

UNIVERSITÀ CATTOLICA DEL SACRO CUORE

Sede di Piacenza

Dottorato per il Sistema Agro-alimentare

Ciclo XXXVIII

S.S.D. AGRI-01/A



UNIVERSITÀ
CATTOLICA
del Sacro Cuore

Adozione delle tecnologie digitali nel
sistema agroalimentare italiano: evidenze
empiriche e implicazioni per le politiche
pubbliche

Coordinatore:

Prof. Paolo Ajmone Marsan

Tutor:

Prof. Sckokai Paolo

Co-tutor:

Prof.ssa Silvia Coderoni

Tesi di Dottorato di:

Valerio De Paolis

N. Matricola: 5214875

Anno Accademico 2024/2025

Indice

ABSTRACT	4
Introduzione	7
1. La transizione digitale nel settore agro-alimentare	12
1.1 Quadro teorico di adozione: TAM/UTAUT e adattamento al contesto agricolo.....	15
1.2 Importanza economica e sociale della digitalizzazione nell'agricoltura e il <i>precision farming</i>	18
2. La normativa agricola dai primi anni '50 ad oggi: focus sulla politica agricola orientata sull'adozione delle innovazioni	28
2.1 Ecosistemi dell'innovazione e dimensione socio-tecnica della digitalizzazione rurale.	29
2.2 Evoluzione della politica agricola nazionale e europea verso l'incentivazione dell'adozione delle innovazioni.	29
2.3 Il sistema AKIS: risorse e prospettive per l'innovazione agricola.....	32
2.4 Ruolo del secondo pilastro della PAC e delle misure innovative adottate dalle varie regioni italiane a confronto con gli altri Paesi europei.....	34
2.5 Analisi del ruolo del Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza nell'accelerare la transizione digitale nel settore agro-alimentare.....	38
2.6 Iniziative italiane come l'agricoltura 4.0 e il loro impatto sul settore.	40
2.7 Il Ruolo delle politiche pubbliche nell'incentivare l'adozione dell'IA	42
3. Lo sviluppo tecnologico in agricoltura: stato dell'arte	44
3.1 Evoluzione delle innovazioni in agricoltura	45
3.2 Le tecnologie digitali adottate nel settore agricolo, i sistemi decisionali di supporto (DSS) e altri strumenti digitali.....	49
3.3 L'intelligenza artificiale in agricoltura: potenzialità e sfide	53
3.4 Diffusione delle tecnologie digitali in agricoltura	59
3.5 Fattori determinanti l'adozione delle tecnologie digitali in agricoltura.....	64
3.6 Asimmetrie tra quadro normativo e innovazione tecnologica: il caso dei droni in agricoltura	66

4. Diffusione delle tecnologie digitali nelle aziende agricole italiane.....	70
4.1 Risultati dell'indagine AGRIColtura100	71
4.2 Analisi delle principali piattaforme disponibili in commercio e relativa diffusione in Italia..	82
4.3 Il modello matematico proporzionale generale per il calcolo delle percentuali di adozione delle singole piattaforme agricole digitali per categoria tecnologica più diffuse in Italia.....	88
5. Innovazione, impatti e diversificazione nelle imprese agricole italiane: un'analisi descrittiva ed econometrica sul DB AGRIColtura100.....	100
5.1 Quadro concettuale e domande di ricerca	102
5.2 Risultati descrittivi	108
5.3 Interpretazione complessiva dei risultati: esiti e ipotesi dei determinanti, eterogeneità e impatti economico-istituzionali.....	113
5.4 Determinanti dell'adozione delle tecnologie digitali	117
5.5.1 Disegno empirico e specificazione del modello <i>logit</i>	118
5.5.2 Statistiche quantitative e qualitative delle variabili	123
5.5 Inquadramento dei risultati nel dibattito scientifico e implicazioni per la transizione digitale	127
6. Conclusioni.....	131
<i>Bibliografia</i>	142

*A chi ha avuto il coraggio di sognare con me,
la forza di sostenermi
e la pazienza di aspettarmi...*

ABSTRACT

La tesi analizza in quale misura e a quali condizioni la digitalizzazione in agricoltura si traduca in valore economico e organizzativo per le imprese e per le filiere agroalimentari italiane, con particolare attenzione ai meccanismi attraverso cui le tecnologie possono incidere su produttività, efficienza gestionale, competitività e sostenibilità, nonché alle implicazioni per le politiche pubbliche. L'attenzione si sposta dal mero possesso di singole soluzioni tecniche, come macchinari, piattaforme e applicativi, alla configurazione di insiemi tecnologici interoperabili, stabilmente incorporati nei processi decisionali aziendali e capaci di generare routine gestionali formalizzate e verificabili. L'assunto di fondo è che la tecnologia produca valore non in quanto semplice dotazione strumentale, ma in quanto infrastruttura cognitiva e organizzativa, in grado di abilitare nuove modalità di coordinamento, monitoraggio e apprendimento lungo le catene del valore. In tale prospettiva, la tecnologia abilita anche la tracciabilità e la gestione del rischio, e i benefici dipendono dalla sua effettiva integrazione nei processi decisionali e dalla presenza di condizioni abilitanti, tra cui competenze, servizi di supporto e contesto infrastrutturale e istituzionale, che possono ridurre oppure amplificare i divari tra imprese e territori. La domanda di ricerca unitaria è la seguente: in che misura e attraverso quali canali l'adozione digitale, intesa come configurazione integrata e *data-driven*, si associa a migliori performance economiche e a esiti di sostenibilità, e quali condizioni ne determinano l'accessibilità e la scalabilità.

La base empirica del lavoro è costituita dalla banca dati **AGRIcoltura100**, iniziativa nazionale promossa da Reale Mutua e Confagricoltura con il supporto analitico di Innovation Team del Gruppo Cerved. Il dataset, costruito su un campione volontario e in progressiva espansione di imprese agricole italiane, rileva in modo integrato pratiche gestionali e digitali, caratteristiche economiche, incluse classi di fatturato e loro dinamica, profili imprenditoriali e variabili di contesto, tra cui qualità delle infrastrutture digitali, presenza di servizi di assistenza tecnica, condizioni di accesso al credito e inserimento in filiera. Tale impostazione consente di interpretare l'adozione digitale non come fenomeno isolato, ma come esito di combinazioni specifiche di risorse, vincoli territoriali e strategie imprenditoriali. Questo consente di leggere la transizione digitale come processo potenzialmente diseguale, influenzato da barriere di accesso legate a connettività, competenze, costi ricorrenti, interoperabilità e governo dei dati, e da meccanismi di cumolazione dei vantaggi nelle imprese meglio strutturate. In termini concettuali, la digitalizzazione è trattata come capitale organizzativo e il suo impatto dipende da complementarità tra tecnologie, capitale umano, servizi e assetti di governance dei dati.

L'obiettivo scientifico è articolato lungo due direttrici principali. La prima consiste nel misurare l'associazione tra intensità e configurazione dell'adozione digitale, intese come combinazione di famiglie tecnologiche effettivamente operative nei processi aziendali, e la probabilità di investimento in tecnologie digitali. La seconda consiste nell'individuare il ruolo delle condizioni economiche, organizzative, territoriali e cognitive che innalzano o abbassano la soglia di ingresso alla transizione digitale. In linea con la domanda di ricerca, l'analisi considera anche la relazione tra digitalizzazione e risultati aziendali, includendo dimensioni economiche, quali produttività, efficienza e redditività, e profili di sostenibilità, interpretati come esiti associati a configurazioni tecnologiche più o meno integrate. Le stime non vengono interpretate in chiave pienamente causale, ma sono orientate alla progettazione di politiche pubbliche e strategie di sistema, ponendo al centro il tema delle condizioni abilitanti e delle complementarità tra strumenti tecnologici, capitale umano e assetti di governance. L'impianto metodologico combina analisi descrittive comparative per settore e territorio con la stima di un modello logit sull'adozione, controllato per struttura d'impresa e caratteristiche contestuali, accompagnata da verifiche di robustezza e da una discussione esplicita dei limiti informativi del dataset. La scelta del *logit* è coerente con l'obiettivo di stimare la probabilità di investimento e adozione come decisione discreta, mentre l'intensità digitale viene trattata come configurazione in termini di tipologie e pacchetti e viene discussa anche attraverso alternative modellistiche, come conteggi e *modelli zero-inflated*, considerate come possibili estensioni e verifiche di robustezza.

I risultati delineano un profilo di diffusione ancora in fase embrionale, caratterizzato dalla coesistenza tra una larga maggioranza di imprese non adottanti e una minoranza concentrata su livelli bassi o intermedi di intensità digitale. L'ingresso nel digitale appare associato al superamento di una soglia tecnologico organizzativa identificabile in un pacchetto minimo funzionante composto da sensori, connettività, applicazioni e supporto tecnico, che riduce gli attriti informativi e rende tracciabili le attività. Configurazioni più integrate, che combinano monitoraggio, telemetria, sistemi di supporto alle decisioni e software gestionali, risultano associate a benefici crescenti in virtù di complementarità tecniche e organizzative. Nel complesso emerge un gradiente di integrazione tecnologica che va dai livelli iniziali centrati sulla tracciabilità e sulla riduzione degli attriti informativi fino a configurazioni più mature basate sull'uso sistematico dei dati, nelle quali monitoraggio e strumenti di supporto alle decisioni si traducono in routine gestionali più formalizzate e verificabili. L'adozione risulta significativamente correlata alla solidità economica, misurata da livelli di fatturato e redditività, alla scala di attività nazionale o internazionale, alla presenza di una leadership giovane e orientata a processi decisionali fondati sui dati, nonché all'adesione a percorsi strutturati di qualità e sostenibilità, come agricoltura biologica e iniziative ambientali certificate. Al contrario, la localizzazione in aree caratterizzate da debole infrastrutturazione, in particolare digitale, e una valutazione marcatamente

pessimistica delle prospettive ambientali dell'agricoltura riducono in misura significativa la probabilità di investimento, evidenziando come fattori territoriali strutturali e percezioni soggettive del futuro settoriale concorrano nel modellare le decisioni di adozione. Queste evidenze suggeriscono l'esistenza di un *digital divide* non solo tecnologico, ma anche organizzativo e territoriale, legato alla disponibilità di servizi e alla capacità di assorbimento dell'innovazione.

Sul piano delle implicazioni, il lavoro mette in luce i limiti di approcci di policy incentrati quasi esclusivamente su sussidi all'acquisto di tecnologie e indica l'esigenza di una strategia multilivello che combini investimenti in condizioni abilitanti, quali connettività, infrastrutture di dati, servizi di estensione e formazione accreditati, con sostegni anche ai costi ricorrenti e alla consulenza, requisiti minimi e verificabili di interoperabilità e portabilità delle soluzioni e una governance del dato affidata a corpi intermedi rafforzati nel loro ruolo di orchestratori di ecosistemi digitali territoriali. Inoltre, le politiche di sostegno al reddito e alla liquidità, inclusi i pagamenti diretti, risultano rilevanti come condizioni di investimento e di gestione del rischio, da integrare con strumenti per competenze, standard e servizi, come AKIS e reti di innovazione. In questa prospettiva, la digitalizzazione viene concettualizzata come forma di capitale organizzativo diffuso, la cui configurazione contribuisce alla riduzione dei divari settoriali e territoriali e, più in generale, al rafforzamento della competitività e della resilienza di lungo periodo del sistema agroalimentare italiano.

Introduzione

Nel contesto dell'attuale rivoluzione digitale, l'agricoltura e il settore alimentare stanno vivendo una trasformazione senza precedenti. È da ricordare che, secondo dati dell'Organizzazione delle Nazioni Unite per l'Alimentazione e l'Agricoltura, l'agricoltura fornisce mezzi di sostentamento per oltre un miliardo di persone in tutto il mondo e contribuisce al 10 per cento del prodotto interno lordo globale. Inoltre, rappresenta una fonte primaria di cibo per la maggior parte della popolazione mondiale, garantendo la sicurezza alimentare e la nutrizione.

L'avvento delle tecnologie digitali, insieme alla crescente disponibilità di dati e all'innovazione nel settore, sta cambiando radicalmente il modo in cui le aziende agricole producono, gestiscono e commercializzano i loro prodotti. Questa trasformazione, nota come *digital transition* nel sistema agroalimentare, sta generando impatti economici, sociali e ambientali significativi, ponendo sfide e opportunità per i decisori politici, gli imprenditori agricoli e la società nel suo complesso. In questa tesi la digitalizzazione non è trattata come semplice dotazione strumentale, ma come infrastruttura cognitiva e organizzativa, in grado di produrre valore quando è integrata nei processi decisionali, genera routine verificabili e abilita coordinamento, tracciabilità, monitoraggio, gestione del rischio e apprendimento lungo la filiera.

L'obiettivo di questo lavoro di tesi è esaminare in dettaglio gli effetti della digitalizzazione sull'agricoltura e il sistema alimentare, con particolare attenzione agli impatti economici e alle implicazioni per le politiche pubbliche. In particolare, il lavoro intende rispondere a una domanda di ricerca unitaria: in che misura e attraverso quali canali l'adozione di tecnologie digitali nelle imprese agricole si associa a migliori performance economiche e a esiti di sostenibilità, e quali implicazioni operative ne derivano per l'azione pubblica. Più precisamente, la domanda guida è individuare a quali condizioni l'adozione digitale, intesa come configurazione integrata e interoperabile di famiglie tecnologiche effettivamente operative, si associ a differenze osservabili nelle performance e nei comportamenti di sostenibilità.

Coerentemente con il framework, l'analisi si articola in quattro sotto-quesiti: (D1) quali caratteristiche economico-organizzative e territoriali si associano alla probabilità di adozione; (D2) quali fattori si associano all'intensità/configurazione dell'adozione; (D3) se e come l'adozione si associa a esiti economici e di sostenibilità; (D4) se tali relazioni varino per territorio e ordinamento produttivo. Le ipotesi di lavoro sono: (H1) maggiore solidità economica e scala organizzativa aumentano la probabilità di adozione; (H2) condizioni facilitanti territoriali (infrastrutture/servizi/competenze) riducono le barriere; (H3) configurazioni integrate ("*bundle*") producono associazioni più forti

rispetto a strumenti isolati; (H4) gli esiti dipendono da complementarità organizzative e requisiti informativi di filiera.

A partire da tale quesito, la ricerca persegue tre direttrici. La prima direttrice consiste nel descrivere e misurare il livello e l'intensità di adozione delle tecnologie digitali, evidenziandone l'eterogeneità tra imprese. La seconda direttrice consiste nell'individuare i principali fattori economici e strutturali che influenzano la propensione ad adottare innovazioni digitali. La terza direttrice consiste nel valutare la relazione tra digitalizzazione e risultati aziendali, con attenzione alla redditività, alla produttività, all'efficienza gestionale e alle dimensioni della sostenibilità. In termini operativi, l'analisi si concentra su tre blocchi di relazioni che collegano determinanti e condizioni abilitanti alla probabilità di investimento digitale, configurazioni tecnologiche all'intensità di integrazione organizzativa e integrazione digitale a esiti economici e di sostenibilità, interpretati come associazioni e non come piena causalità.

La tesi assume che l'adozione non dipenda solo dai costi e benefici immediati della singola tecnologia, ma da complementarità tra risorse aziendali, condizioni di contesto e capacità di trasformare dati e strumenti digitali in prassi decisionali. Le risorse aziendali includono scala, solidità economica e capitale umano e manageriale. Le condizioni di contesto includono connettività, qualità infrastrutturale, accesso a consulenza e servizi e inserimento in filiera. La capacità di trasformazione include governance del dato, interoperabilità, standard e routine di monitoraggio e controllo. Questa impostazione dialoga con la letteratura sui modelli di adozione tecnologica basati su utilità attesa e capacità di assorbimento dell'innovazione e con i filoni TAM e UTAUT per la dimensione percettiva e cognitiva, senza assumerli in modo meccanico e utilizzandoli come cornice per ordinare ipotesi e risultati. Ne deriva un'aspettativa centrale secondo cui l'effetto associato alla digitalizzazione cresce con l'integrazione in pacchetti e architetture più che con la mera presenza di strumenti isolati.

Nel corso di questo capitolo introduttivo verrà delineato il contesto storico e normativo che ha contribuito a configurare il settore agricolo fino ad oggi, con particolare enfasi sulla politica agricola orientata all'adozione delle innovazioni. La rivoluzione digitale in agricoltura è un argomento ampiamente dibattuto nella letteratura scientifica. Studi come quelli condotti da Federici e collaboratori e Bonelli e collaboratori hanno analizzato gli effetti della digitalizzazione sull'efficienza, la sostenibilità e la competitività dell'agricoltura. Inoltre, la politica agricola europea, come definita nel Regolamento (UE) n. 1305 del 2013, ha influenzato significativamente la direzione della trasformazione digitale nel settore. La discussione di *policy* include anche il ruolo delle misure che incidono sulla capacità di investimento e sulla gestione del rischio, inclusi i pagamenti diretti, e il funzionamento di ecosistemi dell'innovazione rurale e dell'AKIS, che comprendono servizi di

consulenza, formazione e trasferimento di conoscenza, come condizioni abilitanti della transizione digitale.

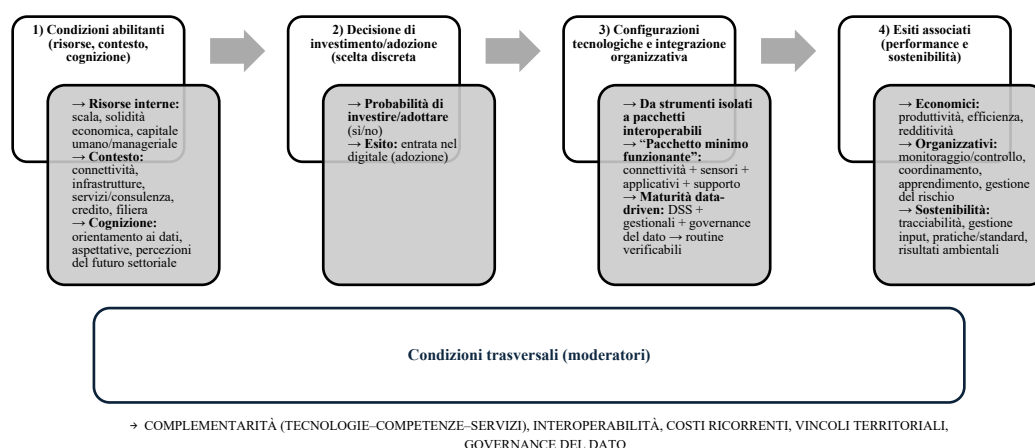
La comprensione del contesto storico e normativo è fondamentale per valutare gli impatti attuali e futuri della digitalizzazione sull'agricoltura e il settore alimentare. La trasformazione digitale rappresenta una nuova frontiera per l'agricoltura, offrendo opportunità di innovazione, miglioramento delle pratiche agricole e aumento della competitività. Tali opportunità si manifestano attraverso una migliore capacità decisionale basata sui dati, una gestione più efficiente degli input e dei processi, un incremento della qualità e della tracciabilità lungo la filiera e una più efficace gestione del rischio produttivo e di mercato. Tuttavia, è importante affrontare le sfide legate alla digitalizzazione, come l'accesso alle tecnologie, la protezione dei dati e l'equità nell'adozione delle innovazioni. Assumono inoltre rilievo la governance dei dati, l'interoperabilità delle soluzioni e la disponibilità di competenze adeguate, per evitare che la transizione digitale accentui divari già esistenti tra imprese e territori. Per questo l'analisi pone attenzione alle condizioni di accesso legate a connettività, competenze, servizi, costi ricorrenti, interoperabilità e governo dei dati, che possono innalzare o abbassare la soglia di ingresso al digitale e determinare processi di cumolazione dei vantaggi.

In sintesi, questo lavoro si propone di esaminare criticamente gli effetti della digitalizzazione sull'agricoltura e il settore alimentare, offrendo un'analisi approfondita degli impatti economici e delle implicazioni per le politiche pubbliche. Attraverso una revisione completa della letteratura e un'analisi empirica, si mira a fornire raccomandazioni chiare e orientate all'azione per sostenere una transizione digitale equa, sostenibile e orientata al futuro nel sistema agroalimentare. In linea con questa impostazione, l'elaborato combina una prospettiva teorico-normativa e una verifica quantitativa, in modo da inquadrare il ruolo delle politiche di settore e delle strategie europee e nazionali e misurare evidenze empiriche sulle determinanti e sugli esiti associati all'adozione tecnologica. I contributi attesi sono una misura dell'adozione come configurazione e integrazione nei processi, l'identificazione di condizioni abilitanti e barriere territoriali e organizzative e indicazioni di *policy* che combinino incentivi, standard, infrastrutture e servizi.

Per rendere esplicita la logica unitaria della ricerca e i canali attraverso cui la digitalizzazione può tradursi in performance e sostenibilità, di seguito si sintetizza il framework concettuale che guida la formulazione delle ipotesi, la selezione delle variabili e la strategia empirica.

Figura 1: Framework analitico della transizione digitale in agricoltura: condizioni abilitanti, decisione di adozione, configurazioni tecnologiche e integrazione organizzativa, esiti economici e di sostenibilità.

Nota: lo schema sintetizza canali interpretativi e relazioni attese; le stime empiriche sono interpretate come associazioni.



A completamento dell'analisi teorica e normativa, **sulla base dello schema concettuale**, la ricerca prevede un approfondimento empirico basato sui dati dell'indagine **AGRIColtura100**, promossa da Confagricoltura e Reale Mutua Foundation. Tale indagine costituisce uno strumento fondamentale per comprendere il livello di adozione delle tecnologie digitali e delle pratiche innovative nelle imprese agricole italiane, fornendo un quadro articolato su oltre duecento variabili relative agli aspetti economici, sociali e ambientali della sostenibilità aziendale.

L'elaborazione dei dati di **AGRIColtura100** ha permesso di sviluppare modelli di analisi economico statistica volti a valutare la relazione tra digitalizzazione, performance economica e sostenibilità delle aziende agricole. Attraverso l'applicazione di specifici modelli di analisi statistica si analizzeranno i principali fattori che influenzano l'adozione delle tecnologie digitali, con particolare attenzione all'impatto sulla produttività, sull'efficienza gestionale e sulla competitività del settore. L'obiettivo è individuare le determinanti economiche e strutturali della transizione digitale, stimandone gli effetti tangibili in termini di redditività e innovazione. In coerenza con il framework, la scelta di un *modello logit* risponde alla necessità di stimare una decisione discreta di investimento e adozione, controllando per struttura d'impresa e contesto, mentre l'eterogeneità di intensità viene trattata tramite configurazioni e pacchetti tecnologici e verifiche di robustezza. Sono inoltre discusse come estensioni alternative specificazioni per variabili di intensità basate su conteggi e modelli adatti a distribuzioni con eccesso di zeri, come gli approcci *zero inflated*, al fine di valutare la sensibilità dei risultati alla natura del dato. Le stime sono interpretate come associazioni utili per il disegno delle politiche pubbliche, non come effetti pienamente causali.

L'approccio integrato, teorico, quantitativo e qualitativo, consentirà di delineare un quadro completo dell'evoluzione digitale dell'agricoltura italiana, individuando criticità, opportunità e leve di policy per sostenere la diffusione dell'innovazione tecnologica nel settore. In questo modo, la tesi intende contribuire al dibattito accademico e istituzionale sul futuro dell'agricoltura digitale, fornendo strumenti di valutazione e proposte operative per accompagnare una transizione equa, sostenibile e

coerente con gli obiettivi del Green Deal Europeo e del Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza (PNRR). La struttura dell'elaborato riflette questa logica: (i) quadro teorico e normativo; (ii) descrizione della diffusione e delle configurazioni di adozione; (iii) stima delle determinanti dell'investimento digitale; (iv) discussione della relazione tra integrazione digitale ed esiti economico-sostenibili; (v) implicazioni per politiche multilivello su infrastrutture, standard/interoperabilità, competenze/servizi e governance dei dati.

1. La transizione digitale nel settore agro-alimentare

Nell'attuale contesto di rapida trasformazione digitale, l'introduzione delle tecnologie digitali, insieme alla crescente disponibilità di dati e all'innovazione nel settore, sta modificando in profondità le pratiche agricole tradizionali e, più in generale, l'organizzazione delle filiere agroalimentari. Questa transizione, spesso indicata come *digital transition* del sistema agroalimentare, sta generando impatti significativi a livello economico, sociale e ambientale, creando allo stesso tempo sfide e opportunità per i decisori politici, gli imprenditori agricoli e la società nel suo complesso.

L'avvento di tecnologie quali Internet of Things (IoT), sistemi di sensoristica e telerilevamento (satelliti e droni), piattaforme di gestione e supporto alle decisioni (DSS), Intelligenza Artificiale (AI) e robotica agricola consente alle imprese di raccogliere e integrare dati in tempo reale sui terreni, sulle colture e sulle condizioni ambientali. Tali informazioni, se opportunamente elaborate e trasformate in indicazioni operative, permettono decisioni agronomiche più informate e mirate, con potenziali effetti di ottimizzazione nell'uso delle risorse (input chimici, acqua, energia), incremento della produttività e miglioramento della sostenibilità.

In questa analisi, la digitalizzazione non è interpretata come mera "dotazione" di strumenti, ma come infrastruttura cognitiva e organizzativa capace di produrre valore quando: (i) è integrata nei processi decisionali; (ii) genera routine verificabili e misurabili; (iii) abilita coordinamento, tracciabilità, monitoraggio, gestione del rischio e apprendimento lungo la filiera. In tale prospettiva, le tecnologie digitali assumono la forma di un "capitale organizzativo diffuso": il loro impatto dipende non solo dalla presenza di singoli strumenti, ma dalla capacità dell'impresa di combinarli in architetture interoperabili e utilizzarli in modo coerente nel tempo.

Per incentivare le imprese agricole a investire in tecnologie innovative, l'Italia ha introdotto incentivi di natura fiscale a favore delle aziende che acquistano mezzi e attrezzature dotati di specifici requisiti tecnologici, tra cui, in primo luogo, la capacità di raccogliere, elaborare e trasferire dati dalle operazioni e dalle produzioni in campo. Questo quadro agevolativo, inizialmente concepito per il settore manifatturiero con il Piano Industria 4.0, è stato riorientato e potenziato nel Piano Transizione 4.0 e, a partire dal 2020, esteso anche al comparto agricolo. Lo strumento mira a favorire l'adozione di beni strumentali avanzati funzionali alla digitalizzazione e all'automazione delle attività agricole, con l'obiettivo di accrescere produttività e sostenibilità. In quest'ottica, esso promuove l'integrazione di tecnologie digitali lungo la catena del valore agroalimentare, dalla produzione alla trasformazione, fino alla distribuzione e al consumo, secondo un approccio orientato a migliorare efficienza, tracciabilità e trasparenza del sistema nel suo complesso.

La diffusione di queste soluzioni, tuttavia, si accompagna a criticità rilevanti: l'accessibilità economica e tecnica per una platea ampia di imprese, la gestione e la tutela dei dati generati in azienda, la disponibilità di competenze e servizi di supporto, il rischio di accentuare divari tra imprese e territori a diversa capacità di innovazione. Emergono inoltre questioni etiche e regolatorie, dalla privacy alla governance del dato, fino agli standard di interoperabilità, che richiedono attenzione specifica da parte dei decisori pubblici e degli attori di filiera.

Per governare queste sfide e valorizzare le opportunità della transizione digitale è necessario un approccio integrato che combini politiche pubbliche coerenti, investimenti in infrastrutture digitali, programmi strutturati di formazione e accompagnamento, nonché collaborazione tra settore pubblico e privato. In questa prospettiva, la promozione delle tecnologie digitali in agricoltura diventa una leva cruciale per rafforzare la resilienza del sistema agroalimentare e contribuire al raggiungimento degli obiettivi di sostenibilità ambientale e sicurezza alimentare.

Lo sviluppo digitale e tecnologico nel settore agroalimentare non riguarda soltanto l'Italia, ma coinvolge l'intera comunità internazionale, con una particolare rilevanza sul piano europeo e nazionale. Su scala globale, l'adozione di tecnologie digitali è sempre più interpretata come leva strategica per affrontare sfide quali sicurezza alimentare, sostenibilità ambientale e resilienza ai cambiamenti climatici. Governi e imprese investono in soluzioni digitali per aumentare l'efficienza dei processi produttivi, monitorare le risorse naturali, ottimizzare l'uso del suolo e rafforzare trasparenza e tracciabilità lungo la catena del valore.

A livello europeo, la digitalizzazione è promossa attraverso politiche e iniziative mirate. Ne è un esempio la Politica Agricola Comune (PAC), che sostiene innovazione e modernizzazione, in particolare attraverso strumenti dello sviluppo rurale e misure dedicate a investimenti, formazione e consulenza. Inoltre, iniziative quali la *Strategia Farm to Fork* e la *Strategia Digitale per l'Europa* contribuiscono a orientare l'adozione di tecnologie digitali lungo la filiera agroalimentare.

In tale contesto transitorio, il coinvolgimento attivo delle aziende agricole diventa fondamentale per il successo della digitalizzazione nel settore agricolo. Questo coinvolgimento dipende da vari fattori, tra cui l'accessibilità economica e tecnologica delle soluzioni digitali, la consapevolezza e la formazione degli agricoltori e il supporto istituzionale e normativo. Le aziende agricole che adottano soluzioni digitali possono beneficiare di una maggiore efficienza operativa, una migliore gestione delle risorse e una maggiore competitività sui mercati nazionali e internazionali.

Secondo i dati dell'Indagine ISTAT sull'uso delle tecnologie dell'informazione e della comunicazione (ICT) nelle imprese agricole italiane, il coinvolgimento delle aziende agricole nella digitalizzazione sta aumentando costantemente. Nel 2020, ad esempio, il 70% delle aziende agricole italiane con almeno 10 addetti utilizzava internet per le proprie attività, rispetto al 67% del 2019.

Inoltre, il 37% delle aziende agricole utilizzava dispositivi mobili per accedere ad internet e gestire le proprie attività, mentre il 26% utilizzava software specifici per l'agricoltura.

Secondo i dati di Eurostat, il settore agro-alimentare italiano ha mostrato una crescente adozione di tecnologie digitali negli ultimi anni, sebbene permangano notevoli disparità tra le diverse regioni. I dati indicano che circa il 20% delle aziende agricole italiane utilizza già tecnologie di agricoltura di precisione, con una proiezione di crescita significativa grazie agli investimenti del PNRR (Eurostat, 2021). L'Italia si posiziona tra i paesi leader in Europa per l'adozione di soluzioni tecnologiche avanzate nel settore agro-alimentare, ma è ancora inferiore rispetto a paesi come Germania e Paesi Bassi, che hanno percentuali di adozione superiori al 30%.

Tuttavia, esistono ancora disparità significative nell'adozione delle tecnologie digitali tra le diverse categorie di aziende agricole. Le grandi aziende tendono ad essere più propense a adottare soluzioni digitali avanzate, come l'agricoltura di precisione e l'automazione, grazie alle loro risorse finanziarie e alla loro capacità di investimento. Dall'altra parte, le piccole e medie imprese agricole possono incontrare maggiori difficoltà nell'accedere alle tecnologie digitali a causa delle limitate risorse finanziarie e della mancanza di conoscenze tecniche.

Per incentivare ulteriormente il coinvolgimento delle aziende agricole nella digitalizzazione, è fondamentale supportare politiche pubbliche mirate che offrano incentivi finanziari, programmi di formazione e supporto tecnico. Ad esempio, come previsto dal Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza (PNRR) dell'Italia che prevede investimenti significativi nel settore agricolo per promuovere la digitalizzazione e migliorare la competitività delle aziende agricole italiane sui mercati globali.

Il coinvolgimento attivo delle aziende agricole è essenziale per realizzare pienamente i benefici della digitalizzazione nel settore agricolo. Attraverso politiche mirate, investimenti e sostegno istituzionale, è possibile favorire una diffusione più ampia delle tecnologie digitali nelle aziende agricole di tutte le dimensioni, contribuendo così a migliorare l'efficienza, la sostenibilità e la competitività del settore agricolo nel suo complesso.

La transizione digitale nel settore agroalimentare costituisce un processo di profonda ristrutturazione delle modalità di produzione, distribuzione e consumo del cibo. Essa si inserisce in un più ampio percorso di trasformazione digitale che interessa l'insieme dei settori economici e sociali, assumendo però una rilevanza specifica in agricoltura e nell'alimentazione, ambiti nei quali può incidere in modo significativo sulla sicurezza alimentare, sulla sostenibilità ambientale dei sistemi produttivi e sulla competitività delle imprese e delle filiere.

L'agricoltura moderna si trova di fronte a numerose sfide, tra cui la crescente domanda di cibo da parte di una popolazione mondiale in costante aumento, il cambiamento climatico, la scarsità delle

risorse naturali e la necessità di ridurre l'impatto ambientale delle pratiche agricole. Inoltre, l'agricoltura deve affrontare la concorrenza globale e le pressioni sui prezzi dei prodotti agricoli, che possono mettere a rischio la sostenibilità economica delle aziende agricole.

La digitalizzazione offrirebbe le soluzioni per affrontare queste sfide e migliorare la resilienza e la sostenibilità del settore agricolo. Le tecnologie digitali, come l'IoT, l'analisi dei dati, l'intelligenza artificiale (AI) e la robotica, consentirebbe agli agricoltori di monitorare e gestire in modo più efficiente le loro operazioni, ottimizzare l'uso delle risorse naturali, migliorare la qualità e la sicurezza dei prodotti, e ridurre gli sprechi lungo tutta la catena del valore agricolo.

