriva innanzitutto dalla consapevolezza dei danni provocati dall'agricoltura convenzionale all'ecosistema, dall'interesse per i principi dell'agricoltura organica rigenerativa e dall'incontro con altre aziende agricole locali che già utilizzavano metodi simili.

Sotto il profilo dell'innovazione tecnologica, si ritrova ancora Meracinq (vedi tabella 4.3), che, in collaborazione con xFarm, ha adottato un sistema di *Internet of Things* grazie a cui monitora l'intera azienda attraverso un'unica piattaforma di gestione. I dati risultanti dalla mappatura del terreno e quelli raccolti in tempo reale dai sensori confluiscono infatti all'interno della piattaforma, fornendo una visione complessiva di quanto accade in campo e consentendo di personalizzare le operazioni per ogni singola area del campo. L'utilizzo della piattaforma xFarm ha inoltre consentito la completa digitalizzazione del Quaderno di Campagna, che è ora accessibile in qualunque momento e da qualunque luogo.

La tecnologia interviene a supporto del processo produttivo anche post-raccolta. Nelle operazioni di sbramatura, in cui i chicchi – dopo 12 mesi di stagionatura – vengono sgusciati meccanicamente, un lettore ottico che sfrutta algoritmi di *machine vision* seleziona solo quelli integri e con elevata purezza, consentendo di mantenere elevati standard qualitativi senza appesantire il processo.

L'utilizzo della *blockchain* consente infine di visualizzare tutte le fasi che hanno coinvolto lo specifico lotto di produzione acquistato tramite la scannerizzazione di un codice QR posto sul lato della confezione. È in questo modo possibile comunicare al consumatore in modo semplice e trasparente da dove deriva il valore del prodotto e quali processi hanno contribuito alla sua realizzazione (vedi R42). Lo strumento selezionato consente di trovare il giusto equilibrio tra l'utilizzo di strumenti tecnologici avanzati e la semplicità d'uso per il consumatore.

**Tabella 4.3 - Innovazioni tecnologiche e percorso di adozione**

<b>Azienda</b>	<b>Tecnica</b>	<b>Driver</b>
Meracinque	Automazione e IoT	Volontà di aumentare la qualità del prodotto e di essere sostenibili dal punto di vista ambientale, agronomico, sociale ed economico
	IA e Machine Vision	Ottimizzazione del processo produttivo per migliorare la qualità del prodotto
	Blockchain	Volontà di aumentare la tracciabilità e rendere più semplice la comunicazione di tutte le pratiche sostenibili adottate
DiCristiana	Blockchain	Rendere visibili le peculiarità del processo produttivo e la coerenza delle stesse con i principi dell'azienda
Porto Felloni	Automazione e IoT	Volontà di massimizzare le rese. Iniziali difficoltà nel reperire le tecnologie necessarie
	IA e Machine Vision	Ricerca dell'efficienza per rispondere a fattori quali l'elevato costo del lavoro e degli input produttivi
Planet Farms	Robotica	Necessità di monitorare costantemente le colture anche in assenza di un operatore in sede
	Automazione e IoT	Eliminare la possibilità di contaminazione delle colture e raccogliere quanti più dati possibili
	IA e Machine Vision	Volontà di individuare le migliori condizioni di crescita delle colture pur ottimizzando i costi
Ferrari Farm	Automazione e IoT	Volontà di coniugare tradizione (tutela della biodiversità) e innovazione (missioni spaziali)
Pixelfarming	Robotica	Volontà di mettere la tecnologia a servizio dell'agroecologia, rispondendo alle principali problematiche riscontrate nello svolgimento dell'attività agricola
	IA e Machine Vision	

L'idea di implementare un sistema di agricoltura 4.0 che comprende le tecnologie elencate nasce dall'esigenza di ottenere un riso dalla qualità quanto più elevata possibile, capace di distinguersi sul mercato e di garantire all'azienda una sostenibilità a 360 gradi, dal punto di vista ambientale, agronomico, sociale ed economico. L'utilizzo della tecnologia contribuisce al raggiungimento di tale obiettivo grazie alla riduzione dell'impatto ambientale dell'attività in campo, all'aumento delle rese e al miglioramento delle caratteristiche organolettiche del riso prodotto.

Quest'ultimo punto è particolarmente rilevante per la sostenibilità economica dell'azienda, dal momento che il miglioramento della marginalità agricola è strettamente connesso alla capacità di presentarsi sul mercato con un brand forte e riconoscibile (vedi R43). L'intero progetto Meracinque nasce infatti dalla volontà di commercializzare i prodotti dell'azienda agricola di famiglia con un nome e un'identità propria e non – come era accaduto fino a quel momento – solo attraverso la vendita a realtà terze.

La principale innovazione tecnologica adottata da DiCristiana (vedi tabella 4.3) è la piattaforma *blockchain* di Trusty, utilizzata al fine di garantire una maggiore trasparenza del processo produttivo (vedi R44). Scannerizzando il codice QR presente sulla confezione dei prodotti è infatti possibile visualizzare ogni fase che ha condotto alla loro realizzazione. Tale intervento è volto ad aumentare la tracciabilità del prodotto e comunicare il valore del *Made in Italy*, anche in virtù dell'apertura ai mercati internazionali (es. vendita del prodotto ad alcuni ristoratori negli Stati Uniti). Si tratta di un intervento in linea con la filosofia dell'azienda, che contribuisce inoltre al suo posizionamento come realtà innovatrice, non solo sul fronte agronomico, ma anche su quello digitale.

Porto Felloni si presenta da oltre due decenni come un'azienda innovatrice e pioniera nell'adozione di sistemi per l'agricoltura 4.0. In particolare (vedi tabella 4.3), si serve di tecnologie appartenenti all'*Internet of Things* e all'intelligenza artificiale per condurre le operazioni in campo.

Per quanto riguarda l'IoT, una piattaforma software centrale, rappresentata dal gestionale di Technofarming, si interfaccia con più hardware, creando una fitta rete di comunicazione e rendendo possibile l'accesso ai dati aziendali anche da remoto. Le attività in campo sono programmate sulla base delle informazioni raccolte da (vedi R 45):

- immagini satellitari dell'Esa, che vengono scaricate periodicamente;
- riprese effettuate dai droni di proprietà dell'azienda, che si rivelano particolarmente utili nei momenti in cui il cielo è coperto e le immagini satellitari non sono disponibili;

- dati provenienti dai sensori in campo. Tra i sensori utilizzati, tre stazioni meteo e venti sonde per la rilevazione dell'umidità del suolo, che raccolgono i dati ogni 10 cm fino a 50 cm di profondità su seminativi e orticole e fino a 90 cm sul noceto.

Le mappe di prescrizione, pur essendo poi ratificate manualmente da un operatore, sono inizialmente elaborate da appositi algoritmi di intelligenza artificiale. A partire dal 2023 si stanno inoltre testando delle telecamere intelligenti che, attraverso appositi algoritmi di *machine vision*, guidano automaticamente i macchinari all'interno dei filari e identificano le infestanti. Altri algoritmi guidano poi l'applicazione dell'erbicida solo nei punti in cui è necessario, con un risparmio di materia prima che si aggira attorno al 70-80% (vedi R12).

Il percorso di avvicinamento alla tecnologia di Porto Felloni nasce dalla volontà di ridurre l'eterogeneità delle rese causata dalla variabilità del suolo, massimizzando la produttività e la redditività dell'azienda. In un primo periodo, tuttavia, l'introduzione delle innovazioni tecnologiche è stata rallentata dalle difficoltà legate all'assenza delle tecnologie e delle infrastrutture di supporto necessarie a realizzare la visione dei soci.

In seguito alla diffusione delle soluzioni tecnologiche sul mercato, la ricerca della massima efficienza in azienda è continuata come risposta a fattori quali l'elevato costo del lavoro e degli input produttivi e la bassa marginalità che caratterizza l'agricoltura.

In Planet Farms le innovazioni tecnologiche (vedi tabella 3.4) permeano ogni aspetto del processo produttivo. Gli impianti di produzione sono progettati e costruiti in modo da consentire una gestione intelligente dell'edificio mediante l'utilizzo delle tecnologie dell'*Internet of Things*. Ogni area è infatti dotata di una rete capillare di sensori interconnessi, che consente il costante monitoraggio dei parametri ambientali. I dati raccolti dai sensori, grazie all'infrastruttura tecnologica realizzata in collaborazione con Sirti, sono poi trasmessi e raccolti in un centro dati in *cloud* (vedi R46).

Al fine di migliorare il processo produttivo e la qualità del prodotto, tali dati sono continuamente utilizzati per svolgere minuziose attività di *data analytics*. Per monitorare lo sviluppo delle colture e svolgere le analisi dei dati, Planet Farms si avvale del supporto di Gaia VF, l'intelligenza artificiale che garantisce alle piante le condizioni di crescita ideali e rappresenta il vero patrimonio aziendale (vedi R47).

All'interno della farm di Brusaporto si sta inoltre sperimentando l'utilizzo di un robot per il monitoraggio delle colture e la raccolta dei dati, che vengono poi trasmessi all'hub principale. Il robot è dotato di telecamere 3D che valutano il colore e la dimensione delle foglie e di telecamere termiche che rilevano i processi di fotosintesi in corso grazie allo scambio di calore ad essi associato (vedi R14). In questo modo le colture possono essere monitorate anche quando non è presente un addetto in sede.

Il percorso che ha condotto all'elaborazione delle soluzioni tecnologiche implementate ha origine dalla volontà di coltivare i propri prodotti minimizzando i costi di produzione e contenendo quindi il prezzo al dettaglio, mantenendolo in linea con quello degli alimenti biologici. La consapevolezza che per ottimizzare il processo produttivo sono necessari un'immensa mole di dati generati in tempo reale e un sistema in grado di gestirli e utilizzarli per prendere decisioni hanno evidenziato l'esigenza di servirsi di tecnologie innovative – quali l'*Internet of Things* e l'intelligenza artificiale – capaci di assolvere a tali compiti.

Un'altra azienda che sfrutta l'automazione e la trasmissione in tempo reale delle informazioni per la gestione delle colture è Ferrari Farm (vedi tabella 4.3).

L'intera struttura – composta da due serre e un fitotrone<sup>49</sup> – è autonomamente gestita da un apposito computer, che regola le operazioni sulla base dei dati raccolti dai sensori in merito a quantità di acqua rimanente, CO<sub>2</sub>, temperatura e umidità ambientale, etc. e di un'apposita Ricetta di Coltivazione Elettronica (RCE). I sistemi di automazione integrati nelle serre ne consentono la supervisione da remoto e, in caso di necessità, permettono al sistema di realizzare autodiagnosi, riducendo i fermi ed i tempi di ricerca guasto (vedi R48).

La necessità di ricorrere a sistemi di automazione nasce dalla volontà di Giorgia di realizzare un ambiente di coltivazione controllato e soprattutto sterile, che potrebbe essere utilizzato anche nelle missioni spaziali di lunga durata (l'obiettivo ultimo del progetto).

Pixelfarming Robotics (vedi tabella 4.3), a differenza delle altre aziende presentate, non si occupa direttamente della produzione agricola, ma produce robot per

---

<sup>49</sup> Ambiente totalmente oscurato utilizzato per lo studio delle piante, in cui vengono artificialmente riprodotti diversi climi e situazioni meteorologiche.

l'automazione delle attività in campo. L'idea alla base dei suoi prodotti deriva dai problemi connessi a depauperamento del suolo, carenza di risorse idriche, crescente necessità di lavoro manuale e aumenti del costo di carburante e input chimici che si sono trovati ad affrontare i quattro fondatori nella gestione di un'azienda agricola di 10 ettari e dalla volontà di trovare una soluzione tecnologica in grado di risolverli (vedi R37).

Rispetto agli altri produttori di attrezzi agricoli, Pixelfarming Robotics si distingue per il suo approccio incentrato sulla reale volontà di mettere la tecnologia a servizio dell'agroecologia. Il modo in cui *Robot One* – il loro prodotto principale – è realizzato non si basa infatti sulle logiche agricole convenzionali, ma punta a rivoluzionare il modo in cui avviene l'agricoltura su larga scala. Grazie alla possibilità di regolarne i bracci meccanici e al suo sistema integrato di *machine vision*, Robot One è infatti capace di gestire molteplici specie vegetali collocate in uno stesso campo, consentendo di superare l'attuale modello basato sulle monocolture.

Utilizzando quattro camere stereoscopiche e appositi algoritmi di elaborazione delle immagini raccolte, *Robot One* scansiona la superficie del campo per creare una mappatura 3D, rileva potenziali ostacoli ed analizza le immagini per riconoscere le piante in campo. Ciò gli consente di distinguere le colture dalle infestanti, procedendo in autonomia con un diserbo laser o meccanico.

A ogni passaggio in campo, le nuove immagini raccolte sono utilizzate per affinare l'algoritmo di riconoscimento, rendendo il sistema sempre più preciso. L'integrazione di *machine vision* e sistema GPS consente inoltre di mantenere la traiettoria con estrema precisione.

### 4.3.3 Vantaggi e benefici nelle applicazioni

Quanto emerso dall'analisi effettuata permette ora di osservare benefici e potenzialità legate alle tecniche agricole e alle innovazioni tecnologiche oggetto di analisi (vedi tabelle 4.4 e 4.5).

Nello specifico, con riferimento all'agricoltura di precisione i principali benefici riscontrati in seguito alla sua adozione riguardano la migliore qualità organolettica degli alimenti prodotti (in particolar modo in Meracinque), l'aumento delle rese (che

rappresenta il principale focus di Porto Felloni), la riduzione dei costi grazie alle operazioni a tasso variabile e la maggiore marginalità complessiva derivante sia dalla riduzione dei costi che da un maggior valore del prodotto riconosciuto dal mercato.

I vantaggi potenzialmente conseguibili nel medio periodo grazie all'adozione dell'agricoltura di precisione sono connessi alla capacità di minimizzare le risorse utilizzare per le operazioni agricole – che rende l'azienda più resiliente agli *shock* (carenze idriche, aumenti imprevisti dei prezzi, etc.) – e alla possibilità di sfruttare e monetizzare il valore dei dati generati negli anni. La carenza di *database* ampi e affidabili su cui condurre ricerche ed effettuare il *training* dei modelli di intelligenza artificiale li rende infatti un elemento a cui sempre più frequentemente altri attori (istituti di ricerca, aziende che producono macchinari e input per l'agricoltura, etc.) riconosceranno un valore anche economico.

Per quanto concerne invece l'agricoltura indoor e/o verticale, i maggiori benefici riscontrati sia da Planet Farms che da Ferrari Farm riguardano l'indipendenza della produzione dalle condizioni pedoclimatiche, la riduzione delle risorse naturali utilizzate e delle emissioni legate ai trasporti e la possibilità di ricreare l'ambiente di crescita ideale per le piante, elemento che elimina le perdite legate a infestanti e patologie.

La possibilità che l'evoluzione delle tecnologie utilizzate – unita all'aumento in termini quantitativi del mercato ad esse connesso – riduca i costi connessi all'impianto e alla gestione di un impianto produttivo consente di intravederne le potenzialità di un capillare utilizzo per la produzione agricola in aree critiche, con elevati tassi di inquinamento o condizioni climatiche ostili.

Realtà che puntano in questa direzione (come Ferrari Farm, che ha realizzato sia un impianto-container che una mini farm da introdurre in ambiente domestico) potrebbero quindi beneficiare della diffusione di queste tecnologie, affiancando la vendita della tecnologia proprietaria a quella dei prodotti agricoli. Esiste inoltre la possibilità (esplorata da realtà come Planet Farms) di utilizzare le camere di coltivazione per produrre input per settori quali quelli farmaceutico, cosmetico e tessile.