Secondo l'Organizzazione per la Cooperazione e lo Sviluppo Economico (OCSE), l'adozione delle tecnologie digitali può aumentare la produttività agricola fino al 20%, ridurre i costi di produzione fino al 25% e diminuire l'impatto ambientale delle pratiche agricole.

La digitalizzazione presenta, come è comprensibile, delle sfide e dei rischi. Questi includono la questione dell'accesso equo e universale alle tecnologie digitali da parte di tutte le aziende agricole, indipendentemente dalle loro dimensioni e risorse, la protezione dei dati e della privacy, e il rischio di esacerbare le disuguaglianze esistenti tra le diverse regioni e settori dell'agricoltura, offrendo contemporaneamente una opportunità senza precedenti per migliorare la sostenibilità, la resilienza e la competitività del sistema alimentare globale. Per sfruttare appieno il potenziale della digitalizzazione, è necessario affrontare le sfide e garantire un'adozione inclusiva e responsabile delle tecnologie digitali nell'agricoltura.

Alla luce di tali evidenze, il tema centrale non è soltanto *“quali tecnologie esistono”*, ma *“perché e in quali condizioni le aziende le adottano e le utilizzano stabilmente”*. Per rendere più solida e coerente questa lettura, la sezione seguente introduce un quadro teorico di adozione (TAM/UTAUT), adattandolo alle specificità del contesto agricolo (eterogeneità strutturale, rischio, dipendenza da servizi e infrastrutture).

1.1 Quadro teorico di adozione: TAM/UTAUT e adattamento al contesto agricolo

La diffusione delle tecnologie digitali in agricoltura non può essere interpretata esclusivamente come esito di un calcolo costi-benefici o come risposta automatica alla disponibilità di incentivi. Le evidenze disponibili mostrano che, a parità di opportunità tecnologiche, le imprese adottano in modo differenziato e spesso discontinuo: alcune investono e integrano stabilmente sensori, piattaforme di gestione, strumenti di *decision support* e automazione; altre rimangono su soluzioni minime o abbandonano l'uso nel tempo. Questa eterogeneità è particolarmente marcata in agricoltura per tre ragioni strutturali: (i) l'elevata incertezza climatica e di mercato, che rende più complessa la valutazione dei benefici attesi; (ii) la forte frammentazione produttiva e organizzativa del tessuto

aziendale, che determina capacità di investimento e competenze molto diverse; (iii) la dipendenza da infrastrutture e servizi esterni (connettività, assistenza tecnica, consulenza, manutenzione, interoperabilità) che condizionano la possibilità stessa di utilizzare in modo efficace le tecnologie.

In questa prospettiva, i modelli di *technology acceptance* sono utili perché consentono di distinguere tra l'esistenza di una soluzione tecnologica e la sua effettiva adozione/uso, chiarendo quali "leve" incidono sulla decisione dell'impresa. Tra questi, il Technology Acceptance Model (TAM) e la Unified Theory of Acceptance and Use of Technology (UTAUT) rappresentano due riferimenti consolidati e frequentemente impiegati negli studi sull'adozione di innovazioni. Il contributo di tali modelli non risiede nel fornire una spiegazione esaustiva di ogni scelta individuale, ma nel proporre un set di costrutti ordinatori che, se adattati al contesto, permettono di leggere in modo coerente le differenze tra imprese, territori e filiere.

Il TAM (Davis, 1989) interpreta l'adozione come funzione di due fattori principali: l'utilità percepita e la facilità d'uso percepita. L'utilità percepita rimanda alla convinzione che la tecnologia generi un miglioramento nelle performance: nel caso agricolo, questo significa attendersi incrementi di resa e qualità, riduzioni di costi variabili, migliore allocazione degli input, maggiore capacità di prevenire stress biotici/abiotici e rafforzamento di tracciabilità e compliance. La facilità d'uso percepita, invece, riguarda la misura in cui l'impresa ritiene la tecnologia gestibile senza un eccessivo carico di apprendimento, tempo e coordinamento. In agricoltura questo punto assume un significato concreto: molte soluzioni digitali richiedono competenze tecniche (interpretazione dati, manutenzione sensoristica, settaggio macchine), disponibilità di connettività stabile, interoperabilità tra strumenti e, soprattutto, la capacità di integrare l'informazione generata nei processi decisionali. Di conseguenza, la "facilità d'uso" non è un attributo solo dell'interfaccia o del software, ma dipende dall'organizzazione aziendale e dall'ecosistema di supporto.

L'UTAUT (Venkatesh et al., 2003) amplia il TAM e consente un adattamento particolarmente adeguato all'agricoltura perché introduce esplicitamente le "condizioni facilitanti" e l'influenza sociale. In UTAUT, l'adozione e l'uso dipendono da aspettative di performance (benefici attesi), aspettative di sforzo (complessità/costi cognitivi e organizzativi), influenza sociale (pressione o imitazione derivante da pari, reti, filiera) e condizioni facilitanti (infrastrutture e supporti disponibili). In termini operativi, tali costrutti costituiscono una griglia interpretativa per la parte empirica: dimensione economica, scala di attività e redditività catturano vincoli/capacità di investimento; territorio e infrastrutture sintetizzano condizioni facilitanti; variabili su sostenibilità e filiera approssimano benefici attesi e requisiti informativi. Il capitolo empirico utilizza questa cornice per ordinare risultati e ipotesi, interpretando le stime come associazioni.

In agricoltura, proprio le condizioni facilitanti rappresentano spesso il discriminante principale: la stessa tecnologia può essere altamente performante sulla carta, ma inutilizzabile o poco affidabile senza banda larga adeguata, servizi di assistenza, disponibilità di consulenza e capacità di manutenzione. La digitalizzazione, inoltre, non riguarda soltanto l'azienda come unità isolata: molte applicazioni generano valore pieno quando sono integrate in sistemi di filiera (tracciabilità, certificazioni, reporting, gestione logistica), e qui l'influenza sociale è spesso "istituzionalizzata" in requisiti informativi e standard richiesti da cooperative, OP, trasformatori o buyer.

L'adattamento di TAM/UTAUT al contesto agricolo richiede quindi di esplicitare due elementi che, se sottovalutati, riducono la capacità interpretativa del quadro teorico. Il primo è che l'adozione non coincide con l'acquisto: nel digitale agricolo il valore economico e ambientale emerge quando i dati diventano parte del ciclo decisionale "misurazione–analisi–intervento–verifica", cioè quando si stabilizzano routine operative. Pertanto, la tecnologia va interpretata come un'infrastruttura cognitiva e organizzativa: ciò che differenzia le imprese non è solo "avere" un sensore o un software, ma saperlo integrare stabilmente, interpretare l'informazione e trasformarla in decisioni. Questo punto consente anche di spiegare perché alcune imprese adottino soluzioni "di facciata" (adozione formale) senza ottenere risultati misurabili, mentre altre costruiscano architetture coerenti e ne traggano benefici continui.

Il secondo elemento riguarda la natura composita e complementare delle tecnologie digitali. Molte applicazioni richiedono pacchetti di strumenti: sensoristica, macchine connesse, piattaforme di gestione, competenze, assistenza, interoperabilità. Ne deriva che l'adozione è spesso un processo graduale e cumulativo, e che la presenza di vincoli in uno qualsiasi dei componenti (ad esempio connettività o competenze) può bloccare o scoraggiare l'adozione anche quando l'utilità potenziale è elevata. Questa prospettiva è coerente con UTAUT: i benefici attesi possono essere alti, ma l'adozione non avviene se lo sforzo percepito è elevato o se mancano condizioni facilitanti.

Alla luce di quanto sopra, i costrutti di TAM/UTAUT possono essere "tradotti" in determinanti osservabili e rilevanti per l'agricoltura. Le aspettative di performance/utilità percepita si collegano ai benefici che l'impresa ritiene conseguibili: efficienza nell'uso degli input, riduzione sprechi, gestione del rischio, accesso a mercati premium e compliance. Le aspettative di sforzo/facilità d'uso si collegano a competenze, complessità organizzativa e costi di apprendimento e coordinamento. L'influenza sociale, nel contesto agroalimentare, si collega non solo alle reti di pari ma anche alle pressioni e agli standard di filiera che rendono la digitalizzazione più o meno necessaria per vendere e posizionarsi. Le condizioni facilitanti, infine, si collegano direttamente alle dotazioni territoriali (connettività), alla presenza di servizi (consulenza, assistenza), ai programmi di formazione e alla qualità dell'ecosistema locale dell'innovazione.

Questo inquadramento è coerente con il dibattito recente che, in ambito agroalimentare, combina esplicitamente la dimensione micro dell'adozione (decisione dell'impresa e stabilizzazione d'uso) con la dimensione meso e macro (assetti istituzionali, strumenti di policy, incentivi, servizi e infrastrutture). In particolare, il *Special Issue* di *Bio-based and Applied Economics (BAE)* “*Economic and policy analysis of technology uptake for the smart management of agricultural systems*” enfatizza proprio la necessità di leggere l'adozione come fenomeno congiunto economico e di *policy*: non solo scelta individuale, ma esito dell'interazione tra benefici attesi, vincoli organizzativi, disponibilità di servizi e disegno degli strumenti pubblici (incentivi, formazione, consulenza, supporto all'innovazione). Tale impostazione rafforza la coerenza del presente capitolo con i capitoli successivi, nei quali le determinanti dell'adozione vengono analizzate empiricamente e discusse in chiave di implicazioni per le politiche pubbliche.

L'utilità di questo quadro teorico per la tesi è dunque duplice. Da un lato, consente di interpretare l'adozione come fenomeno multidimensionale, evitando una lettura riduttiva basata solo sul sostegno pubblico o sulla disponibilità tecnologica. Dall'altro, rende più lineare il raccordo con l'analisi empirica: l'eterogeneità osservata tra imprese e territori può essere letta come differenza nei benefici attesi, nei costi/complessità percepiti, nella pressione di filiera e, soprattutto, nelle condizioni facilitanti. In questa prospettiva, la digitalizzazione emerge come leva di competitività e sostenibilità quando è sostenuta da competenze e servizi e quando l'impresa riesce a trasformare strumenti e dati in capitale organizzativo, cioè in capacità stabile di decisione, controllo e miglioramento.

1.2 Importanza economica e sociale della digitalizzazione nell'agricoltura e il *precision farming*

La digitalizzazione dell'agricoltura produce effetti di ampia portata sia sul piano economico sia su quello sociale. L'introduzione e la progressiva diffusione di tecnologie digitali stanno trasformando in modo strutturale l'organizzazione dei processi produttivi, incidendo sulla composizione dei costi, sui margini di produttività dei fattori e sulle modalità di utilizzo delle risorse naturali. Sistemi di monitoraggio in tempo reale, piattaforme di gestione integrata e strumenti di supporto alle decisioni consentono di aumentare l'efficienza operativa, ridurre sprechi e ridondanze, ottimizzare l'impiego di input quali acqua, fertilizzanti e fitofarmaci e, più in generale, migliorare la qualità e la tempestività delle decisioni agronomiche.

Parallelamente, la transizione digitale ridisegna le condizioni di lavoro e le traiettorie professionali degli agricoltori, introducendo nuove competenze, nuove forme di organizzazione del lavoro e, in prospettiva, opportunità di qualificazione dei profili occupazionali nelle aree rurali. Sul piano sistemico, l'uso strutturato dei dati contribuisce a rafforzare la sicurezza alimentare, migliorando la

capacità di programmare le produzioni, di gestire i rischi climatici e fitosanitari e di garantire tracciabilità e trasparenza lungo le filiere. La possibilità di misurare con maggiore precisione gli impatti delle pratiche agricole e di intervenire in modo mirato sull'uso degli input apre, inoltre, margini significativi per la mitigazione delle pressioni ambientali del settore, collocando la digitalizzazione al crocevia tra competitività economica, qualità del lavoro e sostenibilità ecosistemica.

Dal punto di vista strettamente economico, l'impiego di tecnologie digitali consente ai produttori agricoli di operare in modo più efficiente, riducendo i costi variabili e incrementando la redditività complessiva. Attraverso dati geospaziali, sensoristica distribuita, rilievi da remoto (droni, satelliti) e piattaforme analitiche, gli agricoltori possono monitorare in continuo lo stato del suolo, delle colture e le condizioni meteorologiche, calibrando in modo sito-specifico l'applicazione di fertilizzanti, acqua e fitofarmaci. La conseguenza è una riduzione degli sprechi e una maggiore aderenza tra input impiegati e fabbisogni effettivi delle colture, con effetti congiunti su efficienza tecnica, costi di produzione e stabilità dei margini.

Tali dinamiche si riflettono anche sulla dimensione ambientale. L'uso più mirato e razionale di risorse idriche e prodotti chimici consente di contenere le perdite e di ridurre il rischio di contaminazione delle acque superficiali e sotterranee, contribuendo a migliorare il profilo di sostenibilità delle aziende e dei territori. Ciò può tradursi, a sua volta, in una maggiore capacità di soddisfare requisiti ambientali stringenti, di accedere a schemi di certificazione e a segmenti di mercato "premium" che riconoscono e remunerano pratiche agricole a minore impatto.

Sul piano competitivo, le imprese che adottano sistemi digitali mostrano una maggiore capacità di adattamento a condizioni di mercato mutevoli e a preferenze dei consumatori sempre più orientate verso prodotti di alta qualità, sicuri e tracciabili. La disponibilità di dati strutturati sui processi produttivi sostiene strategie di differenziazione, rafforza il potere negoziale nelle filiere e facilita l'accesso a canali commerciali più remunerativi. In questa prospettiva, la digitalizzazione non si limita a incrementare l'efficienza interna delle aziende, ma contribuisce a ridefinirne il posizionamento competitivo e a generare esternalità positive per le economie locali e nazionali.

L'adozione di tecnologie digitali in agricoltura attiva un insieme articolato di benefici potenziali – in termini di efficienza, redditività, sostenibilità e competitività – la cui effettiva realizzazione dipende tuttavia dalle condizioni istituzionali, infrastrutturali e organizzative in cui le imprese operano. I principali profili di impatto economico emersi dall'analisi di contesto saranno oggetto di approfondimento sistematico nelle sezioni che seguono, in cui tali dimensioni verranno esaminate in relazione ai diversi modelli di adozione e alle eterogeneità settoriali e territoriali.

In linea con TAM/UTAUT, tali benefici attesi (performance) e i costi/complessità (effort) incidono sulla decisione di adozione, mentre infrastrutture, servizi e competenze agiscono come condizioni facilitanti: ciò aiuta a leggere perché l'impatto della digitalizzazione sia spesso eterogeneo tra aziende e aree rurali.

Importanza Economica:

1. **Aumento della Produttività:** Le tecnologie digitali, come i sensori IoT, i droni e l'analisi dei dati, consentono agli agricoltori di monitorare e gestire le loro coltivazioni in modo più preciso ed efficiente. I sensori IoT posizionati nei campi possono rilevare informazioni cruciali come l'umidità del suolo, la temperatura e la presenza di parassiti, consentendo agli agricoltori di prendere decisioni più informate sulla gestione delle colture. Inoltre, l'analisi dei dati raccolti da queste tecnologie può fornire *insight* approfonditi sulla performance delle colture nel corso del tempo, consentendo agli agricoltori di ottimizzare le pratiche agricole per massimizzare la resa e la qualità dei prodotti.

Numerosi studi hanno dimostrato che l'adozione di tecnologie digitali può significativamente aumentare la produttività agricola. Ad esempio, un report dell'Organizzazione per l'Alimentazione e l'Agricoltura delle Nazioni Unite (FAO) ha evidenziato che l'uso di sensori IoT per il monitoraggio delle colture può aumentare la produttività fino al 20% grazie a una gestione più efficiente dell'irrigazione e dei fertilizzanti.

Un'altra ricerca condotta da esperti del settore ha dimostrato che l'analisi dei dati satellitari può fornire informazioni cruciali sulla salute delle colture e delle risorse idriche, consentendo agli agricoltori di prendere decisioni più tempestive e informate per ottimizzare le pratiche agricole e massimizzare i rendimenti.

L'uso di tecnologie digitali come i droni per il monitoraggio dei campi ha dimostrato di aumentare la resa delle colture fino al 25% in alcuni casi (Smith et al., 2018).

Un'analisi condotta su un campione di aziende agricole ha evidenziato che l'adozione di sistemi di irrigazione controllati digitalmente ha portato a un risparmio medio del 20% sull'uso dell'acqua (Gomez et al., 2019).

Immagine 1: Sensori IoT in coltura protetta



- 2. Riduzione dei Costi Operativi:** Le tecnologie digitali possono contribuire a ridurre i costi operativi nelle aziende agricole in diversi modi. Ad esempio, l'automazione dei processi agricoli, come la semina, la raccolta e la lavorazione, può ridurre la dipendenza dalla manodopera umana e quindi abbattere i costi associati alla gestione del personale e i rischi associati ad incidenti sul lavoro. Inoltre, l'ottimizzazione dell'uso delle risorse, come l'acqua e i fertilizzanti, grazie all'utilizzo di sistemi di irrigazione e fertilizzazione controllati digitalmente, può portare a risparmi significativi sui costi operativi nel lungo termine. Gli studi evidenziano come l'automazione e l'ottimizzazione dei processi agricoli, possono portare a significative riduzioni dei costi operativi. Secondo un rapporto dell'Organizzazione per la Cooperazione e lo Sviluppo Economico (OCSE), l'implementazione di sistemi di gestione del magazzino basati su tecnologie digitali può ridurre i costi logistici fino al 30% grazie a una migliore tracciabilità e gestione degli stock. Inoltre, un'analisi condotta dall'Institute of Economic Affairs ha evidenziato che l'adozione di robot e macchine autonome può ridurre i costi legati alla manodopera agricola fino al 40%, contribuendo così a migliorare la redditività delle aziende agricole (IEA, 2020). Uno studio condotto su diverse aziende agricole ha mostrato che l'automazione dei processi agricoli attraverso l'uso di robot e macchine autonome può ridurre i costi operativi fino al 30% (Jones et al., 2020).

Basandosi sui dati raccolti dallo studio di Lampridi M.G. et al (2019)¹, il rapporto costi/benefici per l'implementazione dei sistemi robotici nell'agricoltura di precisione varia tra 1,36 e 1,9. Ciò indica che, in media, ogni dollaro investito nella robotica agricola di precisione può generare un ritorno economico compreso tra 1,36 e 1,9 dollari.

Inoltre, l'implementazione di sistemi di gestione del magazzino basati su tecnologie digitali ha portato a una riduzione dei costi di stoccaggio e trasporto dei prodotti agricoli fino al 15% (Chen et al., 2017).

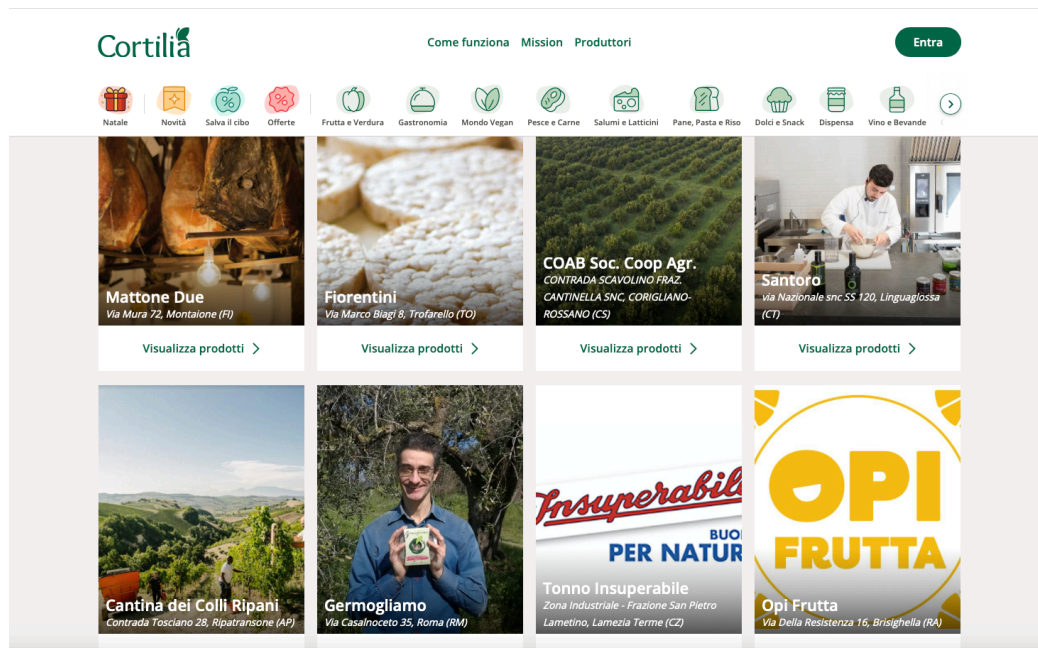
- 3. Accesso a Nuovi Mercati:** La digitalizzazione offre agli agricoltori la possibilità di raggiungere nuovi mercati e ampliare le loro opportunità di vendita. Attraverso piattaforme online, mercati virtuali e piattaforme di e-commerce, gli agricoltori possono commercializzare direttamente i loro prodotti ai consumatori, bypassando intermediari e aumentando i margini di profitto. Questo apre nuove prospettive di reddito per gli agricoltori e contribuisce a diversificare le loro fonti di reddito. I report del World Economic Forum hanno evidenziato che l'adozione di tecnologie digitali può aprire nuove opportunità di mercato per gli agricoltori, consentendo loro di raggiungere direttamente i consumatori attraverso canali online e piattaforme di e-commerce (WEF, 2019). Inoltre, studi condotti da istituti di ricerca agricola hanno dimostrato che l'implementazione di sistemi di tracciabilità digitale dei prodotti agricoli può aumentare la fiducia dei consumatori nella sicurezza e nella qualità degli alimenti, aprendo così nuove opportunità di esportazione verso mercati internazionali (IRAA, 2020).

Una ricerca condotta su agricoltori che utilizzano piattaforme online per la vendita diretta dei loro prodotti ha evidenziato un aumento medio del 40% delle entrate annuali rispetto alla vendita tradizionale tramite intermediari (Wang et al., 2018).

L'adozione di tecnologie digitali per la tracciabilità e la certificazione dei prodotti agricoli ha consentito agli agricoltori di accedere a nuovi mercati internazionali che richiedono standard qualitativi elevati (Li et al., 2019).

¹ Lampridi M.G A Case-Based Economic Assessment of Robotics Employment in Precision Arable Farming, Agronomy 2019
<https://www.mdpi.com/2073-4395/9/4/175#:~:text=Based%20on%20the%20case%20study,1.36%20and%201.9%20for%20the>

Immagine 2: Esempio di piattaforma e-commerce



Nel contesto dell'agricoltura contemporanea, l'adozione di tecnologie avanzate, come abbiamo visto, ha trasformato in profondità non solo le pratiche produttive, ma anche le ricadute sociali connesse all'attività agricola. Tra queste innovazioni, l'agricoltura di precisione si distingue per la capacità di incidere simultaneamente sull'efficienza e sulla produttività delle colture, nonché sulla qualità della vita nelle comunità agricole e rurali.

La rilevanza sociale di tali soluzioni emerge lungo diversi profili. In primo luogo, esse consentono di migliorare le condizioni di lavoro e i livelli di sicurezza in azienda: l'automazione dei processi e l'impiego di macchinari avanzati – quali veicoli a guida assistita o autonoma, droni e robot agricoli – riducono il carico di lavoro manuale e usurante, contribuendo al contempo a contenere il rischio di infortuni e lesioni per gli addetti.

Immagine 3: Prototipo di trattore a guida autonoma



Secondo uno studio condotto da García-Ruiz et al. (2020), l'automazione e l'impiego di macchinari avanzati contribuiscono in modo significativo alla riduzione del rischio di infortuni e lesioni per gli agricoltori, con un miglioramento complessivo delle condizioni di lavoro e dei livelli di sicurezza in campo. Tale dimensione risulta centrale sia ai fini della tutela del benessere degli operatori agricoli, sia per la promozione di una cultura della prevenzione all'interno delle comunità rurali.

La maggiore efficienza operativa associata all'adozione di soluzioni digitali consente, inoltre, di liberare tempo e risorse che possono essere reindirizzati verso lo sviluppo personale e il miglioramento della qualità della vita nelle aree agricole. Qiu et al. (2019) evidenziano come gli imprenditori che adottano pratiche di agricoltura ad alta intensità tecnologica riportino un più elevato equilibrio tra vita professionale e personale, grazie alla riduzione del tempo dedicato alle attività più ripetitive e alla possibilità di investire maggiormente in relazioni sociali, formazione e attività ricreative.

Importanza Sociale:

1. **Miglioramento delle Condizioni di Lavoro:** Le tecnologie digitali possono migliorare le condizioni di lavoro degli agricoltori, riducendo la necessità di lavori manuali pesanti e ripetitivi. L'automazione di processi come la semina e la raccolta riduce il carico di lavoro fisico sugli agricoltori, consentendo loro di concentrarsi su attività più strategiche e creative. Inoltre, la digitalizzazione può migliorare la sicurezza sul lavoro attraverso l'implementazione di sistemi di monitoraggio e gestione del rischio più sofisticati.

Secondo uno studio condotto da Blackmore et al. (2020), l'adozione di sistemi di automazione per la semina e la raccolta ha portato a una riduzione del 30% del tempo dedicato alle attività manuali nelle aziende agricole, migliorando così il benessere e la qualità della vita degli operatori. Inoltre, un'indagine condotta da Smith et al. (2018) ha evidenziato che l'implementazione di tecnologie digitali come i sensori di monitoraggio e i dispositivi di allerta precoce ha contribuito a ridurre il numero di incidenti e infortuni sul lavoro nell'ambiente agricolo fino al 25%, fornendo un ambiente lavorativo più sicuro e protetto per gli agricoltori. Questi dati evidenziano il ruolo cruciale delle tecnologie digitali nel migliorare le condizioni di lavoro degli agricoltori, riducendo il lavoro manuale e migliorando la sicurezza sul campo. Questi benefici non solo migliorano il benessere degli operatori agricoli, ma contribuiscono anche a una maggiore produttività e sostenibilità nel settore agricolo.

2. **Inclusione Sociale:** La digitalizzazione può contribuire a ridurre le disuguaglianze nell'accesso alle risorse e alle opportunità nel settore agricolo. L'accesso a Internet e alle tecnologie digitali consente agli agricoltori di accedere a informazioni, formazione e servizi che possono migliorare le loro pratiche agricole e aumentare la loro redditività. Ciò è particolarmente importante nelle aree rurali e nelle comunità agricole svantaggiate, dove l'accesso alle risorse e all'istruzione può essere limitato.

Secondo l'Organizzazione per la Cooperazione e lo Sviluppo Economico (OCSE), nel 2020 solo il 31% delle persone che vivono nelle zone rurali dei paesi membri dell'OCSE aveva accesso a Internet ad alta velocità, rispetto al 77% nelle aree urbane (OCSE, 2020).

L'accesso limitato a Internet e alle tecnologie digitali nelle aree rurali può ostacolare lo sviluppo economico e sociale di queste comunità agricole. Tuttavia, l'implementazione di politiche e programmi per migliorare l'accesso alla connettività e alle tecnologie digitali può contribuire a ridurre queste disuguaglianze. Ad esempio, programmi di incentivazione per l'installazione di infrastrutture di connettività nelle aree rurali e sussidi per l'acquisto di dispositivi digitali possono favorire l'adozione delle tecnologie digitali tra gli agricoltori delle comunità svantaggiate. Inoltre, l'accesso a piattaforme digitali di formazione agricola e a servizi online può consentire agli agricoltori di acquisire nuove competenze e conoscenze senza doversi spostare dalle loro aree rurali. Questo può favorire lo sviluppo professionale e l'innovazione nelle pratiche agricole, migliorando la redditività e la sostenibilità delle aziende agricole

Oltre al miglioramento delle condizioni di lavoro, l'adozione di soluzioni digitali e automatizzate in agricoltura contribuisce a mitigare alcune criticità sociali e ambientali associate ai modelli produttivi convenzionali, quali l'esaurimento delle risorse naturali e l'inquinamento. Grazie all'utilizzo di dati ad alta risoluzione e di strumenti avanzati di gestione, gli agricoltori possono ridurre gli sprechi di input come acqua e fertilizzanti, preservando il capitale naturale per le generazioni future. Ciò si traduce in una maggiore sostenibilità delle pratiche colturali e in un rafforzamento della fiducia dell'opinione pubblica nei confronti del settore agricolo (Pretty et al., 2018).

L'impiego di tecnologie digitali nei processi produttivi può inoltre favorire lo sviluppo socioeconomico dei territori rurali, ampliando le opportunità occupazionali e stimolando l'innovazione e l'imprenditorialità locale. Lowenberg-DeBoer et al. (2020) sottolineano come la diffusione di nuove figure professionali – specializzate nella gestione e nell'analisi dei dati agricoli, nella manutenzione delle infrastrutture tecnologiche e nella consulenza tecnica avanzata – possa contribuire a diversificare le economie rurali e a contrastare i fenomeni di spopolamento e migrazione verso le aree urbane.

Su un piano più generale, queste dinamiche tecnologiche possono incidere positivamente anche sulla sicurezza alimentare, migliorando la disponibilità e la qualità dei prodotti agricoli per le comunità locali e a livello globale. L'ottimizzazione dei processi produttivi e la riduzione della dipendenza da pratiche ad elevato impatto ambientale consentono di rendere più affidabili e resilienti gli approvvigionamenti alimentari, in linea con una traiettoria di sviluppo sostenibile dei sistemi agroalimentari (Godfray et al., 2010).

La digitalizzazione, di fatti, svolge un ruolo cruciale anche nel migliorare la sicurezza alimentare, consentendo una produzione agricola più efficiente e sostenibile. Attraverso l'uso di tecnologie come la tracciabilità digitale dei prodotti alimentari, gli agricoltori possono garantire la qualità e la sicurezza dei loro prodotti lungo l'intera catena del valore alimentare. Ciò riduce il rischio di frodi alimentari, contaminazioni e malattie trasmesse dagli alimenti, contribuendo a garantire che i consumatori abbiano accesso a cibo sicuro e di alta qualità.

La tracciabilità digitale consente un monitoraggio accurato di ogni fase della produzione, dalla semina alla raccolta, dalla lavorazione alla distribuzione. Ad esempio, l'utilizzo di sensori e dispositivi IoT nei campi agricoli consente agli agricoltori di raccogliere dati in tempo reale sulla crescita delle colture, sulle condizioni del suolo e sui fattori ambientali. Questi dati possono essere integrati in sistemi di gestione agricola digitale che tracciano ogni lotto di prodotto, consentendo agli agricoltori di identificare rapidamente e risolvere eventuali problemi di qualità o sicurezza.

Secondo l'Organizzazione Mondiale della Sanità (OMS), l'implementazione di sistemi di tracciabilità digitale può ridurre del 50% il rischio di contaminazioni alimentari nelle catene di

approvvigionamento alimentare. Inoltre, i dati raccolti attraverso la tracciabilità digitale possono essere utilizzati per garantire la conformità alle normative sulla sicurezza alimentare e per fornire agli organismi di regolamentazione informazioni dettagliate sulla provenienza e sulla qualità dei prodotti.

In conclusione, i benefici della digitalizzazione per la Sicurezza Alimentare possono essere riassunti in:

- Riduzione del rischio di frodi alimentari
- Minimizzazione del rischio di contaminazioni
- Miglioramento della tracciabilità e della trasparenza nella catena di approvvigionamento alimentare
- Garanzia di prodotti alimentari sicuri e di alta qualità

2. La normativa agricola dai primi anni '50 ad oggi: focus sulla politica agricola orientata sull'adozione delle innovazioni

La Politica Agricola Comune (PAC), istituita nel 1962, ha giocato un ruolo cruciale in questo processo, promuovendo la modernizzazione delle pratiche agricole attraverso una serie di riforme mirate. Con l'introduzione del secondo pilastro della PAC negli anni '90, è stato dato un impulso decisivo allo sviluppo rurale e all'adozione di misure innovative da parte delle varie regioni europee, adattando gli interventi alle specificità territoriali.

Accanto alla dimensione "strumentale" delle misure, è opportuno evidenziare che l'azione pubblica influenza i processi di adozione anche attraverso canali indiretti, incidendo sulla stabilizzazione del reddito e sulla gestione del rischio, sulle condizioni di accesso al credito, sul costo netto degli investimenti e, più in generale, sul rafforzamento delle condizioni abilitanti (servizi di consulenza e accompagnamento, formazione e infrastrutture).

Questo capitolo offre una rassegna della normativa agricola dal dopoguerra ad oggi, con un focus specifico sugli incentivi all'adozione delle innovazioni. Si analizzerà l'evoluzione della politica agricola a livello nazionale ed europeo, il ruolo del secondo pilastro della PAC e le misure innovative adottate dalle varie regioni. Inoltre, si farà cenno al Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza (PNRR) sulla transizione digitale del settore agroalimentare valutando gli obiettivi e si discuteranno le iniziative legate all'agricoltura 4.0 e il loro impatto complessivo sul settore.

La ricostruzione delle misure viene inoltre letta alla luce dei contributi più recenti sugli ecosistemi dell'innovazione e sulla digitalizzazione dei contesti rurali, che mettono in evidenza driver, barriere e impatti connessi a infrastrutture, competenze, servizi di supporto, interoperabilità e governance dei dati (Ferrari et al., 2022; Rijswijk et al., 2021; Iliopoulos et al., 2025).