**Tabella 4.4 - Benefici e potenzialità riscontrati - Parte 1**

Azienda	Tecnica / tecnologia	Benefici	Potenzialità
Meracinque	Agricoltura di precisione	Aumento delle rese e delle qualità organolettiche del prodotto, maggiore marginalità anche in virtù del valore riconosciuto al prodotto	Mantenere elevate le rese, minimizzando le disomogeneità territoriali e l'impatto sull'ambiente
	Agricoltura rigenerativa	Tutela del territorio di provenienza, migliori valori nutrizionali e salubrità dei prodotti	Sfruttare le tecnologie per aumentare la complessità del sistema
	Automazione e IoT	Possibilità di supervisionare l'azienda da remoto e basare il processo produttivo sui dati raccolti	Migliorare la qualità e l'ampiezza del database aziendale, anche in virtù del crescente valore (economico e operativo) dei dati
	IA e Machine Vision	Mantenimento di elevati standard qualitativi di prodotto grazie alla selezione automatizzata de chicchi di riso	Utilizzo più diffuso dell'intelligenza artificiale per migliorare la gestione dei sistemi complessi
	Blockchain	Tracciabilità e trasparenza della filiera	Utilizzo di smart contract per la gestione dei rapporti con i partner, maggiore integrazione con il sistema IoT che fornisce i dati
DiCristiana	Agricoltura biologica	Rispetto dell'ecosistema e salubrità dei prodotti. Sviluppo delle competenze necessarie ad andare oltre il semplice biologico e avvicinarsi all'agricoltura rigenerativa	Sfruttare competenze e collaborazioni per supportare lo sviluppo di nuove soluzioni compatibili con la filosofia aziendale
	Agricoltura rigenerativa	Rigenerazione dell'ecosistema, maggiore salubrità e migliore gusto dei prodotti	Sfruttare competenze e collaborazioni per supportare lo sviluppo di nuove soluzioni compatibili con la filosofia aziendale
	Blockchain	Tracciabilità e trasparenza della filiera	Utilizzo di smart contract per la gestione dei rapporti con i partner
Porto Felloni	Agricoltura di precisione	Rese maggiori della media regionale, aumento della redditività	Possibilità di sfruttare e monetizzare il valore del database aziendale creato negli anni
	Agricoltura biologica	Minori costi per l'acquisto di input e carburante, maggiore valore percepito dal mercato	Sfruttare la profonda conoscenza del suolo, garantita anche dall'ampio database aziendale, per adottare pratiche più coerenti con i cicli naturali
	Automazione e IoT	Creazione di un ampio database, che consente la gestione delle operazioni agricole basata sui dati raccolti	Possibilità di sfruttare e monetizzare il valore del database aziendale creato negli anni
	IA e Machine Vision	Aumentare l'efficienza produttiva grazie all'utilizzo di algoritmi di IA	Utilizzo dell'intelligenza artificiale per migliorare la gestione dei sistemi complessi e della machine vision per automatizzare le operazioni in campo
Planet Farms	Agricoltura verticale indoor	Indipendenza dalle condizioni pedoclimatiche, prodotti a km0 anche in ambiente urbano	Possibilità di ampliare la gamma dei prodotti e di espandersi in altri settori (farmaceutico, cosmetico, tessile)
	Robotica	Gestione automatizzata delle colture, raccolta di dati in tempo reale	Non noti, le operazioni sono già completamente automatizzate
	Automazione e IoT	Prezzi in linea con i prodotti biologici grazie all'elevata efficienza dell'impianto, raccolta dei dati necessari alla gestione	Non noti, le operazioni sono già completamente automatizzate
	IA e Machine Vision	Efficienza del processo produttivo, creazione delle condizioni di sviluppo ideali per le colture	Migliorare la capacità di influenzare le caratteristiche del prodotto e le specie vegetali supportate

**Tabella 4.5 - Benefici e potenzialità riscontrati - Parte 2**

Azienda	Tecnica / tecnologia	Benefici	Potenzialità
Ferrari Farm	Agricoltura biologica	Rispetto delle tradizioni e dell'ecosistema in cui la coltivazione è inserita	Integrazione di tecnologia e coltivazioni in campo per migliorarne la gestione
	Agricoltura verticale indoor	Indipendenza dalle condizioni pedoclimatiche, possibilità di ricreare l'ambiente di crescita ideale per le colture	Produzione agricola in aree critiche (inquinamento, condizioni climatiche estreme, missioni spaziali), anche a tutela della biodiversità
	Automazione e IoT	Possibilità di operare da remoto e automatizzare la gestione dei parametri aziendali	Integrazione di tecnologia e coltivazioni in campo per migliorarne la gestione
Karadrà	Aridocoltura	Recupero delle tradizioni, possibilità di coltivare in un'area calda e arida. Ricostruzione del tessuto sociale	Integrazione con altre pratiche agricole per massimizzarne i benefici ambientali (es. agricoltura rigenerativa)
Feeducia	Agricoltura biologica	Rispetto della natura e dei suoi cicli naturali, maggiore salubrità dei prodotti, con ricadute positive sul benessere delle comunità circostanti	Migliorare la resilienza dell'ecosistema e la sua capacità di rispondere alle minacce future
	Agricoltura rigenerativa	Rigenerazione dell'ecosistema, migliore livello qualitativo e salubrità dei prodotti	Migliorare la resilienza dell'ecosistema e la sua capacità di rispondere alle minacce future
Pixelfarming Robotics	Robotica	Minor compattazione del terreno, gestione automatizzata delle policolture, raccolta di dati in tempo reale	Possibilità di aumentare la diffusione delle policolture e delle pratiche agricole sostenibili, facilitando la transizione ecologica
	IA e Machine Vision	Maggiore efficienza produttiva, utilizzo degli algoritmi di elaborazione delle immagini per la rimozione automatizzata delle infestanti	Introduzione di algoritmi per il riconoscimento e il trattamento delle patologie vegetali

I benefici connessi all'agricoltura biologica, come evidenziato da realtà quali DiCristiana, Ferrari Farm e Feeducia, riguardano innanzitutto il rispetto dell'ecosistema e dei suoi cicli naturali, la maggiore salubrità dei prodotti ottenuti e gli effetti positivi sul benessere delle comunità circostanti. La riduzione degli input produttivi consente inoltre di ridurre i costi e aumentare il valore del prodotto sul mercato, garantendo una maggior redditività all'azienda (come emerso nel caso di Porto Felloni).

Affinché la produzione in regime biologico si riveli economicamente sostenibile è tuttavia importante non limitarsi a tradurre la produzione biologica come una produzione convenzionale, che però utilizza solamente input permessi dal regolamento. Non stupisce infatti che procedere in questo modo – senza preoccuparsi di rigenerare l'ecosistema in cui le colture si inseriscono e di aumentarne la resilienza – porti a una diminuzione delle rese e dei benefici per l'agricoltore.

L'emergere delle principali potenzialità dell'agricoltura biologica non può pertanto prescindere una sua evoluzione verso pratiche più integrate (come accaduto per DiCristiana con l'agricoltura rigenerativa) e lo sfruttamento dell'innovazione tecnologica per migliorare la gestione delle colture.

In modo simile a quanto emerso per l'agricoltura biologica, anche i benefici legati all'agricoltura rigenerativa riguardano per lo più la possibilità di arricchire l'ambiente in cui viene praticata – riducendo l'impatto ambientale del settore agricolo (Feeducia) – e di ottenere prodotti con un valore maggiore in virtù delle loro migliori qualità organolettiche e della loro salubrità (Meracinqe, DiCrisiana). Le sue potenzialità future sono inoltre connesse all'utilizzo della tecnologia per rendere più semplice la comprensione delle dinamiche che governano l'intero sistema e la personalizzazione delle operazioni in campo (ad esempio sfruttando l'intelligenza artificiale per comprendere le necessità del terreno e le soluzioni migliori date le specifiche circostanze).

Per quanto riguarda l'aridocoltura, gli attuali benefici derivanti dalla possibilità di coltivare in zone calde e aride – recuperandone anche il valore storico e culturale, come nel caso di Karadrà – potrebbero emergere in modo ancora più evidente nel futuro, dati i cambiamenti climatici e la crescente desertificazione in corso nelle aree mediterranee. L'integrazione con l'agricoltura rigenerativa sta inoltre dimostrando delle enormi potenzialità per il recupero di terreni in cui la desertificazione è già in stadio avanzato, fornendo strumenti utili per il loro recupero e la loro rivitalizzazione.

Per quanto concerne l'integrazione di attività agricola e robotica, i principali benefici che ne derivano sono connessi alla possibilità, dato il loro peso ridotto, di ridurre la compattazione del terreno conseguente al passaggio dei macchinari in campo; alla gestione automatizzata delle colture anche nei casi in cui assumono conformazioni differenti dalla tradizionale monocoltura (Pixelfarming Robotics) e alla raccolta di dati in campo in tempo reale (Planet Farms).

Le potenzialità della robotica per il futuro sono ancora molto aperte, vista la fase introduttiva in cui la tecnologia si trova, e dipenderanno molto dal modo in cui verrà condotto il suo sviluppo. Ci si auspica tuttavia che la possibilità di automatizzare compiti

non standardizzati e l'integrazione con l'*Internet of Things* e l'intelligenza artificiale consentano di costruire robot capaci di aumentare la diffusione delle policolture e delle pratiche agricole rigenerative e sostenibili, facilitando la transizione ecologica.

Per quanto concerne i sistemi di automazione e l'*Internet of Things*, le aziende che li hanno introdotti hanno riscontrato notevoli vantaggi in termini di: supervisione dell'azienda da remoto, processo produttivo basato sui dati raccolti (Meracinqe) e automazione della gestione dei parametri ambientali (Planet Farms, Ferrari Farm). La possibilità di realizzare impianti produttivi indoor che sfruttano l'automazione per raggiungere elevati livelli di efficienza consente inoltre ad aziende come Planet Farms di contenere i costi connessi alla produzione alimentare.

La diffusione di sistemi IoT più avanzati e lo sviluppo delle infrastrutture necessarie al loro supporto potrà in futuro garantire la possibilità di migliorare l'integrazione dei diversi sottosistemi aziendali, rendendo più semplice la gestione integrata dell'azienda agricola. A ciò si aggiungono le potenzialità già evidenziate per l'agricoltura di precisione di sfruttare maggiormente (in termini operativi e monetari) il valore dei dati raccolti da sensori e sistemi di automazione.

Con riferimento a intelligenza artificiale e *machine vision*, i principali benefici ravvisati dalle aziende dopo la loro introduzione riguardano: l'aumento dell'efficienza operativa raggiunto grazie alla produzione automatizzata delle mappe di prescrizione da parte di appositi algoritmi (Porto Felloni); il mantenimento delle condizioni di sviluppo ideali in ambiente controllato (Planet Farms); l'utilizzo di algoritmi di *machine vision* per mantenere elevati standard qualitativi del prodotto (selezionatrice ottica in Meracinqe) o per automatizzare le attività di diserbo (Pixelfarming Robotics).

Così come la robotica, anche l'intelligenza artificiale è una tecnologia che si trova ancora in fase embrionale, di cui risulta particolarmente difficile immaginare le reali potenzialità future. I dati e i risultati oggi disponibili consentono tuttavia di immaginare che, in presenza di algoritmi più stabili e avanzati, sarà possibile migliorare la loro capacità di gestire sistemi complessi. Ciò consentirebbe la creazione di sistemi agricoli resilienti e variegati, in cui la produzione alimentare e la tutela della biodiversità possano coesistere. Per quanto riguarda la coltivazione in ambienti controllati sarà inoltre possibile sfruttare tali capacità per influenzare le caratteristiche delle specie che

crescono al loro interno (Planet Farms sta ad esempio studiando quali parametri influenzano dimensione delle foglie, omogeneità e vividezza del colore, etc.).

Prendendo in considerazione infine la *blockchain* e le sue applicazioni si riscontra ad oggi un'adozione per lo più formale dello strumento. I benefici connessi alla sua adozione riguardano infatti principalmente la maggiore fiducia riposta nel prodotto da parte del consumatore di fronte a una filiera produttiva tracciata e trasparente (Meracinqe e DiCristiana). La risoluzione dei principali problemi riscontrati oggi nel suo utilizzo (credibilità degli oracoli o delle altre fonti da cui provengono i dati, robustezza degli algoritmi di consenso, etc.) consentirebbe tuttavia di ampliarne l'utilizzo. Le sue potenzialità non si limitano infatti alla credibilità della comunicazione, ma comprendono applicazioni quali l'automazione delle transazioni, che le renderebbe più rapide, sicure e meno onerose, e la possibilità di ridurre gli intermediari presenti all'interno della filiera, migliorando la redistribuzione del valore generato.

#### 4.4 Conclusioni e possibili pattern

La seppur limitata disamina di casi di applicazione, sia delle tecniche agricole (vedi capitolo 2) che delle innovazioni tecnologiche (vedi capitolo 3) precedentemente illustrate, ha consentito di porre in luce quali tecniche e nuove tecnologie hanno trovato effettivo impiego (vedi paragrafo 2), nonché i percorsi e gli elementi che hanno condotto a tali applicazioni, rilevando infine alcuni tra i principali benefici ottenuti e potenzialmente ottenibili.

Con questa parte di analisi dei casi studio, volutamente non si è ritenuto opportuno andare a ricercare e a operare analisi e riflessioni in merito a quelli che possono essere rischi, criticità e situazioni di insuccesso. E ciò non perché non ve ne siano, bensì perché - essendo lo stadio 'evolutivo' dell'agricoltura in merito, sia sul piano di diffusione che di maturità di implementazione, pressoché ancora nelle primissime fasi - si è ritenuto più utile tentare di osservare, individuare o ricostruire alcuni possibili pattern ricorrenti e di successo, sulla base dell'analisi di realtà che sono tra quelle che si sono dimostrate pioniere in tal senso.

Da un lato il fine della presente trattazione è interrogarsi sul ruolo che le tecniche agricole e le innovazioni tecnologiche, descritte nei precedenti capitoli, possono

ricoprire nelle evoluzioni sempre più necessaria del mondo agricolo, dall'altro, si intendono individuare ricavare appunto le 'basi' di percorso e le traiettorie utili in tal senso.

In relazione al primo fine, nel paragrafo precedente si sono poste delle riflessioni in tal senso, ponendo in evidenza i vantaggi e i benefici riscontrati con tali applicazioni e il ruolo di queste ultime nell'evoluzione del comparto agricolo.

Con riferimento al secondo punto, ossia l'individuazione di basi e traiettorie utili di percorso, nella parte che segue si richiamano a tal proposito alcune evidenze e ricorrenze, in merito alle applicazioni di tecniche agricole e innovazioni tecnologiche analizzate precedentemente nei casi, che possono appunto costituire una base utile per individuare dei pattern.

Una prima 'base', un 'nodo' importante, rappresentato da un insieme di variabili e fattori intrecciati tra loro, fa leva sull'approccio imprenditoriale che caratterizzano tali realtà pioniere, in termini di: consapevolezza della propria identità, visione, dinamismo di mercato, logiche di strutturazione e proposta della propria produzione e offerta.

La maggior parte delle realtà considerate si caratterizza infatti per aver sviluppato uno o più canali di vendita diretta e si propone sul mercato finale con un proprio brand, valorizzando e cercando di far emergere e conoscere le peculiarità del proprio processo produttivo e la filosofia sottostante. In relazione ai casi osservati, rispetto a quanto appena rilevato, fa eccezione soltanto l'azienda agricola Porto Felloni, che vende direttamente al consumatore solo le noci biologiche, mentre il resto dei prodotti vengono venduti ad aziende italiane di trasformazione. Viene quindi proposto sul mercato un prodotto che non è più solo una *commodity*, ma che ha invece un'offerta che esprime la propria identità e le caratteristiche distintive che lo rendono unico (o quanto meno riconoscibile).

Si ravvisa inoltre con una certa ricorrenza per quanto concerne il fattore della componente familiare, identitaria e di fiducia – si veda ad esempio il caso di cessione di terreni im Feeducia o quello di continuazione di un'attività imprenditoriale in Meracinque, ma anche di trasmissione di valori e tradizioni in Ferrari Farm.

Si sono poi riscontrate, nella pressoché totalità dei casi, un'attitudine e una volontà ricorrente di prevedere le minacce future (costo e reperibilità degli input

agricoli, carenze idriche, etc.), per mettere in atto delle strategie difensive preventive, in modo da non farsi cogliere impreparati, con i conseguenti effetti esiziali in tal senso.

In stretta connessione con quanto appena evidenziato, nella logica di superare ostacoli e criticità poste da logiche di concentrazione e di rendite di posizione lungo la filiera produttiva, buona parte delle realtà analizzate negli anni ha scelto cammini autonomi, e il meno possibili vincolati da parte di grandi soggetti del settore, per cogliere le opportunità legate all'ascesa del *Made in Italy* sui mercati internazionali, alla crescente attenzione agli aspetti salutistici e alla qualità degli alimenti, alle innovazioni tecnologiche emergenti, etc., riuscendo ad agire da pionieri nonostante le difficoltà.

Ciò pone in evidenza come ciò richieda lo sviluppo di un percorso causa ed effetto dei propri valori, nonché dalla leva su proprie specificità interne, evolvendo dove necessario, con conseguente percorso, non sempre agevole, di ampliamento e cambiamento delle proprie competenze per gestire un'azienda agricola di fronte a tale evoluzione. In questo senso, un'integrazione importante di visione e conoscenze si ravvisa in un 'movimento' di persone qualificate che torna a lavorare la terra anche con la volontà di ridisegnare la figura del contadino/agricoltore, riconoscendo la professionalità e la dignità (e la sempre più centralità) del lavoro agricolo.

In quasi tutte le realtà analizzate, si osserva poi un'apertura ai mercati internazionali, che si affianca alla volontà di raccontare il *Made in Italy*, coerentemente con la crescita di tale mercato che si è vista negli ultimi anni. Allo stesso tempo però ciò risulta essere in stretta combinazione con la volontà di recuperare il legame con il territorio, praticando forme di agricoltura che arricchiscono e avvicinano alla comunità (si veda ad esempio cooperativa Karadrà per il recupero della conoscenza e del patrimonio rurale o la *Community Supported Agriculture* praticata da Feeducia).

Tra gli elementi più cruciali riscontrati, vi è forse la capacità di riconoscere, sfruttare e valorizzare le peculiarità locali, rinunciando in parte alla standardizzazione tipica dell'agricoltura convenzionale (dalle operazioni a tasso variabile di Porto Felloni alle diverse varietà coltivate nei vari appezzamenti – che danno poi il nome alle linee di prodotto – in DiCristiana).

Altrettanto ricorrente e fondamentale è la presenza di una forte attitudine a mettere in discussione lo *status quo*, ricercando e trovando soluzioni nuove ai problemi affrontati, con l'attitudine a sperimentare in prima persona e guardando alle ricerche e alle soluzioni tecnologiche più avanzate, anche se ancora poco note e diffuse (Ferrari

Farm per la costruzione di serre, tecnologia a Porto Felloni, campo per la sperimentazione in DiCristiana).

Sulla stessa scia, emerge inoltre l'attitudine ad andare oltre le semplici logiche di competizione che legano i diversi attori, sviluppando invece logiche di sistema, in primis creando dei momenti di condivisione delle conoscenze e di cooperazione, che giovino a tutti i partecipanti tramite la crescita dell'intero ecosistema. A ciò si aggiungono le partnership con altri organismi pubblici e privati che presentano competenze complementari (Pixelfarming Robotics con l'università, DiCristiana con *Italian Rice Experiment Station*).

Sul piano più strettamente tecnologico si evidenzia come Automazione e IoT, robotica, IA e machine vision siano molto spesso causa ed effetto dell'implementazione di tecniche di agricoltura di precisione o verticale / indoor. Tra i possibili motivi e cause legate a tale aspetto, si individua la vicinanza e sinergia tecnologica, anche da un punto di vista culturale e di approccio. Si tratta infatti di modalità produttive che per loro natura trovano tra loro basi e integrazioni tecnologiche comuni, con tecnologie sviluppate in modo da essere compatibili con queste modalità e meno con altre (Robot One è forse in questo panorama l'unica eccezione, vedi paragrafo 3.2).

L'intero capitolo dedicato alla trattazione di casi studio ha evidenziato diversi modi di intendere l'innovazione in ambito agricolo, che variano per la dimensione dell'azienda agricola considerata, per la fase di sviluppo in cui si trovano, per l'intensità di tecnologia e capitali impiegati, per il modo di intendere il legame tra agricoltura e comunità, etc.

Tuttavia, come è emerso anche da quanto appena osservato e dalle riflessioni svolte in questo paragrafo, ai fini dei pattern di percorso, emergono e si confermano alcuni elementi di base di partenza pressoché imprescindibili:

- la necessaria evoluzione della figura del contadino-agricoltore. Per prosperare oggi è infatti necessario che esso abbia elevate competenze, che non si limitano alla conoscenza tacita derivante dall'esperienza in campo com'era un tempo, ma che devono riguardare un insieme più ampio di materie e argomenti (conoscenza della tecnologia per un suo adeguato utilizzo, comprensione dell'impatto ambientale delle proprie azioni, ...). Data l'elevata incertezza che oggi caratterizza ogni settore e che coinvolge anche l'agricoltura (cambiamenti



climatici, variazioni eccezionali nei costi degli input produttivi, ...) e la necessità di creare realtà che siano economicamente sostenibili (e non stiano in piedi solo grazie ai sussidi nazionali o europei, dal momento che ciò vincola la loro libertà di azione e li rende di fatto paragonabili a dipendenti), è inoltre necessario che gestisce un'azienda agricola analizzi in continuazione le potenziali minacce e opportunità che si trovano all'orizzonte, per essere pronto ad affrontare le prime e cogliere le seconde. L'elevata professionalità e imprenditorialità che sono oggi richieste a un agricoltore per avere successo dovrebbero dunque portare a una rivalutazione della sua figura, che non corrisponde più alla persona scarsamente istruita e qualificata che lavora la terra perché non ha alternative, ma a persone competenti e in gamba, che scelgono liberamente di dedicarsi alla produzione di cibo e alla tutela del patrimonio paesaggistico e ambientale del luogo in cui operano. In questo modo, come in parte già sta avvenendo, anche l'agricoltura può diventare un settore capace di attrarre menti brillanti e qualificate, che possono lavorare per il progresso del settore;

- l'attenzione all'aspetto ambientale che non può più tradursi semplicemente nella ricerca di una maggiore efficienza delle operazioni svolte rimanendo all'interno dello stesso paradigma produttivo, ma deve prevedere un'evoluzione radicale dello stesso che riduca la standardizzazione (direttamente in campo o mediante la liberazione di spazio che può essere restituito agli ecosistemi naturali, anche se sarebbe interessante capire se ciò avviene davvero) e consenta una maggior tutela delle risorse naturali e della biodiversità.

# Conclusione

La presente trattazione, interrogandosi sul 'punto di arrivo' più auspicabile per il mondo agricolo - alla luce delle sfide attuali e future, alcune delle quali sempre più stringenti - si è incentrata sui seguenti punti e obiettivi: un'agricoltura in grado di nutrire, che offre cibo sicuro, salutare e in grado di esprimere i valori e l'essenza-legame con il territorio; un modo agricolo che non sfrutta e depauperava l'ambiente, ma che anzi lo salvaguarda con percorsi di rigenerazione; un'agricoltura causa ed effetto della crescita sociale, sia sul fronte produttivo e lavorativo, sia sotto il profilo del consumo e di espressione culturale, sociale e identitaria del territorio.

Nell'interrogarsi quindi sul possibile ruolo dell'agricoltura e sulla sua evoluzione in tal senso, si è voluto far emergere come sia fondamentale a tal proposito adottare un approccio e una visione sistemica, in quanto, come rilevato in pressoché tutta la trattazione, si osservano percorsi caratterizzati da equilibri che mettono in forte relazione e correlazione tra loro agricoltura, territorio, società, cultura e conoscenze e tecnologie disponibili.

Proprio per questo motivo, proponendo considerazioni e riflessioni a cavallo tra lo stato attuale del mondo agricolo e una visione con obiettivi e traiettorie auspicabili, il primo capitolo ha affrontato le diverse 'dimensioni' dell'agricoltura, evidenziando tra le diverse questioni fondamentali: le criticità ambientali connesse al sovrasfruttamento delle risorse (suolo e acqua in primis); l'elevato impiego di energia (sotto forma di input chimici, macchinari, carburante, etc.) che espone il settore agli *shock* derivanti dalle sue fluttuazioni di prezzo; gli squilibri (non solo economici e di potere di mercato) interni alla filiera; le ingenti perdite e gli sprechi dovuti a inefficienze di filiera o a comportamenti errati degli attori coinvolti e logiche dominanti che tendono a premiare il peso del prodotto agricolo, anziché la sua qualità e il suo contributo nutritivo (fenomeno che riguarda in particolar modo le *commodity*, anche se è in crescita la porzione di consumatori disposta a riconoscere il maggior valore degli alimenti in virtù dei loro attributi legati a sicurezza e proprietà organolettiche).

Ciò ha posto le basi per interrogarsi sul come, ovvero su quali possano essere i modelli e gli 'strumenti' utili ad affrontare nel modo più sistemico possibile tali questioni, individuando appunto due fronti principali: l'adozione di tecniche agricole

realmente sostenibili e l'introduzione di innovazioni tecnologiche, capaci di supportare l'adozione di tali modelli e di renderli più efficienti e redditizi per gli agricoltori, anche in un'ottica di coniugazione tra transizione ecologica e digitale.

Rimandando ai capitoli inerenti (vedi capitoli 2 e capitolo 3) per considerazioni e osservazioni più approfondite, ai fini della fase conclusiva della presente trattazione, si ritiene opportuno porre l'attenzione in modo particolare su alcuni aspetti.

Nello specifico, per quanto riguarda l'implementazione di tecniche agricole, che si presentano come alternative all'agricoltura convenzionale (vedi capitolo 2), si ritiene in primo luogo interessante osservare come i diversi metodi considerati possono essere suddivisi in due grandi categorie:

- una a trazione tecnologica (agricoltura di precisione, coltivazione indoor e verticale), che non sempre unisce produzione agricola e sostenibilità ambientale in modo diretto, ma si focalizza in genere sulla maggiore efficienza produttiva così ottenibile, che dovrebbe liberare risorse e territori da destinare alla produzione di servizi ecosistemici;
- l'altra a matrice agro-ecologica (agricoltura biologica, agricoltura rigenerativa e aridocoltura) che si pone l'obiettivo di integrare la produzione alimentare e quella di servizi ecosistemici, anche in virtù della maggiore produttività ottenibile dagli ecosistemi in salute in condizioni ambientali critiche. La tutela del territorio che ne consegue, oltre a garantire una maggiore solidità al settore agricolo, contribuisce inoltre a mantenerne il valore culturale e turistico, con risvolti positivi per l'intera comunità (es. minore contatto con sostanze pericolose per la salute, maggiore valore estetico del paesaggio) e per le aziende agricole multifunzionali che includono attività connesse all'agriturismo.

Tale categorizzazione può offrire indicazioni utili nella definizione del percorso evolutivo in campo agricolo più utile in relazione agli obiettivi che ci si pone.

In secondo luogo, interrogandosi su come effettivamente le tecniche agricole trattate possano essere funzionali al percorso evolutivo del mondo agricolo, si ritiene utile, seppur brevemente, richiamare e porre l'attenzione su alcune specificità e potenzialità di ognuna:

- Agricoltura di precisione: attraverso l'utilizzo di sensori consente di comprendere le caratteristiche e le reali esigenze di suolo e colture, con la conseguente possibilità di adottare operazioni ad elevata variabilità e flessibilità (personalizzazione di lavorazione), minimizzando gli input utilizzati e migliorando la capacità di gestire le peculiarità locali, nonché le specificità di ogni singolo terreno;
- Coltivazione indoor e verticale: offre potenzialmente la possibilità di coltivare ovunque, riducendo sia i costi (economici e ambientali) connessi ai trasporti sia gli effetti del clima sulle rese. La possibilità di rendere verticali le colture riduce inoltre la superficie che è necessaria dedicare all'agricoltura, aumentando verosimilmente le aree che è possibile destinare ad aree verdi;
- Agricoltura biologica: ha alla sua base un mercato in forte crescita, tale da essere causa ed effetto di quelle che sono le principali opportunità per il suo futuro legate sia all'integrazione delle nuove tecnologie (che consentono ad esempio la gestione automatizzata di policolture e consociazioni), sia alla sua evoluzione verso l'agricoltura rigenerativa;
- Agricoltura rigenerativa: fa leva sulla necessità, da un lato, di effettuare rotazioni idonee a mantenere l'equilibrio dei nutrienti nel suolo e, dall'altro, di tenere coperto il suolo, usando colture di copertura. Questo approccio ha inoltre condotto alla sperimentazione di modelli e strumenti quali le colture perenni (in cui il suolo non rimane nudo dopo la raccolta e il profondo apparato radicale delle piante migliora la struttura del suolo e la loro capacità di assorbire acqua e nutrienti in profondità), gli *effective microorganisms* (come quelli utilizzati da Meracinqe per la difesa del riso, vedi capitolo 4) e l'agroforestazione (integrazione di colture arboree e erbacee in un unico sistema produttivo);
- Aridocoltura: include diverse pratiche volte a migliorare la capacità del suolo di trattenere acqua, utilizza piante in grado di raggiungere le riserve idriche in profondità, fa leva su varietà arido-resistenti. Talvolta integra anche principi provenienti dall'agricoltura rigenerativa, consentendo il recupero di aree che presentano un avanzato stato di desertificazione.

In relazione al fronte più tecnologico e alle possibili innovazioni implementabili per incrementare lo sviluppo e la sostenibilità del settore agricolo (vedi capitolo 3), si osserva come l'utilizzo di tecnologie emergenti (quale ad esempio l'*Internet of Things*, l'intelligenza artificiale, la *blockchain* e la robotica) possa contribuire in modo potenzialmente significativo a rendere l'agricoltura più efficiente, trasparente e rispettosa dell'ambiente.

Ancora una volta, affinché ciò accada è tuttavia fondamentale che il suo sviluppo avvenga tenendo presente che l'innovazione tecnologica non deve essere fine a sé stessa, ma focalizzarsi sulla risoluzione dei problemi in ottica integrata e sistemica. È dunque fondamentale che le tecnologie introdotte all'interno del settore non siano pensate solo per rendere più efficiente e redditizia l'agricoltura convenzionale, ma per supportare l'adozione di modelli alternativi. I sistemi di automazione e gli algoritmi di intelligenza artificiale devono quindi essere sfruttati per aumentare la capacità di gestire la complessità, creando dei sistemi agricoli più vari e resilienti (si veda ad esempio Pixelfarming Robotics per la gestione automatizzata su larga scala delle policolture, capitolo 4) e le potenzialità di strumenti come la *blockchain* e gli *smart contract* devono essere guardate in ottica di disintermediazione dei rapporti di filiera e redistribuzione del valore al loro interno.

Anche con riferimento al fronte tecnologico, interrogandosi su come effettivamente le diverse innovazioni tecnologiche considerate possano essere funzionali allo sviluppo e all'evoluzione del comparto agricolo, si ritiene interessante richiamare e porre l'attenzione su alcune specificità e potenzialità di ognuna:

- Automazione e robotica: tra i benefici più rilevanti, può consentire l'utilizzo in campo di macchinari più flessibili e meno pesanti, che sono in grado di compiere molteplici azioni su colture diverse (grazie a carreggiata e altezza regolabili) e ridurre la compattazione del suolo. Il loro utilizzo apre inoltre a nuove possibilità come la semina precoce (il peso ridotto consente infatti il passaggio in campo anche quando il suolo è ancora relativamente umido) e la risemina localizzata nei casi in cui è necessaria;
- IoT: grazie all'integrazione di dati provenienti da diverse fonti (sensori, immagini satellitari, dati raccolti dai macchinari, etc.) consente di aumentare la conoscenza del sistema agricolo, andando più in profondità e comprendendo meglio le

relazioni tra i diversi elementi e fattori e quindi gli effetti delle proprie azioni. Si tratta di un aspetto imprescindibile, poiché conoscere gli effetti delle pratiche messe in atto sull'intero ecosistema consente di valutare l'effettivo grado di salute e sostenibilità del sistema, oltre che l'effettiva valenza delle pratiche stesse;

- **Intelligenza artificiale:** tra gli altri aspetti, offre la possibilità di osservare *trend* e *pattern* complessi, consentendo di migliorare la capacità di gestione, anche in presenza di molteplici variabili. Si tratta di un elemento che può e deve supportare le decisioni degli operatori, fornendo loro valutazioni e simulazioni basate sui dati raccolti, ma che in ogni caso non deve sostituire completamente la componente umana. Lo sviluppo degli algoritmi di *machine vision* è inoltre indispensabile affinché i robot e i macchinari possano operare autonomamente in un ambiente imprevedibile come quello naturale e gestire la variabilità che caratterizza le colture;
- **Blockchain:** considerate le sue molteplici potenzialità, molte delle quali ancora inesplorate, si tratta di andare oltre il suo utilizzo attuale, che riguarda per lo più la comunicazione al consumatore delle fasi della filiera per la tracciabilità e la trasparenza del processo produttivo. Grazie all'utilizzo degli *smart contract* è infatti possibile ad esempio sfruttare l'immutabilità delle informazioni contenute al suo interno, con tutti i benefici conseguenti in termini di: riduzione delle frodi riguardanti l'erogazione di fondi e sussidi e miglioramento della gestione delle transazioni tra attori della filiera, riducendo la necessità di ricorrere a intermediari, proponendo sul mercato assicurazioni parametriche che tutelino gli agricoltori dalle condizioni ambientali critiche, etc.