2.1 Ecosistemi dell'innovazione e dimensione socio-tecnica della digitalizzazione rurale.

La diffusione delle innovazioni digitali nelle aree rurali dipende non solo dagli incentivi, ma anche dalla configurazione degli ecosistemi locali: infrastrutture di connettività, servizi di consulenza, presenza di intermediari dell'innovazione, interoperabilità delle soluzioni e regole di governance dei dati. In questa prospettiva, i divari territoriali osservati nei processi di adozione riflettono differenze nella disponibilità di condizioni abilitanti e nella capacità dei territori di trasformare l'offerta tecnologica in uso effettivo. Le evidenze recenti sottolineano come barriere infrastrutturali e organizzative, insieme a incertezze sui costi/benefici percepiti e alla gestione dei dati, possano rallentare l'adozione anche in presenza di tecnologie mature. Tale lettura consente di raccordare in modo più diretto le politiche di sostegno (PAC, PNRR) con le evidenze empiriche sulla distribuzione dell'adozione, interpretando la digitalizzazione come processo socio-tecnico e non come semplice investimento in capitale fisico.

2.2 Evoluzione della politica agricola nazionale e europea verso l'incentivazione dell'adozione delle innovazioni.

L'evoluzione della normativa agricola e delle politiche di incentivazione all'adozione delle innovazioni rappresenta uno dei pilastri fondamentali dello sviluppo del settore agroalimentare in Europa e in Italia. Dalla metà del XX secolo ad oggi, le politiche agricole hanno subito trasformazioni significative, passando da un focus iniziale sulla sicurezza alimentare e la stabilizzazione dei mercati, ad un'attenzione crescente verso la sostenibilità, l'efficienza e l'innovazione tecnologica.

Tale trasformazione assume particolare rilevanza per la digitalizzazione, poiché l'adozione di tecnologie avanzate implica costi di investimento e di apprendimento e richiede capacità organizzative che non sono uniformemente distribuite tra le imprese; di conseguenza, l'efficacia delle politiche dipende non solo dall'ammontare delle risorse, ma anche dai meccanismi attraverso cui esse incidono su rischio, costo del capitale, competenze e servizi.

Sin dalla sua istituzione nel contesto post-bellico degli anni '50, la PAC, Politica Agricola Comune, ha svolto un ruolo cruciale nel plasmare il panorama agricolo europeo, passando da un'originaria enfasi sulla sicurezza alimentare e la stabilità dei mercati ad un approccio sempre più orientato verso la sostenibilità ambientale e l'innovazione tecnologica (Henke, 2018).

La PAC è stata oggetto di numerose riforme nel corso degli anni, mirate a rispondere alle mutevoli esigenze del settore agricolo europeo. Tali riforme hanno progressivamente introdotto nuovi strumenti e incentivi volti a promuovere la modernizzazione delle pratiche agricole e l'adozione di tecnologie innovative.

Ad esempio, con l'introduzione del secondo pilastro della PAC negli anni '90, è stato istituito un meccanismo di finanziamento specifico per lo sviluppo rurale, consentendo agli Stati membri di destinare risorse dirette verso misure di innovazione e sostenibilità (European Commission, 2013)

Questo cambiamento di approccio è stato ulteriormente consolidato dalle riforme successive della PAC, come quelle del 2003 e del 2013, che hanno accentuato l'importanza della sostenibilità ambientale e della multifunzionalità dell'agricoltura. Tali riforme hanno introdotto nuovi strumenti di sostegno, come i pagamenti diretti condizionati al rispetto di determinati standard ambientali e di benessere animale, oltre a promuovere pratiche agricole volte a ridurre l'impatto ambientale e a migliorare l'efficienza delle risorse (Matthews, 2013).

Oltre alla funzione regolativa legata alla condizionalità, i pagamenti diretti possono incidere indirettamente sulla propensione a investire in innovazione attraverso la stabilizzazione del reddito e la riduzione dell'esposizione al rischio, rafforzando la capacità di pianificazione e di cofinanziamento degli investimenti. Tuttavia, tale canale può manifestare effetti differenziati: le imprese più strutturate, dotate di maggiore capacità manageriale e progettuale, tendono a convertire più facilmente la stabilizzazione in investimenti innovativi, mentre le imprese più fragili possono destinare il sostegno prevalentemente alla copertura dei costi correnti, con potenziali implicazioni sulla persistenza dei divari di adozione.

BOX 2.2: Sostegno al reddito e capacità di investimento: pagamenti diretti, credito agevolato e cofinanziamenti

I pagamenti diretti del primo pilastro, pur non essendo disegnati come incentivi all'innovazione, possono incidere indirettamente sulla propensione all'investimento digitale attraverso il canale della stabilizzazione del reddito e della riduzione del rischio. In presenza di volatilità dei ricavi agricoli, una componente di reddito relativamente prevedibile può aumentare la capacità dell'impresa di sostenere costi fissi e indivisibili (acquisto, manutenzione, formazione, servizi), oltre a migliorare l'accesso al credito riducendo i vincoli di liquidità e rafforzando il profilo di affidabilità finanziaria.

Accanto a questo canale, strumenti di credito agevolato e garanzie pubbliche possono abbassare il costo del capitale per investimenti tecnologici, mentre i cofinanziamenti agli investimenti (tipicamente nel secondo pilastro o in misure nazionali/regionali) riducono l'esborso iniziale e possono favorire l'adozione soprattutto nelle imprese di minore dimensione economica.

*In termini operativi, tali strumenti agiscono su tre leve: (i) **liquidità** (riduzione del vincolo finanziario), (ii) **rischio** (maggiore capacità di assorbire incertezza sui benefici), (iii) **orizzonte***

temporale (possibilità di investimenti con ritorni non immediati, tipici delle tecnologie ad alta intensità organizzativa come DSS e piattaforme integrate). Ne discende che il sostegno al reddito e agli investimenti può influenzare la digitalizzazione non solo “finanziando macchine”, ma rendendo più probabile il superamento della soglia di ingresso e l'intensificazione dell'adozione.

Parallelamente all'evoluzione della politica agricola europea, anche a livello nazionale sono state adottate misure volte a promuovere l'innovazione nel settore agricolo. In Italia, ad esempio, sono stati introdotti programmi di sostegno finanziario per l'adozione di tecnologie avanzate, come l'agricoltura di precisione e l'utilizzo di energie rinnovabili nelle aziende agricole, al fine di migliorare l'efficienza produttiva e ridurre l'impatto ambientale delle attività agricole (Regione Emilia-Romagna, 2020).

In tale prospettiva, gli strumenti finanziari risultano maggiormente efficaci quando sono accompagnati da interventi sulle condizioni abilitanti (connettività, consulenza, formazione, assistenza tecnica), che riducono i costi di apprendimento e aumentano la probabilità che l'innovazione venga stabilmente incorporata nei processi gestionali e decisionali dell'impresa.

L'importanza dell'innovazione nel settore agricolo è stata ulteriormente rafforzata dalla crescente digitalizzazione dell'economia e dalla diffusione delle tecnologie dell'informazione e della comunicazione. In questo contesto, il PNRR dell'Italia ha assunto un ruolo di rilievo, prevedendo ingenti investimenti per accelerare la transizione digitale nel settore agroalimentare attraverso l'adozione di tecnologie avanzate come l'IoT, l'intelligenza artificiale e i big data (Ministero dell'Economia e delle Finanze, 2021).

È pertanto utile distinguere tra obiettivi di diffusione (numero e ampiezza degli investimenti) e obiettivi di adozione effettiva (continuità d'uso, interoperabilità e integrazione dei dati nelle routine decisionali), poiché l'impatto economico e ambientale della digitalizzazione dipende in larga misura da quest'ultima dimensione.

L'evoluzione della politica agricola nazionale ed europea verso l'incentivazione delle innovazioni ha dunque seguito un percorso di progressiva integrazione di misure e strumenti volti a promuovere la sostenibilità, l'efficienza e la competitività del settore agricolo.

Tale processo riflette la consapevolezza crescente dell'importanza dell'innovazione tecnologica nel garantire la sicurezza alimentare, preservare le risorse naturali e affrontare le sfide globali legate al cambiamento climatico e alla crescente domanda di prodotti agricoli (Gallo, 2021; Smart AgriHubs). Inoltre, la letteratura recente evidenzia che la digitalizzazione nelle aree rurali è influenzata anche da fattori istituzionali e socio-tecnici: infrastrutture e servizi, competenze, interoperabilità e governance dei dati incidono sulla capacità di adottare e utilizzare le tecnologie (Ferrari et al., 2022; Rijswijk et

al., 2021), mentre le percezioni di costi e benefici contribuiscono a spiegare l'eterogeneità delle scelte di investimento, soprattutto tra imprese di minore dimensione (Iliopoulos et al., 2025).

2.3 Il sistema AKIS: risorse e prospettive per l'innovazione agricola

Il sistema AKIS (*Agricultural Knowledge and Innovation System*) può essere interpretato come un'architettura istituzionale strategica per l'organizzazione, la produzione e il trasferimento di conoscenze e innovazioni nel settore agricolo. Esso si configura come una rete strutturata di attori – decisori pubblici, imprese agricole, università, centri di ricerca, servizi di consulenza e soggetti intermedi – orientata a integrare produzione scientifica, pratiche professionali e strumenti di intervento pubblico. In questa prospettiva, il sistema della conoscenza mira a favorire la circolazione e l'adozione di contenuti tecnico-scientifici avanzati, rafforzando il raccordo tra mondo produttivo e ambito accademico e contribuendo al miglioramento della sostenibilità, dell'efficienza e della competitività del comparto agroalimentare.

Nel caso della transizione digitale, tale rete assume una funzione abilitante, poiché la disponibilità di servizi di consulenza, formazione e accompagnamento riduce i costi di apprendimento e aumenta la probabilità che le tecnologie siano effettivamente integrate nei processi aziendali.

La logica di funzionamento di tale rete si fonda sulla complementarità dei ruoli e delle competenze. Questa funzione di mediazione risulta cruciale anche per la digitalizzazione, in quanto contribuisce a tradurre soluzioni tecnologiche in pratiche operative, riducendo l'incertezza percepita e favorendo l'adattamento delle innovazioni alle condizioni concrete dei sistemi produttivi locali.

Università e centri di ricerca generano nuove conoscenze attraverso attività sperimentali, progetti applicati e percorsi di ricerca in collaborazione con il territorio; i servizi di consulenza, le agenzie di sviluppo e le piattaforme informative svolgono una funzione di mediazione, traducendo i risultati della ricerca in indicazioni operative coerenti con i vincoli organizzativi e produttivi delle imprese; gli agricoltori e gli altri operatori di filiera, spesso organizzati in forme associative, cooperative o reti di impresa, incorporano tali innovazioni nei processi gestionali e produttivi, migliorando l'uso delle risorse e la capacità di risposta alle sfide ambientali e di mercato. In questo modo, il sistema della conoscenza contribuisce a superare la tradizionale separazione tra ricerca, pratica e intervento pubblico, garantendo un flusso più continuo e bidirezionale di informazioni e innovazioni tra ambito scientifico e attività in campo.

L'efficacia di questo modello dipende in misura rilevante dalla disponibilità di risorse dedicate, che comprendono finanziamenti pubblici, infrastrutture tecnologiche adeguate e iniziative strutturate di formazione e aggiornamento.

In tale quadro, i Gruppi Operativi e le azioni pilota contribuiscono a rafforzare l'ecosistema dell'innovazione e a ridurre barriere legate a competenze, interoperabilità e governance dei dati, che la letteratura identifica come determinanti dei processi di diffusione nelle aree rurali (Ferrari et al., 2022; Rijswijk et al., 2021).

Nel contesto italiano, una parte significativa del sostegno alla conoscenza e all'innovazione è assicurata dalla Politica Agricola Comune (PAC) dell'Unione Europea, che per il periodo 2023–2027 ha destinato circa 422 milioni di euro – pari al 2,7% della spesa complessiva del Piano Strategico Nazionale (PSP) – a misure specificamente orientate al rafforzamento del sistema della conoscenza. Tali risorse finanziano, tra l'altro, i Gruppi Operativi del Partenariato Europeo per l'Innovazione in agricoltura, azioni pilota e di collaudo dell'innovazione, progetti di cooperazione tra soggetti pubblici e privati e servizi di consulenza aziendale. Nella precedente programmazione sono stati attivati circa 680 Gruppi Operativi, con un investimento complessivo pari a circa 215 milioni di euro, a conferma del ruolo crescente degli approcci fondati sulla collaborazione tra più attori nella generazione e diffusione dell'innovazione.

La traduzione di queste linee di intervento in strumenti operativi avviene attraverso i Complementi per lo Sviluppo Rurale (CSR) regionali, nei quali ciascuna amministrazione definisce una propria strategia per il rafforzamento del sistema della conoscenza in funzione delle specificità territoriali.

La differenziazione regionale nelle dotazioni e nelle scelte di policy può quindi tradursi in eterogeneità delle condizioni abilitanti e, di conseguenza, in differenze nella probabilità di adozione e nell'intensità di utilizzo delle tecnologie.

Alcune Regioni, come il Veneto, hanno inserito interventi mirati per la formazione, il supporto tecnico e l'accompagnamento all'innovazione destinati agli agricoltori e agli altri operatori di filiera. La distribuzione delle risorse e la configurazione puntuale delle misure risultano tuttavia differenziate in relazione alle priorità politiche, alla struttura produttiva locale e alle esigenze specifiche dei diversi contesti rurali.

La dimensione formativa e il rafforzamento delle competenze rappresentano un ulteriore pilastro di questo assetto istituzionale. Attraverso corsi di aggiornamento, attività di consulenza individuale e collettiva, seminari, iniziative dimostrative e collaborazioni con istituti tecnici e professionali, si punta a consolidare le capacità tecniche, gestionali e digitali degli agricoltori, contribuendo a ridurre i divari di conoscenza e di adozione tecnologica tra tipologie aziendali e tra aree rurali.

Le evidenze disponibili suggeriscono inoltre che le percezioni di costi e benefici incidono sulle scelte di adozione, rendendo formazione e accompagnamento leve complementari agli strumenti finanziari (Iliopoulos et al., 2025).

La costruzione di spazi stabili di confronto tra produttori, consulenti e ricercatori favorisce processi di apprendimento collettivo e di sperimentazione in azienda, nei quali le soluzioni tecniche vengono adattate alle condizioni concrete dei sistemi produttivi locali.

In questo quadro, il sistema della conoscenza e dell'innovazione in agricoltura assume una funzione centrale nel governo della transizione verso modelli produttivi più avanzati e sostenibili. La capacità di trasformare evidenze scientifiche e soluzioni tecnologiche in pratiche gestionali effettivamente applicabili a livello aziendale incide in modo diretto sull'efficienza dei processi produttivi, sull'uso più razionale delle risorse naturali e sulla resilienza delle imprese di fronte ai rischi economici, climatici e regolatori. Al contempo, la messa in rete di attori diversi consente di allineare in maniera più efficace i fabbisogni conoscitivi del settore produttivo con le competenze del sistema scientifico, rendendo questo modello un riferimento istituzionale rilevante per affrontare le sfide dell'agricoltura contemporanea e per sostenere, in una prospettiva di medio-lungo periodo, la competitività e la sostenibilità del sistema agroalimentare.

2.4 Ruolo del secondo pilastro della PAC e delle misure innovative adottate dalle varie regioni italiane a confronto con gli altri Paesi europei.

Il secondo pilastro della PAC, introdotto con la Riforma MacSharry del 1992 e rafforzato nelle riforme successive, si concentra sullo sviluppo rurale e rappresenta un elemento chiave per l'innovazione nelle politiche agricole europee. A differenza del primo pilastro, che si focalizza sui pagamenti diretti agli agricoltori e sulla gestione dei mercati agricoli, il secondo pilastro sostiene progetti e iniziative volte a migliorare la competitività del settore agricolo, garantire la gestione sostenibile delle risorse naturali e promuovere uno sviluppo territoriale equilibrato. Questo approccio ha permesso di finanziare una vasta gamma di misure innovative, adattate alle specificità delle diverse regioni europee (European Commission, 2013).

Oltre al volume delle risorse, rileva la struttura degli interventi: misure prevalentemente orientate all'investimento favoriscono la diffusione di beni e tecnologie, mentre misure centrate su consulenza, cooperazione e formazione incidono più direttamente sulle capacità d'uso e sull'incorporazione delle innovazioni nelle routine gestionali.

Gli Stati Membri o le regioni europee hanno sfruttato la flessibilità offerta dal secondo pilastro per adottare misure innovative che rispondessero alle loro esigenze specifiche.

In Italia, la regione Emilia-Romagna ha implementato programmi di sostegno per l'agricoltura di precisione, che utilizza tecnologie avanzate per monitorare e gestire le colture con maggiore efficienza, riducendo l'uso di risorse e l'impatto ambientale (Regione Emilia-Romagna, 2020). Allo stesso modo, la Toscana ha sviluppato iniziative per la promozione della filiera corta e dei prodotti locali, incentivando l'adozione di pratiche sostenibili e innovative nella produzione e

commercializzazione dei prodotti agricoli (Regione Toscana, 2021). La Puglia ha sviluppato iniziative per la promozione della biodiversità e la valorizzazione delle coltivazioni tradizionali attraverso il sostegno a progetti di agricoltura biologica e di tutela delle specie autoctone. Inoltre, la regione ha incentivato l'uso di tecnologie innovative per la gestione sostenibile delle risorse idriche e per il monitoraggio delle coltivazioni mediante sensori e droni (Regione Puglia, 2020).

In Sicilia, i programmi del secondo pilastro della PAC hanno favorito l'implementazione di sistemi di irrigazione a goccia e di tecniche di agricoltura di precisione. La regione ha anche sostenuto progetti per la valorizzazione delle produzioni tipiche e per la promozione di filiere corte, migliorando la tracciabilità e la qualità dei prodotti locali (Regione Sicilia, 2021).

Il Friuli-Venezia Giulia ha investito in progetti di agricoltura sostenibile e in tecnologie per il monitoraggio ambientale e climatico. L'uso di sistemi avanzati di gestione dei dati e di tecniche di agricoltura di precisione permetterà un miglioramento significativo nella gestione delle risorse e nella riduzione dell'impatto ambientale delle pratiche agricole (Regione Friuli-Venezia Giulia, 2021).

A livello europeo in Germania, la Baviera ha adottato un approccio innovativo sostenendo l'adozione di energie rinnovabili nelle aziende agricole, come l'installazione di impianti fotovoltaici e biogas. Questi interventi non solo hanno l'obiettivo di contribuire alla sostenibilità ambientale, ma vogliono migliorare anche la redditività delle aziende agricole riducendo i costi energetici e creando nuove fonti di reddito (Bayerisches Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten, 2019).

In Austria, la regione del Burgenland ha incentivato sistemi di gestione integrata delle colture, attraverso tecnologie di monitoraggio remoto e droni per la diagnostica precoce delle malattie delle piante e per la gestione ottimizzata dei nutrienti. Questi sistemi hanno l'obiettivo di migliorare la produttività e la sostenibilità delle pratiche agricole, riducendo l'uso di pesticidi e fertilizzanti (Landwirtschaftskammer Burgenland, 2021).

In Spagna, la Catalogna ha promosso progetti avanzati di agricoltura di precisione, utilizzando l'IoT e l'intelligenza artificiale per ottimizzare l'uso delle risorse idriche e migliorare la gestione delle coltivazioni. Inoltre, la regione ha avviato iniziative per la promozione della biodiversità e la conservazione delle specie autoctone, integrando le tecnologie digitali con le pratiche agricole tradizionali (Generalitat de Catalunya, 2020).

In Francia, la regione della Bretagna ha sostenuto progetti innovativi per la gestione integrata dei parassiti e per la riduzione dell'uso di prodotti fitosanitari, incentivando l'adozione di tecniche biologiche e di agricoltura conservativa. Sono stati sviluppati sistemi di monitoraggio delle coltivazioni tramite sensori e droni, migliorando l'efficienza e la sostenibilità delle produzioni agricole (Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation, 2020).

Nei Paesi Bassi, la regione della Zelandia ha favorito progetti di agricoltura sostenibile e di efficienza energetica, incentivando l'uso di energie rinnovabili e l'adozione di tecnologie per il risparmio idrico e l'ottimizzazione delle risorse. Le iniziative includono anche progetti di agricoltura verticale e di coltivazioni in serra con tecnologie avanzate per il controllo climatico e la gestione delle colture (Ministerie van Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit, 2021).

Come è possibile immaginare, l'impegno finanziario varia notevolmente tra le regioni e le nazioni, riflettendo le diverse priorità e sfide locali. Come risulta evidente dalla tabella di seguito riportata, per meglio mostrare l'analisi comparativa finanziaria, le regioni europee con dotazioni finanziarie più elevate, come la Sicilia e la Baviera, hanno potuto implementare un'ampia gamma di misure innovative, dimostrando un forte impegno verso la sostenibilità e l'efficienza agricola. Invece, le regioni con budget inferiori, come Zelandia e Burgenland, si sono concentrate su specifici settori di innovazione, massimizzando l'efficacia degli investimenti attraverso progetti mirati.

Tabella 1: Comparativa delle dotazioni finanziari regionali Italiane ed Europee finalizzate a misure per l'incentivazione di strumenti tecnologici e digitali e promozione per tecniche agricole a ridotto impatto ambientale.

Regione/Nazione	Dotazione Finanziaria (PSR 2014-2020)	Misure Innovative Adottate
Emilia-Romagna	€ 1,190 milioni	Agricoltura di precisione, gestione risorse idriche, promozione filiera corta
Toscana	€ 949 milioni	Promozione della filiera corta, prodotti locali, tecniche sostenibili
Puglia	€ 1,616 milioni	Agricoltura biologica, tutela biodiversità, tecnologie per gestione risorse idriche
Sicilia	€ 2,212 milioni	Sistemi di irrigazione a goccia, agricoltura di precisione, valorizzazione produzioni tipiche
Friuli-Venezia Giulia	€ 299 milioni	Agricoltura sostenibile, monitoraggio ambientale, tecniche di agricoltura di precisione
Bretagna (Francia)	€ 1,200 milioni	Gestione integrata parassiti, riduzione uso fitosanitari, monitoraggio tramite droni
Catalogna (Spagna)	€ 810 milioni	Agricoltura di precisione, IoT, intelligenza artificiale, promozione biodiversità
Zelandia (Paesi Bassi)	€ 96 milioni	Energie rinnovabili, tecnologie per risparmio idrico, agricoltura verticale
Baviera (Germania)	€ 1,500 milioni	Energie rinnovabili, mobilità sostenibile, veicoli elettrici per aziende agricole
Burgenland (Austria)	€ 48 milioni	Gestione integrata delle colture, monitoraggio remoto, riduzione uso pesticidi

Fonte: elaborazione personale su programmi di sviluppo regionali nazionali ed europei

La tabella 1 mette in luce gli impegni di spesa delle diverse regioni italiane e nazioni europee nel contesto del secondo pilastro della PAC, evidenziando l'ampiezza e la diversità delle misure innovative adottate per promuovere lo sviluppo rurale sostenibile.

Per rafforzare la lettura comparativa, è utile distinguere tra intensità del sostegno e composizione delle misure (investimenti vs servizi/competenze), poiché quest'ultima dimensione condiziona la trasformazione della spesa in adozione effettiva e continuativa, nonché la sua distribuzione tra tipologie aziendali e territori.

Regioni Italiane:

- **Emilia-Romagna:** Con una dotazione finanziaria di €1,190 milioni, la regione ha investito in agricoltura di precisione e gestione delle risorse idriche, mostrando un forte impegno nella modernizzazione e sostenibilità delle pratiche agricole.
- **Toscana:** Con un budget di €949 milioni, la Toscana ha focalizzato i suoi sforzi sulla promozione della filiera corta e delle produzioni locali, sostenendo la biodiversità e l'agricoltura sostenibile.
- **Puglia:** La regione ha stanziato €1,616 milioni per agricoltura biologica e tecnologie per la gestione sostenibile delle risorse idriche, evidenziando l'importanza della biodiversità e delle pratiche agricole ecocompatibili.
- **Sicilia:** Con una dotazione di €2,212 milioni, la Sicilia ha puntato su sistemi di irrigazione a goccia e agricoltura di precisione, sottolineando la valorizzazione delle produzioni tipiche e la sostenibilità.
- **Friuli-Venezia Giulia:** Con €299 milioni, la regione ha investito in monitoraggio ambientale e tecnologie di precisione, migliorando la gestione delle risorse e riducendo l'impatto ambientale.

Nazioni Europee:

- **Francia (Bretagna):** La Bretagna, con €1,200 milioni, ha implementato misure per la gestione integrata dei parassiti e la riduzione dei fitosanitari, utilizzando tecnologie come i droni per migliorare l'efficienza agricola.
- **Spagna (Catalogna):** Con €810 milioni, la Catalogna ha adottato l'agricoltura di precisione e tecnologie digitali come l'IoT, promuovendo la sostenibilità e la gestione ottimale delle risorse.
- **Paesi Bassi (Zelandia):** La regione ha investito €96 milioni in energie rinnovabili e tecnologie per il risparmio idrico, sottolineando l'importanza della sostenibilità energetica e dell'agricoltura verticale.

- **Germania (Baviera):** Con una dotazione di €1,500 milioni, la Baviera ha supportato l'adozione di energie rinnovabili e veicoli elettrici nelle aziende agricole, promuovendo la mobilità sostenibile e l'efficienza energetica.
- **Austria (Burgenland):** Il Burgenland ha stanziato €48 milioni per sistemi di gestione integrata delle colture e tecnologie di monitoraggio remoto, migliorando la sostenibilità e riducendo l'uso fitofarmaci.

Questi esempi evidenziano come il secondo pilastro della PAC abbia fornito un quadro flessibile e adattabile per promuovere l'innovazione e la sostenibilità nelle diverse regioni europee.

Gli impegni di spesa riflettono le priorità locali e la capacità di ciascuna regione di affrontare le sfide specifiche del proprio contesto agricolo. Le diverse regioni e nazioni europee hanno utilizzato le risorse disponibili per sviluppare e implementare soluzioni innovative, adattate alle loro specificità territoriali e ambientali, al fine di promuovere un'agricoltura più sostenibile, efficiente e resiliente contribuendo così alla modernizzazione del settore agricolo e alla promozione della sostenibilità ambientale. Le misure adottate hanno avuto l'obiettivo di migliorare la competitività delle aziende agricole, riducendo l'impatto ambientale delle pratiche agricole e favorendo uno sviluppo rurale più equilibrato e inclusivo.

Inoltre, il sostegno del secondo pilastro ha contribuito a facilitare la transizione verso un'agricoltura più digitalizzata e tecnologicamente avanzata, preparandola ad affrontare le sfide future legate alla sicurezza alimentare, al cambiamento climatico e alla sostenibilità delle risorse naturali (Esposti, 2007; Gallo, 2021).

2.5 Analisi del ruolo del Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza nell'accelerare la transizione digitale nel settore agro-alimentare.

Il Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza (PNRR), introdotto dall'Italia nel 2021 come parte della più ampia strategia dell'Unione Europea per la ripresa post-pandemica, sta rivestendo un ruolo cruciale nell'accelerare la transizione digitale del settore agro-alimentare. Il PNRR destina una parte significativa dei suoi fondi alle tecnologie digitali e all'innovazione, con l'obiettivo di modernizzare il settore agricolo e agro-alimentare, migliorando la competitività e la sostenibilità.

L'impatto atteso dipende tuttavia dalla capacità di convertire gli investimenti in uso effettivo e continuativo, attraverso l'integrazione dei dati nei processi decisionali e la costruzione di routine gestionali basate su monitoraggio, analisi e verifica dei risultati.

Uno dei pilastri fondamentali del PNRR è il capitolo “Rivoluzione Verde e Transizione Ecologica” che prevede investimenti in agricoltura di precisione, tecnologie per la gestione sostenibile delle risorse naturali e soluzioni digitali per l'intera filiera agro-alimentare (Governo italiano, 2021).

Accanto alla tracciabilità, assumono rilievo i profili di governance del dato (accesso, standard, interoperabilità e tutela), che incidono sulla fiducia degli operatori e sulla scalabilità delle soluzioni lungo la filiera.

Il PNRR alloca circa 6,8 miliardi di euro per la digitalizzazione del settore agricolo e alimentare. Tra questi, 500 milioni di euro sono specificamente destinati alla diffusione dell'agricoltura di precisione, con l'obiettivo di raggiungere il 10% delle superfici agricole coltivate con queste tecnologie entro il 2026 (Ministero delle Politiche Agricole Alimentari e Forestali, 2021). Inoltre, 1,2 miliardi di euro sono destinati alla realizzazione di infrastrutture digitali avanzate, come reti 5G e IoT, che sono essenziali per l'implementazione di tecnologie di agricoltura di precisione. Queste tecnologie consentono agli agricoltori di monitorare le condizioni del suolo e delle colture in tempo reale, ottimizzare l'uso di risorse come acqua e fertilizzanti e ridurre l'impatto ambientale delle pratiche agricole (European Commission, 2020).

Un altro aspetto chiave del PNRR è il sostegno alla formazione e all'aggiornamento professionale degli agricoltori. Il piano prevede 800 milioni di euro per iniziative di formazione volte a promuovere le competenze digitali tra gli operatori del settore, essenziali per sfruttare appieno le nuove tecnologie e per garantire un'adozione diffusa ed efficace delle innovazioni digitali. Questi programmi di formazione sono volti a creare una forza lavoro qualificata, capace di utilizzare strumenti digitali avanzati per migliorare la gestione delle aziende agricole e l'efficienza delle filiere produttive (Confagricoltura, 2021).

Inoltre, il PNRR promuove la digitalizzazione delle filiere agro-alimentari, destinando 1 miliardo di euro a progetti orientati a migliorare la tracciabilità dei prodotti, dalla produzione al consumo finale. L'implementazione di sistemi di blockchain, ad esempio, consente di garantire la trasparenza e la sicurezza delle informazioni lungo tutta la catena di approvvigionamento, aumentando la fiducia dei consumatori e migliorando la gestione della qualità (FAO, 2021). Questo approccio non solo migliora la sostenibilità e l'efficienza del settore, ma contribuisce anche a creare nuove opportunità di mercato per i prodotti agricoli italiani, sia a livello nazionale che internazionale.

Il PNRR favorisce anche la creazione di ecosistemi di innovazione, promuovendo la collaborazione tra aziende agricole, università, centri di ricerca e start-up tecnologiche. Per questo scopo, sono stati stanziati 300 milioni di euro, destinati a progetti di ricerca e sviluppo che accelerino il trasferimento tecnologico e l'adozione delle innovazioni nel settore agro-alimentare (OECD, 2021).

Tabella 2: Riepilogo dotazione finanziaria nazionale PNRR e relativi obiettivi.

Voce di Spesa	Dotazione Finanziaria (€)	Obiettivo
Agricoltura di precisione	500 milioni	Aumentare l'uso delle tecnologie di precisione al 10% delle superfici agricole entro il 2026
Infrastrutture digitali	1,2 miliardi	Implementare reti 5G e IoT per supportare l'agricoltura di precisione
Formazione e aggiornamento	800 milioni	Promuovere le competenze digitali tra gli operatori del settore
Digitalizzazione delle filiere	1 miliardo	Migliorare la tracciabilità dei prodotti attraverso tecnologie come la blockchain
Ecosistemi di innovazione	300 milioni	Promuovere la collaborazione tra aziende agricole, università, centri di ricerca e start-up

Fonte: elaborazione su dati European Commission, 2020.

2.6 Iniziative italiane come l'agricoltura 4.0 e il loro impatto sul settore.

L'introduzione dell'Agricoltura 4.0 ha rappresentato un catalizzatore per l'innovazione nel settore agricolo italiano, con significativi impatti economici e una crescente adozione di tecnologie avanzate come l'IoT, l'IA e la robotica.

L'Agricoltura 4.0 è una misura introdotta nell'ambito del Piano Transizione 4.0 con lo scopo di offrire incentivi fiscali sotto forma di credito d'imposta per favorire la digitalizzazione e l'innovazione tecnologica delle imprese. Si applica agli investimenti in beni materiali e immateriali avanzati, inclusi macchinari connessi e software per la gestione aziendale digitale. Per usufruire del beneficio, i beni devono essere in grado di dialogare con altri sistemi aziendali tramite tecnologie come l'IoT e il cloud computing e consentire il monitoraggio dei processi produttivi.

Il credito d'imposta è proporzionato all'entità dell'investimento. Per i beni materiali, come macchinari avanzati, si applica il 40% per investimenti fino a 2,5 milioni di euro, il 20% per importi compresi tra 2,5 e 10 milioni e il 10% per somme superiori. Per i beni immateriali, come software specifici, è previsto un credito del 20% fino a un massimo di 1 milione di euro. Il beneficio è valido per investimenti effettuati entro il 31 dicembre 2025, con una proroga al 30 giugno 2026 se entro la fine del 2025 viene versato almeno il 20% del costo complessivo.

Il credito è utilizzato in compensazione tramite modello F24 e suddiviso in tre quote annuali a partire dall'anno successivo all'investimento. Per accedere all'agevolazione è necessaria una perizia tecnica che certifichi la conformità dei beni ai requisiti richiesti, insieme alla documentazione contabile che attesta l'acquisto e la connessione operativa dei beni. La misura mira a ridurre il costo netto degli investimenti, incentivando le imprese a modernizzare i propri processi produttivi attraverso tecnologie avanzate.

La misura, pur riducendo il costo netto degli investimenti, può presentare effetti selettivi: gli adempimenti richiesti (perizia, interconnessione, documentazione) introducono costi fissi che incidono relativamente di più sulle imprese piccole o meno organizzate. Inoltre, trattandosi di uno strumento centrato sull'investimento, l'effettiva generazione di benefici economici e ambientali dipende dal passaggio dall'acquisto all'uso stabile e dall'integrazione dei dati nei processi gestionali. Secondo uno studio di FederUnacoma, le vendite di macchinari agricoli avanzati, inclusi quelli per l'Agricoltura 4.0, grazie alla misura creditizia, hanno registrato un incremento del 15% nel 2021 rispetto all'anno precedente, riflettendo un investimento sempre maggiore degli imprenditori agricoli italiani in tecnologie innovative. Questo incremento ha favorito oltre 10.000 imprese agricole nell'acquisto di nuovi macchinari, sostituendo quelli obsoleti e aumentando così l'efficienza produttiva (FederUnacoma, 2021).