Emerge dunque come conoscere a fondo le criticità da affrontare, nonché i principi sulla base dei quali è necessario formulare delle soluzioni, sia indispensabile per indirizzare lo sviluppo delle nuove tecnologie, che devono basarsi sulla reale volontà di creare un sistema sostenibile in tutte le sue dimensioni. Se infatti i nuovi strumenti tecnologici vengono costruiti avendo in mente un modello agricolo inadeguato, che comporta la distruzione degli ecosistemi in cui si inserisce, risulterà impossibile superarne i limiti emersi e far realmente progredire il settore.

Anche sulla base delle riflessioni osservate (in merito a necessità di visione sistemica, unita a capacità di cogliere l'essenza e le specificità del contesto), a fronte dell'impossibilità di definire 'standard' di soluzione definitivi e universali, con la presente trattazione si è rilevato il ruolo cruciale di un percorso più orientato a indurre a conoscere a fondo il ventaglio di opzioni possibili: un approccio che conduca all'adozione di quelle scelte che più si adattano alle caratteristiche strutturali del terreno, agli obiettivi di chi lo coltiva e ai mezzi che ha a disposizione.

Tale approccio emerge anche da quanto osservato nel quarto capitolo, in cui si sono analizzati otto casi aziendali che stanno affrontando le criticità del settore ciascuna con i propri peculiari strumenti e metodi. Il loro lavoro dimostra che è possibile costruire dei sistemi agricoli capaci di integrarsi con il contesto in cui sono inseriti, di rispettarlo e renderlo migliore, talvolta con il supporto di tecnologie innovative, talvolta recuperando il sapere derivante dalla tradizione (più spesso con un mix delle due).

In un mondo in continua evoluzione, l'agricoltura deve abbracciare il cambiamento per sopravvivere e prosperare. La sostenibilità non è solo una necessità ambientale, ma anche una prospettiva economica e sociale fondamentale per il futuro del settore agricolo e della nostra società nel suo complesso.

Certamente, come osservato nei precedenti capitoli, molti sono i limiti e le condizioni che rendono critico tale percorso (la necessità di ingenti capitali per l'introduzione delle innovazioni; l'assenza di operatori con una formazione adeguata; la difficoltà di gestione e di adattamento nel momento in cui si modifica il modo di condurre le operazioni; il timore che la redditività dell'attività agricola diminuisca se ci si allontana dalle logiche convenzionali; i limiti tecnologici legati all'incipienza delle tecnologie e all'assenza di infrastrutture di supporto). Tali limiti possono tuttavia essere considerati delle variabili e traiettorie sulla base delle quali guidare l'evoluzione necessaria, verosimilmente anche attraverso lo sviluppo di nuove forme di imprenditorialità, una sempre maggiore attitudine a sperimentare, un incremento delle competenze (non solo agronomiche) negli attori del settore, per cogliere le opportunità che il contesto offre, anche grazie alla collaborazione con altri attori pubblici o privati.

# Bibliografia

Agostini Alessandro, Colauzzi Michele, Amaducci Stefano (2021) *“Innovative agrivoltaic systems to produce sustainable energy: An economic and environmental assessment”*, in Applied Energy, Vol. 281, No. 1, No. articolo 116102;

Ahuja Lajpat R., Ma Liwang, Fang Quanxiao, Saseendran S. Anapalli, Islam Adul, Malone Robert W. *“Computer Modeling: Applications to Environment and Food Security”*, in van Alfen Neal K. (a cura di) (2014) *“Encyclopedia of Agriculture and Food Systems”*, Vol. 3, Elsevier, Amsterdam, 1° ed.;

Ahumada Omar, Villalobos Rene J. (2019) *“Decision support models for fresh fruits and vegetables supply chain management”*, in Accorsi Riccardo, Manzini Riccardo (a cura di) (2019) *“Sustainable Food Supply Chains”*, Academic Press, Cambridge, 1° ed.;

Alahmad Samir, Rambla Charlotte, Voss-Fels Kai P., Hickey Lee T. (2022) *“Accelerating Breeding Cycles”*, in Reynolds Matthew P., Braun Hans-Joachim (a cura di) (2022) *“Wheat Improvement. Food Security in a Changing Climate”*, Springer, Cham, 1° ed.;

Allan John Anthony (2015) *“Water and Food Security: Food-water and Food Supply Value Chains”*, in Greco Francesca, Antonelli Marta (a cura di) (2015) *“The Water We Eat. Combining Virtual Water and Water Footprints”*, Springer, Cham, 1° ed.;

Ampim Peter A., Obeng Eric, Olvera-Gonzalez Ernesto (2022) *“Indoor Vegetable Production: An Alternative Approach to Increasing Cultivation”*, in Plants, Vol. 11, No. 21, No. articolo 2843;

Aramyan Lusine, Grainger Matthew, Logatcheva Katja, Piras Simone, Setti Marco, Stewart Gavin, Vittuari Matteo (2021) *“Food waste reduction in supply chains through innovations: a review”*, in Measuring Business Excellence, Vol. 25, No. 4, pp. 475-492;

Arbenz Markus, Gould David, Stopes Christopher (2016) *“Organic 3.0 – for truly sustainable farming and consumption”*, IFOAM Organics International, Bonn, 2° ed.;

Arrúe José Luis, Álvaro-Fuentes Jorge, Plaza-Bonilla Daniel, Villegas Dolors, Cantero-Martínez Carlos (2019) *“Managing Drylands for Sustainable Agriculture”*, in Farooq Muhammad, Pisante Michele (a cura di) (2019) *“Innovations in Sustainable Agriculture”*, Springer, Cham, 1° ed.;



Arya MS, Reshma UR, Syama S Thampi, Anaswara SJ, Karishma Sebastian (2019) *“Nutraceuticals in vegetables: New breeding approaches for nutrition, food and health: A review”*, in Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry, Vol. 8, No. 1, pp. 677-682;

Avgoustaki Dafni Despoina, Xydis George (2020) *“How energy innovation in indoor vertical farming can improve food security, sustainability, and food safety?”*, in Cohen Marc J. (a cura di) (2020) *“Advances in Food Security and Sustainability. Volume 5”*, Elsevier, Amsterdam, 1° ed.;

Barański Marcin, Średnicka-Tober Dominika, Volakakis Nikolaos, Seal Chris, Sanderson Roy, Stewart Gavin B., Benbrook Charles, Biavati Bruno, Markellou Emilia, Giotis Charilaos, Gromadzka-Ostrowska Joanna, Rembiałkowska Ewa, Skwarło-Sońta Krystyna, Tahvonon Raija, Janovská Dagmar, Niggli Urs, Nicot Philippe, Leifert Carlo (2014) *“Higher antioxidant and lower cadmium concentrations and lower incidence of pesticide residues in organically grown crops: a systematic literature review and meta-analyses”*, in British Journal of Nutrition, Vol. 112, No. 5, pp. 794–811;

Barilla Center for Food and Nutrition (2009) *“La dimensione culturale del cibo”*;

Baruffaldi Giulia, Accorsi Riccardo, Santi Daniele, Manzini Riccardo, Pilati Francesco (2019) *“The storage of perishable products: A decision-support tool to manage temperature-sensitive products warehouses”*, in Accorsi Riccardo, Manzini Riccardo (a cura di) (2019) *“Sustainable Food Supply Chains”*, Academic Press, Cambridge, 1° ed.;

Baumhardt R. Louis, Humberto Blanco-Canqui (2014) *“Soil: Conservation Practices”*, in van Alfen Neal K. (a cura di) (2014) *“Encyclopedia of Agriculture and Food Systems”*, Vol. 5, Elsevier, Amsterdam, 1° ed.;

Beach Robert H., Sulser Timothy B., Crimmins Allison, Genacchi Nicola, Cole Jefferson, Fukagawa Naomi K., Mason-D’Croz Daniel, Myers Samuel, Sarofim Marcus C., Smith Matthew, Ziska Lewis H. (2019) *“Combining the Effects of Increased Atmospheric Carbon Dioxide on Protein, Iron, and Zinc Availability and Projected Climate Change on Global Diets. A Modelling Study”*, in The Lancet Planetary Health, Vol. 3, No. 7, pp. e307-317;

Beacham Andrew M., Vickers Laura H., Monaghan James M. (2019) *“Vertical farming: a summary of approaches to growing skywards”*, in The Journal of Horticultural Science and Biotechnology, Vol. 94, No. 3, pp 277-283;

Bechar Avital, Vigneault Clément (2016) “*Agricultural robots for field operations: Concepts and components*”, in *Biosystems Engineering*, Vol. 149, No. 1, pp. 94–111;

Behdani Behzad, Fan Yuan, Bloemhof Jacqueline M. (2019) “*Cool chain and temperature-controlled transport: An overview of concepts, challenges, and technologies*”, in Accorsi Riccardo, Manzini Riccardo (a cura di) (2019) “*Sustainable Food Supply Chains*”, Academic Press, Cambridge, 1° ed.;

Bellini Mauro (2022) “*Blockchain: cos'è, come funziona e gli ambiti applicativi in Italia*”. Disponibile su: [www.blockchain4innovation.it/esperti/blockchain-perche-e-cosi-importante](http://www.blockchain4innovation.it/esperti/blockchain-perche-e-cosi-importante);

Bellon Maurel Véronique, Huyghe Christian (2017) “*Putting agricultural equipment and digital technologies at the cutting edge of agroecology*”, in *Oilseeds and fats, Crops and Lipids*, Vol. 24, No. 3, No. articolo D307;

Berti-Equille Laure, Raimundo Rafael L. G. (2022) “*Discovering Transition Pathways Towards Coviability with Machine Learning*”, atto di convegno in *Proceedings of the 1st AAAI 2022 Fall Symposium series on the Role of AI in Responding to Climate Challenges*, 17-19 novembre 2022, Arlington, USA;

Bertocco Matteo, Basso Bruno, Sartori Luigi, Martin Edward C. (2008) “*Evaluating energy efficiency of site-specific tillage in maize in NE Italy*”, in *Bioresource Technology*, Vol. 99, No. 15, pp. 6957–6965;

Bhat Rajeev, Jõudu Ivi (2019) “*Emerging issues and challenges in agri-food supply chain*”, in Accorsi Riccardo, Manzini Riccardo (a cura di) (2019) “*Sustainable Food Supply Chains*”, Academic Press, Cambridge, 1° ed.;

Bimonte Sandro, Belhassena Amina, Cariou Christophe, Laneurit Jean, Moussa Rim, Chalhoub Gerard, Wrembel Robert, Picard Gauthier, Bellatreche Ladjel, Journaux Alexandre, Heirman Thierry, Hassan Ali, Rizzi Stefano, Georgé Jean-Pierre (2021) “*On Designing and Implementing Agro-ecology IoT Applications: Issues from Applied Research Projects*”, atto di convegno in *IEEE 25th International Enterprise Distributed Object Computing Workshop (EDOCW)*, 25-29 ottobre 2021, Gold Coast, Australia, pp. 204-209;

Bindraban Prem S., van der Velde Marijn, Ye Liming, van den Berg Maurits, Materechera Simeon, Kiba Delwendé Innocent, Tamene Lulseged, Ragnarsdóttir Kristín Vala, Jongschaap Raymond, Hoogmoed Marianne, Hoogmoed Willem, van Beek Christy, van

- Lynden Godert (2012) *“Assessing the impact of soil degradation on food production”*, in *Current Opinion in Environmental Sustainability*, Vol. 4, No. 5, pp. 478–488;
- Bonfante Antonello, Basile Angelo, Bouma Johan (2020) *“Exploring the effect of varying soil organic matter contents on current and future moisture supply capacities of six Italian soils”*, in *Geoderma*, Vol. 361, No. articolo 114079;
- Bottoni Paolo, Gessa Nicola, Massa Gilda, Pareschi Remo, Selim Hesham, Arcuri Enrico (2020) *“Intelligent Smart Contracts for Innovative Supply Chain Management”*, in *Frontiers in Blockchain*, Vol. 3, No. articolo 535787;
- Brewster Christopher, Roussaki Ioanna, Kalatzis Nikos, Doolin Kevin, Ellis Keith (2017) *“IoT in Agriculture: Designing a Europe-Wide Large-Scale Pilot”*, in *IEEE Communications Magazine*, Vol. 55, No. 9, p. 26-33;
- Brunori Gianluca (2022) *“Agriculture and rural areas facing the “twin transition”: principles for a sustainable rural digitalisation”*, in *Italian Review of Agricultural Economics*, Vol. 77, No. 3, pp. 3-14;
- BS EN ISO (2005) *“ISO 22000: Food Safety management systems—requirements for any organization in the food chain”*, BSI, Londra;
- Bucci Giorgia, Bentivoglio Deborah, Belletti Matteo, Finco Adele (2019) *“When accuracy of measurements matter: economic profitability from precision agriculture”*, in 2019 IEEE International Workshop on Metrology for Agriculture and Forestry (MetroAgriFor), Portici, Italia, pp. 237-241;
- Bucci Giorgia, Bentivoglio Deborah, Belletti Matteo, Finco Adele (2020) *“Measuring the farm's profitability after the adoption of Precision Agriculture Technologies: A case study research from Italy”*, in *Acta IMEKO*, Vol. 9, No. 3, No. articolo 11;
- Bucci Giorgia, Bentivoglio Deborah, Finco Adele (2018) *“Precision agriculture as a driver for sustainable farming systems: state of art in literature and research”*, in *Quality - Access to Success*, Vol 19, pp. 114-121;
- Butturini Michele, Marcelis Leo F.M. (2020) *“Vertical farming in Europe: present status and outlook”*, in Kozai Toyoki, Niu Genhua, Takagaki Michiko (a cura di) (2020) *“Plant*

*Factory. An Indoor Vertical Farming System for Efficient Quality Food Production*, Academic Press, Cambridge, 2°ed.;

Campbell Bruce M., Beare Douglas J., Bennett Elena M., Hall-Spencer Jason M., Ingram John S. I., Jaramillo Fernando, Ortiz Rodomiro, Ramankutty Navin, Sayer Jeffrey A., Shindell Drew (2017) *"Agriculture production as a major driver of the Earth system exceeding planetary boundaries"*, in Ecology and Society, Vol. 22, No. 4, No. articolo 8;

Capone Roberto, El Bilali Hamid, Debs Philipp, Cardone Gianluigi, Driouech Nouredin (2014) *"Food System Sustainability and Food Security: Connecting the Dots"*, in Journal of Food Security, Vol. 2, No. 1, pp. 13-22;

Caro-González Antonia, Serra Artur, Albalá Xabier, Borges Cruz E., Casado-Mansilla Diego, Colobrants Delgado Jordi, Iñigo Edurne Angosto, Millard Jeremy, Mugarra-Elorriaga Aitziber, Petrevska Nechkoska Renata (2023) *"The Three MuskEuteers. Pushing and Pursuing a "One for All, All for One" Triple Transition: Social, Green, and Digital"*, in Petrevska Nechkoska Renata, Manceski Gjorgji, Poels Geert (a cura di) (2023) *"Facilitation in Complexity"* Springer, Cham, 1° ed.;

Checchinato Francesca, Colapinto Cinzia, Finotto Vladi, Myshko Alena (2023) *"The role of innovative technologies in sustainability"*, in Annosi Maria Carmela, Appio Francesco, Brunetta Federica (a cura di) (2023) *"Sustainability in Agribusiness"*, Routledge, Londra, 1° ed.;

Chen Yud-Ren, Chao Kuanglin, Kim Moon S. (2002) *"Machine vision technology for agricultural applications"*, in Computers and Electronics in Agriculture, Vol. 36, No. 1, pp. 173-191;

Chiap Gianluca, Ranalli Jacopo, Bianchi Raffaele (2019) *"Blockchain. Tecnologia e applicazioni per il business"*, Ulrico Hoepli Editore, Milano, 1° ed.;

Chotte lean-Luc, Ben Kathra Nobil, Loireau Maud, Thibon Maxime (2016) *"Land degradation neutrality"*, in Moatti Jean-Paul, Thiébaud Stéphane (a cura di) (2016) *"The Mediterranean Region under Climate Change. A Scientific Update"*, AllEnvi IRD Éditions, Marsiglia, 1° ed.;

Coldiretti (2022) *"Clima: nell'anno più caldo triplicano i tropicali italiani"*, articolo su sito in: <https://www.coldiretti.it/consumi/clima-nellanno-piu-caldo-triplicano-i-tropicali-italiani>;

Colizzi Lucio, Caivano Danilo, Ardito Carmelo, Desolda Giuseppe, Castrignanò Annamaria, Matera Maristella, Khosla Raj, Moshou Dimitrios, Hou Kun-Mean, Pinet François, Chanet Jean-Pierre, Hui Gao, Shi Hongling (2020) *“Introduction to agricultural IoT”*, in Castrignanò Annamaria, Buttafuoco Gabriele, Khosla Raj, Mouazen Abdul M., Moshou Dimitrios, Naud Olivier (2020) *“Agricultural Internet of Things and Decision Support for Precision Smart Farming”*, Elsevier, Londra, 1° ed.;

Commissione Europea (2019) *“The European Green Deal”*, COM(2019) 640 final, Bruxelles;

Commissione Europea (2021) *“Una visione a lungo termine per le zone rurali dell’UE: verso zone rurali più forti, connesse, resilienti e prospere entro il 2040”*, COM(2021) 345 final, Bruxelles;

Commissione Europea (2022a) *“Analysis of links between CAP Reform and Green Deal”*, SWD(2020) 93 final, Bruxelles;

Commissione Europea (2022b) *“2022 Strategic Foresight Report. Twinning the green and digital transitions in the new geopolitical context”*, COM(2022) 289 final, Bruxelles;

Commissione Europea (2022c) *“Blockchain for climate action”*. Disponibile su: [www.digital-strategy.ec.europa.eu/en/policies/blockchain-climate-action](http://www.digital-strategy.ec.europa.eu/en/policies/blockchain-climate-action);

Cong Wen-Feng, Hoffland Ellis, Li Long, Six Johan, Sun Jian-Hao, Bao Xing-Guo, Zhang Fu-Suo, van der Werf Wopke (2015) *“Intercropping enhances soil carbon and nitrogen”* in *Global Change Biology*, Vol. 21, No. 4, pp. 1715–1726;

Connor David J., Mínguez M. Inéz (2012) *“Evolution not revolution of farming systems will best feed and green the world”*, in *Global Food Security*, Vol. 1, No. 2, pp. 106–113;

Cortignani Raffaele, Dell’Unto Davide, Dono Gabriele (2021) *“Paths of adaptation to climate change in major Italian agricultural areas: Effectiveness and limits in supporting the profitability of farms”*, in *Agricultural Water Management*, Vol. 244, No. articolo 106433;

Costa Carla, García-Lestón Julia, Costa Solange, Coelho Patrícia, Silva Susana, Pingarilho Marta, Valdiglesias Vanessa, Mattei Francesca, Dall’Armi Valentina, Bonassi Stefano, Laffon Blanca, Snawder John, Teixeira João Paulo (2014) *“Is organic farming safer to*

*farmers' health? A comparison between organic and traditional farming*", in Toxicology Letters, Vol. 230, No. 2, pp. 166-176;

Costantini Edoardo A. C., Lorenzetti Romina (2013) "*Soil degradation processes in the Italian agricultural and forest ecosystems*", in Italian Journal of Agronomy, Vol. 8, No. 28, pp. 233-243;

Costes Evelyne, Khadari Bouchaib, Zaher Hayat, Moukhli Abdelmajid, Morillon Raphaël, Legave Jean-Michel, Regnard Jean-Luc (2016) "*Adaptation of Mediterranean fruit tree cultivation to climate change*", in Moatti Jean-Paul, Thiébault Stéphane (a cura di) (2016) "*The Mediterranean Region under Climate Change. A Scientific Update*", AllEnvi IRD Éditions, Marsiglia, 1° ed.;

CREA (2021) "*Annuario dell'agricoltura italiana 2020*", Roma, 74° ed.;

CREA (2022) "*Annuario dell'agricoltura italiana 2021*", Roma, 75° ed.;

Crescimanno G., Marcum K. B., Reina C., Versaci A. (2009) "*Investigating soil-plant relationships for sustainable management of irrigation with saline water in a Sicilian vineyard*", 5th International Conference on Sustainable Water Resources Management, Halkadiki, Grecia;

D'Odorico Paolo, Bhattachan Abinash, Davis Kyle F., Ravi Sujith, Runyan Christiane W. (2013) "*Global desertification: Drivers and feedbacks*", in Advances in Water Resources, Vol. 51, No. 1, p. 326-244;

D'Odorico Paolo, Carr Joel A., Laio Francesco, Ridolfi Luca, Vandoni Stefano (2014) "*Feeding humanity through global food trade*", in Earth's Future, Vol. 2, No. 9, pp. 421-469;

D'Odorico Paolo, Davis Kyle Frankel, Rosa Lorenzo, Carr Joel A., Chiarelli Davide, Dell'Angelo Jampel, Gephart Jessica, MacDonald Graham K., Seekell David A., Suweis Samir, Rulli Maria Cristina (2018) "*The global food-energy-water nexus*", in Review of Geophysics, Vol. 56, No. 3, pp. 456-531;

Damalas Christos A., Koutroubas Spyridon D. (2016) "*Farmers' Exposure to Pesticides: Toxicity Types and Ways of Prevention*", in Toxics, Vol. 4, No. 1, articolo No. 1;

Decreto legge 14 dicembre 2018, n. 135 “*Disposizioni urgenti in materia di sostegno e semplificazione per le imprese e per la pubblica amministrazione*”. Disponibile su:

[www.gazzettaufficiale.it/eli/id/2018/12/14/18G00163/sg](http://www.gazzettaufficiale.it/eli/id/2018/12/14/18G00163/sg);

DeHaan Lee R., Ismail Baraem P. (2017) “*Perennial cereals provide ecosystem benefits*”, in *Cereal Foods World*, Vol. 62, No. 6, pp. 278–281;

Dhananjayan Venugopal, Ravichandran Beerappa (2018) “*Occupational health risk of farmers exposed to pesticides in agricultural activities*”, in *Environmental Science & Health*, Vol. 4, No. 1, pp. 31-37;

Di Francia Girolamo, Cupo Paolo (2023) “*A Cost–Benefit Analysis for Utility-Scale Agrivoltaic Implementation in Italy*”, in *Energies*, Vol. 16, No. 7, No. articolo 2991;

Ditzler Lenora, Driessen Clemens (2022) “*Automating Agroecology: How to Design a Farming Robot Without a Monocultural Mindset?*”, in *Journal of Agricultural and Environmental Ethics*, Vol. 35, No. 1, No. articolo 2;

Dou Haijie, Genhua Niu (2020) “*Plant responses to light*”, in Kozai Toyoki, Niu Genhua, Takagaki Michiko (a cura di) (2020) “*Plant Factory. An Indoor Vertical Farming System for Efficient Quality Food Production*”, Academic Press, Cambridge, 2° ed.;

Doukas Yannis E. L., Maravegias Napoleon, Chrysomallidis Charalampos (2022) “*Digitalization in the EU Agricultural Sector: Seeking a European Policy Response*”, in Mattas Konstadinos, Baourakis George, Zopounidis Constantin, Staboulis Christos (a cura di) (2022) “*Food Policy Modelling. Responses to Current Issues*”, Springer, Cham, 1° ed.;

Duponnois Robin, Ouahmane Lahcen, Hafidi Mohamed, Prin Yves (2016) “*Rethinking the management of mycorrhizal soil infectivity to restore Mediterranean and tropical forest ecosystems*”, in Moatti Jean-Paul, Thiébaud Stéphane (a cura di) (2016) “*The Mediterranean Region under Climate Change. A Scientific Update*”, AllEnvi IRD Éditions, Marsiglia, 1° ed.;

Edan Yael, Adamides George, Oberti Roberto (2023) “*Agriculture Automation*”, in Nof Shimon Y. (a cura di) “*Springer Handbook of Automation*”, Springer, Cham, 2° ed.;

EIT Food (2020) “*Can Regenerative Agriculture Replace Conventional Farming?*”, articolo su sito in: [www.eitfood.eu/blog/can-regenerative-agriculture-replace-conventional-farming?](http://www.eitfood.eu/blog/can-regenerative-agriculture-replace-conventional-farming?);

EIT Food (2021) *“Be inspired! Consumers can help to transform our agrifood sectors”*, articolo su sito in: [www.eitfood.eu/news/consumers-can-transform-our-agrifood-sectors](http://www.eitfood.eu/news/consumers-can-transform-our-agrifood-sectors);

Eli-Chukwu Ngozi Clara (2019) *“Applications of Artificial Intelligence in Agriculture: A Review”*, in Engineering, Technology & Applied Science Research, Vol. 9, No. 4, pp. 4377–4383;

Elijah Olakunle, Rahman Tharek Abdul, Orikumhi Igbafe, Leow Chee Yen, Hindia MHD Nour (2018) *“An Overview of Internet of Things (IoT) and Data Analytics in Agriculture: Benefits and Challenges”*, in IEEE Internet of Things Journal, Vol. 5, No. 5, pp. 3758-3773;

FAO (1981) *“Food loss prevention in perishable crops”*, FAO Agricultural Service Bulletin, No. 43, FAO Statistics Division;

FAO (Food and Agriculture Organization) (1996) *“Rome declaration on world food security”*. Disponibile su: [www.fao.org/3/w3613e/w3613e00.htm](http://www.fao.org/3/w3613e/w3613e00.htm);

FAO (2011) *“Global Food Losses and Food Waste: Extent, Causes and Prevention”*. Disponibile su: [www.fao.org/docrep/014/mb060e/mb060e00.pdf](http://www.fao.org/docrep/014/mb060e/mb060e00.pdf);

FAO (2014) *“Definitional Framework of Food Loss”*. Disponibile su: [www.fao.org/fileadmin/user\\_upload/save-food/PDF/FLW\\_Definition\\_and\\_Scope\\_2014.pdf](http://www.fao.org/fileadmin/user_upload/save-food/PDF/FLW_Definition_and_Scope_2014.pdf);

FAO, ITPS (Intergovernmental Technical Panel on Soils) (2015) *“Status of the World’s Soil Resources (SWSR) – Main Report”*, Food and Agriculture Organization of the United Nations and Intergovernmental Technical Panel on Soils, Roma;

Fenner Kathrin, Canonica Silvio, Wackett Lawrence P., Elsner Martin (2013) *“Evaluating Pesticide Degradation in the Environment: Blind Spots and Emerging Opportunities”*, in Science, Vol. 341, No. 6147, pp. 752-578;

Ferri Christian (2020) *“Blockchain & Made in Italy. Istruzioni per l'uso”*, Mondadori Electa, Milano, 1° ed.;

Fouda Hazem Shawky (2021) *“Automation and Robotics in Agriculture”*, Delve Publishing, Burlington, 1° ed.;

FUSIONS (2014) *“FUSIONS Definitional Framework for Food Waste”*, Bruxelles, 1° ed.;

FUSIONS (2016) *“Estimates of European food waste levels”*, Bruxelles, 1° ed.;



Gaume Eric, Borga Marco, Llasat Maria Carmen, Maouche Said, Lang Michel, Diakakis Michalis (2016) *“Mediterranean extreme floods and flash floods”*, in Moatti Jean-Paul, Thiébaud Stéphane (a cura di) (2016) *“The Mediterranean Region under Climate Change. A Scientific Update”*, AllEnvi IRD Éditions, Marsiglia, 1° ed.;

Giampieri Francesca, Mazzoni Luca, Cianciosi Danila, Alvarez-Suarez José M., Regolo Lucia, Sánchez-González Cristina, Capocasa Franco, Xiao Jianbo, Mezzetti Bruno, Battino Maurizio (2022) *“Organic vs conventional plant-based foods: A review”*, in Food Chemistry, Vol. 383, No. articolo 132352;

Giller Ken E., Hijbeek Renske, Andersson Jens A., Sumberg James (2021) *“Regenerative Agriculture: An agronomic perspective”*, in Outlook on Agriculture, Vol. 50, No. 1, pp. 13–25;

Glover Jerry D., Reganold John P., Bell Lindsay W., Borevitz Justin, Brummer E. Charles, Buckler Edward S., Cox C.M., Cox T. Stan, Crews Tim E., Culman Steve W., DeHaan Lee R., (2010) *“Increased food and ecosystem security via perennial grains”*, in Science, Vol. 328, No. 5986, pp. 1638–1639;

Gomiero Tiziano (2016) *“Soil Degradation, Land Scarcity and Food Security: Reviewing a Complex Challenge”*, in Sustainability, Vol. 8, No. 3, No. articolo 281, pp. 1-41;

Gomiero Tiziano (2018) *“Food quality assessment in organic vs. conventional agricultural produce: Findings and issues”*, in Applied Soil Ecology, Vol. 123, pp. 714-728;

Gomiero Tiziano (2019) *“Soil and crop management to save food and enhance food security”*, in Galanakis Charis M. (2019) *“Saving Food. Production, Supply Chain, Food Waste, and Food Consumption”*, Academic Press, Cambridge, 1° ed.;

Gomiero Tiziano, Pimentel David, Paoletti Maurizio G. (2011) *“Environmental Impact of Different Agricultural Management Practices: Conventional vs. Organic Agriculture”*, in Critical Reviews in Plant Sciences, Vol. 30, No. 1-2, pp. 95-124;

Gordon Ethan, Davila Federico, Riedy Chris (2022) *“Transforming landscapes and mindscapes through regenerative agriculture”*, in Agriculture and Human Values, Vol. 39, No. 2, pp. 809–826;

Gosciu Alessio, Brunetta Federica, Annosi Maria Carmela (2020) *“Artificial Intelligence. Toward a new economic paradigm in agri-food”*, in Annosi Maria Carmela, Brunetta Federica (2020) *“How is Digitalization Affecting Agri-food?”*, Routledge, Abingdon, 1° ed.;

Grassini Patricio, Eskridge Kent M., Cassman Kenneth G. (2012) *“Distinguishing between yield advances and yield plateaus in historical crop production trends”*, in Nature Communication, Vol. 4, No. articolo 2918;

Greco Francesca, Antonelli Marta (2015) *“Not All Drops of Water Are the Same”*, in Greco Francesca, Antonelli Marta (a cura di) (2015) *“The Water We Eat. Combining Virtual Water and Water Footprints”*, Springer, Cham, 1° ed.;

Grieve Bruce Donaldson, Duckett Tom, Collison Martin, Boyd Lesley, West Jon, Yin Hujun, Arvin Farshad, Pearson Simon (2019) *“The challenges posed by global broadacre crops in delivering smart agri-robotic solutions: A fundamental rethink is required”*, in Global Food Security, Vol. 23, No. 1, pp. 116-124;

Gunderson Michael A., Boehlje Michael D., Neves Marcos Fava, Sonka Steven T. (2014) *“Agribusiness Organization and Management”*, in van Alfen Neal K. (a cura di) (2014) *“Encyclopedia of Agriculture and Food Systems”*, Elsevier, Amsterdam, 1° ed.;

Haber Stuart, Stornetta W. Scott (1991) *“How to time-stamp a digital document”*, in Journal of Cryptology, Vol. 3, No. 2, pp. 99-111;

Hansen Zeynep K., Libecap Gary D. (2004) *“Small Farms, Externalities, and the Dust Bowl of the 1930s”*, in Journal of Political Economy, Vol. 112, No. 3, pp. 665-694;

Havas Karyn A., Watts C. A. (2014) *“Food Chain: Farm to Market”*, in van Alfen Neal K. (a cura di) (2014) *“Encyclopedia of Agriculture and Food Systems”*, Elsevier, Amsterdam, 1° ed.;

Hedley Carolyn, Knox Jerry, Raine Steve, Smith Rod (2014) *“Water: Advanced Irrigation Technologies”*, in van Alfen Neal K. (a cura di) (2014) *“Encyclopedia of Agriculture and Food Systems”*, Vol. 5, Elsevier, Amsterdam, 1° ed.;

Henke Roberto, Cimino Orlando, Vanni Francesco (2022) *“The role of diversification in the revenue composition of Italian farms”*, in Italian Review of Agricultural Economics, Vol. 77, No. 1, pp. 25-38;

Hernandez-Escobedo Quetzalcoatl, Muñoz-Rodríguez David, Vargas-Casillas Alejandro, Juárez Lopez José Manuel, Aparicio-Martínez Pilar, Martínez-Jiménez María Pilar, Perea-Moreno Alberto-Jesus (2023) “*Renewable Energies in the Agricultural Sector: A Perspective Analysis of the Last Three Years*”, in *Energies*, Vol. 16, No. 1, No. articolo 345;

Huang Yanbo, Brown Molly E. (2019) “*Advancing to the Next Generation of Precision Agriculture*”, in Serraj Rachid, Pingali Prabhu (a cura di) (2019) “*Agriculture & Food Systems to 2050*”, World Scientific Publishing, Singapore, 1° ed.;