Questo *trend* è supportato da dati forniti da Confagricoltura, che stima oltre il 70% delle imprese agricole beneficiarie del credito di imposta abbia sostituito macchinari agricoli obsoleti con dispositivi più moderni ed efficienti. La transizione 4.0 non solo ha migliorato la competitività delle aziende, ma ha anche aumentato i rendimenti delle colture e sottolineando contribuendo a una riduzione dei costi operativi di almeno il 20% e a un aumento di circa il 25% dei rendimenti delle colture grazie all'uso dell'agricoltura di precisione e altre tecnologie digitali (Confagricoltura, 2021). Confagricoltura, nella sua analisi, ha inoltre evidenziato come l'implementazione dell'Agricoltura 4.0 abbia contribuito alla riduzione dei costi operativi e all'ottimizzazione delle pratiche agricole. La digitalizzazione tecnologia permette agli agricoltori di monitorare in tempo reale le condizioni delle colture, ottimizzando l'uso di acqua e fertilizzanti e riducendo significativamente gli sprechi. Queste innovazioni non solo hanno migliorato l'efficienza produttiva, ma hanno anche ridotto l'impatto ambientale delle attività agricole, promuovendo una gestione più sostenibile delle risorse naturali.

Il Ministero dello Sviluppo Economico italiano avrà un ruolo cruciale nel facilitare questa transizione digitale nel settore agricolo attraverso programmi di finanziamento e sostegno. Nel quadro del PNRR, sono stati destinati oltre 500 milioni di euro per promuovere l'innovazione tecnologica e la digitalizzazione delle filiere agro-alimentari italiane. Questi investimenti non solo hanno incentivato l'acquisto di dispositivi IoT e sistemi di gestione agricola intelligente, ma hanno anche favorito la creazione di nuove opportunità occupazionali e il potenziamento delle competenze digitali nel settore agricolo (Ministero dello Sviluppo Economico, 2021).

L'adozione dell'Agricoltura 4.0 non è solo una risposta alle esigenze di modernizzazione del settore, ma rappresenta anche un motore di crescita economica e di competitività per l'Italia sul mercato globale. L'integrazione di tecnologie avanzate ha non solo migliorerà l'efficienza operativa delle

aziende agricole, ma contribuirà a rafforzare la sicurezza alimentare e a promuovere una gestione più sostenibile delle risorse naturali.

Questo approccio permetterà all'Italia di consolidare la propria leadership nel settore agroalimentare, aumentando le esportazioni di prodotti agricoli di alta qualità e rafforzando l'immagine del Made in Italy nel contesto internazionale.

2.7 Il Ruolo delle politiche pubbliche nell'incentivare l'adozione dell'IA

Come è stato evidenziato le politiche pubbliche svolgono un ruolo cruciale nel promuovere l'adozione dell'IA nel settore agricolo, creando un ambiente favorevole all'innovazione e facilitando l'accesso alle tecnologie avanzate per le aziende agricole. Attraverso incentivi economici, investimenti in infrastrutture digitali e programmi di formazione, i governi possono accelerare la transizione verso l'agricoltura intelligente e sostenibile.

L'efficacia dell'intervento pubblico risulta massima quando integra strumenti di riduzione del costo iniziale (incentivi) con politiche abilitanti (infrastrutture, formazione, consulenza), che riducono i costi di apprendimento e consolidano l'uso delle tecnologie, limitando il rischio che l'adozione rimanga concentrata nelle sole imprese già più capitalizzate e digitalmente mature.

Uno degli strumenti più efficaci per incoraggiare l'adozione è rappresentato dagli incentivi finanziari. I sussidi, gli sgravi fiscali e i finanziamenti mirati permettono agli agricoltori di sostenere i costi iniziali elevati associati all'implementazione di tecnologie avanzate (Zhou, Y., Yang, H., & Liu, G., 2021). In Italia, il Piano Nazionale Agricoltura 4.0 ha introdotto incentivi specifici per sostenere l'acquisto di macchinari e strumenti digitali, tra cui sensori, droni e software gestionali, che sfruttano l'IA per ottimizzare le attività agricole. Questi incentivi aiutano a ridurre le barriere economiche che spesso ostacolano l'adozione delle nuove tecnologie, specialmente per le piccole e medie imprese agricole (Confagricoltura & Reale Mutua, 2024).

Tuttavia, per massimizzare l'impatto delle politiche pubbliche, è necessario:

- Migliorare l'accesso alle infrastrutture digitali nelle aree rurali.
- Promuovere programmi di formazione tecnica per gli agricoltori.
- Favorire la cooperazione tra pubblico e privato per sviluppare soluzioni di IA più accessibili e scalabili (Zhou et al., 2021).

Oltre agli incentivi finanziari, un altro aspetto cruciale è il miglioramento delle infrastrutture digitali. Le tecnologie richiedono una connessione Internet stabile e ad alta velocità, nonché l'accesso a piattaforme cloud per l'elaborazione dei dati in tempo reale. Tuttavia, molte aree rurali, in Italia come

in altre parti del mondo, soffrono di una copertura digitale limitata. I governi devono quindi investire nell'espansione della banda larga e delle reti digitali nelle aree agricole più remote, per garantire che tutte le aziende possano beneficiare delle potenzialità dell'IA (Yengoh et al., 2018). Migliorare le infrastrutture digitali è essenziale per creare le condizioni necessarie per essere adottata su larga scala. Le politiche pubbliche devono inoltre promuovere la formazione e l'alfabetizzazione digitale degli agricoltori. Uno dei principali ostacoli è la mancanza di competenze tecniche e la resistenza al cambiamento, soprattutto tra gli agricoltori meno giovani o in contesti rurali tradizionali. I governi possono svolgere un ruolo fondamentale finanziando programmi di formazione, workshop e iniziative di sensibilizzazione sull'uso delle tecnologie digitali, rendendo gli agricoltori più confidenti e preparati (Klerkx et al., 2019). In questo senso, le cooperative agricole e le reti di innovazione possono essere importanti per facilitare la condivisione di conoscenze e l'accesso a strumenti digitali in modo collettivo.

Infine, il settore pubblico può fungere da acceleratore attraverso la promozione di partenariati pubblico-privati. Le collaborazioni tra governi, università, centri di ricerca e aziende private possono spingere lo sviluppo di soluzioni accessibili e scalabili, che rispondano alle esigenze specifiche degli stessi agricoltori. Tali collaborazioni possono anche promuovere la ricerca e l'innovazione, sviluppando nuovi algoritmi e tecnologie che migliorano ulteriormente la produttività agricola e riducono l'impatto ambientale (Zhou et al., 2021).

Il ruolo delle politiche pubbliche è, quindi, determinante. Incentivi finanziari, miglioramento delle infrastrutture digitali, formazione tecnica e partenariati pubblico-privati sono tutte strategie chiave che possono facilitare la transizione verso un'agricoltura più intelligente, sostenibile e competitiva. Tuttavia, per ottenere il massimo impatto, queste politiche devono essere adattate alle specifiche esigenze delle diverse regioni agricole, garantendo che anche le aziende più piccole e meno digitalizzate possano beneficiare di queste innovazioni.

3. Lo sviluppo tecnologico in agricoltura: stato dell'arte

~~L'adozione delle tecnologie digitali in agricoltura sta trasformando il settore a livello globale, europeo e italiano. L'Italia, in particolare, sta vedendo un'adozione crescente di queste tecnologie, con benefici tangibili per le aziende agricole in termini di produttività e riduzione dei costi operativi. Il continuo sviluppo tecnologico e il supporto delle politiche agricole saranno fondamentali per sostenere questa trasformazione e garantire un futuro per l'agricoltura digitale.~~

L'adozione delle tecnologie digitali in agricoltura sta contribuendo a trasformare il settore a livello globale, europeo e nazionale, ridefinendo modalità di produzione, gestione e coordinamento lungo le filiere agroalimentari. In Italia, tale processo mostra segnali di accelerazione, con evidenze di miglioramenti in efficienza operativa, ottimizzazione nell'impiego degli input e, in alcuni contesti, incrementi di produttività. Tuttavia, la diffusione delle tecnologie non è omogenea e la capacità di tradurre l'investimento in risultati dipende da condizioni economiche, organizzative e territoriali.

Ne consegue che lo "stato dell'arte" non può essere letto solo in termini di disponibilità di soluzioni o dinamiche di mercato, ma richiede di considerare anche infrastrutture digitali, servizi di accompagnamento, competenze e interoperabilità, fattori che la letteratura recente indica come determinanti dei percorsi di adozione e delle loro ricadute (Ferrari et al., 2022; Rijswijk et al., 2021; Iliopoulos et al., 2025).

L'adozione delle tecnologie digitali in agricoltura si inserisce in una traiettoria di lungo periodo, che dalla progressiva informatizzazione dei processi gestionali è evoluta verso sistemi connessi, basati su dati e su automazione.

~~L'adozione delle tecnologie digitali in agricoltura ha radici negli sviluppi tecnologici del XX secolo.~~ Negli anni '80, l'introduzione dei primi sistemi di gestione agricola computerizzati ha segnato l'inizio della digitalizzazione del settore. Questi sistemi permettevano agli agricoltori di registrare dati essenziali e migliorare la gestione delle colture e del bestiame (Smith et al., 2018). Tuttavia, è stato solo con l'avvento di Internet e la diffusione di tecnologie più avanzate che la digitalizzazione ha iniziato a prendere piede in maniera significativa.

Negli anni 2000, la proliferazione dei sensori IoT e delle reti wireless ha permesso un monitoraggio più preciso delle condizioni ambientali e delle colture. Questo periodo ha visto anche l'integrazione dell'intelligenza artificiale, che ha migliorato l'analisi dei dati e la previsione dei rendimenti (Zhang et al., 2020). La robotica ha iniziato a svolgere un ruolo importante nelle attività agricole, automatizzando processi come la semina e la raccolta.

In questa fase, il progresso tecnologico è stato accompagnato da un ampliamento delle fonti dati (telerilevamento, sensoristica in campo, macchine connesse) e da un crescente ricorso a piattaforme digitali, con implicazioni non solo tecniche, ma anche organizzative e regolatorie (in particolare per la gestione, la proprietà e la circolazione del dato).

3.1 Evoluzione delle innovazioni in agricoltura

Negli anni '80 e '90, la digitalizzazione in agricoltura ha cominciato a consolidarsi con l'introduzione dei sistemi di monitoraggio climatico e dei primi software di gestione delle colture. Questi strumenti primordiali hanno permesso agli agricoltori di raccogliere dati più accurati sulle condizioni ambientali e sullo stato delle colture, migliorando la precisione nelle decisioni agronomiche.

La disponibilità limitata di tecnologie nella fase iniziale della digitalizzazione agricola era principalmente legata alla scarsa diffusione di dispositivi avanzati di sensoristica e sistemi informativi geografici (GIS). I costi elevati dei dispositivi di monitoraggio climatico e delle stazioni meteo automatizzate rappresentavano un ostacolo significativo per molti agricoltori, specialmente quelli delle piccole e medie imprese (PMI). Tali vincoli economici tendevano a interagire con la dimensione aziendale: nelle imprese di minore scala, i costi fissi di acquisizione e gestione della tecnologia incidono relativamente di più sul costo unitario, riducendo la convenienza attesa e aumentando la probabilità di rinuncia o di adozione parziale.

In tal senso, la dimensione aziendale ha storicamente influenzato il tasso di adozione delle innovazioni. Alle aziende con maggiore estensione coltivata è stata spesso associata una più elevata adozione di soluzioni 4.0; tuttavia, negli anni più recenti si osserva una progressiva diffusione anche tra aziende di minori dimensioni. In particolare, nel 2023 si registra un aumento della quota di piccole aziende che utilizzano almeno una soluzione digitale; le aziende tra 50 e 100 ettari, ad esempio, mostrano un incremento del 20% tra 2022 e 2023 (Osservatorio Smart Agrifood, 2023).

Va precisato che le stime di adozione e le quantificazioni di mercato disponibili in letteratura e nei rapporti settoriali possono differire in funzione delle definizioni operative adottate (quali tecnologie vengono incluse nel perimetro dell'"agricoltura 4.0"), della metodologia di raccolta dati (indagini campionarie, mappature dell'offerta, dati di fatturato dei provider) e dell'orizzonte di osservazione. Per tale ragione, i valori riportati sono interpretati come indicazioni di tendenza e ordine di grandezza e vengono utilizzati principalmente per descrivere l'evoluzione del fenomeno, più che come misure puntuali pienamente comparabili tra fonti.

Inoltre, la complessità nell'interpretazione dei dati raccolti risulta essere un altro fattore limitante. Mentre i primi software di gestione delle colture consentivano la raccolta di dati dettagliati sulle

condizioni del suolo e sulle variazioni climatiche, la loro analisi richiedeva competenze specialistiche e tempo, spesso escludendo gli agricoltori meno esperti o con risorse limitate (Hunt, 2019).

Questo aspetto anticipa un nodo ricorrente nella transizione digitale: il valore dei dati dipende dalla capacità di trasformarli in decisioni operative, processo che richiede competenze, tempo e, frequentemente, servizi di consulenza e assistenza tecnica.

L'evoluzione tecnologica successiva ha progressivamente attenuato molte delle criticità iniziali, rendendo le soluzioni digitali più accessibili, affidabili e utilizzabili anche da parte delle aziende di minori dimensioni e con minore dotazione di competenze specialistiche. La diffusione di sensori a costo decrescente, il miglioramento delle loro prestazioni in termini di robustezza e continuità di rilevazione e la crescente intuitività delle interfacce delle piattaforme digitali hanno accresciuto in misura significativa la disponibilità, la qualità e l'accessibilità dei dati agricoli, favorendo un ampliamento della base degli utilizzatori e una più agevole integrazione delle pratiche di *precision farming* nei processi decisionali ordinari dell'impresa agricola.

Con l'avvio del nuovo millennio si è aperta, in questo quadro, una fase di accelerazione della transizione digitale, sostenuta dallo sviluppo del cloud computing, dalla diffusione di architetture informative distribuite e dall'emergere di un ecosistema di servizi digitali dedicati. Il paradigma dell'"Agricoltura 4.0" – ormai ampiamente consolidato nella letteratura e nelle politiche settoriali – si fonda sull'integrazione di sistemi avanzati di sensoristica per il monitoraggio in tempo reale delle condizioni del suolo, delle colture e del bestiame con piattaforme di analisi, algoritmi predittivi e strumenti di supporto alle decisioni. L'adozione di tali sistemi consente l'implementazione di soluzioni tecnologiche integrate che rendono possibile l'ottimizzazione dell'impiego di acqua, fertilizzanti e fitofarmaci in funzione delle esigenze effettive delle colture, con effetti potenziali di rilievo in termini di riduzione degli sprechi, contenimento delle pressioni ambientali e incremento della capacità di governo dell'incertezza lungo l'intero ciclo produttivo.

L'avanzamento tecnologico ha permesso una importante riduzione dei costi dei sensori migliorandone le performances. Sensori avanzati per il monitoraggio del suolo, delle condizioni atmosferiche e delle colture sono ora disponibili a costi contenuti, consentendo agli agricoltori di monitorare le loro operazioni in modo più dettagliato e continuo (Russo et al., 2020).

Le piattaforme digitali sono state sviluppate con un'attenzione particolare alla facilità d'uso e all'integrazione dei dati provenienti dai sensori. Le interfacce utente intuitive e le applicazioni mobile hanno reso più semplice per gli agricoltori la gestione e l'analisi dei dati agricoli. Queste piattaforme consentono agli utenti di visualizzare in tempo reale i dati raccolti dai sensori, di effettuare analisi comparative e di generare report dettagliati senza necessità di competenze informatiche avanzate (Liu et al., 2021).

L'IA ha avuto un ruolo cruciale nell'evoluzione dell'Agricoltura 4.0, rendendo possibile l'analisi predittiva dei dati agricoli e la generazione di raccomandazioni agronomiche personalizzate. Algoritmi avanzati sono stati sviluppati per prevedere malattie delle piante, ottimizzare il momento della semina e della raccolta, e gestire in modo efficiente la logistica dei prodotti agricoli (Liu et al., 2021).

Grazie all'uso di questa tecnologia gli agricoltori sono in grado di prendere decisioni più precise e basate su dati, migliorando l'efficienza delle operazioni agricole e aumentando la produttività complessiva. La capacità di monitorare continuamente le colture e i terreni consente di prevenire e mitigare problemi come malattie e parassiti, migliorando i raccolti e riducendo le perdite.

Influisce, inoltre, sull'ottimizzazione delle risorse, come acqua e fertilizzanti e la riduzione degli sprechi. Le tecnologie permettono di applicare solo la quantità necessaria di risorse, riducendo l'impatto ambientale dell'agricoltura, migliorando al contempo la sostenibilità a lungo termine del settore (Gebbers & Adamchuk, 2010).

Infine, migliora la gestione dei rischi legati a condizioni climatiche avverse o malattie delle colture. I modelli predittivi basati sull'analisi dei dati storici e in tempo reale consentono agli agricoltori di prepararsi meglio per eventi imprevisti, minimizzando le perdite e migliorando la resilienza delle aziende agricole (Kamilaris et al., 2018).

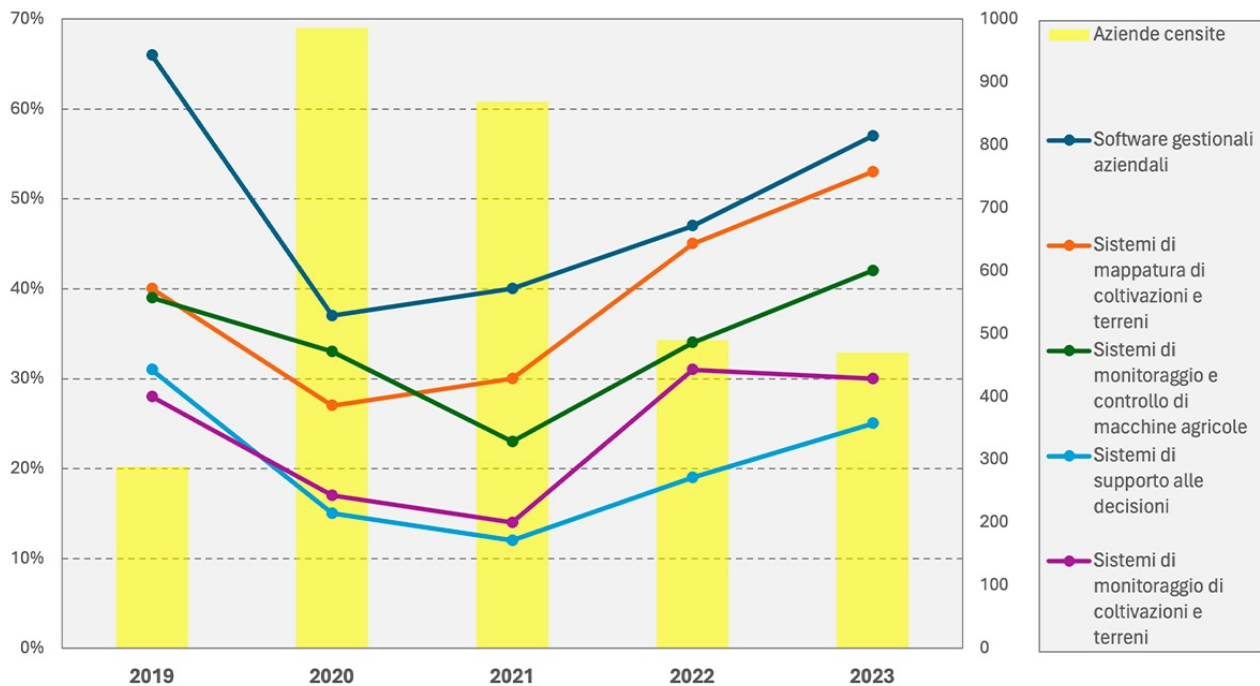
Parallelamente, la robotica agricola ha automatizzato molte delle operazioni tradizionalmente eseguite manualmente, come la semina, l'irrigazione e la raccolta, migliorando l'efficienza operativa e affrontando la crescente scarsità di manodopera nelle zone rurali. Queste pratiche hanno incluso la variabilità gestionale dei campi (VGA), la gestione delle mappe di rese, l'irrigazione di precisione e l'applicazione mirata di fertilizzanti e fitofarmaci. L'uso strategico dei dati agricoli per ottimizzare l'input e massimizzare i rendimenti ha portato a una maggiore efficienza operativa e a una riduzione dell'impatto ambientale delle pratiche agricole (Van Evert et al., 2019).

La tecnologia blockchain ha introdotto trasparenza e sicurezza nelle filiere agro-alimentari, consentendo la tracciabilità completa dei prodotti dall'origine al consumatore finale. Questo approccio ha migliorato la sicurezza alimentare, riducendo i rischi di frodi e migliorando la gestione dei controlli di qualità e sicurezza (Gajda et al., 2020).

Dal punto di vista economico, la digitalizzazione ha portato a una maggiore produttività e competitività delle aziende agricole, riducendo i costi operativi e migliorando i rendimenti delle colture. Un report della Banca Mondiale ha evidenziato come l'adozione di tecnologie digitali possa aumentare il reddito degli agricoltori del 20-30% in molti paesi in via di sviluppo (World Bank, 2019). A livello sociale, la digitalizzazione ha contribuito a una migliore qualità della vita nelle comunità

rurali, offrendo opportunità di lavoro più qualificate e stimolando l'innovazione locale (OECD, 2020).

Grafico 1: Percentuali di adozione delle principali categorie di soluzioni di agricoltura 4.0 (asse di sinistra) e numero di aziende censite (asse di destra)



Fonte: Osservatorio Smart Agrifood, 2023

A livello globale, l'adozione delle tecnologie digitali in agricoltura ha registrato una crescita esponenziale. Secondo un rapporto di MarketsandMarkets (2023), il mercato globale dell'agricoltura digitale è cresciuto da 5,5 miliardi di dollari nel 2015 a oltre 20 miliardi di dollari nel 2023, con un tasso di crescita annuo composto (CAGR) del 17%.

In Europa, la digitalizzazione dell'agricoltura ha seguito un andamento simile, come abbiamo visto grazie anche ad un forte sostegno da parte delle politiche comunitarie e nazionali. L'Unione Europea ha investito significativamente nel settore attraverso la PAC e specifici programmi di ricerca e innovazione come Horizon Europe. Secondo il rapporto della European Commission (2023), il valore del mercato dell'agricoltura digitale in Europa ha raggiunto circa 5 miliardi di euro nel 2023, con un CAGR del 15% dal 2018.

In Italia, la digitalizzazione del settore agricolo ha segnato un'accelerazione negli ultimi anni, sostenuta da politiche nazionali e regionali volte a incentivare l'innovazione. Secondo i dati dell'Osservatorio Smart Agrifood del Politecnico di Milano e dell'Università di Brescia (2023), il mercato delle tecnologie per l'agricoltura 4.0 in Italia ha raggiunto un valore di 600 milioni di euro

nel 2023, con una crescita del 12% rispetto all'anno precedente. Un'indagine condotta da IMAGE LINE (2023) ha rilevato che il 35% delle aziende agricole italiane ha adottato almeno una tecnologia digitale, con un incremento del 5% rispetto al 2022. Le tecnologie più diffuse includono i sensori IoT per il monitoraggio delle condizioni ambientali, i droni per la mappatura delle colture e i DSS per l'ottimizzazione delle decisioni agronomiche. L'adozione di queste tecnologie ha portato a un miglioramento medio del 18% nella produttività e a una riduzione dei costi operativi del 12% (Osservatorio Smart Agrifood, 2023).

Tabella 3: Diffusione delle tecnologie digitali in agricoltura

Area Geografica	Valore di Mercato (2023)	Crescita Annuale (%)	Principali Tecnologie
Mondo	20 miliardi di USD	17%	IoT, AI, droni, DSS
Europa	5 miliardi di EUR	15%	IoT, AI, robotica
Italia	600 milioni di EUR	12%	IoT, droni, DSS

Fonte: elaborazioni personali su dati Commissione Europea, Osservatorio Smart Agrifood (2023) e MarketsandMarkets (2023)

La digitalizzazione in agricoltura rappresenta un percorso irreversibile verso una gestione più efficiente, sostenibile e resiliente delle risorse agricole globali. L'evoluzione dall'uso iniziale dei computer per la gestione dei dati agricoli alla piena integrazione di tecnologie avanzate ha trasformato radicalmente il settore agricolo, preparandolo a sfide future come il cambiamento climatico e la crescita demografica. Il sostegno continuo da parte delle istituzioni governative, l'industria e la ricerca scientifica sono cruciali per accelerare questa transizione digitale e massimizzare i suoi benefici per agricoltori, consumatori e l'ambiente.

3.2 Le tecnologie digitali adottate nel settore agricolo, i sistemi decisionali di supporto (DSS) e altri strumenti digitali.

Negli ultimi decenni, l'agricoltura ha conosciuto una trasformazione progressiva dovuta all'introduzione e alla diffusione di tecnologie digitali, con effetti rilevanti su efficienza, produttività e sostenibilità. Tali innovazioni non si limitano all'automazione, ma abilitano modalità di gestione basate su dati, monitoraggio in tempo reale e integrazione di informazioni eterogenee (clima, suolo, colture, mercato). In questo quadro, i sistemi decisionali di supporto (*Decision Support Systems*, DSS) assumono un ruolo centrale, poiché consentono di integrare basi informative diverse e di tradurle in indicazioni operative utili alla pianificazione e alla gestione delle attività aziendali.

Tali sistemi rappresentano strumenti fondamentali per migliorare l'efficienza e la sostenibilità in agricoltura. È opportuno precisare che l'entità dei benefici dipende dalla qualità dei dati disponibili, dalla corretta taratura dei modelli e dalla capacità dell'azienda di utilizzare le raccomandazioni nei processi decisionali, evitando un impiego meramente "consultivo" privo di riscontro operativo.

Secondo la FAO, il loro utilizzo comporta un aumento della resa delle colture grazie alla possibilità di monitorare parametri come l'umidità del suolo e le condizioni climatiche, permettendo interventi mirati e tempestivi. Sono particolarmente efficaci nel ridurre l'uso di acqua, ottimizzando le irrigazioni in base alle necessità specifiche delle colture. Inoltre, il sistema consente di ridurre il consumo di fertilizzanti attraverso indicazioni precise, evitando sprechi e diminuendo l'impatto ambientale. Un altro vantaggio significativo è la gestione migliorata delle malattie delle piante, poiché l'analisi dei dati consente di prevenire e contrastare l'insorgenza di patologie attraverso interventi più mirati. Complessivamente, l'adozione permette di ridurre i costi operativi delle aziende agricole, generando risparmi economici significativi grazie a una gestione ottimizzata delle risorse.

La blockchain, applicata al settore agricolo, offre benefici rilevanti nella tracciabilità e nella sicurezza delle filiere agroalimentari. Secondo Gajda et al., questa tecnologia garantisce la registrazione immutabile delle informazioni lungo l'intera catena del valore, migliorando la trasparenza e riducendo il rischio di frodi alimentari. Ciò rafforza la fiducia dei consumatori, che possono accedere a dati verificabili sull'origine e sulla qualità dei prodotti. L'efficienza nella gestione della *supply chain* è un altro elemento chiave, grazie alla possibilità di automatizzare processi amministrativi con contratti intelligenti, riducendo tempi e costi. Sebbene i benefici in termini di riduzione dei costi amministrativi possano risultare contenuti, l'incremento di trasparenza informativa e la maggiore verificabilità delle informazioni lungo la filiera rappresentano elementi potenzialmente rilevanti in termini di fiducia, coordinamento e gestione del rischio.

Queste tecnologie rappresentano due pilastri fondamentali per affrontare le sfide dell'agricoltura moderna, migliorando sia la produttività che la sostenibilità. Tuttavia, la loro adozione su larga scala richiede infrastrutture adeguate, supporto normativo e un forte investimento nella formazione degli agricoltori. Le evidenze mostrano che l'integrazione di DSS e blockchain non solo aumenta l'efficienza operativa delle aziende agricole, ma contribuisce anche a costruire un sistema agroalimentare più resiliente e trasparente, rispondendo alle crescenti esigenze di sostenibilità e sicurezza alimentare.

I dati dimostrano chiaramente l'impatto positivo di questa tecnologia. Ad esempio, l'adozione di sensori IoT nel settore agricolo è cresciuta rapidamente, passando da 10 milioni di unità nel 2015 a 35 milioni nel 2020, con una crescita annuale del 25-30% (IoT Analytics, 2020). Questo aumento ha permesso una raccolta di dati molto più ampia e dettagliata, migliorando significativamente le

pratiche di gestione delle colture. Inoltre, l'uso dell'IA ha portato a un aumento medio della produttività agricola del 15-20%, secondo uno studio di Liu et al. (2021), grazie alla capacità di analizzare grandi volumi di dati e fornire raccomandazioni agronomiche ottimizzate.

Anche la robotica ha mostrato risultati promettenti. Ad esempio, l'adozione di robot agricoli per la semina, l'irrigazione e la raccolta ha ridotto i costi operativi del 10-15%, migliorando al contempo la precisione e l'efficienza delle operazioni (Van Evert et al., 2019). Questi robot sono in grado di svolgere compiti ripetitivi con maggiore precisione rispetto agli esseri umani, riducendo la necessità di manodopera e aumentando la produttività complessiva.

Un altro esempio significativo è l'uso della blockchain per migliorare la tracciabilità nella catena di approvvigionamento agroalimentare. Questa tecnologia consente di registrare in modo sicuro e immutabile tutte le transazioni e i movimenti dei prodotti agricoli dalla fattoria al consumatore finale, aumentando la trasparenza e la fiducia nel sistema alimentare. Secondo Gajda et al. (2020), l'adozione della blockchain nell'agricoltura ha migliorato la tracciabilità del 35%, riducendo le frodi alimentari del 25% e aumentando la fiducia dei consumatori del 20%.

Tabella 4: Diffusione dei Sensori IoT in Agricoltura

Anno	Numero di Sensori Installati (milioni)	Crescita Annuale (%)
2015	10	-
2016	13	30
2017	17	31
2018	22	29
2019	28	27
2020	35	25

Fonte: IoT Analytics, 2020

Tabella 5: Benefici dei DSS per gli Agricoltori

Beneficio	Percentuale di Adozione (%)
Aumento della resa delle colture	25
Riduzione dell'uso di acqua	30
Ottimizzazione dell'uso di fertilizzanti	20
Migliore gestione delle malattie delle piante	15
Riduzione dei costi operativi	10

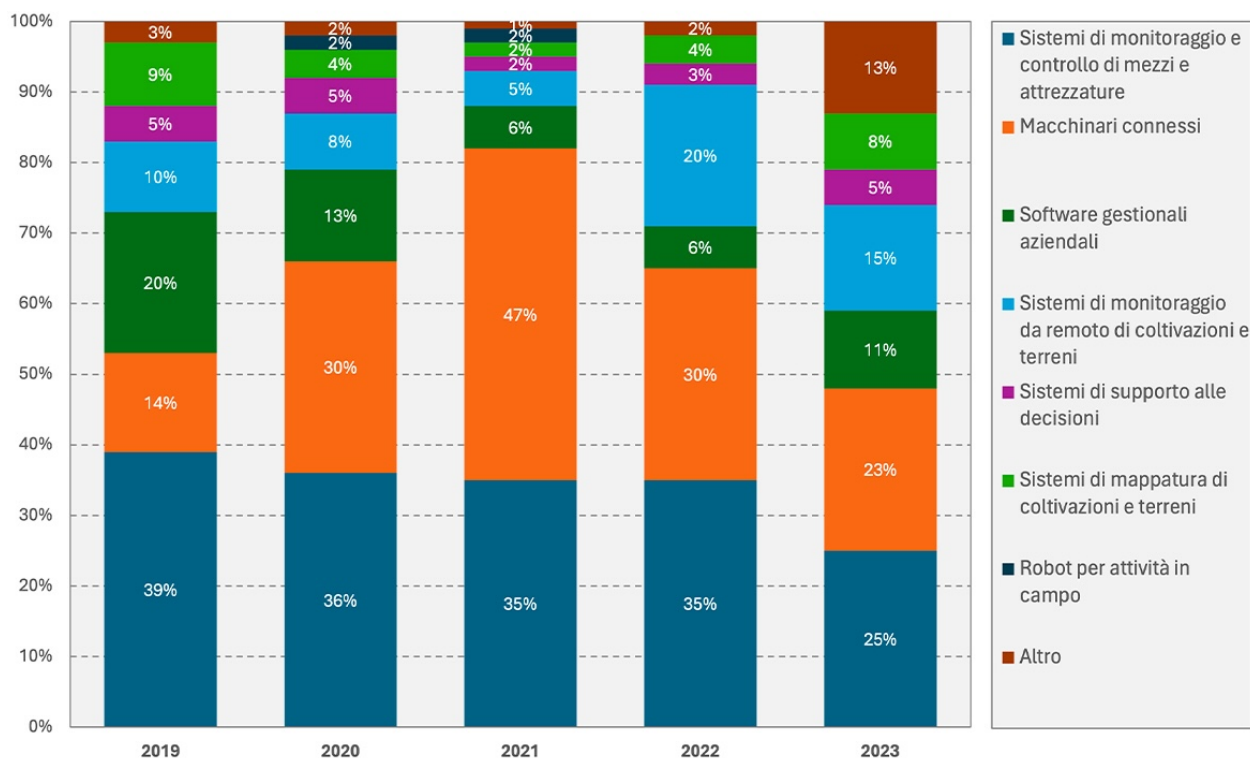
Fonte: FAO, 2020

Tabella 6: Vantaggi della Blockchain nell'Agricoltura

Vantaggio	Percentuale di Adozione (%)
Miglioramento della tracciabilità	35
Riduzione delle frodi alimentari	25
Aumento della fiducia dei consumatori	20
Efficienza nella gestione della supply chain	15
Riduzione dei costi amministrativi	5

Fonte: Gajda et al., 2020

Grafico 2: Valore percentuale di ciascuna delle soluzioni per l'agricoltura 4.0 mappate dall'Osservatorio dal 2019 al 2023.