Iglesias Ana, Garrote Luis (2015) “*Adaptation strategies for agricultural water management under climate change in Europe*”, in *Agricultural Water Management*, Vol. 155, No. 1, pp. 113-124;

INEA (2014) “*L’agricoltura in Italia. Multifunzionalità, diversificazione e servizi*”. Disponibile all’indirizzo: [www.antaes.crea.gov.it:8080/documents/10179/227001/opuscolo\\_agr\\_multif.pdf](http://www.antaes.crea.gov.it:8080/documents/10179/227001/opuscolo_agr_multif.pdf);

International Organization for Standardization (ISO) (2018) “*ISO 22000. Food safety management systems — Requirements for any organization in the food chain*”, ISO copyright office, Geneva, 2° ed.;

Jagtap Santosh T., Phasinam Khongdet, Kassanuk Thanwamas, Jha Subhesh Saurabh, Ghosh Tanmay, Thakar Chetan M. (2022) “*Towards application of various machine learning techniques in agriculture*”, in *Materials Today: Proceedings*, Vol. 51, No. 1, pp. 793-797;

JRC (Joint Research Centre) (2011) “*The state of soil in Europe*”, Publication Office of the European Union, Lussemburgo;

JRC (Joint Research Centre) (2015) “*Energy use in the EU food sector: State of play and opportunities for improvement*”, Publication Office of the European Union, Lussemburgo;

Juniper Research (2019) “*Blockchain to Save the Food Industry \$31 Billion by 2024, Driven by IoT Partnerships*”. Disponibile su: [www.juniperresearch.com/press/blockchain-to-save-the-food-industry-31-billion?ch=blockchain%20food](http://www.juniperresearch.com/press/blockchain-to-save-the-food-industry-31-billion?ch=blockchain%20food);

Kahl Johannes, Baars Ton, Bügel Susanne, Busscher Nicolaas, Huber Machteld, Kusche Daniel, Rembiałkowska Ewa, Schmid Otto, Seidel Kathrin, Taupier-Letage Bruno, Velimirov Alberta, Załęcka Aneta (2012) “*Organic food quality: a framework for concept*,

*definition and evaluation from the European perspective*”, in Journal of the Science of Food and Agriculture, Vol. 92, No. 14, pp. 2760–2765;

Kaiser Natalie, Douches David, Dhingra Amit, Glenn Kevin C., Reed Herzig Philip, Stowe Evan C., Swarup Shilpa, (2020) “*The role of conventional plant breeding in ensuring safe levels of naturally occurring toxins in food crops*”, in Trends in Food Science & Technology, Vol. 100, pp. 51-66;

Karakotsios Achillefs, Katrakilidis Constantinos, Kroupis Nikolaos (2021) “*The dynamic linkages between food prices and oil prices. Does asymmetry matter?*”, in The Journal of Economic Asymmetries, Vol. 23, No. 1, No. articolo e00203;

Khatteli Houcine, Ramadan Ali Rafat, Bergametti Gilles, Bouet Christel, Hachicha Mohamed, Hamdi-Aissa Belhadi, Labiadh Mohamed, Montoroi Iean-Pierre, Podwojewski Pascal, Rajot Iean-Louis, Mohaamed Zaghoul Alaa, Valentin Christian (2016) “*Soils and desertification in the Mediterranean region*” in Moatti Jean-Paul, Thiébault Stéphane (a cura di) (2016) “*The Mediterranean Region under Climate Change. A Scientific Update*”, AllEnvi IRD Éditions, Marsiglia, 1° ed.;

Khoury Colin K., Brush Stephen, Costich Denise E., Curry Helen Anne, de Haan Stef, Engels Johannes M. M., Guarino Luigi, Hoban Sean, Mercer Kristin L., Miller Allison J., Nabhan Gary P., Perales Hugo R., Richards Chris, Riggins Chance, Thormann Imke (2021) “*Crop genetic erosion: understanding and responding to loss of crop diversity*”, in New Phytologist, Vol. 233, No. 1, pp. 84–118;

Kopittke Peter M., Menzies Neal W., Wang Peng, McKenna Brigid A., Lombi Enzo (2019) “*Soil and the intensification of agriculture for global food security*”, in Environment International, Vol. 132, No. 1, No. articolo 105078;

Kosior Katarzyna (2021) “*The importance of Blockchain technology in the development of agricultural insurance – a review of applications and solutions*”, in Ubezpieczenia w Rolnictwie – Materiały i Studia, Vol. 1, No. 75, p. 137–161;

Kozai Toyoki, Niu Genhua (2020) “*Role of the plant factory with artificial lighting (PFAL) in urban areas*”, in Kozai Toyoki, Niu Genhua, Takagaki Michiko (a cura di) (2020) “*Plant Factory. An Indoor Vertical Farming System for Efficient Quality Food Production*”, Academic Press, Cambridge, 2°ed.;

Kozai Toyoki, Niu Genhua, Takagaki Michiko (a cura di) (2020) *Plant Factory. An Indoor Vertical Farming System for Efficient Quality Food Production*, Academic Press, Cambridge, 2° ed.;

Kumar Pankaj, Shaunak Ishani, Verma Madan L. (2020) *Biotechnological application of health promising bioactive molecules*, in Verma Madan L. , Chandel Anuj K. (a cura di) (2020) *Biotechnological Production of Bioactive Compounds*, Elsevier, Amsterdam, 1° ed.;

Kurose James F., Ross Keith W. (2022) *Reti di calcolatori e Internet. Un approccio top-down*, Pearson Italia, Milano, 8° ed.;

Kutyauripo Innocent, Rushambwa Munyaradzi, Chiwazi Lyndah (2023) *Artificial intelligence applications in the agrifood sectors*, in Journal of Agriculture and Food Research, Vol. 11, No. 1, pp. 1-8;

LaCanne Claire E., Lundgren Jonathan G. (2018) *Regenerative agriculture: merging farming and natural resource conservation profitably*, in PeerJ, Vol. 6, No. articolo e4428, p. 1-12;

Lages Barbosa, G., Almeida Gadelha, F.D., Kublik, N., Proctor, A., Reichelm, L., Weissinger, E., Wohlleb, G.M., Halden, R.U. (2015) *Comparison of land, water, and energy requirements of lettuce grown using hydroponic vs. conventional agricultural methods*, in International journal of environmental research and public health, Vol. 12, No. 6, pp. 6879-6891;

Lal Rattan (1997) *Degradation and resilience of soils*, in Philosophical Transactions: Biological Sciences, Vol. 352, No. 1356, pp. 997–1010;

Lal Rattan (2015) *Restoring Soil Quality to Mitigate Soil Degradation*, in Sustainability, Vol. 7, No. 5, pp. 5875-5895;

Lal Rattan (2018) *Digging deeper: A holistic perspective of factors affecting soil organic carbon sequestration in agroecosystems*, in Global Change Biology, Vol. 24, No. 8, pp. 3285–3301;

Langridge Peter (2019) *Innovation in Breeding and Biotechnology*, in Serraj Rachid, Pingali Prabhu (a cura di) (2019) *Agriculture & Food Systems to 2050*, World Scientific Publishing, Singapore, 1° ed.;

Landon Kenneth C., Landon Jane P. (2022) *“Management Information System”*, Pearson Education, Harlow, 17° ed.;

Legge 9 marzo 2022 No. 23, *“Disposizioni per la tutela, lo sviluppo e la competitività della produzione agricola, agroalimentare e dell’acquacoltura con metodo biologico”*.

Disponibile su: [www.gazzettaufficiale.it/eli/id/2022/03/23/22G00031/sg](http://www.gazzettaufficiale.it/eli/id/2022/03/23/22G00031/sg);

Lovelli Stella (2019) *“Dryland Farming and the Agronomic Management of Crops in Arid Environments”*, in *Journal of Agronomy*, Vol. 18, No. 1, pp. 49-54;

Lowenberg-DeBoer James, Yuelu Huang Iona, Grigoriadis Vasileios, Blackmore Simon (2020) *“Economics of robots and automation in field crop production”*, in *Precision Agriculture* Vol. 20, No. 2, pp. 278-299;

Lubofsky Evan (2016) *“The promise of perennials: working through the challenges of perennial grain crop development”*, in *CSA News*, Vol. 61, No. 11, pp. 4-7;

Macdiarmid Jennie I., Whybrow Stephen (2019) *“Nutrition from a Climate Change Perspective”*, in *Proceedings of the Nutrition Society*, Vol. 78, No. 3, pp. 380-387;

Maffezzoli Federico, Ardolino Marco, Bacchetti Andrea, Perona Marco, Renga Filippo (2022), *“Agriculture 4.0: A systematic literature review on the paradigm, technologies and benefits”*, in *Futures*, Vol. 142, No. articolo 102998, pp. 1-15;

Magistrali Amelia, Cooper Julia, Franks Jeremy, George Dave, Standen James (2022) *“Identifying and Implementing Regenerative Agricultural Practices in Challenging Environments: Experiences of Farmers in the North of England”*, BBSRC Project Report No. PR640-09;

Mann Stefan (2018) *“Socioeconomics of Agriculture”*, Springer, Cham, 1° ed.;

Marti Alessandra, Rahardjo Citra P., Ismail Baraem (2019) *“Insights Into Perennial Crops as Potential Food Source”*, in Ferranti Pasquale, Berry Elliot M., Anderson Jock R. (a cura di) (2019) *“The encyclopedia of Food Security and Sustainability”*, Elsevier, Amsterdam, 1° ed.;

Martin-Guay Marc-Olivier, Paquette Alain Dupras Jérôme, Rivest David (2018) *“The new Green Revolution: Sustainable intensification of agriculture by intercropping”*, in *Science of the Total Environment*, Vol. 615, No. 1, pp. 767-772;

- Mastrorilli Marcello (a cura di) (2015) *“L’acqua in agricoltura Gestione sostenibile della pratica irrigua”*, Edagricole - Edizioni Agricole, Bologna, 1° ed.;
- McCarty Mark F., Dinicolantonio James J. (2014), *“Are organically grown foods safer and more healthful than conventionally grown foods?”*, in *British Journal of Nutrition*, Vol. 112, No. 10, pp. 1589 - 1591;
- Mendes Rodrigo, Garbeva Paolina, Raaijmakers Jos M. (2013) *“The rhizosphere microbiome: significance of plant beneficial, plant pathogenic, and human pathogenic microorganisms”*, in *FEMS Microbiology Reviews*, Vol. 37, No. 5, pp. 634–663;
- Meshram Vishal, Patil Kailas, Meshram Vidula, Hanchate Dinesh, Ramkteke S.D. (2021) *“Machine learning in agriculture domain: A state-of-art survey”*, in *Artificial Intelligence in the Life Sciences*, Vol. 1, No. 1, No. articolo 100010;
- Ministero delle politiche agricole alimentari e forestali (Mipaaf), Rete Rurale Nazionale (2022) *“Piano strategico della PAC 2023-2027. Documento di sintesi”*, 1° ed.;
- Mitchell Cary A., Sheibani Fatemeh (2020) *“LED advancements for plant-factory artificial lighting”*, in Kozai Toyoki, Niu Genhua, Takagaki Michiko (a cura di) (2020) *“Plant Factory. An Indoor Vertical Farming System for Efficient Quality Food Production”*, Academic Press, Cambridge, 2°ed.;
- Monbiot George (2022) *“Il futuro è sottoterra”*, Mondadori, Milano, 1° ed.;
- Montanari Massimo (2010) *“Il cibo come cultura”*, Editori Laterza, Bari, 4° ed.;
- Monteiro José, Barata João, Veloso Marco, Veloso Luís, Nunes João (2022) *“A scalable digital twin for vertical farming”*, in *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, pubblicato online l’1 agosto 2022;
- Moreno-Jiménez Eduardo, Orgiazzi Alberto, Jones Arwyn, Saiz Hugo, Aceña-Heras Sara, Plaza César (2021) *“Aridity and geochemical drivers of soil micronutrient and contaminant availability in European drylands”*, in *European Journal of Soil Science*, Vol. 73, No. 1, No. articolo e13163;
- Mosquera-Losada María Rosa, Rodríguez-Rigueiro Francico Javier, Santiago-Freijanes José Javier, Rigueiro-Rodríguez Antonio, Silva-Losada Pablo, Pantera Anastasia, Fernández-Lorenzo Juan Luis, González-Hernández María Pilar, Romero-Franco Rosa,

Aldrey-Vázquez José Antonio, Ferreiro-Domínguez Nuria (2022) “*European agroforestry policy promotion in arable Mediterranean areas*”, in *Land Use Policy*, Vol. 120, No. 1, No. articolo 106274;

Mountrakis Giorgos, Im Jungho, Ogole Caesar (2011) “*Support vector machines in remote sensing: A review*”, in *SPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 66, No. 3, pp. 247-259;

Moyer Jeff, Smith Andrew, Rui Yichao, Hayden Jennifer (2020) “*Regenerative Agriculture and the Soil Carbon Solution*”, Rodale Institute;

Muench Stefan, Stoermer Eckhard, Jensen Kathrine, Asikainen Tommi, Salvi Maurizio, Scapolo Fabiana (2022) “*Towards a green and digital future*”, Ufficio delle pubblicazioni dell'Unione europea, Lussemburgo;

Munafò Michele, Salvati Luca, Zitti Marco (2013) “*Estimating soil sealing rate at national level—Italy as a case study*”, in *Ecological Indicators*, Vol. 26, No. 1, pp. 137-140;

Muñoz Cristina, Hoffman Thomas, Escobar Nieves Medina, Ludemann Felix, Botella Miguel A., Valpuesta Victoriano, Schwab Wilfried (2010) “*The Strawberry Fruit Fra a Allergen Functions in Flavonoid Biosynthesis*”, in *Molecular Plant*, Vol. 3, No. 1, pp. 113-124;

Myers Samuel S., Zanobetti Antonella, Kloog Itai, Huybers Peter, Leakey Andrew D. B., Bloom Arnold J., Carlisle Eli, Dietterich Lee H., Fitzgerald Glenn, Hasegawa Toshihiro, Holbrook N. Michele, Nelson Randall L., Ottman Michael J., Raboy Victor, Sakai Hidemitsu, Sartor Karla A., Schwartz Joel, Seneweera Saman, Tausz Michael, Usui Yasuhiro (2014) “*Increasing CO<sub>2</sub> Threatens Human Nutrition*”, in *Nature*, Vol. 510, No. 7503, pp. 139-143;

Nair P. K. Ramachandran (2014) “*Agroforestry: Practices and Systems*”, in van Alfen Neal K. (a cura di) (2014) “*Encyclopedia of Agriculture and Food Systems*”, Elsevier, Amsterdam, 1° ed.;

Nakamoto Satoshi (2008) “*Bitcoin: A Peer-to-Peer Electronic Cash System*”. Disponibile su: [www.bitcoin.org/bitcoin.pdf](http://www.bitcoin.org/bitcoin.pdf);



Narayanan Arvind (2015) “*Private blockchain’ is just a confusing name for a shared database*”. Disponibile su:

[www.freedom-to-tinker.com/2015/09/18/private-blockchain-is-just-a-confusing-name-for-a-shared-database/](http://www.freedom-to-tinker.com/2015/09/18/private-blockchain-is-just-a-confusing-name-for-a-shared-database/);

Nassi o Di Nasso Nicoletta, Bosco Simona, Di Bene Claudia, Coli Antonio, Mazzoncini Marco, Bonari Enrico (2011) “*Energy efficiency in long-term Mediterranean cropping systems with different management intensities*”, in *Energy*, Vol. 36, No. 4, pp. 1924-1930;

National Research Council (2010) “*Toward Sustainable Agricultural Systems in the 21st Century*”, The National Academies Press, Washington DC, 1° ed.;

Nemali Krishna, Stephens Mike (2014) “*Plant Abiotic Stress: Water*”, in van Alfen Neal K. (a cura di) (2014) “*Encyclopedia of Agriculture and Food Systems*”, Vol. 4, Elsevier, Amsterdam, 1° ed.;

Nomisma (2020) “*L’industria alimentare italiana oltre il Covid-19. Competitività, impatti socio-economici, prospettive*”, EGEA, Milano, 1° ed.;

O’Shaughnessy Susan A., Rush Charles M., (2014) “*Precision Agriculture: Irrigation*”, in van Alfen Neal K. (a cura di) (2014) “*Encyclopedia of Agriculture and Food Systems*”, Elsevier, Amsterdam, 1° ed.;

OECD (2001) “*Environmental Indicators for Agriculture - Vol. 3: Methods and results*”, OECD Publications Service, Parigi;

Omara Peter, Aula Lawrence, Oyebiyi Fikayo, Raun William R. (2019) “*World Cereal Nitrogen Use Efficiency Trends: Review and Current Knowledge*”, in *Agrosystems, Geosciences & Environment*, Vol. 2, No. 1, No. articolo 180045;

Ortega-Gras Juan-José, Bueno-Delgado María-Victoria, Cañavate-Cruzado Gregorio, Garrido-Lova Josefina (2021) “*Twin Transition through the Implementation of Industry 4.0 Technologies: Desk-Research Analysis and Practical Use Cases in Europe*”, in *Sustainability*, Vol. 13, No. articolo 13601, pp. 1-18;

Osservatorio Blockchain & Distributed Ledger (2023) “*Blockchain e web3: time to build*”. Disponibile su:

[www.osservatori.net/it/prodotti/formato/infografiche/blockchain-web3-time-to-build-infografica](http://www.osservatori.net/it/prodotti/formato/infografiche/blockchain-web3-time-to-build-infografica);

Pagliai Marcello (2007) “*Changes of Pore System Following Soil Compaction*”, College of Soil Physics, 22 October - 9 November 2007;

Paris Pierluigi, Camilli Francesca, Rosati Adolfo, Mantino Alberto, Mezzalira Giustino, Dalla Valle Cristina, Franca Antonello, Seddaiu Giovanna, Pisanelli Andrea, Lauteri Marco, Brunori Antonio, Antonio Re Giovanni, Sanna Federico, Ragaglini Giorgio, Mele Marcello, Ferrario Viviana, Burgess Paul J. (2019) *“What is the future for agroforestry in Italy?”*, in *Agroforestry Systems*, Vol. 93, No. 6, pp. 2243–2256;

Parlamento Europeo (2020) *“Legge sui servizi digitali: adeguare le norme di diritto commerciale e civile per i soggetti commerciali che operano online”* Risoluzione del Parlamento Europeo n. 2020/2019(INL), 20 ottobre 2020. Gazzetta Ufficiale dell'Unione Europea;

Parmar Aditya (2019) *“Optimizing agricultural practices”*, in Galanakis Charis M. (2019) *“Saving Food. Production, Supply Chain, Food Waste, and Food Consumption”*, Academic Press, Cambridge, 1° ed.;

Parola Lorenzo, Merati Paola, Gavotti Giacomo (2018) *“Blockchain e smart contract: questioni giuridiche aperte”*, in *Contratti (I)*, Vol. 6, pp. 681-688;

Patel Keyur K., Patel Sunil M. (2016) *“Internet of Things-IOT: Definition, Characteristics, Architecture, Enabling Technologies, Application & Future Challenges”*, in *International Journal of Engineering Science and Computing*, Vol. 6, No. 5, pp. 6122-6131;

Paustian Keith (2014) *“Soil: Carbon Sequestration in Agricultural Systems”*, in van Alfen Neal K. (a cura di) (2014) *“Encyclopedia of Agriculture and Food Systems”*, Vol. 5, Elsevier, Amsterdam, 1° ed.;

Persson Linn, Carney Almroth Bethanie M., Collins Christopher D., Cornell Sarah, de Wit Cynthia A., Diamond Miriam L., Fantke Peter, Hassellöv Martin, MacLeod Matthew, Ryberg Morten W., Søgaaard Jørgensen Peter, Villarrubia-Gómez Patricia, Wang Zhanyun, Zwicky Hauschild Michael (2022) *“Outside the Safe Operating Space of the Planetary Boundary for Novel Entities”*, in *Environmental Science & Technology*, Vol. 56, No. 3, pp. 1510-1521;

Petropoulos Fotios e Carver Shawn (2019) *“Forecasting for Food Demand”*, in Accorsi Riccardo, Manzini Riccardo (a cura di) (2019) *“Sustainable Food Supply Chains”*, Academic Press, Cambridge, 1° ed.;

Pilati Luciano (2004) *“Marketing agro-alimentare”*, UNI Service, Trento, 1° ed.;

Quintarelli Valentina, Radicetti Emanuele, Allevato Enrica, Stazi Silvia Rita, Haider Ghulam, Abideen Zainul, Bibi Safia, Jamal Aftab, Mancinelli Roberto (2022) *“Cover Crops for Sustainable Cropping Systems: A Review”*, in *Agriculture*, Vol. 12, No. 12, No. articolo 2076;

Ramankutty Navin, Foley Jonathan A., Norman John, McSweeney, Kevin (2002) *“The global distribution of cultivable lands: current patterns and sensitivity to possible climate change”*, in *Global Ecology and Biogeography*, Vol. 11, No. 5, pp. 377-39;

Raseduzzaman Md, Jensen Erik Steen (2017) *“Does intercropping enhance yield stability in arable crop production? A meta-analysis”*, in *European Journal of Agronomy*, Vol. 91, No. 1, pp. 25-33;

Rempelos Leonidas, Baranski Marcin, Wang Juan, Adams Timothy N., Adebusuyi Kolawole, Beckman Jeremy J., Brockbank Charlotte J., Douglas Bradley S., Feng Tianer, Greenway Jem D., Gür Mehmet, Iyaremye Eric, Kong Chi Leong, Korkut Recep et al. (2021) *“Integrated Soil and Crop Management in Organic Agriculture: A Logical Framework to Ensure Food Quality and Human Health?”*, in *Agronomy*, Vol. 11, No. 12, No. articolo 2494;

Rempelos Leonidas, Kabourakis Emmanouil, Leifert Carlo (2023) *“Innovative Organic and Regenerative Agricultural Production”*, in *Agronomy*, Vol. 13, No. 5, No. articolo 1344;

Renga Filippo (2019) *“Blockchain nell’agrifood: grande opportunità... travestita da moda?”*. Disponibile su: [www.blog.osservatori.net/it\\_it/blockchain-agrifood-grande-opportunita](http://www.blog.osservatori.net/it_it/blockchain-agrifood-grande-opportunita);

Rockström Johan, Steffen Will, No one Kevin, Persson Åsa, Chapin F. Stuart III, Lambin Eric, Timothy M. Lenton, Scheffer Marten, Folke Carl, Schellnhuber Hans Joachim, Nykvist Björn, De Wit Cynthia A., Hughes Terry, van der Leeuw Sander, Rodhe Henning, Sörlin Sverker, Snyder Peter K., Costanza Robert, Svedin Uno, Falkenmark Malin, Karlberg Louise, Corell Robert W., Fabry Victoria J., Hansen James, Walker Brian, Liverman Diana, Richardson Katherine, Crutzen Paul, Foley Jonathan (2009) *“Planetary boundaries: exploring the safe operating space for humanity”*, in *Ecology and Society*, Vol. 14, No. 2, No. articolo 32;

Rodriguez Daniel, de Voil Peter, Power B. (2016) *“Modelling Dryland Agricultural Systems”*, in Farooq Muhammad, Siddique Kadambot H.M. (a cura di) (2016) *“Innovations in Dryland Agriculture”*, Springer, Cham, 1° ed.;

Rolandi Silvia, Brunori Gianluca, Bacco Manlio, Scotti Ivano (2021) *“The Digitalization of Agriculture and Rural Areas: Towards a Taxonomy of the Impacts”*, in Sustainability, Vol. 13, No. articolo 5172, pp. 1-16;

Romualdi Giulia (2020) *“Banane made in Sicilia, una scommessa vinta”*, articolo su sito in: [www.agronotizie.imagelinenetwork.com/agronomia/2020/01/28/banane-made-in-sicilia-una-scommessa-vinta/65616](http://www.agronotizie.imagelinenetwork.com/agronomia/2020/01/28/banane-made-in-sicilia-una-scommessa-vinta/65616);

Rose David Christian, Wheeler Rebecca, Winter Michael, Lobley Matt, Chivers Charlotte-Anne (2021) *“Agriculture 4.0: Making it work for people, production, and the planet”*, in Land Use Policy, vol. 100, No. articolo 104933, pp. 1-5;

Russell David (2019) *“Il suolo: un tesoro vivente sotto i nostri piedi”*, articolo su sito in: [www.eea.europa.eu/it/segnali/segnali-2019/articoli/intervista-2013-il-suolo-un#](http://www.eea.europa.eu/it/segnali/segnali-2019/articoli/intervista-2013-il-suolo-un#);

Sabbadini Silvia, Capocasa Franco, Battino Maurizio, Mazzoni Luca, Mezzetti Bruno (2021) *“Improved nutritional quality in fruit tree species through traditional and biotechnological approaches”*, in Trends in Food Science & Technology, Vol. 117, pp. 125-138;

Salvati Luca, Carlucci Margherita (2010) *“Estimating land degradation risk for agriculture in Italy using an indirect approach”* in Ecological Economics Vol. 69, No. 3, pp. 511-518;

Salvati Luca, Zitti Marco, Perini Luigi (2016) *“Fifty Years on: Long-Term Patterns of Land Sensitivity to Desertification in Italy”*, in Land Degradation & Development, Vol. 27, No. 2, pp. 97–107;

Samuel Arthur Lee (1959) *“Some studies in machine learning using the game of checkers”*, in IBM Journal of Research and Development, Vol. 3, No. 3, pp. 210–229;

Santini Monia, Rulli Maria Cristina (2015) *“Water Resources in Italy: The Present Situation and Future Trends”*, in Greco Francesca, Antonelli Marta (a cura di) (2015) *“The Water We Eat. Combining Virtual Water and Water Footprints”*, Springer, Cham, 1° ed.;

Sassi Maria (2010) *“Politiche di sicurezza alimentare”*, in Sodano Valeria, Sassi Maria, Marchini Andrea (a cura di) (2010) *“Economia agroalimentare: mercati e politiche”*, McGraw-Hill, Milano, 1° ed.;

Scozzafava Gabriele, Mauracher Christine, Gerini Francesca (2022) “*Sustainable Marketing and Consumers’ Food Preference*”, in *Sustainability*, Vol. 14, No. 14, No. articolo 8360;

Serafini Mauro, Toti Elisabetta (2016) “*Unsustainability of obesity: metabolic food waste*”, in *Frontiers in Nutrition*, Vol. 3, No. articolo 40, pp. 1–5;

Seufert Verena (2019) “*Comparing Yields: Organic Versus Conventional Agriculture*”, in Ferranti Pasquale, Berry Elliot M., Anderson Jock R. (a cura di) (2019) “*The encyclopedia of Food Security and Sustainability*”, Elsevier, Amsterdam, 1° ed.;

Seufert Verena, Ramankutty Navin, Foley Jonathan A. (2012) “*Comparing the yields of organic and conventional agriculture*”, in *Nature*, Vol. 485, No. 7397, pp. 229-232;

Sharma Abhinav, Jain Arpit, Gupta Prateek, Chowdary Vinay (2021) “*Machine Learning Applications for Precision Agriculture: A Comprehensive Review*”, in *IEEE Access*, Vol. 9, No. 1, pp. 4843-4873;

Sharma Reeba, Therthala Aravind, Sharma Roopali (2019) “*Sustainable agriculture: Trends and opportunities for 21st Century*”, in *Journal of Applied and Natural Science*, Vol. 11, No. 3, pp. 666-672;

Shrivastava Stuti, Marshall-Colon Amy (2019) “*Big Data in Agriculture and Their Analyses*”, in Ferranti Pasquale, Berry Elliot M., Anderson Jock R. (a cura di) (2019) “*The encyclopedia of Food Security and Sustainability*”, Elsevier, Amsterdam, 1° ed.;

Smith Pete, Davies Christian A., Ogle Stephen, Zanchi Giuliana, Bellarby Jessica, Bird Neil, Boddey Robert M., McNamara Niall P., Powlson David, Cowie Annette, van Noordwijk Meine, Davis Sarah C., Richter Daniel B., Kryzanowski Len, van Wijk Mark T., Stuart Judith, Kirton Akira, Eggar Duncan, Newton-Cross Geraldine, Adhya Tapan K., Braimoh Ademola K. (2012) “*Towards an integrated global framework to assess the impacts of land use and management change on soil carbon: current capability and future vision*”, in *Global Change Biology* Vol. 18, No. 7, pp. 2089–2101;

Spolidoro Giulia C. I., Tesfaye Amara Yohannes, Ali Mohamed Mustafa, Nyassi Sungkutu, Lisik Daniil, Ioannidou Athina, Rovner Graciela, Khaleva Ekaterina, Venter Carina, van Ree Ronald, Worm Margitta, Vlieg-Boerstra Berber, Sheikh Aziz, Muraro Antonella,

Roberts Graham, Nwaru Bright I. (2022) “*Frequency of food allergy in Europe: An updated systematic review and meta analysis*”, in *Allergy*, Vol. 78, No. 2, pp. 351-368;

Steffens Will, Richardson Katherine, Rockström Johan, Cornell Sarah E., Fetzer Ingo, Bennett Elena M., Biggs Reinette, Carpenter Stephen R., de Vries Wim, de Wit Cynthia A., Folke Carl, Gerten Dieter, Heineken Jens, Mace Georgina M., Persson Linn M., Ramanathan Veerabhadran, Reyers Belinda, Sörlin Sverker (2015) “*Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet*”, in *Science*, Vol. 347, No. 6223, No. articolo 1259855;

Stein Eric W. (2021) “*The Transformative Environmental Effects Large-Scale Indoor Farming May Have On Air, Water, and Soil*”, in *Air, Soil and Water Research*, Vol. 14, No. 1, pp. 1-8;

Stewart Bobby A.(2016) “*Dryland Farming*”, in Reference Module in Food Science, Elsevier, Amsterdam;

Stomph Tjeerd Jan, Dordas Christos, Baranger Alain, de Rijk Joshua, Dong Bei, Evers Jochem, Gu Chunfeng, Li Long, Simon Johan, Jensen Erik Steen, Wang Qi, Wang Yunyun, Wang Zishen, Xu Huasen, Zhang Chaochun, Zhang Lizhen, Zhang Wei-Ping, Bedoussac Laurent, van der Werf Wopke (2020) “*Designing intercroops for high yield, yield stability and efficient use of resources: Are there principles?*”, in *Advances in Agronomy*, Vol. 160, No. 1, pp. 1-50;

Subeesh A, Meh C. R. (2021) “*Automation and digitization of agriculture using artificial intelligence and internet of things*”, in *Artificial Intelligence in Agriculture*, Vol. 5, No. ?, pp. 278–291;

Szabo Nick (1994) “*Smart Contracts*”. Disponibile su:  
[www.fon.hum.uva.nl/rob/Courses/InformationInSpeech/CDROM/Literature/L.O.Twinterschool2006/szabo.best.vwh.net/smart.contracts.html](http://www.fon.hum.uva.nl/rob/Courses/InformationInSpeech/CDROM/Literature/L.O.Twinterschool2006/szabo.best.vwh.net/smart.contracts.html);

Tian Hongkun, Wang Tianhai, Liu Yadong, Qiao Xi, Li Yanzhou (2020) “*Computer vision technology in agricultural automation —A review*”, in *Information Processing in Agriculture*, Vol. 7, No. 1, pp. 1-19;

Toreti Andrea, Bassu Simona, Ceglar Andrej, Zampieri Matteo (2019) “*Climate Change and Crop Yields*” in Ferranti Pasquale, Berry Elliot, Anderson Jock (a cura di) (2019) “*The encyclopedia of Food Security and Sustainability*”, Vol. 1, Elsevier, Amsterdam, 1° ed.;

Toussaint Mariana, Cabanelas Pablo, González-Alvarado Tania E. (2021) *“What about the consumer choice? The influence of social sustainability on consumer’s purchasing behavior in the Food Value Chain”*, in European Research on Management and Business Economics, Vol. 27, No. 1, No. articolo 100134;

van Horen Lambert G. J. (2019) *“Vertical Farming in Netherlands”*, articolo su sito in: [www.service-studievereniging.nl/magazine/artikel/vertical-farming-in-nederland-voorlopig-nog-geen-mainstream/](http://www.service-studievereniging.nl/magazine/artikel/vertical-farming-in-nederland-voorlopig-nog-geen-mainstream/);

van Mil Harald G.J., Foegeding Edward Allen, Windhab Erich J., Perrot Nathalie, van der Linden E. (2014) *“A complex system approach to address world challenges in food and agriculture”*, in Trends in Food Science & Technology, Vol. 40, No. 1, pp. 20-32;

Veblen Thorstein B. [1899] (2009) *“The Theory of the Leisure Class”*, Oxford University Press, Oxford;