Fonte: Osservatorio Smart Agrifood, 2023

La digitalizzazione nel settore agricolo ha dunque trasformato radicalmente le pratiche agricole, portando a una gestione più precisa ed efficiente delle risorse agricole. I DSS, in particolare, hanno fornito agli agricoltori strumenti potenti per ottimizzare le decisioni agronomiche e migliorare i rendimenti. Il futuro della digitalizzazione in agricoltura dipenderà dalla continua innovazione

tecnologica e dall'adozione di politiche di sostegno che favoriscano l'accesso e l'implementazione di queste tecnologie nelle comunità agricole globali.

3.3 L'intelligenza artificiale in agricoltura: potenzialità e sfide

L'intelligenza artificiale (IA) sta assumendo un ruolo crescente in diversi comparti, inclusa l'agricoltura. La pressione a migliorare produttività e sostenibilità, riducendo l'impatto ambientale e rafforzando la resilienza ai rischi climatici e fitosanitari, ha favorito l'interesse verso applicazioni basate su apprendimento automatico, visione artificiale e analisi di grandi basi dati.

In termini analitici, l'IA non costituisce una tecnologia isolata, ma un livello "abilitante" che valorizza infrastrutture digitali preesistenti (sensoristica, connettività, piattaforme dati) e che, per dispiegare effetti, richiede condizioni organizzative e competenze coerenti.

Questo paragrafo esplora l'applicazione dell'intelligenza artificiale nell'agricoltura, esaminando le principali tecnologie emergenti, i benefici che possono apportare e le sfide da affrontare per una sua adozione diffusa.

L'IA comprende una serie di tecnologie, tra le quali l'apprendimento automatico (*machine learning*), il riconoscimento delle immagini, i sistemi predittivi e l'analisi dei big data.

L'apprendimento automatico è particolarmente utile per migliorare le previsioni meteorologiche e i modelli di crescita delle colture, consentendo agli agricoltori di prendere decisioni più informate e tempestive su fertilizzazione, irrigazione e raccolta (Wolfert et al., 2017). Questo non solo aumenta la produttività, ma riduce anche l'uso inefficiente di risorse naturali come acqua e fertilizzanti.

Le tecniche di apprendimento automatico permettono di costruire modelli predittivi che suggeriscono il momento ottimale per l'irrigazione o la semina, riducendo gli sprechi e massimizzando il rendimento delle colture. L'IA può inoltre migliorare la gestione della catena di approvvigionamento, prevedendo la domanda e ottimizzando la distribuzione dei prodotti agricoli (Gebbers & Adamchuk, 2010).

Queste tecnologie trovano applicazione in diversi ambiti dell'agricoltura:

1. Agricoltura di Precisione

Una delle principali innovazioni che l'IA ha introdotto in agricoltura è l'agricoltura di precisione. Questa tecnica si basa sull'analisi dei dati raccolti da sensori, droni e immagini satellitari per monitorare le condizioni delle colture, dei terreni e delle risorse naturali. Utilizzando modelli predittivi basati sull'apprendimento automatico, l'IA può aiutare gli agricoltori a prendere decisioni più informate su aspetti come l'irrigazione, la distribuzione di fertilizzanti e pesticidi, ottimizzando l'uso delle risorse e riducendo i costi (Zhang et al., 2020).

Per esempio, l'IA può prevedere il momento ottimale per piantare o raccogliere le colture, basandosi su dati meteorologici, analisi del suolo e storico delle colture. Questo tipo di gestione avanzata contribuisce a migliorare la produttività e a ridurre lo spreco di risorse.

Immagine 4: Un sistema di supporto decisionale basato su sensori e algoritmi previsionali



2. Gestione e Monitoraggio delle Colture con Droni

Grazie ai progressi nella visione artificiale e nell'impiego dei droni, l'intelligenza artificiale è oggi in grado di monitorare in tempo reale lo stato delle coltivazioni, identificando precocemente parassiti, malattie o carenze nutrizionali. Le immagini multispettrali raccolte dai droni e analizzate tramite algoritmi di machine learning consentono di evidenziare anomalie non rilevabili a occhio nudo, permettendo interventi agronomici tempestivi e mirati (Kamilaris et al., 2018). Sistemi avanzati di classificazione basati sul colore, l'indice di vegetazione o la morfologia delle foglie possono, ad esempio, rilevare situazioni di stress idrico o nutrizionale, riducendo i danni colturali e ottimizzando l'impiego di input chimici. Il monitoraggio remoto mediante droni, inoltre, consente di coprire rapidamente ampie superfici, diminuendo la dipendenza dalle ispezioni manuali e riducendo i costi operativi.

Negli ultimi anni, parallelamente all'uso dei droni per l'osservazione delle colture, si è registrato un crescente interesse verso il loro impiego diretto nella distribuzione dei prodotti fitosanitari. L'evoluzione tecnologica – in particolare sistemi di distribuzione a rateo variabile, ugelli a controllo elettronico, riduzione della deriva e integrazione con mappe di prescrizione – ha stimolato numerose

sperimentazioni, condotte spesso all'interno di progetti di ricerca europei o nazionali attivati mediante specifiche deroghe. Tra queste rientra anche l'iniziativa avviata da Confagricoltura, in collaborazione con il CNR di Firenze a partire dal 2021, che, grazie a una deroga autorizzativa, ha l'obiettivo di valutare gli impatti agronomici, ambientali e operativi dei trattamenti fitosanitari effettuati tramite droni in differenti contesti colturali. Le prime evidenze provenienti dalle sperimentazioni in avvio insieme ad ARSIAL – Agenzia Regionale per lo Sviluppo e l'Innovazione dell'Agricoltura del Lazio, ente strumentale della Regione Lazio dedicato alla ricerca, all'assistenza tecnica e alla modernizzazione del settore agricolo – confermano un potenziale miglioramento non solo in termini di precisione applicativa, ma anche di riduzione degli sprechi, minore inquinamento puntuale e maggiore sicurezza per gli operatori, che non devono accedere a terreni impervi o condizioni operative rischiose.

Questo rinnovato interesse si inserisce in un quadro normativo europeo tuttora caratterizzato da rigidità: la Direttiva 2009/128/CE, infatti, vieta l'irrorazione aerea di prodotti fitosanitari, includendo anche l'utilizzo dei droni, salvo specifiche deroghe motivate dall'assenza di alternative tecniche equivalenti o da comprovati benefici ambientali e sanitari rispetto alle attrezzature terrestri tradizionali. A livello nazionale, tuttavia, il dibattito politico e tecnico sta evolvendo rapidamente: un disegno di legge dedicato alla regolamentazione dell'uso dei droni per i trattamenti fitosanitari, annunciato recentemente in diverse sedi istituzionali, mira a definire un quadro autorizzativo più chiaro e aggiornato, uniformare le procedure di sperimentazione, stabilire criteri di sicurezza e delineare condizioni specifiche per un impiego controllato di queste tecnologie. Tale iniziativa legislativa si propone di colmare il divario tra l'innovazione tecnologica e la normativa vigente, favorendo un utilizzo responsabile dei droni nel quadro della transizione ecologica e della digitalizzazione del settore agricolo.

Immagine 5: Esempio di utilizzo del drone per sistemi di monitoraggio delle colture



Immagine 6: Modello di drone per i trattamenti fitosanitari



3. Sistemi di Irrigazione Intelligente

L'IA ha anche trovato applicazione nell'irrigazione intelligente, dove sensori posizionati nei campi misurano l'umidità del suolo e, combinando questi dati con le previsioni meteorologiche, l'IA determina il momento ottimale per l'irrigazione. Questo sistema permette di ridurre significativamente il consumo di acqua, che è una risorsa sempre più scarsa in molte parti del mondo (Jha et al., 2019).

I sistemi di irrigazione gestiti dall'intelligenza artificiale possono anche distribuire l'acqua in modo più preciso, evitando sovra-irrigazioni o carenze d'acqua che potrebbero compromettere le rese agricole.

Immagine 7: Modelli di sistemi per l'irrigazione intelligente



4. Robotica Agricola

L'IA sta rivoluzionando anche il campo della robotica agricola, dove robot intelligenti sono utilizzati per compiti che vanno dalla semina e diserbo alla raccolta automatizzata. I robot agricoli basati su IA sono in grado di svolgere operazioni complesse con precisione, riducendo la necessità di manodopera umana, che sta diventando sempre più scarsa e costosa in molte regioni (Bogue, 2019).

Alcuni esempi includono robot in grado di raccogliere frutta e verdura delicata, come i pomodori o le fragole, senza danneggiarle, grazie a sistemi di visione artificiale e algoritmi di riconoscimento delle immagini.

L'automazione agricola, facilitata dall'IA, permette di affrontare anche la crescente carenza di manodopera, riducendo la dipendenza dal lavoro umano in settori come la raccolta delle colture. Questo rappresenta un importante vantaggio per le grandi aziende agricole, che possono migliorare la loro efficienza operativa e ridurre i costi (Rojas et al., 2016).

Immagine 8: Robot mungitura di ultima generazione



L'introduzione dell'IA in agricoltura offre numerosi vantaggi, ma deve affrontare diverse criticità che possono essere riassunti nei seguenti punti:

1. Costi Elevati

L'implementazione di tecnologie basate sull'IA può richiedere elevati investimenti iniziali, specialmente per le piccole e medie imprese agricole. L'acquisto di sensori, droni, macchinari automatizzati e software intelligenti rappresenta una spesa significativa, che molte aziende agricole non sono ancora in grado di sostenere (Lapple et al., 2017).

2. Accesso alle Infrastrutture Digitali

Un altro ostacolo è rappresentato dall'accesso limitato alle infrastrutture digitali, in particolare nelle aree rurali. L'efficacia delle tecnologie basate sull'IA dipende dall'accesso a Internet ad alta velocità e a piattaforme cloud per l'elaborazione dei dati. Nelle regioni con scarsa copertura digitale, l'adozione di queste tecnologie risulta difficoltosa (Yengoh et al., 2018).

3. Competenze e Formazione

L'IA richiede competenze tecniche avanzate per essere utilizzata in modo efficace. La mancanza di formazione e la scarsa familiarità con l'uso di tecnologie digitali tra gli agricoltori rappresentano un altro ostacolo significativo. È necessario investire in programmi di formazione per garantire che gli agricoltori possano sfruttare appieno i benefici dell'IA (Klerkx et al., 2019).

Nonostante le difficoltà, il futuro dell'IA in agricoltura appare promettente. Con i costi delle tecnologie in calo e l'accesso crescente a infrastrutture digitali, sempre più agricoltori saranno in grado di sfruttare le potenzialità dell'intelligenza artificiale. Inoltre, lo sviluppo di piattaforme IA più accessibili e programmi di formazione dedicati potrebbe ridurre le barriere all'adozione.

Nel lungo termine, l'intelligenza artificiale giocherà un ruolo fondamentale nel rendere l'agricoltura più sostenibile e resiliente, aiutando il settore a far fronte alle sfide del cambiamento climatico, della crescita demografica e della riduzione delle risorse naturali.

L'intelligenza artificiale rappresenta dunque una delle tecnologie più promettenti per il futuro dell'agricoltura. Le sue applicazioni, che vanno dall'agricoltura di precisione alla robotica agricola, stanno trasformando il settore, rendendolo più efficiente, sostenibile e resiliente. Tuttavia, per realizzare appieno il potenziale dell'IA, sarà necessario affrontare le barriere legate ai costi, alle competenze tecnologiche e alle infrastrutture. Con il giusto supporto politico e infrastrutturale, l'IA potrebbe rivoluzionare l'agricoltura e contribuire a costruire un sistema alimentare più sostenibile e sicuro per il futuro.

3.4 Diffusione delle tecnologie digitali in agricoltura

A livello globale, l'adozione delle tecnologie digitali in agricoltura è in piena espansione. Secondo il rapporto della FAO (2022), il mercato globale dell'agricoltura digitale è stimato a oltre 20 miliardi di dollari nel 2023, con un tasso di crescita annuale composto (CAGR) del 17% dal 2015. Gli Stati Uniti, la Cina e il Brasile sono i principali attori in questo mercato, grazie agli ingenti investimenti in tecnologie come l'IoT, l'IA) e la robotica.

Negli Stati Uniti, l'utilizzo di tecnologie GPS e droni è diventato comune nelle pratiche di *precision farming*, permettendo una gestione più precisa delle risorse e una maggiore produttività

(Schimmelpfennig, 2016). In Cina, il governo ha investito massicciamente nelle tecnologie IoT per ottimizzare la gestione delle risorse idriche e aumentare la produttività delle colture (Chen et al., 2021). In Sud America, il Brasile è emerso come un leader nell'adozione di tecnologie digitali in agricoltura, specialmente nella produzione di soia e altre colture di alto valore (FAO, 2022).

In Europa, la digitalizzazione dell'agricoltura è stata promossa attraverso politiche come la Politica Agricola Comune (PAC) e programmi di ricerca come Horizon 2020 e Horizon Europe. Il mercato delle tecnologie digitali per l'agricoltura in Europa ha raggiunto circa 5 miliardi di euro nel 2023, con un CAGR del 15% dal 2018 (European Commission, 2023).

Paesi come la Germania, la Francia e i Paesi Bassi sono all'avanguardia nell'adozione di tecnologie agricole avanzate. La Germania, ad esempio, ha sviluppato un robusto ecosistema di start-up e aziende tecnologiche che offrono soluzioni innovative per l'agricoltura (BMEL, 2022). La Francia ha implementato programmi di agricoltura di precisione che utilizzano droni e sensori IoT per migliorare la gestione delle colture (FranceAgriMer, 2022). Nei Paesi Bassi, l'uso delle serre intelligenti e dei sistemi di gestione automatizzata delle colture ha portato a significativi aumenti nella produttività e nella sostenibilità ambientale (European Commission, 2023).

In Italia, l'adozione delle tecnologie digitali in agricoltura ha accelerato notevolmente negli ultimi anni. Secondo l'Osservatorio Smart Agrifood del Politecnico di Milano e dell'Università di Brescia (2023), il mercato delle tecnologie per l'agricoltura 4.0 ha raggiunto un valore di circa 600 milioni di euro nel 2023, con una crescita del 12% rispetto all'anno precedente. Tale stima non deriva da semplici proiezioni, ma da un processo metodologico strutturato: l'Osservatorio realizza infatti una mappatura sistematica dell'offerta tecnologica presente sul mercato italiano – comprendente macchinari connessi, sensori IoT, software gestionali, piattaforme per l'analisi dei dati, i DSS e strumenti di monitoraggio avanzato – e raccoglie dati di fatturato direttamente dai provider tecnologici. A tali informazioni quantitative si affianca un'indagine campionaria sulle imprese agricole, finalizzata a rilevare i livelli di adozione, gli investimenti effettuati, le funzionalità impiegate e le criticità percepite dagli operatori. L'aggregazione di queste diverse fonti consente di calcolare il valore complessivo del mercato e la sua evoluzione annuale, come evidenziato dalla crescita del 12% registrata nel 2023. Questo approccio integrato – basato sulla combinazione dell'analisi dell'offerta con quella della domanda – garantisce valutazioni robuste e rappresentative del processo di digitalizzazione in atto nel settore agricolo italiano. Anche nei rapporti più recenti, la stessa metodologia conferma una tendenza espansiva, segnalando come l'Agricoltura 4.0 stia assumendo un ruolo sempre più centrale nelle filiere agroalimentari nazionali.

Ulteriori evidenze provengono dall'indagine condotta da IMAGE LINE (2023), secondo cui il 35% delle aziende agricole italiane ha adottato almeno una tecnologia digitale, con un incremento di 5

punti percentuali rispetto al 2022. Le soluzioni più diffuse includono sensori IoT per il monitoraggio delle condizioni microclimatiche, droni per la mappatura e il rilievo multispettrale delle colture, e sistemi decisionali di supporto (DSS) per l'ottimizzazione delle pratiche agronomiche. L'adozione di tali strumenti ha determinato un miglioramento medio del 18% della produttività e una riduzione dei costi operativi pari al 12% (Osservatorio Smart Agrifood, 2023), evidenziando l'impatto positivo della digitalizzazione sulle performance aziendali.

In linea generale, va considerato che l'adozione delle tecnologie digitali varia significativamente anche in base all'area geografica e al tipo di agricoltura. Come evidente dalla tabella seguente l'adozione delle tecnologie digitali in agricoltura sia caratterizzata da forti eterogeneità geografiche, sia in termini di intensità sia di specializzazione tecnologica. Gli Stati Uniti presentano il tasso di adozione più elevato (60%), trainato dall'uso combinato di droni e sistemi GPS, a conferma di un modello di agricoltura di precisione maturo, fondato su grandi estensioni aziendali, forte capacità di investimento e un ecosistema consolidato di fornitori tecnologici e servizi di consulenza. Anche la Cina mostra livelli elevati (55%), ma con una traiettoria diversa: l'accento su IoT e Intelligenza Artificiale segnala una strategia fortemente orientata alla gestione massiva dei dati, alla previsione e all'automazione dei processi decisionali su larga scala.

Il Brasile (50%) si colloca su un gradino intermedio, puntando soprattutto su robotica e DSS: una combinazione che riflette l'esigenza di aumentare la produttività e gestire in modo più efficiente colture estensive in contesti spesso caratterizzati da vincoli logistici e ambientali. L'Europa, con un tasso di adozione del 45%, appare in posizione intermedia, con una specializzazione centrata su sensori IoT e DSS: un modello coerente con una struttura aziendale più frammentata, una maggiore attenzione agli aspetti regolatori e ambientali e un ruolo significativo delle politiche pubbliche nel sostenere sistemi di supporto alle decisioni più che l'automazione spinta delle operazioni di campo. L'Italia, infine, con un tasso di adozione pari al 35%, si colloca sotto la media europea e molto distante dai frontrunner extraeuropei. La combinazione prevalente – sensori IoT e droni – segnala una fase ancora parzialmente “sperimentale”, in cui prevalgono investimenti puntuali in monitoraggio e rilievo (immagini da drone, sensori in campo) più che l'integrazione sistematica dei dati in piattaforme gestionali evolute o DSS pienamente operativi. Questo gap quantitativo e qualitativo può essere ricondotto alla minore dimensione media aziendale, alla frammentazione territoriale, a ritardi infrastrutturali (connettività) e alla presenza ancora disomogenea di servizi di accompagnamento (formazione, consulenza digitale, interoperabilità delle soluzioni). Nel complesso, la tabella suggerisce che la sfida per l'Italia non è solo aumentare la percentuale di aziende adottanti, ma spostare il baricentro verso pacchetti tecnologici più integrati e *data-driven*, in linea con le traiettorie osservate nei paesi leader.

Tabella 7: Adozione delle tecnologie per tipo e area geografica

Area Geografica	Tecnologia Principale	Percentuale Adozione
Stati Uniti	Droni, GPS	60%
Cina	IoT, AI	55%
Brasile	Robotica, DSS	50%
Europa	Sensori IoT, DSS	45%
Italia	Sensori IoT, Droni	35%

Fonte: elaborazione personale su dati FAO (2022); European Commission (2023); Osservatorio Smart Agrifood (2023)

La successiva Tabella 8 perfeziona il quadro analitico delineato dalla distribuzione geografica, evidenziando come l'adozione delle tecnologie digitali non sia solo eterogenea nello spazio, ma vari in modo significativo anche in funzione del modello culturale. Nell'agricoltura convenzionale il tasso di adozione raggiunge il 50%, con una prevalenza di soluzioni avanzate quali IoT, intelligenza artificiale e robotica. Tale configurazione risulta coerente con sistemi produttivi orientati alla massimizzazione delle rese, alla riduzione dei costi unitari e all'incremento dell'efficienza operativa, nei quali la scala aziendale, la disponibilità di capitale e la pressione competitiva fungono da leve abilitanti per investimenti in tecnologie ad elevata intensità di automazione e di data processing.

L'agricoltura biologica, pur mostrando una dinamica innovativa non marginale, presenta un livello di adozione più contenuto (30%) e una specializzazione tecnologica differente, centrata su blockchain, sistemi di supporto alle decisioni e sensori. In questo caso, le soluzioni digitali sono impiegate prevalentemente per rafforzare la tracciabilità, la certificazione dei processi, il monitoraggio puntuale delle condizioni colturali e il rispetto dei disciplinari, più che per automatizzare le operazioni di campo. Il minore tasso di adozione può essere ricondotto, tra l'altro, a dimensioni aziendali mediamente inferiori, a una maggiore intensità di lavoro manuale e, in alcuni contesti, a una certa cautela nei confronti di strumenti percepiti come potenzialmente dissonanti rispetto ai principi fondativi dell'agricoltura biologica.

Considerata congiuntamente alla Tabella 7, la Tabella 8 suggerisce che i divari territoriali e quelli legati al metodo di coltivazione tendono a sovrapporsi e, in alcuni casi, ad amplificarsi. I contesti in cui l'agricoltura convenzionale è più diffusa e beneficia di infrastrutture digitali più sviluppate – come gli Stati Uniti o specifiche regioni europee – sono anche quelli in cui le tecnologie più avanzate (IoT, AI, robotica) trovano maggiore spazio di applicazione. Al contrario, nei sistemi in cui il biologico ha

un peso relativamente elevato – come in molte aree europee e italiane – si osserva il rischio di una traiettoria di adozione più selettiva e parziale, focalizzata su strumenti di monitoraggio, tracciabilità e consulenza digitale, senza una piena integrazione dei dati nei processi gestionali e decisionali.

In tale prospettiva, il divario italiano evidenziato dalla Tabella 7 non appare soltanto di natura quantitativa, ma investe anche la composizione interna dei modelli produttivi e la loro “compatibilità digitale”. Ne deriva l’esigenza che le politiche pubbliche e gli strumenti di intervento collettivo siano disegnati in modo differenziato, tenendo conto delle specificità di agricoltura convenzionale e biologica, e mirino non solo a incrementare la diffusione delle tecnologie, ma anche a promuovere percorsi di integrazione dei dati e delle soluzioni digitali coerenti con i vincoli, le opportunità e le identità di ciascun sistema colturale.

Tabella 8: Adozione delle tecnologie per tipo e per metodo di coltivazione

Tipo di Agricoltura	Tecnologia Principale	Percentuale Adozione
Convenzionale	IoT, AI, Robotica	50%
Biologico	Blockchain, DSS, Sensori	30%

Fonte: elaborazioni personali su dati Osservatorio Smart Agrifood (2023); IMAGE LINE (2023)

Nel complesso, le evidenze ricavate confermano che la traiettoria di digitalizzazione dell’agricoltura è profondamente eterogenea e dipende dall’interazione tra dimensione geografica, modelli produttivi e cornici istituzionali. I divari emersi non attengono soltanto al grado di diffusione delle tecnologie, ma anche alla natura e alla composizione dei pacchetti digitali adottati, con l’agricoltura convenzionale maggiormente orientata verso soluzioni ad elevata automazione e l’agricoltura biologica focalizzata su strumenti di tracciabilità, monitoraggio e supporto alle decisioni. In tale prospettiva, il caso italiano si configura come espressione di una digitalizzazione selettiva e ancora parzialmente frammentata, che rende necessario un disegno delle politiche pubbliche capace di coniugare l’estensione della platea delle imprese adottanti con la promozione di percorsi di integrazione dei dati e delle tecnologie coerenti con la pluralità dei modelli colturali e con gli obiettivi di sostenibilità economica, ambientale e sociale del sistema agroalimentare. L’Italia, in particolare, sta vedendo un’adozione crescente di queste tecnologie, con benefici tangibili per le aziende agricole in termini di produttività e riduzione dei costi operativi. Il continuo sviluppo tecnologico e il supporto delle politiche agricole saranno fondamentali per sostenere questa trasformazione e garantire un futuro prospero per l’agricoltura digitale.

3.5 Fattori determinanti l'adozione delle tecnologie digitali in agricoltura.

L'adozione delle tecnologie digitali nel settore agricolo rappresenta un'opportunità fondamentale per migliorare la produttività, l'efficienza operativa e la sostenibilità ambientale. Tuttavia, questo processo è influenzato da una serie di fattori che possono incentivare o ostacolare l'introduzione di tali innovazioni. Attraverso una revisione della letteratura scientifica disponibile e l'analisi dei dati empirici, è stato possibile identificare i principali elementi che determinano il successo o il fallimento dell'adozione delle tecnologie digitali nelle aziende agricole.

In coerenza con la letteratura recente sulla digitalizzazione nelle aree rurali, tali elementi possono essere letti come combinazione di driver economici e barriere socio-tecniche: infrastrutture e connettività, disponibilità di servizi e competenze, interoperabilità e governance dei dati, oltre alle percezioni di costi e benefici da parte degli operatori (Ferrari et al., 2022; Rijswijk et al., 2021; Iliopoulos et al., 2025). Questa impostazione consente di interpretare l'eterogeneità dell'adozione non solo come differenza di capacità di investimento, ma come differenza di "condizioni abilitanti" e di capacità organizzativa.

Uno dei principali incentivi all'adozione delle tecnologie digitali in agricoltura è rappresentato dai benefici economici che derivano dal loro utilizzo (Osservatorio Smart Agrifood, 2023; FAO, 2019; World Bank, 2021; European Commission, 2020–2023). Le tecnologie avanzate, come la meccanizzazione 4.0, i software gestionali e i sistemi di monitoraggio intelligente, offrono miglioramenti in termini di efficienza, consentendo una gestione ottimizzata delle risorse e una riduzione dei costi operativi (Finger et al., 2019). Gli stessi autori hanno dimostrato che l'agricoltura di precisione può migliorare la produttività riducendo l'utilizzo di fertilizzanti e pesticidi, minimizzando così l'impatto ambientale. I vantaggi economici derivano anche da un aumento della redditività, soprattutto nelle aziende che utilizzano tecnologie avanzate per massimizzare la resa per ettaro o per migliorare la qualità del prodotto.

D'altro canto, l'elevato costo iniziale delle tecnologie rappresenta uno dei principali ostacoli all'adozione, specialmente per le piccole e medie imprese agricole (PMI). Le aziende agricole di dimensioni maggiori, con più disponibilità di capitale, sono generalmente in una posizione più favorevole per assorbire i costi associati all'acquisto di tecnologie come droni, sensori e macchinari automatizzati (Läpple et al., 2017). Al contrario, le PMI spesso non hanno accesso a risorse finanziarie sufficienti per investire in tali tecnologie, il che può frenare il processo di innovazione in queste realtà. Questo fenomeno è particolarmente evidente nelle regioni del sud Italia, dove il tessuto imprenditoriale agricolo è caratterizzato da aziende di piccole dimensioni con minori capacità di investimento (Confagricoltura & Reale Mutua, 2024).

Le politiche pubbliche svolgono un ruolo rilevante nel superamento delle barriere economiche e nell'attenuazione del rischio associato all'investimento.

In Italia, il Piano Nazionale Agricoltura 4.0 ha introdotto incentivi finanziari e sgravi fiscali volti a favorire l'adozione delle tecnologie digitali. Queste iniziative forniscono aiuti economici per l'acquisto di macchinari tecnologicamente avanzati, inclusi droni e software di gestione aziendale, con l'obiettivo di accelerare la transizione verso un'agricoltura più sostenibile e competitiva (Zhou et al., 2021). I programmi di supporto pubblico risultano essere determinanti per le PMI, poiché riducono il rischio economico legato all'investimento in nuove tecnologie.

Tuttavia, l'accesso a tali incentivi non è uniforme su tutto il territorio. Le regioni del nord Italia, come Lombardia, Veneto ed Emilia-Romagna, tendono a beneficiare maggiormente degli incentivi statali grazie a un tessuto agricolo più sviluppato e a una maggiore propensione all'innovazione. Al contrario, le regioni del sud, come Molise, Calabria e Sicilia, presentano una minore diffusione delle tecnologie digitali, a causa non solo della mancanza di accesso agli incentivi, ma anche di un'infrastruttura digitale meno sviluppata (Confagricoltura & Reale Mutua, 2024). Le disparità regionali rappresentano un fattore critico nel frenare l'adozione delle innovazioni, evidenziando la necessità di politiche pubbliche più mirate che possano ridurre il divario tra nord e sud.

L'**accesso alle infrastrutture digitali**, in particolare a una connessione Internet veloce e stabile, rappresenta un'altra barriera all'adozione delle tecnologie digitali in agricoltura. Nelle aree rurali, la copertura digitale è spesso limitata, impedendo agli agricoltori di sfruttare appieno le potenzialità delle tecnologie basate su cloud o dei sistemi di monitoraggio in tempo reale (Yengoh et al., 2018). Questa limitazione infrastrutturale riduce l'efficacia di strumenti come i sensori per il monitoraggio delle colture o i software di gestione integrata, che richiedono una connessione costante per funzionare in modo ottimale. Un esempio di questa barriera può essere visto nelle aziende agricole del sud Italia, che hanno minore accesso a tali infrastrutture rispetto alle controparti del nord.

Un altro aspetto che influisce notevolmente sull'adozione delle tecnologie digitali è rappresentato dalla **formazione e dalle competenze tecniche degli agricoltori**. L'uso di strumenti avanzati richiede competenze digitali e tecniche che non sono sempre diffuse tra gli agricoltori, specialmente tra quelli più anziani o operanti in contesti meno sviluppati. Le nuove tecnologie, come i droni o i software gestionali, sono spesso percepite come complesse o difficili da utilizzare, il che può scoraggiare molti agricoltori dall'adottarle. Secondo Klerkx et al. (2019), la mancanza di formazione adeguata rappresenta una delle principali barriere all'adozione delle innovazioni digitali, soprattutto nelle aziende agricole a conduzione familiare. La creazione di programmi di formazione tecnica su larga scala è quindi essenziale per facilitare l'adozione delle tecnologie e migliorare la competenza digitale degli operatori del settore.

Inoltre, il **contesto sociale e culturale** gioca un ruolo importante nell'influenzare la propensione all'adozione delle tecnologie digitali. La resistenza al cambiamento e l'adesione a pratiche tradizionali possono frenare l'adozione di innovazioni tecnologiche, soprattutto nelle aree rurali più conservatrici. Tuttavia, le giovani generazioni di agricoltori, più inclini a sperimentare nuove tecnologie, rappresentano un fattore positivo per il futuro dell'innovazione agricola. L'**invecchiamento della popolazione agricola** e la difficoltà di ricambio generazionale, soprattutto nelle regioni del sud, rappresentano però un ulteriore ostacolo che richiede attenzione nelle politiche di innovazione agricola (Rijswijk et al., 2019).

Per affrontare queste barriere e promuovere l'adozione delle tecnologie digitali su larga scala, è necessario un approccio integrato che combini incentivi economici, miglioramento delle infrastrutture digitali, e programmi di formazione tecnica. Le regioni che hanno maggiormente beneficiato degli investimenti in infrastrutture e delle politiche pubbliche favorevoli hanno mostrato tassi di adozione tecnologica superiori, con un impatto positivo sulla produttività e sulla sostenibilità del settore agricolo.

In sintesi, la letteratura converge sull'idea che la digitalizzazione in agricoltura dipenda dall'interazione tra benefici attesi, complessità d'uso e condizioni facilitanti (infrastrutture, servizi e competenze), oltre che da vincoli organizzativi e requisiti informativi di filiera. Questa evidenza supporta la scelta di strutturare la parte empirica distinguendo tra decisione di adozione e intensità/configurazione dell'adozione, e di interpretare i divari territoriali e dimensionali come esito di condizioni abilitanti diseguali. Il capitolo successivo utilizza i microdati AGRIColtura100 per verificare tali associazioni.

3.6 Asimmetrie tra quadro normativo e innovazione tecnologica: il caso dei droni in agricoltura

Un ambito in cui il disallineamento tra innovazione tecnologica e disciplina giuridica emerge in modo particolarmente evidente è quello dell'impiego dei droni nelle attività agricole. La tecnologia ha conosciuto negli ultimi anni una rapida evoluzione, con mezzi in grado di effettuare rilievi multispettrali, monitoraggio delle colture e, soprattutto, trattamenti fitosanitari mirati, con potenziali vantaggi in termini di efficienza, sicurezza degli operatori e riduzione dell'impatto ambientale. Tuttavia, l'assetto normativo europeo e nazionale è il risultato di stratificazioni regolatorie nate in epoche in cui tali applicazioni non erano ancora ipotizzabili, e questo genera ritardi, incertezze e, in alcuni casi, veri e propri divieti che limitano la diffusione delle innovazioni.