Vecchio Yari, Agnusdei Giulio Paolo, Miglietta Pier Paolo, Capitanio Fabian (2020) *“Adoption of precision farming tools: the case of italian farmers”*, in International Journal of Environmental Research and Public Health, 17(3), p. 869;

Vergara Walter, Rios Ana R., Trapido Paul, Malarín Hector (2014) *“Agriculture and future climate in Latin America and the Caribbean: Systemic impacts and potential responses”* Inter-American Development Bank report;

Vittuari Matteo, De Menna Fabio, Pagani Marco (2016) *“The Hidden Burden of Food Waste: The Double Energy Waste in Italy”*, in Energies, Vol. 9, No. 8, No. articolo 660;

Vittuari Matteo, De Menna Fabio, García-Herrero Laura, Pagani Marco, Brenes-Peralta Laura, Segrè Andrea (2019) *“Food systems sustainability: The complex challenge of food loss and waste”*, in Accorsi Riccardo, Manzini Riccardo (a cura di) (2019) *“Sustainable Food Supply Chains”*, Academic Press, Cambridge, 1° ed.;

Vogt Günter (2007) *“The origins of organic farming”*, in Lockeretz William (a cura di) *“Organic Farming: An International History”*, CAB International, Wallingford, 1° ed.;

Wachter Jonathan M., Reganold John P. (2014) *“Organic Agricultural Production: Plants”*, in van Alfen Neal K. (a cura di) (2014) *“Encyclopedia of Agriculture and Food Systems”*, Elsevier, Amsterdam, 1° ed.;

Wang Tianhai, Chen Bin, Zhang Zhenqian, Li Han, Zhang Man (2022) “*Applications of machine vision in agricultural robot navigation: A review*”, in *Computers and Electronics in Agriculture*, Vol. 198, No. 1, No. articolo 107085;

Wang-Erlandsson Lan, Tobian Arne, van der Ent Ruud J., Fetzer Ingo, te Wierik Sofie, Porkka Miina, Staal Arie, Jaramillo Fernando, Dahlmann Heindriken, Singh Chandrakant, Greve Peter, Gerten Dieter, Keys Patrick W., Gleeson Tom, Cornell Sarah E., Steffen Will, Bai Xuemei, Rockström Johan (2022) “*A planetary boundary for green water*”, in *Nature Reviews Earth and Environment*, Vol. 3, No. 6, pp. 380–392;

Weselek Axel, Bauerle Andrea, Hartung Jens, Zikeli Sabine, Lewandowski Iris, Högy Petra (2021) “*Agrivoltaic system impacts on microclimate and yield of different crops within an organic crop rotation in a temperate climate*”, in *Agronomy for Sustainable Development*, Vol. 41, No. 5, No. articolo 59;

Williams Stacey M., Weil Raymond R. (2004) “*Crop Cover Root Channels May Alleviate Soil Compaction Effects on Soybean Crop*”, in *Soil Science Society of America*, Vol. 68, No. 4, pp. 1403–1409;

Zachariah Annie Bobby (2019) “*Precision Agriculture: The Future of Farming*”, Delve Publishing, Oakville, 1° ed.;

Zampieri Matteo, Ceglar Andrej, Dentener Frank, Toreti Andrea (2017) “*Wheat yield loss attributable to heat waves, drought and water excess at the global, national and subnational scales*”, in *Environmental Research Letters*, Vol. 12, No. 6, No. articolo 064008;

Zhang Shilai, Huang Guangfu, Zhang Yujiao, Lv Xiutao, Wan Kejiang, Liang Jian, Feng Yupeng, Dao Jinrong, Wu Shukang, Zhang Lin, Yang Xu, Lian Xiaoping, Huang Liyu, Shao Lin, Zhang Jing, Qin Shiwen, Tao Dayun, Crews Timothy E., Sacks Erik J., Lyu Jun, Wade Len J., Hu Fengyi (2023) “*Sustained productivity and agronomic potential of perennial rice*”, in *Nature Sustainability*, Vol. 6, No. 1, pp. 28-38.



# Sitografia

[www.academy.bit2me.com](http://www.academy.bit2me.com)

[www.bitcoin.org](http://www.bitcoin.org)

[www.blockchain4innovation.it](http://www.blockchain4innovation.it)

[www.climate.ec.europa.eu](http://www.climate.ec.europa.eu)

[www.coldiretti.it](http://www.coldiretti.it)

[www.consilium.europa.eu/it/](http://www.consilium.europa.eu/it/)

[www.digital-strategy.ec.europa.eu](http://www.digital-strategy.ec.europa.eu)

[www.eea.europa.eu](http://www.eea.europa.eu)

[www.eitfood.eu](http://www.eitfood.eu)

[www.fao.org/faostat/en/](http://www.fao.org/faostat/en/)

[www.freedom-to-tinker.com](http://www.freedom-to-tinker.com)

[www.gazzettaufficiale.it](http://www.gazzettaufficiale.it)

[www.ifoam.bio](http://www.ifoam.bio)

[www.ispag.org](http://www.ispag.org)

[www.landinstitute.org](http://www.landinstitute.org)

[www.melinda.it](http://www.melinda.it)

[www.nestle.com](http://www.nestle.com)

[www.osservatori.net](http://www.osservatori.net)

[www.pinin-project.eu](http://www.pinin-project.eu)

[www.regenerative-agriculture.danone.com](http://www.regenerative-agriculture.danone.com)

[www.reterurale.it](http://www.reterurale.it)

[www.sdgs.un.org](http://www.sdgs.un.org)

[www.stockholmresilience.org](http://www.stockholmresilience.org)

[www.waterandfoodsecurity.org](http://www.waterandfoodsecurity.org)

## Riferimenti per i casi

R1: [www.veronawineandfood.it/sites/default/files/Informazioni/Files/23841/Meracinq%20-%20catalogo%20DIGITALE\\_compressed.pdf](http://www.veronawineandfood.it/sites/default/files/Informazioni/Files/23841/Meracinq%20-%20catalogo%20DIGITALE_compressed.pdf)

R2: [www.mediasetinfinity.mediaset.it/video/melaverde/puntata-dell11-novembre\\_F308750001002401](http://www.mediasetinfinity.mediaset.it/video/melaverde/puntata-dell11-novembre_F308750001002401)

R3: [www.macchinealimentari.it/2022/02/01/silvia-tovo-innovazione-per-un-riso-migliore/](http://www.macchinealimentari.it/2022/02/01/silvia-tovo-innovazione-per-un-riso-migliore/)

R4: [www.giornaleadige.it/meracinq-riso-verona-siccita/](http://www.giornaleadige.it/meracinq-riso-verona-siccita/)

R5: [www.facebook.com/meracinq](http://www.facebook.com/meracinq)

R6: [www.meracinq.com/pages/risocarnarolimicronaturale](http://www.meracinq.com/pages/risocarnarolimicronaturale)

R7: [www.youtube.com/watch?v=rHRwMrnLhPE](http://www.youtube.com/watch?v=rHRwMrnLhPE)

R8: [www.dicristiana.it](http://www.dicristiana.it)

R9: [www.facebook.com/dicristiana.risobio](http://www.facebook.com/dicristiana.risobio)

R10: [www.risoitaliano.eu/un-riso-fortunato-per-il-2023/#:~:text=Rubinum%2C%20il%20nuovo%20riso%20lungo,e%20ciclo%20vegetativo%20di%20stagione](http://www.risoitaliano.eu/un-riso-fortunato-per-il-2023/#:~:text=Rubinum%2C%20il%20nuovo%20riso%20lungo,e%20ciclo%20vegetativo%20di%20stagione)

R11: [www.portofelloni.com](http://www.portofelloni.com)

R12: [www.agriscienza.it/in-agricoltura-e-tutta-questione-di-precisione](http://www.agriscienza.it/in-agricoltura-e-tutta-questione-di-precisione)

R13: [www.smau.it/casi-di-successo/agricoltura-di-precisione-di-lunga-data](http://www.smau.it/casi-di-successo/agricoltura-di-precisione-di-lunga-data)

R14: [www.identitadigitali.identitagolose.it/video/luca-travaglini-enrico-e-roberto-cerea-un-incontro-dal-gusto-rivoluzionario/?fbclid=IwAR33xN6HjkkriyAkg\\_haS uwIMKWAZ-Y6K2EQv3i\\_2lCygIObxAvkVC37Hfg](http://www.identitadigitali.identitagolose.it/video/luca-travaglini-enrico-e-roberto-cerea-un-incontro-dal-gusto-rivoluzionario/?fbclid=IwAR33xN6HjkkriyAkg_haS uwIMKWAZ-Y6K2EQv3i_2lCygIObxAvkVC37Hfg)

R15: [www.youtu.be/UQDqChnOf7c?si=iUpSlw76dpkLihK6](http://www.youtu.be/UQDqChnOf7c?si=iUpSlw76dpkLihK6)

R16: [www.planetfarms.ag/it/](http://www.planetfarms.ag/it/)

R17: [www.agrifood.tech/digital-farming/siemens-al-fianco-di-planet-farms-dal-progetto-di-una-vertical-farm-italiana-a-una-storia-di-successo-internazionale/](http://www.agrifood.tech/digital-farming/siemens-al-fianco-di-planet-farms-dal-progetto-di-una-vertical-farm-italiana-a-una-storia-di-successo-internazionale/)

- R18: [www.agrifood.tech/digital-farming/la-vertical-farm-di-cirimido-apre-un-nuovo-capitolo-per-planet-farms](http://www.agrifood.tech/digital-farming/la-vertical-farm-di-cirimido-apre-un-nuovo-capitolo-per-planet-farms)
- R19: [www.agrifood.tech/digital-farming/siemens-al-fianco-di-planet-farms-dal-progetto-di-una-vertical-farm-italiana-a-una-storia-di-successo-internazionale/](http://www.agrifood.tech/digital-farming/siemens-al-fianco-di-planet-farms-dal-progetto-di-una-vertical-farm-italiana-a-una-storia-di-successo-internazionale/)
- R20: [www.fruitbookmagazine.it/planet-farms-a-cavenago-la-piu-grande-e-avanzata-vertical-farm-in-europa/](http://www.fruitbookmagazine.it/planet-farms-a-cavenago-la-piu-grande-e-avanzata-vertical-farm-in-europa/)
- R21: [www.cucchiaio.it/sostenibilita/planet-farms-e-insalata-verticale-come-si-coltiva-dove-si-compra-quanto-costa/](http://www.cucchiaio.it/sostenibilita/planet-farms-e-insalata-verticale-come-si-coltiva-dove-si-compra-quanto-costa/)
- R22: [www.youtube.com/watch?v=DaKKbyZjldo](http://www.youtube.com/watch?v=DaKKbyZjldo)
- R23: [www.noidonne.org/articoli/giorgia-pontetti-laimprenditrice-agricola-che-voleva-fare-la-astronauta-e-ci-quasi-riuscita.php](http://www.noidonne.org/articoli/giorgia-pontetti-laimprenditrice-agricola-che-voleva-fare-la-astronauta-e-ci-quasi-riuscita.php)
- R24: [www.youtube.com/watch?v=wz1ox9aPZI0](http://www.youtube.com/watch?v=wz1ox9aPZI0)
- R25: [www.youtube.com/watch?v=FXrPNVI6VLg](http://www.youtube.com/watch?v=FXrPNVI6VLg)
- R26: [www.ferrarifarm.com/files/BROCHURE\\_FERRARIFARM.pdf](http://www.ferrarifarm.com/files/BROCHURE_FERRARIFARM.pdf)
- R27: [www.youtube.com/watch?v=9Hpa3WoaCfk](http://www.youtube.com/watch?v=9Hpa3WoaCfk)
- R28: [www.confartigianato.it/giorgia-pontetti](http://www.confartigianato.it/giorgia-pontetti)
- R29: [www.facebook.com/PomodorodiAradeo/posts/pfbid0oiq2UuGiwody41SRt4kCLcz8RoyJMLKnrwQBemwbpURAJtgHWHgBAyGh62CfQ8pUI?locale=it\\_IT](http://www.facebook.com/PomodorodiAradeo/posts/pfbid0oiq2UuGiwody41SRt4kCLcz8RoyJMLKnrwQBemwbpURAJtgHWHgBAyGh62CfQ8pUI?locale=it_IT)
- R30: [www.dissapore.com/alimentazione/karadra-pomodoro-aradeo](http://www.dissapore.com/alimentazione/karadra-pomodoro-aradeo)
- R31: [www.italiachecambia.org/2016/09/karadra-aridocultura-rilancia-salento-unisce-generazioni](http://www.italiachecambia.org/2016/09/karadra-aridocultura-rilancia-salento-unisce-generazioni)
- R32: [www.gamberorosso.it/notizie/karadra-la-rinascita-del-pomodoro-di-aradeo-e-il-sogno-di-un-parco-agricolo-in-puglia](http://www.gamberorosso.it/notizie/karadra-la-rinascita-del-pomodoro-di-aradeo-e-il-sogno-di-un-parco-agricolo-in-puglia)
- R33: [www.retecontadina.it/storie/179-feeducia-di-antonio-segat-colle-umberto-tv-l-agricoltura-rigenerativa](http://www.retecontadina.it/storie/179-feeducia-di-antonio-segat-colle-umberto-tv-l-agricoltura-rigenerativa)
- R34: [www.feeduciaazagr.it](http://www.feeduciaazagr.it)
- R35: [www.facebook.com/Feeducia/](http://www.facebook.com/Feeducia/)

- R36: [www.pixelfarming.eu/the-movement/](http://www.pixelfarming.eu/the-movement/)
- R37: [www.pixelfarmingrobotics.com/](http://www.pixelfarmingrobotics.com/)
- R38: [www.youtube.com/watch?v=PqDn50vPVyY](https://www.youtube.com/watch?v=PqDn50vPVyY)
- R39: [www.ilnuovoagricoltore.it/70-quintali-ettaro-di-riso-carnaroli-meracinque-un-suc-cesso-la-semina-con-geosread-e-dosi-variabili/](http://www.ilnuovoagricoltore.it/70-quintali-ettaro-di-riso-carnaroli-meracinque-un-suc-cesso-la-semina-con-geosread-e-dosi-variabili/)
- R40: [www.myfruit.it/frutta-a-guscio-ed-essiccata/2022/11/frutta-in-guscio-nuovo-pro-getto-da-19-milioni.html](http://www.myfruit.it/frutta-a-guscio-ed-essiccata/2022/11/frutta-in-guscio-nuovo-pro-getto-da-19-milioni.html)
- R41: [www.agronotizie.imaginenetwork.com/agronomia/2021/04/30/noce-bio-la-sc-ommessa-del-delta-del-po/70245](http://www.agronotizie.imaginenetwork.com/agronomia/2021/04/30/noce-bio-la-sc-ommessa-del-delta-del-po/70245)
- R42: [www.trusty.id/post/meracinque-dal-campo-alla-tavola-con-trusty](http://www.trusty.id/post/meracinque-dal-campo-alla-tavola-con-trusty)
- R43: [www.golosini.substack.com/p/re-del-riso-carnaroli-meracinque](http://www.golosini.substack.com/p/re-del-riso-carnaroli-meracinque)
- R44: [www.trusty.id/post/riso-dicristiana-come-innovare-una-filiera-e-rafforzare-la-brand-identity-con-la-blockchain](http://www.trusty.id/post/riso-dicristiana-come-innovare-una-filiera-e-rafforzare-la-brand-identity-con-la-blockchain)
- R45: [www.terraevita.edagricole.it/nova/nova-irrigazione/tecnologie-interconnesse-per-irrigazione-digitale/](http://www.terraevita.edagricole.it/nova/nova-irrigazione/tecnologie-interconnesse-per-irrigazione-digitale/)
- R46: [www.internet4things.it/smart-building/iot-luci-sensori-e-analytics-per-la-vertical-farm-piu-grande-deuropa/](http://www.internet4things.it/smart-building/iot-luci-sensori-e-analytics-per-la-vertical-farm-piu-grande-deuropa/)
- R47: [www.dissapore.com/ristoranti/da-vittorio-inaugura-la-prima-vertical-farm-per-stellati-firmata-planet-farms/](http://www.dissapore.com/ristoranti/da-vittorio-inaugura-la-prima-vertical-farm-per-stellati-firmata-planet-farms/)
- R48: [www.techeconomy2030.it/2021/05/17/ferrari-farm-coltivare-senza-chimica-sulla-terra-e-nello-spazio/](http://www.techeconomy2030.it/2021/05/17/ferrari-farm-coltivare-senza-chimica-sulla-terra-e-nello-spazio/)