Sul piano aeronautico, il Regolamento di esecuzione (UE) 2019/947 ha introdotto un quadro uniforme per l'impiego degli aeromobili senza equipaggio, articolando le operazioni in tre categorie operative

(aperta, specifica e certificata) in funzione del rischio. Le attività che comportano rischi superiori a quelli ammessi nella categoria “aperta” – tra cui rientrano, di norma, le operazioni con droni di massa e quota superiori, voli oltre il campo visivo del pilota o con rilascio di sostanze – sono collocate nella categoria “specifica” e richiedono un’autorizzazione operativa rilasciata dall’autorità nazionale competente, previa valutazione del rischio. In Italia tale funzione è svolta dall’Ente Nazionale per l’Aviazione Civile (ENAC), che ha adottato il Regolamento UAS-IT per disciplinare gli aspetti di propria competenza e definire procedure, requisiti per gli operatori e condizioni di utilizzo dello spazio aereo per i sistemi a pilotaggio remoto.

Per quanto riguarda l’irrorazione di prodotti fitosanitari, l’ostacolo principale non discende però dal diritto aeronautico, bensì dalla normativa sull’uso sostenibile dei pesticidi. La Direttiva 2009/128/CE stabilisce, all’articolo 9, che gli Stati membri “assicurano che l’irrorazione aerea sia vietata”, ammettendo deroghe solo in casi speciali, a condizioni stringenti (assenza di alternative praticabili o vantaggi ambientali evidenti, specifica autorizzazione e controlli rafforzati). Il decreto legislativo n. 150 del 2012, che recepisce la direttiva in Italia, ribadisce il divieto generale di distribuzione aerea di prodotti fitosanitari (art. 13), includendo anche i droni in un’interpretazione estensiva della categoria dei “mezzi aerei”. Ne deriva che, salvo specifiche deroghe concesse dalle autorità competenti, l’impiego dei droni per i trattamenti fitosanitari è, di fatto, precluso, nonostante la diversa natura tecnica e il diverso profilo di rischio rispetto all’irrorazione tradizionale con elicotteri o aerei.

Solo in tempi più recenti il legislatore nazionale ha avviato un processo di parziale riallineamento. Un emendamento al disegno di legge “Semplificazioni” (A.S. n. 1184, XIX legislatura) ha introdotto, nell’autunno 2025, una deroga controllata al divieto di irrorazione aerea, prevedendo la possibilità di autorizzare – per un periodo sperimentale limitato – l’impiego di droni per la distribuzione di prodotti fitosanitari su terreni con pendenza pari o superiore al 20%, a condizioni rigorose e previa adozione di criteri attuativi da parte dei ministeri competenti. Le Regioni e le Province autonome sono individuate quali autorità responsabili del rilascio delle autorizzazioni, nel rispetto del Piano d’azione nazionale per l’uso sostenibile dei prodotti fitosanitari e delle regole europee e nazionali sull’impiego dello spazio aereo.

Il caso dei droni destinati ai trattamenti fitosanitari evidenzia con chiarezza la complessità procedurale che un operatore agricolo deve affrontare. Per poter svolgere in modo pienamente conforme le operazioni, l’impresa deve:

- i) essere riconosciuta come operatore di sistemi a pilotaggio remoto presso ENAC e disporre di piloti in possesso degli attestati previsti per la categoria di rischio interessata;
- ii) ottenere l’autorizzazione aeronautica per operazioni in “categoria specifica”, corredata da una valutazione del rischio operativo;

- iii) essere qualificata come utilizzatore professionale di prodotti fitosanitari, con il relativo certificato di abilitazione;
- iv) richiedere e ottenere l'autorizzazione in deroga al divieto di irrorazione aerea presso la Regione o Provincia autonoma competente;
- v) utilizzare esclusivamente prodotti la cui etichetta preveda esplicitamente la possibilità di applicazione aerea o nell'ambito di protocolli sperimentali autorizzati. In alcune proposte attuative, inoltre, ogni intervento dovrebbe essere preceduto da una segnalazione certificata di inizio attività indirizzata ai servizi fitosanitari regionali, accompagnata da una relazione agronomica che motivi le scelte tecniche.

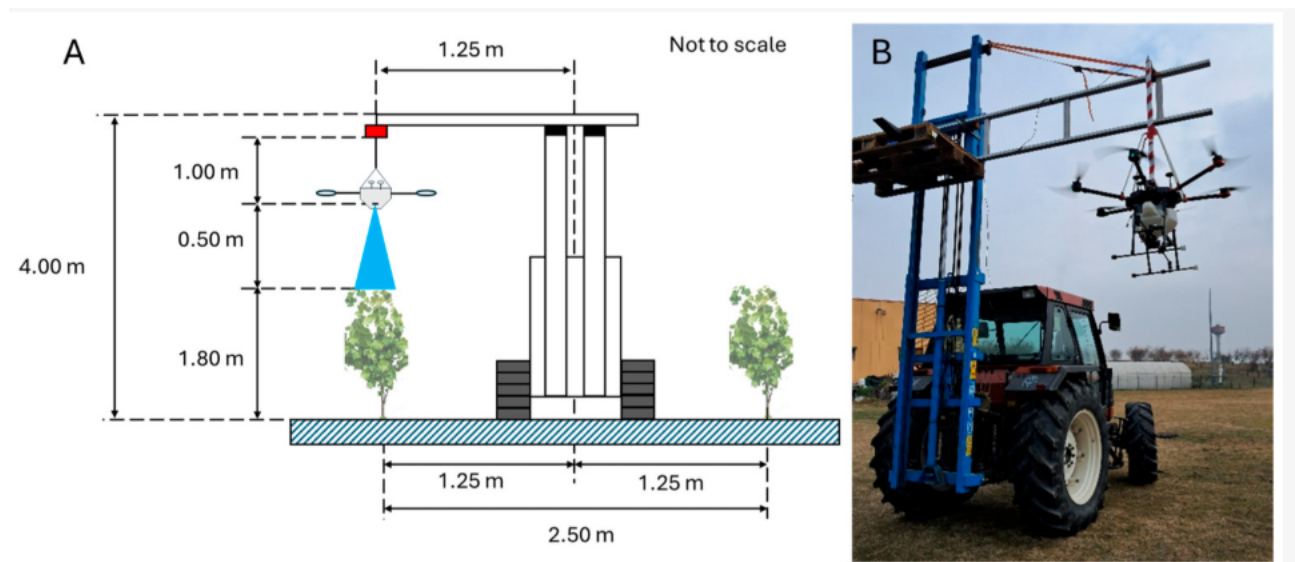
Questa sovrapposizione di livelli autorizzativi e di fonti normative – aeronautiche, fitosanitarie, ambientali e di sicurezza sul lavoro – genera costi amministrativi elevati, tempi lunghi e incertezza interpretativa, soprattutto per le aziende di dimensione ridotta e per gli operatori che non dispongono di competenze giuridiche specialistiche. A ciò si aggiungono ulteriori criticità: la mancanza, allo stato attuale, di prodotti fitosanitari registrati specificamente per l'applicazione via drone, fatta eccezione per alcune categorie come i biostimolanti, limita fortemente la possibilità di impieghi ordinari; la disciplina sulla tutela dei dati personali e delle immagini impone cautele ulteriori nell'uso di sensori e telecamere a bordo, specie in contesti prossimi a insediamenti abitativi. Il risultato è un quadro in cui, pur a fronte di numerose sperimentazioni e progetti pilota, il numero di casi realmente operativi rimane contenuto e l'Italia appare in ritardo rispetto ad altri Paesi che hanno già introdotto regole più flessibili per l'impiego di droni in agricoltura.

Questo disallineamento contrasta con la valutazione ampiamente condivisa dei potenziali benefici dello strumento. Numerosi contributi tecnici evidenziano come i droni possano ridurre la quantità di prodotto distribuito, migliorare l'uniformità di copertura, limitare il rischio di deriva e, soprattutto, diminuire l'esposizione diretta degli operatori ai prodotti fitosanitari, grazie alla possibilità di intervenire a distanza e su aree difficilmente accessibili con mezzi terrestri (pendenze elevate, suoli saturi, colture a struttura complessa). A ciò si aggiungono i vantaggi in termini di tempestività degli interventi, riduzione del compattamento del suolo e integrazione con sistemi di agricoltura di precisione basati su dati georeferenziati.

Il caso dei droni in agricoltura rappresenta dunque un esempio emblematico di come la distanza temporale e concettuale tra il momento di elaborazione delle norme e l'evoluzione delle tecnologie possa generare vincoli non intenzionali all'innovazione. Da un lato, il legislatore europeo ha introdotto regole comprensibilmente prudenziali sull'irrorazione aerea in un contesto in cui l'unico riferimento erano i velivoli con equipaggio; dall'altro, l'affermazione di nuove soluzioni tecniche,

più leggere e più controllabili, richiede oggi un ripensamento calibrato del quadro di regole, capace di mantenere elevati standard di tutela della salute e dell'ambiente, ma al tempo stesso di valorizzare gli strumenti che possono contribuire al raggiungimento di tali obiettivi. In questo senso, la recente apertura alla sperimentazione con droni – pur limitata e temporanea – può essere letta come un laboratorio istituzionale nel quale verificare, su basi empiriche, se e a quali condizioni una revisione del divieto generale di irrorazione aerea possa risultare coerente con i principi di sostenibilità che ispirano la disciplina europea sull'uso dei prodotti fitosanitari.

Immagine 9: Allestimento sperimentale con drone vincolato a un braccio meccanico supportato da trattore in soccorso alle difficoltà di ottenere autorizzazione al volo.



Questa soluzione sperimentale, illustrata nell'Immagine 9 e sviluppata nell'ambito di uno studio congiunto dell'Università Cattolica del Sacro Cuore (sede di Piacenza) e dell'Università di Torino, nasce dalle difficoltà di ottenere autorizzazioni per veri e propri voli operativi con distribuzione di miscela. Per poter proseguire l'attività di ricerca nel rispetto delle prescrizioni del Ministero competente e dell'ENAC, i ricercatori sono stati di fatto costretti a trasformare il drone in un'attrezzatura vincolata al trattore, simulando le condizioni di lavoro in volo senza poter impiegare la piattaforma nel modo per cui è stata originariamente progettata. L'immagine costituisce quindi un caso emblematico del paradosso regolatorio che limita lo sviluppo della ricerca e della sperimentazione applicata su un tema di grande attualità quale l'impiego dei droni nella protezione delle colture.

4. Diffusione delle tecnologie digitali nelle aziende agricole italiane

Questo capitolo analizza la **diffusione delle tecnologie digitali nelle aziende agricole italiane**, con l'obiettivo di comprendere in che misura la transizione digitale stia effettivamente interessando il settore, quali strumenti risultino oggi maggiormente adottati e quali divari – territoriali, settoriali e dimensionali – permangano ancora aperti. Dopo aver inquadrato nei capitoli precedenti il ruolo della digitalizzazione nel sistema agro-alimentare e le principali traiettorie di innovazione, qui l'attenzione si sposta sui **dati empirici** e su un primo tentativo di **misurare in modo strutturato l'adozione delle tecnologie digitali** in agricoltura.

In linea con l'impostazione teorica già delineata, l'adozione viene interpretata non come semplice dotazione tecnologica, ma come processo che può tradursi in valore solo quando le soluzioni sono integrate stabilmente nei processi decisionali e organizzativi dell'impresa (Davis, 1989; Venkatesh et al., 2003).

Le ipotesi e le domande di ricerca sono coerenti con una lettura integrata dei modelli di accettazione/adozione e della prospettiva socio-tecnica della digitalizzazione rurale. Da un lato, i costrutti di utilità attesa e percezione della complessità d'uso, insieme alle condizioni facilitanti, suggeriscono che la probabilità di adozione aumenti quando i benefici sono credibili e quando infrastrutture, competenze e supporto organizzativo riducono i costi di apprendimento. Dall'altro, l'evidenza sulla digitalizzazione nelle aree rurali indica che interoperabilità e governance dei dati, densità dei servizi e presenza di intermediari dell'innovazione contribuiscono a spiegare divari territoriali e settoriali. In questo quadro, le variabili aziendali (dimensione economica, scala di attività, capitale umano) e territoriali (macro-area) sono interpretate come proxy di tali canali e permettono di testare in modo sistematico le domande D1–D4.

Nella prima parte viene presentata l'indagine **AGRIcoltura100**, promossa da Confagricoltura e Reale Mutua, che costituisce una fonte informativa privilegiata per valutare il grado di innovazione e sostenibilità delle imprese agricole italiane. L'analisi del campione, delle sue caratteristiche territoriali e settoriali e delle principali tipologie di innovazione adottate consente di delineare un quadro aggiornato dello stato di diffusione delle tecnologie 4.0 – dalla meccanizzazione avanzata ai sistemi di monitoraggio con sensori, satelliti e droni – evidenziando al contempo le differenze tra comparti produttivi e macro-aree geografiche.

Successivamente, il capitolo amplia lo sguardo alla **dimensione tecnologica e di mercato** attraverso un'analisi delle principali piattaforme digitali disponibili a livello globale e nazionale: sistemi di supporto alle decisioni (DSS), soluzioni IoT per il monitoraggio colturale, droni e immagini satellitari, software gestionali e strumenti di agricoltura di precisione. Di ciascuna categoria vengono richiamati funzioni, benefici, ambiti di utilizzo e livelli stimati di diffusione in Italia, ponendo particolare attenzione alle piattaforme più rilevanti per il contesto nazionale.

Infine, nella parte conclusiva viene illustrato il **Modello Matematico Proporzionale Generale** elaborato per stimare le percentuali di adozione delle singole piattaforme digitali per categoria tecnologica. Il modello integra fonti diverse (Osservatorio Smart Agrifood, AGRIColtura100, ISTAT, Eurostat, FederUnacoma, dati dei produttori), traducendo informazioni aggregate e quote di mercato in stime coerenti di utilizzo delle singole soluzioni. Questo approccio permette non solo di quantificare in modo omogeneo la diffusione delle piattaforme, ma anche di discutere la **robustezza, i limiti e le implicazioni** delle stime ottenute, ponendo le basi per le analisi successive sugli impatti economici, ambientali e territoriali della digitalizzazione in agricoltura.

In tale prospettiva, il capitolo si colloca nel filone di analisi economiche e di policy sul “technology uptake” in agricoltura, oggetto di attenzione anche in contributi recenti del dibattito internazionale (ad es. Special Issue di Bio-based and Applied Economics su “Economic and policy analysis of technology uptake for the smart management of agricultural systems”).

4.1 Risultati dell'indagine AGRIColtura100

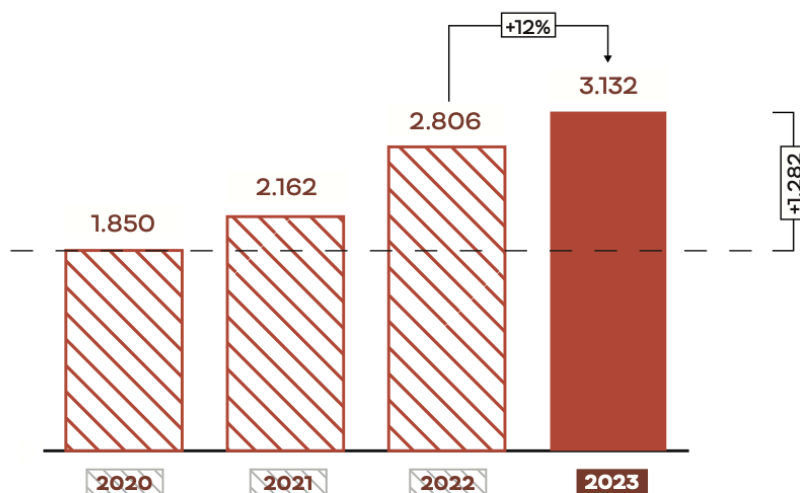
Il progetto **AGRIColtura100**, promosso da Confagricoltura e Reale Mutua, rappresenta un'iniziativa interessante per monitorare e incentivare l'adozione di tecnologie e pratiche sostenibili nelle aziende agricole italiane. L'iniziativa non solo mira a misurare il livello di sostenibilità delle imprese agricole, ma offre anche uno strumento per valorizzare e premiare le aziende che stanno guidando questa trasformazione. Con l'aumento della complessità e delle sfide che il settore agricolo deve affrontare, **AGRIColtura100** fornisce dati preziosi che possono essere utilizzati per orientare le politiche agricole e i futuri investimenti in innovazione.

È tuttavia opportuno ricordare che si tratta di un'indagine basata su partecipazione volontaria e su informazioni auto-riferite: le evidenze che seguono dovranno quindi essere lette come descrizione informativa del fenomeno e delle sue eterogeneità, più che come stima perfettamente rappresentativa dell'intero universo delle aziende agricole italiane.

Questa indagine, giunta alla **terza edizione**, ha coinvolto un campione rappresentativo annuo di **oltre 1.000 aziende agricole** italiane. Nel dettaglio l'indagine di **AGRIColtura100** ha ottenuto nel 2023 la

partecipazione di 3.132 imprese, proseguendo il continuo aumento dalla prima edizione del 2020, quando parteciparono 1.850 imprese.

Figura 2: Imprese partecipanti ad **AGRIcoltura100**



Fonte: Rapporto AGRICOLTURA100 rapporto 2024

L'analisi proposta in questo capitolo si basa sui dati raccolti attraverso il Questionario **AGRICOLTURA100**, che ha indagato diversi aspetti dell'innovazione e della sostenibilità delle aziende agricole italiane. Questi dati, elaborati e presentati sotto forma di grafici e tabelle, permetteranno di evidenziare i settori agricoli e le regioni più innovative, oltre a individuare eventuali aree di miglioramento.

L'analisi approfondita dei dati raccolti nell'ambito dell'indagine **AGRICOLTURA100**, ha l'obiettivo generale di comprendere l'attuale stato di digitalizzazione e innovazione tecnologica nel settore agricolo italiano.

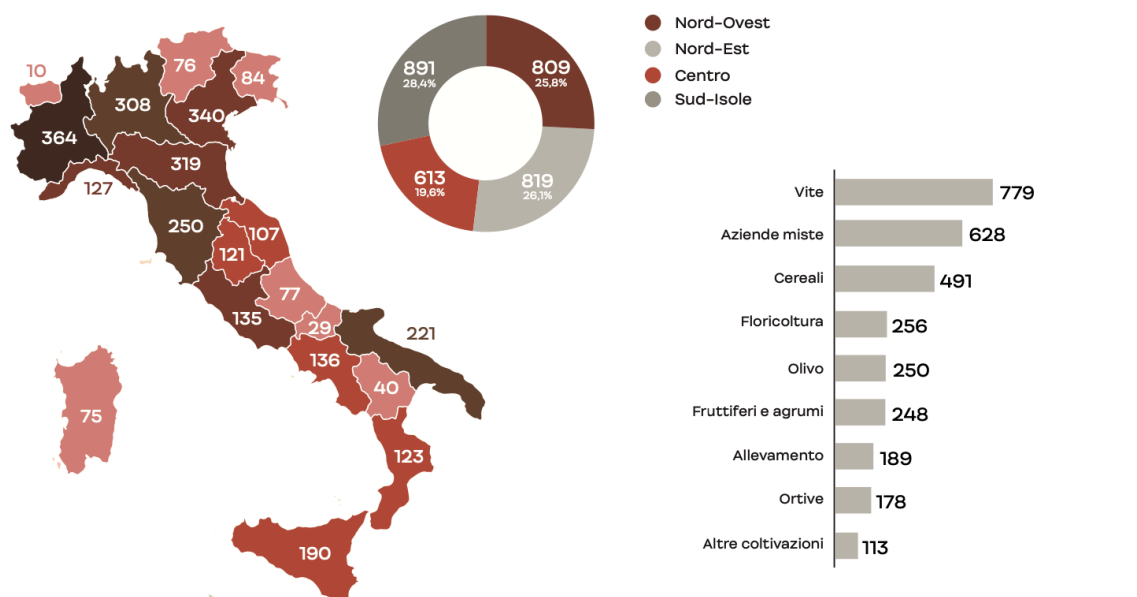
Mentre nello specifico gli obiettivi sono:

1. **Valutare l'adozione delle tecnologie digitali:** Analizzare la diffusione e l'uso delle tecnologie digitali nel settore agricolo, come droni, sensori, software di gestione e tecniche di agricoltura di precisione. L'obiettivo è comprendere quanto queste tecnologie siano integrate nelle pratiche quotidiane delle aziende agricole e quali siano le barriere e le opportunità per una maggiore diffusione.

2. **Misurare l'impatto economico:** Esaminare e valutare la relazione possibile tra l'adozione delle tecnologie digitali e la dimensione aziendale sia in termini reddituali che fisici. Questo include l'analisi dell'efficienza operativa, la riduzione dei costi e l'aumento della produttività. L'indagine cerca di identificare se e come le tecnologie contribuiscano a un miglioramento significativo dei risultati economici delle imprese agricole. In coerenza con l'impostazione TAM/UTAUT, tale relazione può essere letta anche come esito di "aspettative di performance" (benefici attesi) e "condizioni facilitanti" (risorse e capacità organizzative) che differiscono in funzione della scala aziendale.
3. **Analizzare l'impatto ambientale:** Valutare la relazione tra tecnologie digitali e sostenibilità ambientale. Questo comprende la riduzione delle emissioni di gas serra, l'uso più efficiente delle risorse naturali e l'adozione di pratiche agricole più sostenibili. L'indagine mira a capire come le tecnologie contribuiscano a una gestione più ecologica delle risorse e alla mitigazione dell'impatto ambientale.
4. **Indagare le dinamiche di mercato:** Studio delle dinamiche di mercato e dei prezzi dei prodotti agricoli in relazione all'adozione delle tecnologie. L'obiettivo è comprendere come la tecnologia influenzi la competitività delle aziende agricole e l'andamento dei mercati agricoli.
5. **Fornire informazioni utili per le politiche:** Fornire dati utili per le decisioni politiche e per la formulazione di strategie che possano incentivare l'adozione delle tecnologie e supportare la sostenibilità e la competitività del settore agricolo. L'indagine intende offrire indicazioni concrete per le politiche pubbliche e i programmi di supporto per le imprese agricole.

Il Rapporto 2024 indica come il settore agricolo stia attraversando una fase di trasformazione significativa grazie all'adozione di tecnologie moderne e pratiche sostenibili. Tuttavia, le aziende devono affrontare diverse sfide, tra cui l'adattamento ai cambiamenti climatici e le fluttuazioni dei mercati. Le politiche di supporto e l'innovazione rimangono cruciali per il futuro del settore.

Figura 3: Distribuzione del campione per territorio e principale specializzazione produttiva



Fonte: Rapporto *AGRIcoltura100* rapporto 2024

La Figura 3 mostra la rappresentatività del campione, distribuito in tutte le regioni italiane e in tutti i comparti produttivi dell'agricoltura.

Il campione analizzato rappresenta una distribuzione geografica mediamente equilibrata, includendo aziende localizzate in tutte le macro-aree del Paese - Nord-Ovest, Nord-Est, Centro e Sud-Isole - secondo proporzioni coerenti con la distribuzione territoriale del tessuto imprenditoriale agricolo nazionale. Tale articolazione territoriale consente di cogliere le differenti condizioni strutturali, climatiche e organizzative che caratterizzano le diverse aree del Paese, riflettendo la pluralità dei modelli produttivi e gestionali presenti nel sistema agricolo italiano.

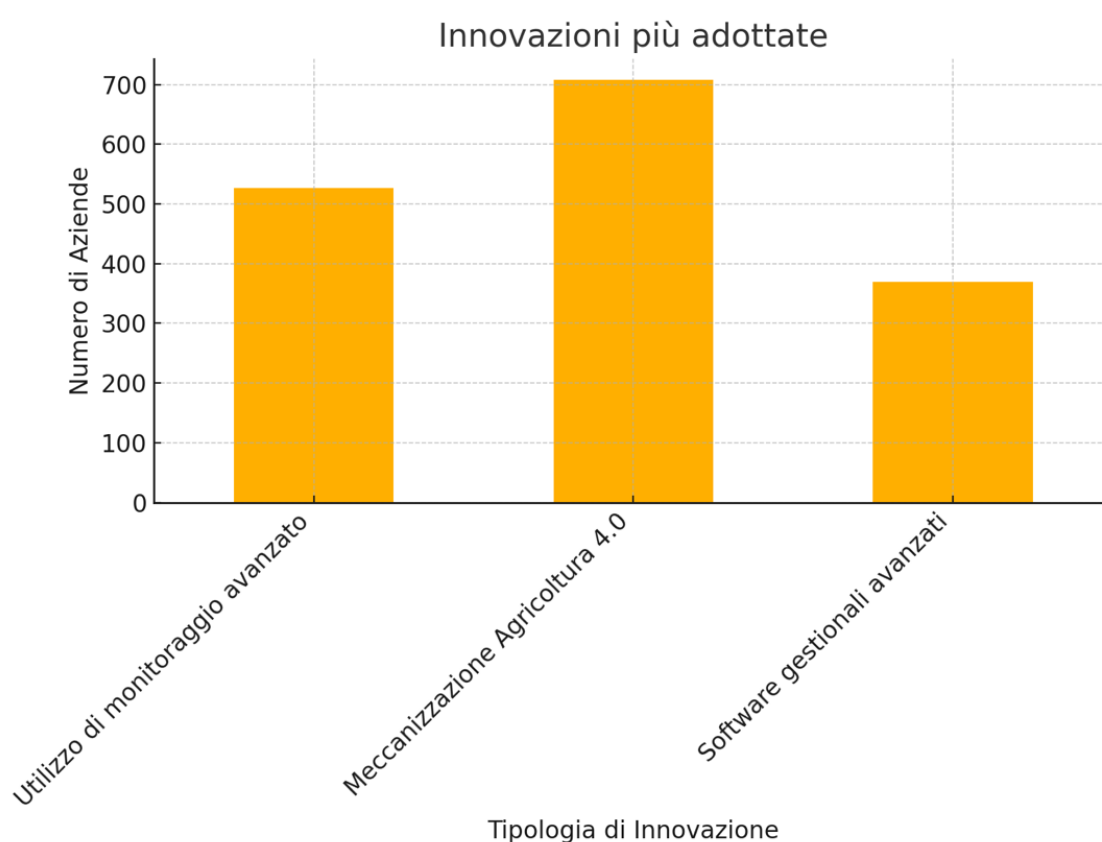
Risulta eterogeneità anche dal punto di vista settoriale, riproducendo in modo fedele la diversificazione produttiva dell'agricoltura nazionale. Sono infatti rappresentati i principali comparti produttivi, tra cui la viticoltura (779 aziende), le aziende miste (628), la cerealicoltura (491), la floricoltura (256), l'olivicoltura (250), la frutticoltura e gli agrumi (248), l'allevamento (189), l'orticoltura (173) e altre coltivazioni specializzate (113). Questa composizione plurima permette di includere realtà agricole caratterizzate da differenti livelli di intensità tecnologica, fabbisogni tecnici e modelli di gestione, migliorando la robustezza dell'analisi comparativa.

Nel complesso, tale configurazione garantisce un livello di rappresentatività adeguato rispetto alle principali dimensioni strutturali del settore agricolo italiano - territoriali, produttive e organizzative - fornendo una base informativa solida e affidabile per l'analisi dei comportamenti aziendali, dei

fabbisogni emergenti e dei livelli di adozione delle tecnologie digitali e innovative lungo l'intera filiera agricola.

Il 32% delle imprese hanno adottato tecnologie e tecniche innovative per la sostenibilità ambientale: meccanizzazione per l'Agricoltura 4.0 (18,5%), utilizzo avanzato dei dati attraverso sistemi di monitoraggio o mappatura di coltivazioni e terreni con sensori, centraline, satelliti e droni (14,5%), e altre iniziative.

Grafico 3: Innovazioni maggiormente adottate



*Fonte: elaborazione personale su dati **AgriCultura100** Rapporto 2024*

Il Grafico 3 rappresenta gli investimenti in innovazioni tecnologiche nel settore agricolo suddivisi per tipologia di coltivazione. È evidente come le coltivazioni più intensive, come cereali e vite, stiano investendo significativamente in tecnologie avanzate per migliorare la produttività e la sostenibilità. D'altro canto, settori come l'allevamento e le colture orticole sono ancora meno coinvolti in questa transizione tecnologica, sebbene ci siano segnali di crescita anche in questi ambiti. L'adozione delle tecnologie è destinata ad aumentare nei prossimi anni, con le coltivazioni che dovranno affrontare sfide legate alla sostenibilità ambientale e all'efficienza operativa.

Le tecnologie analizzate includono:

- **Utilizzo di monitoraggio avanzato** (in giallo): Sistemi di monitoraggio che utilizzano sensori, droni, satelliti e altre tecnologie avanzate per raccogliere dati in tempo reale sulle colture e sui terreni.
- **Meccanizzazione Agricoltura 4.0** (in arancione): Macchine agricole autonome o semi-autonome, connesse digitalmente e ottimizzate per l'agricoltura di precisione.
- **Software gestionali avanzati** (in rosso): Strumenti software che consentono una gestione efficiente delle attività agricole, dalla pianificazione alla tracciabilità dei prodotti.

1. Tecnologia più adottata: Meccanizzazione Agricoltura 4.0

La **meccanizzazione per l'Agricoltura 4.0** è l'innovazione più adottata, con più di **700 aziende** che hanno implementato questo tipo di tecnologia. Questo risultato riflette la crescente automazione del settore agricolo, dove i macchinari intelligenti e automatizzati permettono di ottimizzare le operazioni agricole, ridurre i costi di manodopera e aumentare la produttività.

Le ragioni di questa adozione diffusa possono essere legate a:

- La capacità delle macchine agricole moderne di ridurre il lavoro manuale e migliorare l'efficienza operativa.
- Incentivi politici e finanziari per promuovere l'automazione e la digitalizzazione dell'agricoltura.
- La necessità di ottimizzare la resa, soprattutto nelle coltivazioni intensive come cereali e vite.

2. Utilizzo di Monitoraggio Avanzato

Il **monitoraggio avanzato** è la seconda innovazione più diffusa, adottata da circa **500 aziende**. Questo tipo di tecnologia permette agli agricoltori di monitorare costantemente le condizioni del terreno, delle colture e del clima, ottimizzando l'uso di risorse come acqua e fertilizzanti. La maggiore diffusione di questa tecnologia è associata alla crescente attenzione verso la **sostenibilità ambientale** e alla necessità di ridurre l'impatto ambientale dell'agricoltura.

L'adozione di questi sistemi permette di:

- Ridurre lo spreco di risorse idriche attraverso un'irrigazione mirata.
- Monitorare le condizioni climatiche per prevenire danni alle colture.

- Migliorare la gestione complessiva delle attività agricole, aumentando la sostenibilità delle operazioni.

3. Software Gestionali Avanzati

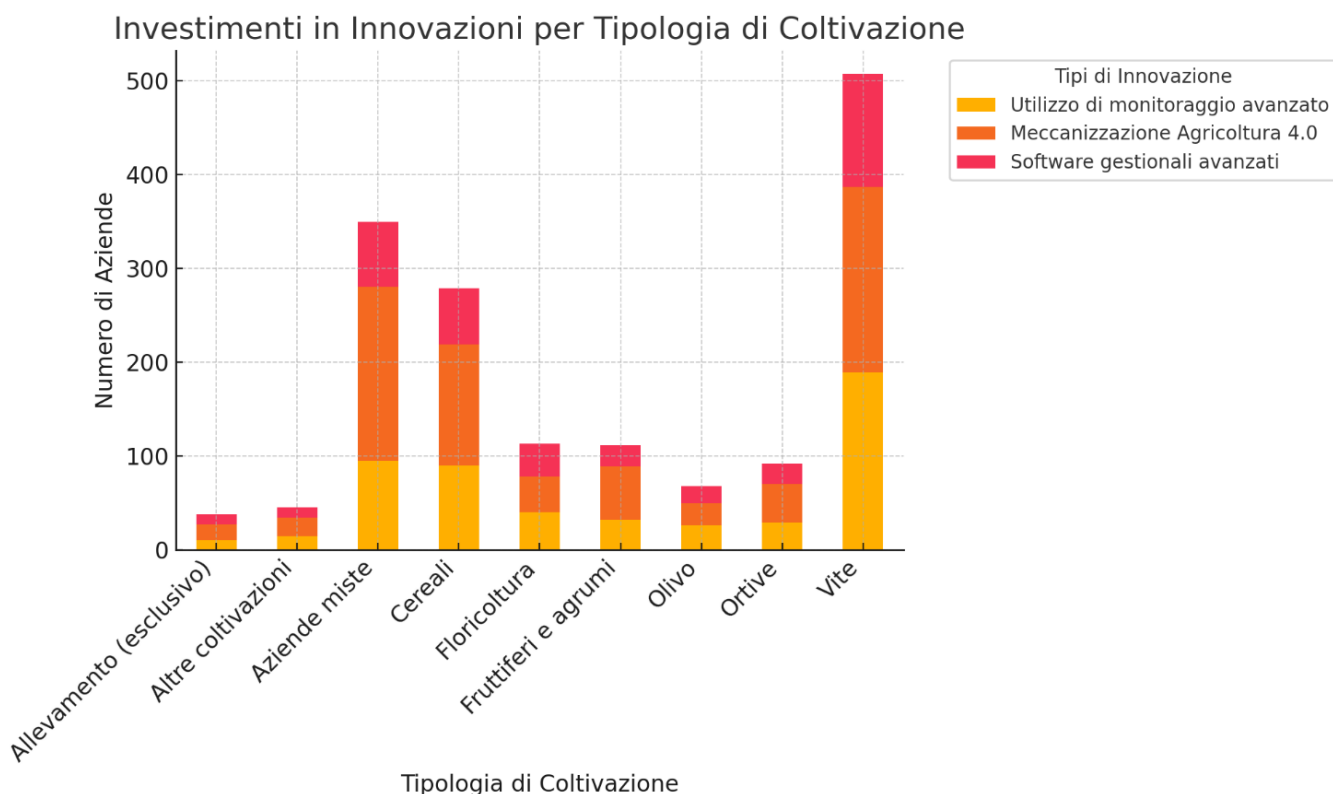
I **software gestionali avanzati** sono meno diffusi rispetto alle altre tecnologie, con meno di **400 aziende** che li hanno adottati. Tuttavia, i software gestionali rappresentano uno strumento cruciale per ottimizzare le attività aziendali, consentendo una migliore pianificazione e gestione delle risorse, nonché una maggiore efficienza operativa.

Nonostante il loro potenziale, la minore diffusione rispetto alle altre tecnologie potrebbe essere dovuta a diversi fattori:

- Costi iniziali di implementazione e necessità di formazione.
- Complessità nell'integrare questi sistemi con le operazioni agricole tradizionali.
- Percezione di un ritorno meno immediato rispetto ad altre tecnologie più tangibili come i macchinari.

L'adozione del **monitoraggio avanzato** e dei **software gestionali** sta crescendo rapidamente, spinta dalla necessità di ottimizzare l'uso delle risorse e migliorare la sostenibilità ambientale. Le aziende agricole stanno progressivamente integrando queste innovazioni per rispondere alle sfide legate alla produttività, sostenibilità e competitività.

Grafico 4: Investimenti in innovazioni per tipologia di coltivazione



Fonte: elaborazione personale su dati **AgriCultura100** Rapporto 2024

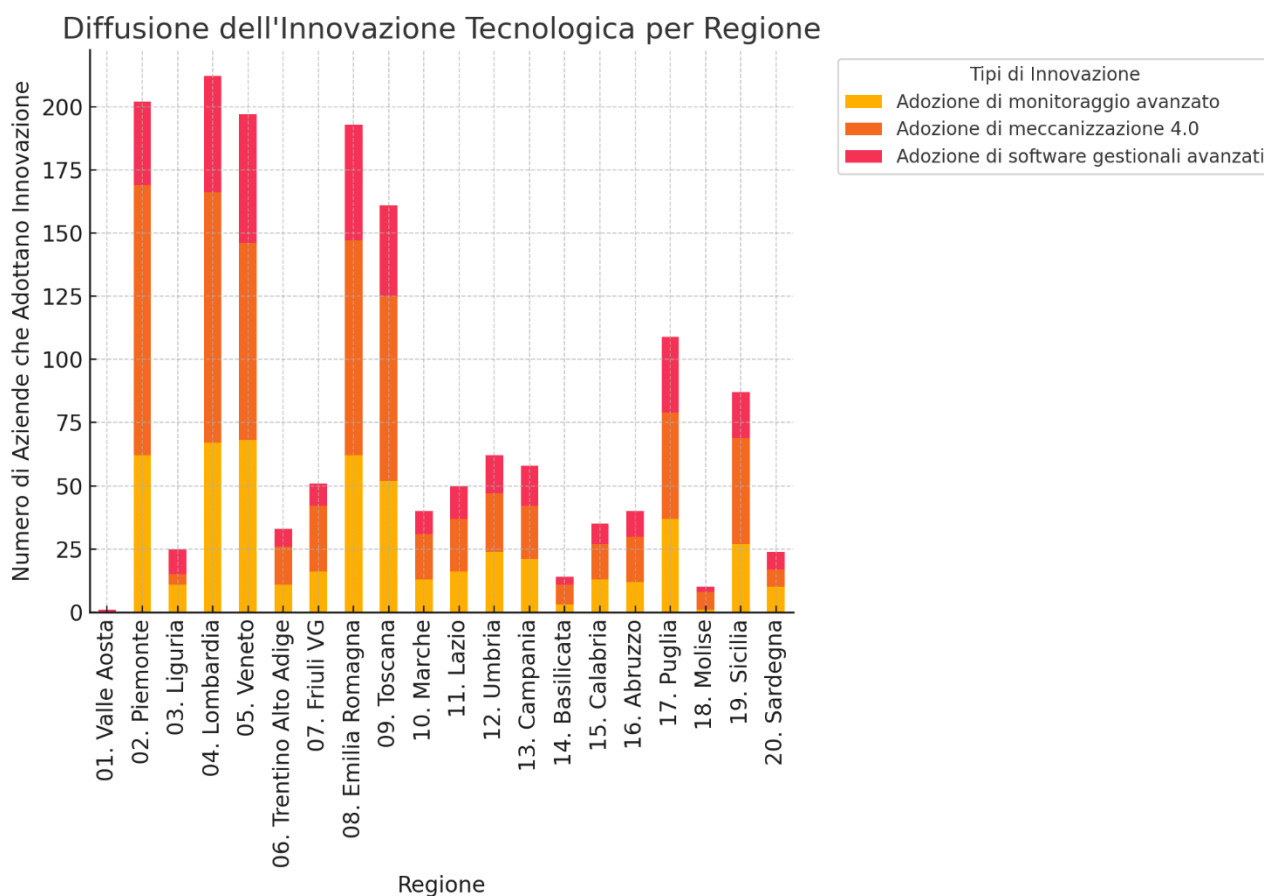
Le **aziende miste**, le **coltivazioni di cereali**, e la **vite** sono tra le tipologie di coltivazione che hanno investito maggiormente in innovazione. Questi settori, essendo caratterizzati da una produzione intensiva e da esigenze di gestione complesse, sono i principali beneficiari delle tecnologie avanzate.

- **Aziende miste:** Queste aziende, che spesso combinano coltivazioni diverse e allevamento, sono le più tecnologicamente avanzate. Gli investimenti in **meccanizzazione 4.0** e **software gestionali** sono particolarmente elevati, probabilmente per la necessità di coordinare molteplici attività agricole e ottimizzare la produttività.
- **Cereali:** Anche il settore dei cereali ha fatto notevoli investimenti in tutte e tre le aree tecnologiche, con una forte presenza di sistemi di monitoraggio avanzato e meccanizzazione. Questo è in linea con la necessità di ottimizzare le coltivazioni su larga scala, riducendo i costi operativi e migliorando la resa per ettaro.
- **Vite:** Il settore della vite, che rappresenta uno dei pilastri dell'agricoltura italiana, si distingue per un alto livello di innovazione, soprattutto per quanto riguarda l'adozione di **meccanizzazione Agricoltura 4.0** e **monitoraggio avanzato**.

D'altro canto, le coltivazioni di **olivo**, **ortive**, e le aziende dedicate esclusivamente all'**allevamento** mostrano un livello inferiore di adozione tecnologica.

- **Olivo e Ortive:** Queste coltivazioni hanno investito meno in innovazioni tecnologiche. Ciò potrebbe essere dovuto alla natura delle colture stesse, che richiedono meno infrastruttura tecnologica o sono più difficili da automatizzare. Tuttavia, la presenza di investimenti, seppur limitati, indica una tendenza in crescita verso l'adozione di nuove tecnologie anche in questi settori.
- **Allevamento esclusivo:** Le aziende dedicate esclusivamente all'allevamento presentano il livello più basso di investimenti. Questo potrebbe riflettere una minore necessità di innovazioni come il monitoraggio avanzato o la meccanizzazione, data la diversa natura delle attività legate all'allevamento rispetto alle coltivazioni.

Grafico 5: Diffusione dell'innovazione Tecnologica per Regione



Fonte: *AgriColtura100 Rapporto 2024*

Le regioni che mostrano la maggiore diffusione delle innovazioni tecnologiche sono:

- **Lombardia, Piemonte, Veneto, ed Emilia-Romagna.** Queste regioni presentano un numero significativamente elevato di aziende che hanno adottato le tre principali categorie di tecnologie.
 - La **Lombardia** e il **Piemonte** spiccano per l'alto livello di **meccanizzazione avanzata** e di utilizzo di **software gestionali**. Questo riflette la presenza di aziende agricole di dimensioni maggiori e con maggiori capacità di investimento, che tendono ad adottare tecnologie più avanzate per migliorare la produttività e ridurre i costi operativi.
 - **Veneto** ed **Emilia-Romagna** mostrano una elevata adozione di **monitoraggio avanzato**, suggerendo che in queste regioni c'è un forte focus sul monitoraggio e la gestione efficiente delle risorse.

Nelle regioni del sud Italia, come **Molise, Basilicata, Calabria, e Sardegna**, l'adozione tecnologica è significativamente inferiore rispetto alle regioni settentrionali.

- **Molise e Basilicata** hanno il numero minore di aziende che adottano tecnologie avanzate, il che potrebbe indicare una carenza di risorse finanziarie o un minore accesso alle infrastrutture necessarie per implementare queste innovazioni.
- Anche in regioni più grandi come **Sicilia e Sardegna**, l'adozione di tecnologie è relativamente minore rispetto al nord Italia. Questo potrebbe essere il risultato di un minor livello di investimento nelle tecnologie digitali o di una maggiore presenza di aziende agricole tradizionali.

Tra le tecnologie maggiormente adottate, la **meccanizzazione per l'Agricoltura 4.0** è la tecnologia più diffusa nelle regioni più innovative, come la **Lombardia** e il **Piemonte**. Questo indica una forte tendenza verso l'automazione agricola, probabilmente dovuta alla necessità di aumentare la produttività e ridurre i costi operativi.

L'**adozione di software gestionali** è significativa, ma rimane limitata rispetto alle altre tecnologie. Tuttavia, nelle regioni con un'agricoltura più avanzata, come la **Lombardia** e il **Veneto**, i software gestionali sono un elemento chiave per ottimizzare la gestione aziendale.

In definitiva appare evidente che le regioni del **nord Italia** sono chiaramente più avanzate in termini di digitalizzazione e innovazione agricola rispetto al **centro-sud**. Queste differenze potrebbero essere attribuite a diversi fattori, come la dimensione media delle aziende agricole, l'accesso a finanziamenti per l'innovazione, e le politiche regionali a sostegno della digitalizzazione agricola.

Dall'analisi dei dati raccolti e dallo studio della bibliografia disponibile, emerge che le **barriere regionali** all'adozione dell'innovazione tecnologica nel settore agricolo italiano variano significativamente da una regione all'altra. Questi ostacoli influenzano la capacità delle aziende agricole di adottare tecnologie avanzate come il **monitoraggio avanzato**, la **meccanizzazione Agricoltura 4.0** e i **software gestionali avanzati**.

Tale quadro è coerente con la letteratura recente sulla digitalizzazione delle aree rurali, che evidenzia come driver e barriere dipendano in misura rilevante da infrastrutture, competenze, servizi di supporto e governance/interoperabilità dei dati (Ferrari et al., 2022; Rijswijk et al., 2021) e come le percezioni di costi e benefici contribuiscano a spiegare la propensione all'investimento, soprattutto nelle imprese meno strutturate (Iliopoulos et al., 2025).

L'innovazione tecnologica nell'agricoltura non è solo un fattore di competitività, ma rappresenta una leva strategica per garantire la sostenibilità ambientale, economica e sociale delle imprese agricole.

La **volontà di investire in innovazione** tra le aziende agricole italiane È molto elevata, con il **95% delle aziende agricole** intervistate che considera l'innovazione tecnologica come **“molto importante”** per il proprio futuro. Questo dato sottolinea un forte consenso tra gli operatori del settore sull'importanza dell'adozione di tecnologie avanzate, come la meccanizzazione 4.0, i software gestionali e i sistemi di monitoraggio.

Ciò implica che le aziende agricole riconoscono che l'innovazione non è più un'opzione, ma una necessità per restare competitivi e rispondere alle sfide della sostenibilità e della produttività. Questa forte volontà di innovare indica che il settore agricolo italiano è maturo per ulteriori investimenti in tecnologie avanzate, specialmente nelle regioni e nei settori che hanno mostrato ritardi nell'adozione tecnologica.

Una minoranza, rappresentata dal **5% delle aziende**, considera l'innovazione come **“abbastanza importante”**. Anche se questa percentuale è piccola, potrebbe indicare alcune aziende più conservative o con meno risorse, che ritengono l'innovazione utile, ma non urgente.

Implicazioni:

- Questo gruppo di aziende potrebbe essere più esitante nell'adottare nuove tecnologie a causa di fattori economici o logistici, come la mancanza di risorse finanziarie o competenze tecniche.
- Tuttavia, la presenza anche di questa piccola percentuale indica che esiste una parte del settore agricolo che potrebbe trarre vantaggio da politiche di sostegno più mirate, come l'accesso a incentivi per la digitalizzazione o la formazione tecnica.

L'indagine **AGRIcoltura100** rappresenta, in definitiva, una fotografia puntuale dell'evoluzione tecnologica e sostenibile del settore agricolo italiano. Dall'analisi emerge chiaramente come l'adozione di tecnologie avanzate, specialmente quelle legate all'Agricoltura 4.0, stia diventando sempre più essenziale per le aziende agricole, consentendo di affrontare sfide economiche, ambientali e di mercato. Permangono tuttavia significative disparità regionali, con le aziende del nord Italia molto più propense all'innovazione rispetto a quelle del sud, che soffrono di barriere infrastrutturali e di risorse.

In chiave interpretativa, questi risultati descrittivi possono essere ricondotti ai costrutti di adozione: la maggiore diffusione al Nord e nei comparti più capitalizzati è coerente con “condizioni facilitanti” più favorevoli (connettività, servizi, accesso a capitale) e con una minore “percezione della complessità d'uso” (competenze e capacità di implementazione), mentre nei territori svantaggiati l'elevato costo organizzativo e infrastrutturale può impedire il passaggio dall'investimento all'uso effettivo (Davis, 1989; Venkatesh et al., 2003).

4.2 Analisi delle principali piattaforme disponibili in commercio e relativa diffusione in Italia

Livello globale – alcuni esempi

Negli ultimi anni, le aziende agricole di tutto il mondo hanno adottato una vasta gamma di tecnologie digitali per migliorare l'efficienza, la produttività e la sostenibilità delle loro operazioni. Questa panoramica offre una visione dettagliata delle principali tecnologie digitali già implementate, con esempi concreti e dati sull'adozione.

Sistemi di Supporto Decisionale (DSS)

I DSS sono strumenti digitali che aiutano gli agricoltori a prendere decisioni informate basate su dati raccolti da diverse fonti. Questi sistemi analizzano dati climatici, del suolo e delle colture per fornire raccomandazioni precise su quando seminare, irrigare, fertilizzare e raccogliere. I DSS possono migliorare significativamente la gestione delle risorse e aumentare la produttività delle aziende agricole.

- **Esempio:** AgroClimate è un DSS utilizzato negli Stati Uniti che integra dati meteorologici con modelli di colture per aiutare gli agricoltori a gestire meglio i rischi climatici (Schimmelpfennig, 2016).

Internet of Things (IoT)

L'IoT permette il collegamento di dispositivi intelligenti che raccolgono e trasmettono dati in tempo reale. In agricoltura, sensori IoT monitorano parametri come umidità del suolo, temperatura, e condizioni ambientali, consentendo un monitoraggio continuo delle colture e delle risorse naturali.

- **Esempio:** In Cina, il sistema di irrigazione intelligente Pinduoduo utilizza sensori IoT per ottimizzare l'uso dell'acqua nelle risaie, migliorando la produttività e riducendo il consumo idrico (Chen et al., 2021).

Droni e Immagini Satellitari

I droni e le immagini satellitari forniscono una visione aerea delle colture, aiutando gli agricoltori a rilevare problemi di salute delle piante, infestazioni e stress idrico. Le immagini ad alta risoluzione permettono un'analisi dettagliata e una gestione precisa delle colture.

- **Esempio:** In Brasile, l'uso di droni per la mappatura delle colture di soia ha aumentato la produttività del 15% riducendo i costi operativi del 10% (FAO, 2022).

Intelligenza Artificiale (IA) e Machine Learning

L'intelligenza artificiale e il machine learning sono utilizzati per analizzare grandi quantità di dati agricoli e fornire previsioni e raccomandazioni. Queste tecnologie possono identificare modelli nei dati e suggerire interventi che migliorano la produttività e riducono i costi.

- **Esempio:** FarmBot è un robot agricolo che utilizza AI per piantare, annaffiare e monitorare le colture con una precisione millimetrica. È utilizzato in piccole aziende agricole in tutto il mondo (MarketsandMarkets, 2023).

Blockchain

La tecnologia blockchain è utilizzata per migliorare la tracciabilità e la trasparenza nella filiera agroalimentare. Questa tecnologia consente di registrare tutte le operazioni in un registro immutabile, facilitando la certificazione dei prodotti biologici e migliorando la fiducia dei consumatori.

- **Esempio:** IBM Food Trust è una piattaforma blockchain utilizzata da diverse aziende agricole per tracciare il percorso dei prodotti dal campo alla tavola, garantendo l'autenticità e la sicurezza alimentare (Osservatorio Smart Agrifood, 2023).

Robotica e Automazione

La robotica e l'automazione stanno trasformando le operazioni agricole, rendendo possibile la gestione automatizzata di attività ripetitive e laboriose. I robot agricoli sono utilizzati per seminare, diserbare, raccogliere e persino per l'impollinazione.

- **Esempio:** In Francia, il robot Vitibot è utilizzato nei vigneti per svolgere compiti come la potatura e la raccolta, migliorando l'efficienza e riducendo la necessità di lavoro manuale (FranceAgriMer, 2022).

Tabella 9: Adozione delle tecnologie digitali in agricoltura a livello globale (2023)

Tecnologia	Percentuale di Adozione Globale (%)
IoT	60
IA	50
Droni	45
DSS	40
Blockchain	30
Robotica	35

Fonte: FAO (2022); MarketsandMarkets (2023)

Occorre precisare che le percentuali di adozione “globali” dipendono da definizioni operative (perimetro tecnologico incluso) e da metodologie di stima non sempre omogenee; esse sono quindi utilizzate come indicatori di tendenza e ordine di grandezza, utili al confronto qualitativo tra categorie.

Livello nazionale - caso studio

Negli ultimi anni, l'agricoltura italiana ha avviato un profondo processo di trasformazione digitale, caratterizzato da una crescente adozione di tecnologie avanzate.

In questo paragrafo sono rappresentate le principali piattaforme digitali e tecnologie adottate nel settore agricolo italiano, suddivise in diverse categorie tecnologiche: piattaforme di gestione aziendale, sensori IoT e monitoraggio delle colture, droni e tecnologie di imaging, sistemi di supporto alle decisioni (DSS), e altri software e soluzioni specifiche. Per ciascuna categoria, vengono analizzate e descritte le funzionalità offerte, i benefici per gli utilizzatori, i costi stimati e il livello di interoperabilità con altri dispositivi o sistemi digitali.

Le percentuali di adozione riportate sono state calcolate attraverso un modello matematico sviluppato per interpolare dati provenienti da molteplici fonti che sarà successivamente rappresentato. Questo modello ha integrato informazioni dichiarate dai produttori, dati di mercato disponibili nella letteratura scientifica e biografia settoriale, oltre a statistiche ufficiali sulla quota di mercato di ogni categoria tecnologica. Il processo ha incluso una categorizzazione dettagliata delle piattaforme e delle soluzioni tecnologiche, tenendo conto di fattori come l'area geografica di utilizzo, le dimensioni delle aziende agricole e i benefici dichiarati dagli utenti. Inoltre, i dati sono stati incrociati con ulteriori fonti, tra cui studi di settore, rapporti di associazioni di categoria e analisi di mercato. Questo approccio ha consentito di stimare accuratamente i livelli di adozione, garantendo una rappresentazione attendibile della diffusione di queste tecnologie. I dettagli sul modello matematico utilizzato saranno presentati in seguito, offrendo una panoramica trasparente della metodologia impiegata.

L'integrazione di fonti eterogenee è particolarmente rilevante in un contesto in cui la disponibilità di dati micro pienamente armonizzati sulle singole piattaforme è limitata: tale limite è frequentemente richiamato nella letteratura sui processi di digitalizzazione rurale e giustifica approcci di stima per triangolazione informativa (Ferrari et al., 2022; Iliopoulos et al., 2025).

Tra le piattaforme di gestione aziendale, xFarm si distingue con un'adozione del 20%, grazie alla gestione aziendale completa e alla compatibilità con diversi dispositivi IoT. Seguono Agronica (15%) e Agricolus (12%), che offrono rispettivamente funzionalità per la tracciabilità dei prodotti e il precision farming. Piattaforme internazionali come ISAGRI (10%) e Abaco Farm (8%) forniscono soluzioni integrate per la gestione delle risorse idriche, mentre HubFarm (7%) si concentra sull'ottimizzazione delle attività operative.

I sensori IoT svolgono un ruolo cruciale nel monitoraggio in tempo reale delle condizioni ambientali e delle colture. TETIS, con un'adozione del 18%, eccelle nel monitoraggio del suolo, dell'umidità e della temperatura, fornendo dati utili per ottimizzare pratiche agricole come l'irrigazione. Elaisian, inizialmente dedicato all'olivicoltura, combina sensori IoT e consigli agronomici per una gestione ottimale degli uliveti, raggiungendo un'adozione del 10%.

I droni stanno diventando strumenti indispensabili per il monitoraggio delle colture e l'analisi multispettrale. Parrot (12%) e DJI Agriculture (10%) offrono soluzioni avanzate per la sorveglianza e la mappatura delle colture, integrandosi facilmente con piattaforme di analisi e gestione aziendale per supportare la pianificazione agronomica.

I DSS aiutano gli agricoltori a prendere decisioni basate sui dati, migliorando l'efficienza delle risorse e la resa agricola. CropX (9%) e FieldView (8%) ottimizzano l'irrigazione, la fertilizzazione e i

trattamenti fitosanitari, mentre Agricolus DSS (7%) offre soluzioni italiane per l'analisi agronomica, utilizzando dati provenienti da sensori e immagini satellitari.

Tra gli altri software, Trimble (5%) e John Deere Operations Center (7%) si concentrano sulla *precision farming* e sulla gestione delle macchine agricole. Agrivi (6%) offre soluzioni per la gestione delle colture e la tracciabilità, mentre BASF Xarvio (5%) e Syngenta Cropwise (4%) forniscono strumenti per il monitoraggio delle colture, la sostenibilità e le raccomandazioni agronomiche.

Queste tecnologie rappresentano un panorama in rapida evoluzione, con un impatto significativo sulla digitalizzazione dell'agricoltura italiana. Sebbene l'adozione vari in base alle esigenze specifiche delle aziende agricole, tutte contribuiscono a migliorare la produttività e a garantire una gestione più sostenibile delle risorse, rispondendo alle sfide contemporanee del settore.

Tabella 10: Elenco delle piattaforme maggiormente diffuse in Italia per tipologia di utilizzo

Piattaforme di Gestione Aziendale

Piattaforma	Nazionalità	Funzionalità	Benefici	Costo	Interoperabilità	Percentuale di Adozione
xFarm	Italia	Gestione aziendale completa, monitoraggio colture	Centralizzazione della gestione	Variabile, moduli aggiuntivi	Compatibile con vari dispositivi IoT	20%
Agronica	Italia	Tracciabilità prodotti, gestione registri	Migliora trasparenza e tracciabilità	Abbonamento	Integrabile con sistemi esistenti	15%
Agricolus	Italia	Precision farming, monitoraggio colture	Efficienza pratiche agronomiche	Da €50/mese	Compatibile con vari sensori IoT	12%
ISAGRI	Francia	Contabilità, gestione colture	Soluzione integrata	Variabile	Integrabile con altre soluzioni software	10%
Abaco Farm	Italia	Gestione superfici agricole, risorse idriche	Ottimizzazione risorse	Su richiesta	Compatibile con vari sensori	8%
HubFarm	Italia	Gestione aziendale, monitoraggio colture	Migliora gestione operativa	Da €30/mese	Integrabile con sensori IoT	7%

Sensori IoT e Monitoraggio delle Colture

Piattaforma	Nazionalità	Funzionalità	Benefici	Costo	Interoperabilità	Percentuale di Adozione
TETIS	Italia	Monitoraggio suolo, umidità, temperatura	Dati in tempo reale	Da €500 per sensore	Compatibile con piattaforme di gestione	18%
Elaisian	Italia	Monitoraggio olivicoltura, consigli agronomici	Gestione uliveti	Da €20/mese per sensore	Integrabile con soluzioni IoT	10%

Droni e Tecnologie di Imaging

Piattaforma	Nazionalità	Funzionalità	Benefici	Costo	Interoperabilità	Percentuale di Adozione
Parrot	Francia	Monitoraggio colture, imaging multispettrale	Sorveglianza colture	Da €1,500 per drone	Compatibile con piattaforme di analisi dati	12%
DJI Agriculture	Cina	Mappatura colture, analisi suolo	Gestione colture	Da €1,200 per drone	Integrabile con piattaforme di gestione aziendale	10%

Sistemi di Supporto alle Decisioni (DSS)

Piattaforma	Nazionalità	Funzionalità	Benefici	Costo	Interoperabilità	Percentuale di Adozione
CropX	Israele	Ottimizzazione irrigazione, fertilizzazione	Efficienza risorse	Da €300/anno	Compatibile con vari sensori	9%
FieldView (Climate Corp.)	USA	Raccomandazioni semina, trattamenti	Decisioni precise	Da €1,000/anno	Integrabile con vari sensori e sistemi	8%
Agricolus DSS	Italia	Consigli agronomici, analisi dati	Ottimizzazione pratiche	Da €50/mese	Compatibile con vari sensori	7%

Altri Software e Tecnologie

Piattaforma	Nazionalità	Funzionalità	Benefici	Costo	Interoperabilità	Percentuale di Adozione
Trimble	USA	Gestione operazioni agricole, precision farming	Aumento precisione ed efficienza	Variabile	Ampia compatibilità	5%
John Deere Operations Center	USA	Monitoraggio macchine, gestione colture	Ottimizzazione utilizzo macchine	Incluso con macchinari John Deere	Compatibile con attrezzature John Deere	7%

Piattaforma	Nazionalità	Funzionalità	Benefici	Costo	Interoperabilità	Percentuale di Adozione
Agrivi	Croazia	Gestione colture, tracciabilità	Facilitazione gestione	Da €150/mese	Compatibile con vari sensori	6%
BASF Xarvio	Germania	Gestione colture, monitoraggio malattie	Produttività e sostenibilità	Da €250/anno	Integrabile con dispositivi e piattaforme	5%
Syngenta Cropwise	Svizzera	Raccomandazioni agronomiche, analisi suolo	Decisioni precise	Su richiesta	Compatibile con vari sensori	4%

Fonte dei dati: elaborazioni personali tramite modello di interpolazione su fonti statistiche ufficiali, rapporti di settore e documentazione dei produttori di soluzioni digitali

Nel complesso, la distribuzione osservata è coerente con l'idea che l'adozione tenda a concentrarsi in soluzioni percepite come più "immediatamente utili" e più semplici da incorporare (macchine connesse, monitoraggio), mentre strumenti che richiedono maggiore integrazione organizzativa (DSS e software gestionali avanzati) incontrano più spesso barriere di competenze, interoperabilità e adattamento dei processi. Tali elementi corrispondono, nel quadro TAM/UTAUT, alle dimensioni di utilità/performance expectancy, effort expectancy e condizioni facilitanti, e risultano coerenti con le evidenze sui vincoli socio-tecnici della digitalizzazione rurale (Davis, 1989; Venkatesh et al., 2003; Ferrari et al., 2022; Rijswijk et al., 2021; Iliopoulos et al., 2025).

4.3 Il modello matematico proporzionale generale per il calcolo delle percentuali di adozione delle singole piattaforme agricole digitali per categoria tecnologica più diffuse in Italia.

Scelta del Modello

Il modello matematico proporzionale è stato scelto per la sua semplicità e capacità di combinare dati aggregati e specifici in un'unica formula. Le principali fonti utilizzate includono l'Osservatorio Smart Agrifood, che offre una panoramica dell'adozione delle tecnologie digitali con specifici riferimenti alle principali categorie, e il rapporto **AGRicoltura100**, che analizza i comportamenti di circa 3.000 aziende agricole italiane. FederUnacoma ha fornito dati relativi alle vendite di macchinari agricoli connessi, mentre ISTAT e Eurostat hanno contribuito con dati generali e comparazioni europee sull'informatizzazione del settore agricolo.

Tale approccio permette di stimare l'adozione di singole piattaforme digitali agricole in Italia utilizzando le percentuali di adozione delle categorie tecnologiche ($P_{categoria}$) e le quote di mercato relative delle piattaforme all'interno di ciascuna categoria ($W_{piattaforma}$). Questa metodologia garantisce flessibilità nell'applicazione e possibilità di aggiornamento con nuovi dati.

La formula generale del modello è:

$$P_{piattaforma} = P_{categoria} \times W_{piattaforma}$$

Dove:

- *Pcategoria*: Percentuale totale di adozione della categoria tecnologica (es. DSS, IoT, piattaforme di gestione).
- *Wpiattaforma*: Quota stimata della piattaforma all'interno della categoria, determinata dalla sua quota di mercato o diffusione.

Componenti del Modello

1. **Adozione Complessiva della Categoria ($P_{categoria}$)**: Rappresenta la percentuale di aziende agricole che adottano una determinata categoria tecnologica (ad esempio DSS, IoT, piattaforme di gestione aziendale). Questo dato è derivato da fonti ufficiali come l'Osservatorio Smart Agrifood e il rapporto **AGRIColtura100**, ISTAT ed EUROSTAT.
2. **Quota di Mercato della Piattaforma ($W_{piattaforma}$)**: La quota di mercato riflette la diffusione relativa di una piattaforma all'interno della categoria tecnologica. Questo valore è stimato sulla base di rapporti settoriali, dati dei produttori e analisi comparate tra piattaforme, analisi delle vendite riportate da FederUnacoma e comunicati ufficiali delle aziende produttrici.
3. **Percentuale di Adozione della Piattaforma ($P_{piattaforma}$)**: È il risultato del prodotto tra i due fattori precedenti. Indica la percentuale di aziende agricole che utilizzano effettivamente una specifica piattaforma.

Sintesi fonte dei dati

Tabella 11: Sintesi delle fonti di dati e applicazione del modello

Fonte	Tipo di Dato	Applicazione nel Modello
Osservatorio Smart Agrifood (2023)	Percentuali di adozione per categorie tecnologiche (DSS, IoT, piattaforme di gestione).	Base per calcolare $P_{categoria}$.
AGRIcoltura100 (2023)	Analisi su 3.000 aziende agricole italiane, incluse dimensioni aziendali e distribuzione geografica.	Supporto per le stime di $P_{categoria}$ e $W_{piattaforma}$.
FederUnacoma	Dati sulle vendite di macchinari agricoli connessi (robotica, GPS).	Calcolo delle quote per robotica e droni.
ISTAT (2023)	Dati sul numero di aziende agricole e sull'informatizzazione del settore agricolo.	Validazione dei risultati complessivi.
Eurostat	Confronto europeo sull'adozione delle tecnologie agricole.	Benchmark per l'adozione italiana rispetto ad altri Paesi.
Rapporti dei produttori (xFarm, DJI, ecc.)	Comunicati ufficiali e dati di mercato relativi alla diffusione delle piattaforme.	Determinazione di $W_{piattaforma}$

Distribuzione per Categorie Tecnologiche

La le tabelle e grafici seguenti riassumono i dati di base utilizzati per calcolare l'adozione tecnologica complessiva:

Tabella 12: Distribuzione percentuale complessiva per categoria tecnologica e fonte di dati

Categoria	Adozione Totale (%)	Fonte Primaria
Piattaforme di Gestione Aziendale	40%	Osservatorio Smart Agrifood
DSS	30%	AGRIcoltura100, FederUnacoma
Sensori IoT	35%	Osservatorio Smart Agrifood
Droni	18%	FederUnacoma
Altri Software e tecnologie	12%	FederUnacoma

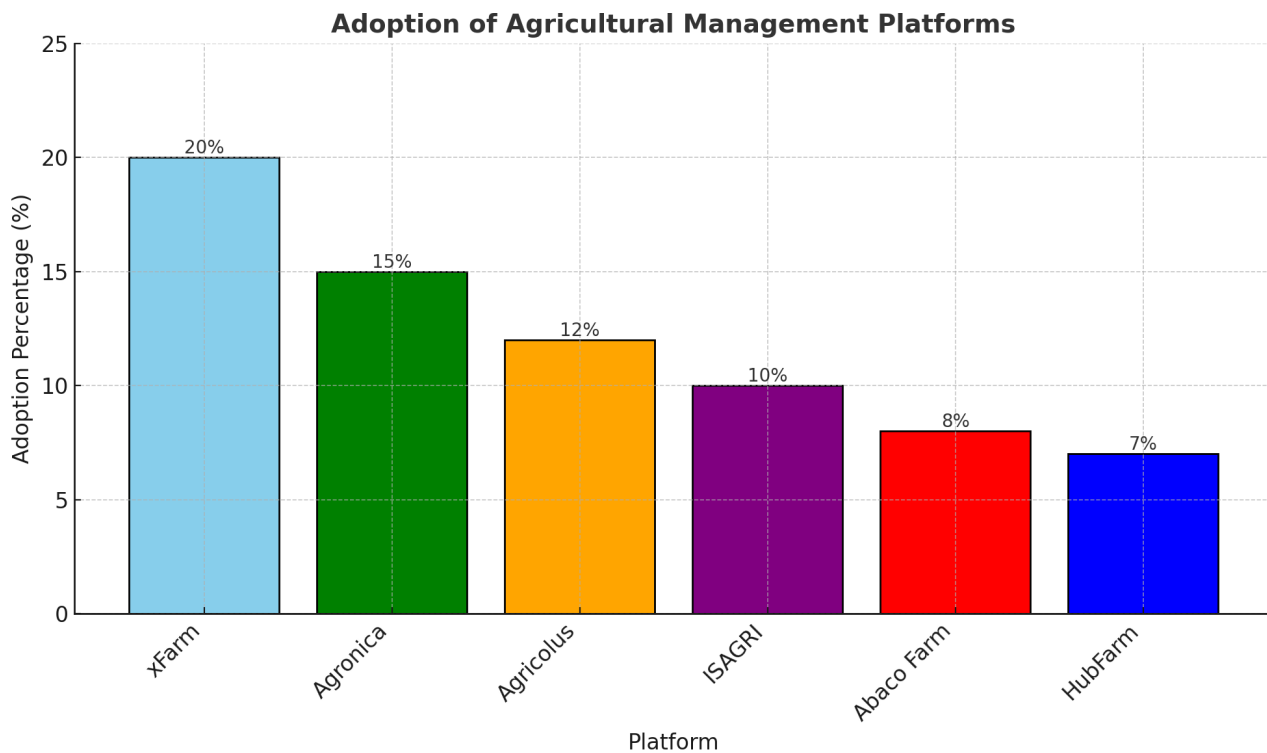
Calcoli per Singola Piattaforma

Piattaforme di Gestione Aziendale

Tabella 13: Distribuzione percentuale piattaforme di gestione aziendale

Piattaforma	Quota di Mercato ($W_{piattaforma}$)	Calcolo	Risultato (%)
xFarm	50%	$40\% \times 0.5$	20%
Agronica	37.5%	$40\% \times 0.375$	15%
ISAGRI	25%	$40\% \times 0.25$	10%
Abaco Farm	20%	$40\% \times 0.2$	8%
HubFarm	17.5%	$40\% \times 0.175$	7%

Grafico 6: Percentuale di adozione delle principali piattaforme gestionali agricole

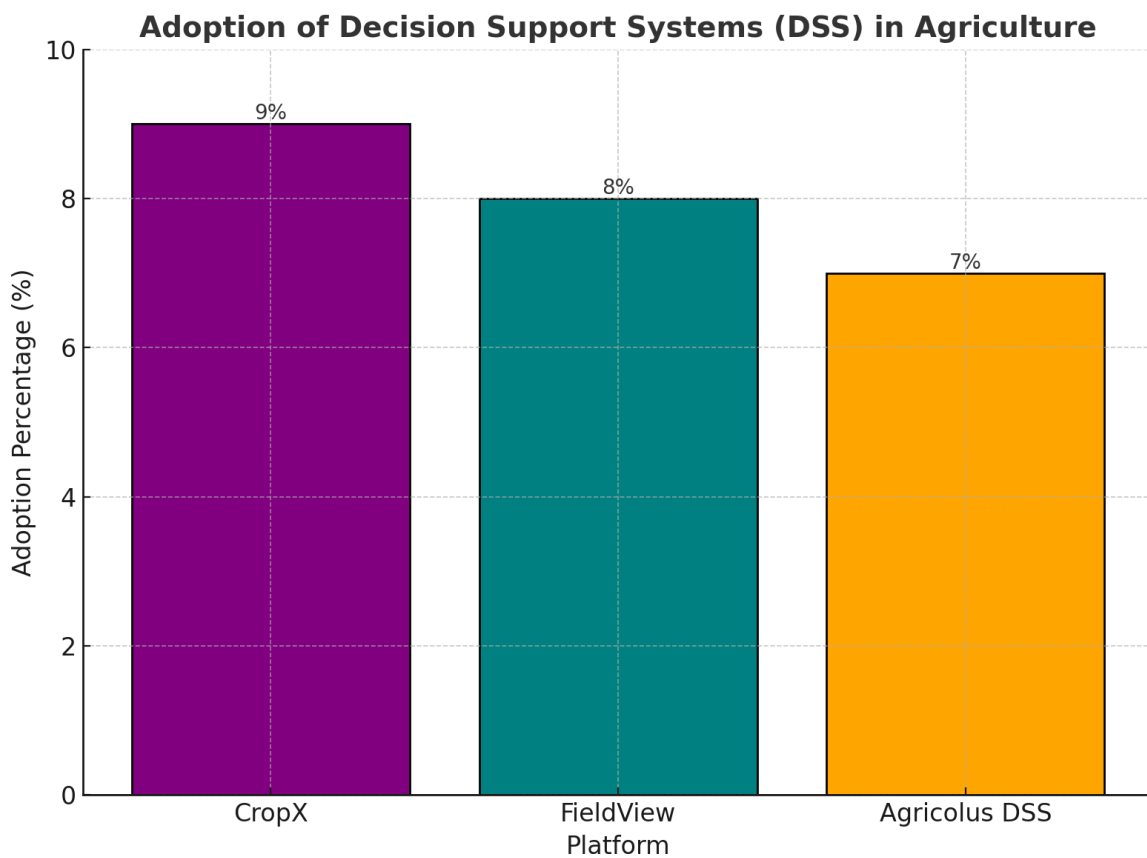


Fonte: elaborazioni personali

Tabella 14: Distribuzione percentuale piattaforme DSS

Piattaforma	Quota di Mercato ($W_{piattaforma}$)	Calcolo	Risultato (%)
Agricolus	40%	$30\% \times 0.4$	12%
CropX	30%	$30\% \times 0.3$	9%
FieldView	26.67%	$30\% \times 0.2667$	8%
Agricolus DSS	23.33%	$30\% \times 0.2333$	7%

Grafico 7: Percentuale di adozione delle principali piattaforme DSS



Fonte: elaborazioni personali

Tabella 15: Distribuzione percentuale sensori IoT per il monitoraggio delle colture

Piattaforma	Quota di Mercato ($W_{piattaforma}$)	Calcolo	Risultato (%)
TETIS	50%	$35\% \times 0.5$	18%
Elaisian	30%	$35\% \times 0.3$	10%

Si osserva che TETIS raggiunge un livello di diffusione pari al 18%, superiore di 8 punti percentuali rispetto a Elaisian (10%). Il divario è non trascurabile e suggerisce una maggiore penetrazione di TETIS sul mercato, probabilmente legata a una migliore percezione in termini di affidabilità, funzionalità offerte o supporto tecnico.

Allo stesso tempo, i valori assoluti restano contenuti: anche la tecnologia più diffusa non supera il 20% di adozione. Ciò indica che, nel complesso, l'impiego di sensori IoT per il monitoraggio delle colture è ancora in una fase iniziale di diffusione e che esiste un ampio margine di crescita potenziale, condizionato da fattori come costi di investimento, competenze digitali disponibili in azienda e qualità dell'infrastruttura di connettività.

Droni e piattaforme collegate

Tabella 16: Distribuzione percentuale utilizzo dei droni

Piattaforma	Quota di Mercato ($W_{piattaforma}$)	Calcolo	Risultato (%)
Parrot	66.67%	$18\% \times 0.6667$	12%
DJI Agriculture	55.56%	$18\% \times 0.5556$	10%

La piattaforma Parrot raggiunge un livello di diffusione pari al 12%, leggermente superiore a quello di DJI Agriculture (10%). Il divario è contenuto e segnala una competizione relativamente equilibrata tra i due fornitori, ma conferma al tempo stesso la maggiore penetrazione di Parrot nel campione considerato. Analogamente a quanto rilevato per altre soluzioni “agritech”, anche in questo caso i

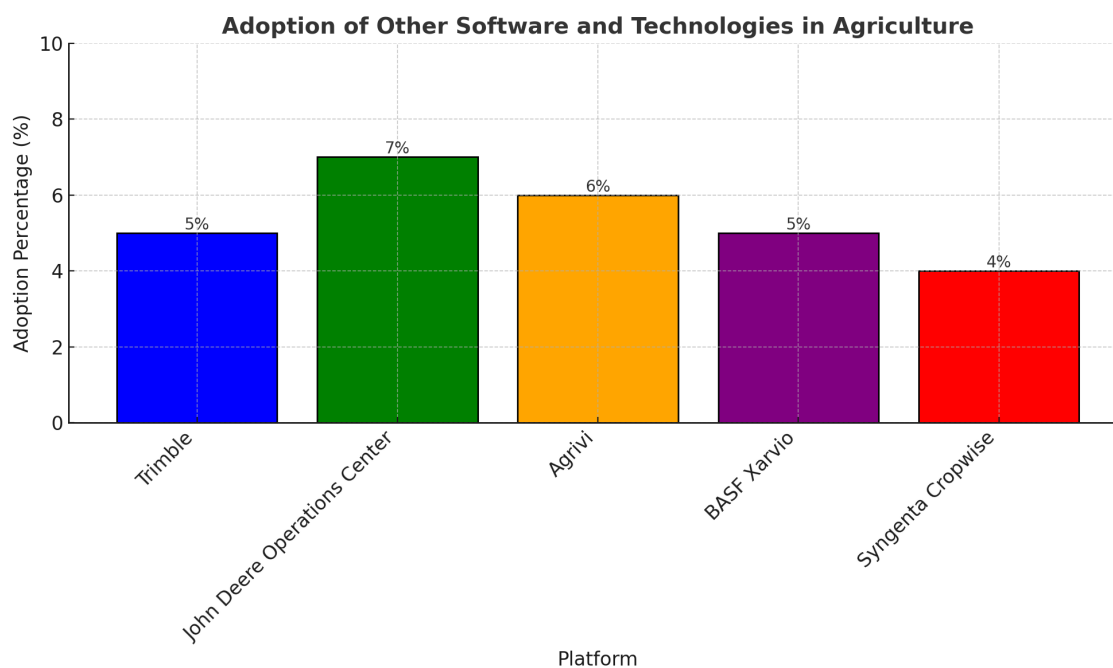
valori assoluti rimangono modesti: nessuna piattaforma supera il 15% di adozione. Ciò suggerisce che l'impiego di droni e tecnologie di imaging in agricoltura si trovi ancora in una fase iniziale di diffusione, con ampi margini di crescita potenziale, condizionati da fattori quali i costi di investimento, la disponibilità di competenze specialistiche per l'elaborazione delle immagini e l'integrazione dei dati raccolti nei processi gestionali aziendali.

Altri Software e Tecnologie

Tabella 17: Distribuzione percentuale utilizzo altri Software e Tecnologie

Piattaforma	Quota di Mercato ($W_{piattaforma}$)	Calcolo	Risultato (%)
John Deere	58.33%	$12\% \times 0.5833$	7%
Trimble	41.67%	$12\% \times 0.4167$	5%
BASF Xarvio	41.67%	$12\% \times 0.4167$	5%
Syngenta Cropwise	33.33%	$12\% \times 0.3333$	4%
Agrivi	50%	$12\% \times 0.5$	6%

Grafico 8: Distribuzione percentuale utilizzo altri Software e Tecnologie



Fonte: elaborazioni personali

Riepilogo Percentuali Finali

Tabella 18: Riepilogo Percentuali Finali

n.	Piattaforma	Percentuale di Adozione (%)	Categoria
1	xFarm	20%	Piattaforme di Gestione Aziendale
2	Agronica	15%	Piattaforme di Gestione Aziendale
3	ISAGRI	10%	Piattaforme di Gestione Aziendale
4	Abaco Farm	8%	Piattaforme di Gestione Aziendale
5	HubFarm	7%	Piattaforme di Gestione Aziendale
6	Agricolus	12%	DSS
7	CropX	9%	DSS
8	FieldView	8%	DSS
9	Agricolus DSS	7%	DSS
10	TETIS	18%	Sensori IoT
11	Elaisian	10%	Sensori IoT
12	Parrot	12%	Droni

n.	Piattaforma	Percentuale di Adozione (%)	Categoria
13	DJI Agriculture	10%	Droni
14	John Deere	7%	Altri Software e Tecnologie
15	Trimble	5%	Altri Software e Tecnologie
16	BASF Xarvio	5%	Altri Software e Tecnologie
17	Syngenta Cropwise	4%	Altri Software e Tecnologie
18	Agrivi	6%	Altri Software e Tecnologie

Attendibilità e Precisione del Modello

- **Attendibilità Stimata:** L'accuratezza del modello è valutata intorno al **90%**, sulla base della qualità e rappresentatività delle fonti utilizzate.
- **Tasso di Errore:** Si stima un margine di errore del **10%**, attribuibile principalmente a ipotesi sulle quote di mercato ($W_{piattaforma}$) e alla mancanza di dati dettagliati per specifiche regioni o settori agricoli. Assunzioni proporzionali che potrebbero non cogliere dinamiche di mercato più complesse.
- **Limiti di Precisione:** L'adozione regionale o settoriale potrebbe variare significativamente, introducendo ulteriori margini di incertezza.

È opportuno precisare che le stime di adozione per singola piattaforma rappresentano una ricostruzione coerente e comparabile basata su fonti eterogenee e ipotesi proporzionali, non una misura ufficiale. Il valore aggiunto del modello è fornire una base omogenea per confronti interni tra categorie e soluzioni, rendendo trasparenti assunzioni e limiti e consentendo aggiornamenti al variare delle quote di mercato.

Miglioramenti Possibili

1. **Dati Proprietari:** Integrare con report dei produttori per ottenere stime più precise.
2. **Validazione Accademica:** Confrontare il modello con analisi peer-reviewed.
3. **Approccio Dinamico:** Monitorare le variazioni di mercato e aggiornare periodicamente i dati.
4. **Dettaglio Regionale e Settoriale:** Raffinare i calcoli includendo specificità territoriali e tipologie colturali.

Punti di Forza del Modello

1. **Semplicità:** Facile da implementare e interpretare.
2. **Adattabilità:** Si aggiorna rapidamente con nuovi dati.
3. **Rappresentatività:** Basato su fonti autorevoli e riconosciute.

Punti di Debolezza del Modello

1. **Dipendenza dai Dati:** L'accuratezza è limitata dalla granularità delle informazioni disponibili.
2. **Approccio Statico:** Non considera dinamiche di mercato o evoluzioni temporali.
3. **Limitazioni Regionali:** Non include dettagli geograficamente specifici.

L'analisi svolta in questo capitolo mostra come la trasformazione digitale dell'agricoltura italiana sia già in atto, ma proceda con velocità e intensità molto differenziate. I risultati di **AGRIColtura100** evidenziano, da un lato, una quota non trascurabile di imprese (circa un terzo) che ha già intrapreso investimenti in tecnologie e tecniche innovative, in particolare nel campo della meccanizzazione 4.0 e del monitoraggio avanzato; dall'altro, la persistenza di ampi segmenti aziendali - per area geografica, settore produttivo e dimensione - ancora poco coinvolti nella transizione digitale. Il quadro che emerge è quello di un'agricoltura "a due velocità": imprese del Nord, di dimensioni medio-grandi, inserite in filiere organizzate e con imprenditori più giovani e istruiti, appaiono nettamente più propense all'innovazione rispetto alle aziende più piccole, localizzate nel Mezzogiorno e operanti in comparti tradizionali o meno intensivi in capitale.

L'analisi settoriale e territoriale delle innovazioni adottate conferma, inoltre, come le colture a maggior intensità produttiva (cereali, vite, aziende miste) e le regioni del Nord (Lombardia, Piemonte, Veneto, Emilia-Romagna) rappresentino oggi i poli primari di diffusione delle tecnologie digitali. Qui si concentrano gli investimenti in meccanizzazione 4.0, monitoraggio con sensori, satelliti e droni, e - seppur in misura minore - in software gestionali avanzati. Al contrario, comparti quali olivicoltura, orticoltura e allevamento esclusivo, così come molte aree del Centro-Sud, risultano caratterizzati da una minore adozione tecnologica, spesso per vincoli di risorse finanziarie, minore accesso alle infrastrutture digitali o minore capacità organizzativa. Queste evidenze confermano che la digitalizzazione agricola non è solo un tema tecnologico, ma anche strutturale e territoriale: dipende dalla dimensione d'impresa, dal capitale umano disponibile, dal grado di integrazione in filiere organizzate e dal contesto infrastrutturale e istituzionale di riferimento.

L'esame delle principali piattaforme digitali disponibili in Italia e della loro diffusione - dalle soluzioni gestionali (xFarm, Agronica, Agricolus, ISAGRI, Abaco Farm, HubFarm) ai sensori IoT (TETIS, Elaisian), dai droni (Parrot, DJI) ai DSS (Agricolus, CropX, FieldView) e ad altri software specialistici (John Deere Operations Center, Trimble, Agrivi, BASF Xarvio, Syngenta Cropwise) - evidenzia un ecosistema in rapida evoluzione, caratterizzato da un'offerta ampia e sempre più integrata. Le stime di adozione ottenute mostrano come alcune piattaforme abbiano già conquistato posizioni di leadership nei rispettivi segmenti, fungendo da riferimento per la digitalizzazione delle imprese più avanzate. Allo stesso tempo, la relativa frammentazione dell'offerta e la diversa interoperabilità tra sistemi possono rappresentare un ulteriore ostacolo per le aziende meno strutturate, che faticano a orientarsi tra soluzioni eterogenee e a coglierne appieno i benefici potenziali.

In questo contesto, il Modello Matematico Proporzionale Generale proposto consente di armonizzare fonti dati diverse (Osservatorio Smart Agrifood, AGRICOLTURA100, ISTAT, Eurostat, FederUnacoma, dati dei produttori) e di tradurre percentuali di adozione per categoria tecnologica e quote di mercato delle singole piattaforme in stime coerenti di diffusione a livello di singola soluzione. Pur presentando limiti legati alla qualità e alla granularità dei dati, nonché a ipotesi proporzionali semplificate, il modello rappresenta un passo importante verso una misurazione più strutturata della digitalizzazione agricola. Esso offre, da un lato, una base quantitativa omogenea per confrontare piattaforme e categorie tecnologiche; dall'altro, uno strumento flessibile, facilmente aggiornabile con nuove informazioni, utile per monitorare nel tempo l'evoluzione del mercato e per valutare l'efficacia delle politiche di sostegno.

Nel complesso, i risultati di questo capitolo indicano che la digitalizzazione dell'agricoltura italiana è già in grado di generare benefici tangibili - in termini di efficienza operativa, riduzione dei costi, miglior uso degli input e maggiore sostenibilità ambientale - ma che tali benefici sono oggi concentrati in una parte relativamente limitata del tessuto produttivo. L'elevata propensione dichiarata all'innovazione (con il 95% delle aziende che la considera molto importante) evidenzia un potenziale di crescita ancora ampio, a condizione che si intervenga sulle barriere economiche, conoscitive e infrastrutturali che frenano l'adozione nelle aree e nei comparti più in ritardo. Le evidenze e le stime sviluppate in questo capitolo costituiscono quindi un punto di partenza fondamentale per le analisi successive sugli impatti economici, ambientali e territoriali delle tecnologie digitali, nonché per la definizione di politiche pubbliche mirate a ridurre i divari di adozione e a guidare in modo più inclusivo la transizione digitale dell'agricoltura italiana.

Dal punto di vista teorico, le evidenze descrittive risultano **coerenti con i principali modelli di accettazione e adozione tecnologica**. In primo luogo, le differenze territoriali e dimensionali

osservate possono essere interpretate come manifestazione di “**condizioni facilitanti**” non omogenee - in termini di infrastrutture digitali, disponibilità di servizi di supporto e dotazione di capitale umano - che incidono sulla probabilità di adozione e sulla continuità d’uso. In secondo luogo, la minore diffusione di strumenti caratterizzati da maggiore intensità organizzativa (quali DSS e piattaforme integrate) appare compatibile con una più elevata **percezione della complessità d’uso** e con vincoli legati a competenze, costi di apprendimento e capacità di integrazione nei processi aziendali. In terzo luogo, la concentrazione dell’adozione in specifici comparti produttivi può essere ricondotta a **benefici attesi** relativamente più elevati e a condizioni di maggiore complementarità tra tecnologie e assetti produttivi, che rendono più agevole la costruzione di configurazioni digitali coerenti (Davis, 1989; Venkatesh et al., 2003). Parallelamente, una prospettiva **socio-tecnica** consente di leggere i divari non soltanto come esito di vincoli economici, ma anche come risultato di elementi sistemici - interoperabilità delle soluzioni, regole di gestione e circolazione del dato, qualità degli ecosistemi di innovazione - che influenzano la scalabilità e la replicabilità delle innovazioni nei contesti rurali (Ferrari et al., 2022; Rijswijk et al., 2021; Iliopoulos et al., 2025).

5. Innovazione, impatti e diversificazione nelle imprese agricole italiane: un'analisi descrittiva ed econometrica sul DB AGRICOLTURA100

Il presente capitolo struttura la parte centrale del lavoro e svolge la funzione di raccordo tra l'analisi del contesto e l'impostazione dell'esame empirico basato sui microdati del programma AGRICOLTURA100. L'attenzione è rivolta alle relazioni tra caratteristiche aziendali, condizioni territoriali e scelte di adozione tecnologica, con l'obiettivo di descrivere le configurazioni produttive, organizzative e di mercato che più frequentemente si associano alla presenza di investimenti digitali. L'adozione non viene considerata come attributo intrinseco dell'impresa, ma come risultato osservabile della combinazione di risorse disponibili, capacità gestionali e vincoli operativi entro cui ciascuna azienda si trova a operare.

L'adozione viene trattata come variabile decisionale influenzata da benefici attesi, costi/complessità di implementazione e condizioni facilitanti (infrastrutture, servizi e competenze), coerentemente con i principali modelli di accettazione e uso della tecnologia, adattati al contesto agricolo (TAM/UTAUT).

In questa prospettiva, il lavoro non si concentra sull'elenco delle tecnologie, ma sulla loro effettiva integrazione nei processi: sistemi di monitoraggio e mappatura, controllo telematico delle attrezzature, automazione delle operazioni colturali, meccanizzazione avanzata e piattaforme gestionali compaiono nel campione in configurazioni molto eterogenee. Alcune imprese adottano singoli strumenti a supporto di attività specifiche, mentre altre integrano sensori, sistemi di controllo e soluzioni di tracciabilità in architetture più articolate. Questa varietà riflette traiettorie di digitalizzazione non uniformi e influenzate dalla vocazione produttiva, dal grado di standardizzazione dei processi e dai requisiti informativi delle filiere di appartenenza.

Ne deriva l'esigenza di distinguere tra adozione "puntuale" (tecnologie isolate) e adozione "integrata" (pacchetti interoperabili), poiché la letteratura segnala che gli effetti economici e ambientali emergono più frequentemente quando la tecnologia diventa parte di routine gestionali e decisionali.

La struttura aziendale è considerata in senso ampio, includendo il numero di addetti permanenti e stagionali e l'estensione dei mercati serviti, utilizzata come proxy della scala economica e della profondità commerciale. Le imprese inserite in filiere maggiormente organizzate o soggette a requisiti informativi più complessi tendono a presentare incentivi più marcati all'adozione di tecnologie digitali. La composizione della forza lavoro, con particolare attenzione all'età degli addetti e alla

figura del conduttore, offre ulteriori elementi interpretativi, in quanto riflette livelli differenti di capitale umano e di predisposizione all'innovazione. Le relazioni analizzate sono lette esclusivamente in termini di associazione, poiché la natura trasversale dei dati non consente inferenze causali. Di conseguenza, i risultati sono interpretati come correlazioni condizionate alle covariate incluse, evitando letture causali e attribuzioni di impatto non identificabili con il disegno osservazionale disponibile.

L'analisi tiene conto anche del ruolo delle aspettative, poiché ciò che l'impresa si attende dall'introduzione di una tecnologia orienta sia la scelta degli strumenti sia le modalità con cui essi vengono integrati nei processi decisionali. Indicatori di intensità dell'adozione, basati sul numero di tecnologie implementate e sulla coerenza del loro utilizzo, permettono di mettere in relazione tali configurazioni con valutazioni di impatto formulate dalle imprese su scale ordinali. La diversificazione del fatturato è considerata come un possibile, ma non necessario, esito dei processi innovativi: molte imprese impiegano tecnologie digitali per esigenze di efficienza, di qualità o di conformità normativa, mentre l'ampliamento verso nuove attività dipende da condizioni commerciali e relazionali ulteriori. In tale quadro, la diversificazione viene trattata come esito potenziale mediato da vincoli di mercato, reti e filiera, più che come conseguenza automatica dell'adozione tecnologica. Per analizzare in modo sistematico queste relazioni, il capitolo presenta il modello econometrico utilizzato nello studio. La scelta ricade su una regressione logistica, adeguata alla natura dicotomica della variabile di interesse, che indica se l'impresa abbia o meno effettuato almeno un investimento digitale. Il modello consente di stimare come la probabilità di adozione vari al mutare delle caratteristiche aziendali, strutturali e territoriali considerate. Poiché l'evento oggetto di studio è relativamente raro, l'impostazione riflette gli standard consolidati nelle applicazioni empiriche che trattano fenomeni di bassa incidenza. A supporto della valutazione della coerenza del modello vengono presentati gli indicatori comunemente utilizzati nella letteratura logit, quali lo *pseudo-R² di McFadden*, l'area sotto la *curva ROC* e la *matrice di classificazione*; essi sono introdotti non per discuterne i valori, che verranno trattati altrove, ma per chiarire la cornice metodologica entro cui si colloca il modello. La presentazione delle metriche di adattamento è quindi funzionale alla trasparenza metodologica e alla replicabilità dell'analisi, più che a una valutazione "prestazionale" fine a sé stessa.

Accanto ai coefficienti *logit*, il capitolo introduce il calcolo degli effetti marginali medi, che costituiscono lo strumento interpretativo principale nelle analisi che seguono. Gli effetti marginali permettono di tradurre le variazioni delle covariate in variazioni dirette della probabilità di adozione, mantenendo costanti le altre caratteristiche dell'impresa. Alcune covariate categoriali presentano limitazioni nella stima degli effetti marginali, dovute alla scarsa variabilità dell'esito in determinate

categorie; queste circostanze non incidono sulla validità del modello ma richiedono attenzione nella fase interpretativa. Sono inoltre presentati i margini predetti per raggruppamenti territoriali e settoriali, utili a illustrare come l'approccio si adatti a variabili con molti livelli senza anticipare alcun commento sostantivo sui valori.

L'obiettivo complessivo del capitolo è definire in modo chiaro il quadro analitico e metodologico entro cui si colloca l'indagine empirica, illustrando le dimensioni considerate, la logica della specificazione econometrica e gli strumenti utilizzati per l'interpretazione delle stime. Il testo non anticipa risultati né implicazioni, ma prepara la lettura delle analisi successive, offrendo una base coerente per comprendere come i diversi elementi osservati concorrano a delineare la propensione delle imprese agricole italiane ad adottare tecnologie digitali.

5.1 Quadro concettuale e domande di ricerca

Il quadro metodologico si sviluppa sulla base delle variabili estratte dalla banca dati AGRIColtura100 e introduce gli elementi necessari a formulare e organizzare le domande di ricerca che orientano le analisi successive. Il perimetro informativo è articolato in quattro blocchi: il fatturato, misurato come livello o come classe; la dimensione aziendale, rappresentata attraverso classi economiche o strutturali; l'area geografica di localizzazione; e l'indirizzo colturale. A questi si affianca una misura dell'intensità di adozione tecnologica, trattata come conteggio delle famiglie implementate tra sensori e sistemi di monitoraggio, controllo telematico, automazione, meccanizzazione avanzata e piattaforme gestionali, quando tali informazioni sono rilevate all'interno del programma. L'intensità viene quindi considerata una *proxy* della complessità del "bundle" tecnologico e, indirettamente, del grado di integrazione organizzativa dell'innovazione.

L'impianto concettuale interpreta l'adozione tecnologica come risultato della combinazione tra risorse e capacità organizzative – catturate da dimensione aziendale e livello di fatturato – condizioni territoriali riassunte nell'area geografica e vincoli o opportunità tecnologico-commerciali associate all'indirizzo colturale. In questo contesto, l'elemento comportamentale centrale è rappresentato dall'intensità di adozione, indicata con m , poiché è nella combinazione di più soluzioni digitali che i processi decisionali possono contrarsi e trasformarsi lungo la sequenza dati → decisioni → azioni. Gli esiti economici sono così interpretati come funzioni di m , condizionate ai blocchi di controllo osservabili. Questa impostazione è coerente con l'idea che il valore della digitalizzazione dipenda da complementarità tra tecnologie e pratiche gestionali: a parità di singolo investimento, configurazioni più integrate possono generare rendimenti maggiori rispetto a adozioni isolate.

A partire da questo quadro, il capitolo formula le domande di ricerca che guideranno la stima e l'interpretazione dei modelli econometrici. La prima riguarda la misura in cui dimensione aziendale,

area geografica, indirizzo culturale e livello o classe di fatturato contribuiscono a spiegare l'intensità m . La seconda esplora se, a parità di tali caratteristiche, livelli più elevati di m si associno a una crescita maggiore del fatturato o, quando la dinamica non è disponibile, a un livello più elevato del fatturato osservato. La terza indaga l'eventuale presenza di eterogeneità territoriali e culturali nelle pendenze del legame tra m e risultati economici, attraverso interazioni tra intensità e area e tra intensità e indirizzo culturale. La quarta affronta il ruolo dell'indirizzo culturale come possibile moderatore del canale attraverso cui l'adozione si riflette nei risultati economici, considerando che, in assenza di una misura diretta di diversificazione nel database, gli orientamenti produttivi distinguono sistemi più standardizzabili da altri caratterizzati da maggiore personalizzazione.

Il capitolo, in questa forma, definisce il quadro concettuale in cui si colloca l'analisi empirica e prepara lo sviluppo dei modelli e la discussione delle stime nei capitoli successivi, mantenendo una prospettiva strettamente interpretativa e metodologicamente trasparente.

Le variabili considerate possono essere lette come *proxy* dei meccanismi discussi nel quadro teorico di adozione. La dimensione economica e la redditività intercettano la capacità di sostenere costi fissi e rischi dell'investimento; la scala di attività e l'integrazione in mercati più complessi catturano requisiti informativi e pressioni competitive; l'area geografica sintetizza condizioni abilitanti (infrastrutture, servizi e densità di ecosistemi dell'innovazione); l'indirizzo culturale approssima differenze nella standardizzabilità dei processi e nella domanda di tracciabilità/monitoraggio. In tale prospettiva, l'intensità di adozione m non rappresenta soltanto un conteggio di strumenti, ma una misura sintetica del grado di articolazione del *bundle* digitale e, indirettamente, della probabilità che le tecnologie vengano integrate in routine decisionali e gestionali.

Domande di ricerca

- **D1.** In che misura dimensione aziendale, area geografica, indirizzo culturale e livello/classe di fatturato spiegano l'intensità di adozione m ?
- **D2.** A parità di dimensione, area, indirizzo e fatturato, l'intensità m si associa a maggiore crescita del fatturato oppure, quando la dinamica non è rilevata, a un livello di fatturato più elevato?
- **D3.** Esistono eterogeneità territoriali e culturali nei livelli e nelle pendenze del legame tra m e risultati economici (interazioni $m \times area$, $m \times indirizzo$)?
- **D4.** In assenza di una misura diretta di diversificazione nel database, l'indirizzo culturale modera il canale con cui l'adozione si traduce in fatturato, distinguendo ordinamenti più standardizzabili da quelli più personalizzati?

Ipotesi operative

- **H1.** Maggiore dimensione aziendale e maggiore fatturato, intesi come sinonimo di capacità d'investimento e organizzazione, si associano a intensità di adozione m più elevata.
- **H2.** L'area geografica e l'indirizzo culturale influenzano adozione e impatti: i contesti e gli ordinamenti più standardizzabili mostrano gradienti più alti.
- **H3.** Aumentando l'intensità d'adozione m crescono gli impatti economici per complementarità tra pratiche all'interno del bundle tecnologico.
- **H4.** Il nesso adozione–diversificazione del fatturato non è necessariamente positivo; in mancanza della misura diretta nel database, l'indirizzo culturale funge da indicatore di traiettorie di valorizzazione diverse tra efficienza/qualità e ampliamento dei canali.

Formule con titoli espliciti delle variabili

- **Equazione di adozione/intensità (m : intensità di adozione)**

$$m_i = \alpha_A + \beta_{A^S} \cdot Dimensione\ azienda_i + \beta_{A^A} \cdot Area\ geografica_i + \beta_{A^T} \cdot Indirizzo\ culturale_i + \beta_{A^F} \cdot Fatturato_i + u_{\{A_i\}}$$

dove m_i è il numero di famiglie tecnologiche adottate dall'impresa i ; $Dimensione\ azienda_i$ è la classe dimensionale; $Area\ geografica_i$ è un vettore di dummies territoriali con categoria di riferimento fissata; $Indirizzo\ culturale_i$ è un vettore di dummies di ordinamento produttivo con categoria di riferimento fissata; $Fatturato_i$ è il livello/classe di fatturato (o la sua trasformazione coerente con la metrica d'uso); $u_{\{A_i\}}$ è il termine d'errore.

- **Esito crescita del fatturato (G : crescita del fatturato, se disponibile)**

$$G_i = \alpha_G + \gamma_G \cdot m_i + \theta_{G^S} \cdot Dimensione\ azienda_i + \theta_{G^A} \cdot Area\ geografica_i + \theta_{G^T} \cdot Indirizzo\ culturale_i + \theta_{G^F} \cdot Fatturato_i + u_{\{G_i\}}$$

dove G_i è la variazione di fatturato dell'impresa i ricodificata in scala numerica tramite punti medi di classe; γ_G misura la variazione media di G associata a una tecnologia addizionale, a parità di covariate; $u_{\{G_i\}}$ è il termine d'errore.

- **Esito livello di fatturato (\ln Fatturato: livello logaritmico di fatturato, alternativa a G)**

$$\ln(Fatturato_i) = \alpha_F + \gamma_F \cdot m_i + \theta_{F^S} \cdot Dimensione\ azienda_i + \theta_{F^A} \cdot Area\ geografica_i + \theta_{F^T} \cdot Indirizzo\ culturale_i + u_{\{F_i\}}$$

dove $\ln(Fatturato_i)$ consente letture in termini di elasticità parziali e attenua la varianza crescente; γ_F approssima l'elasticità del fatturato rispetto a m ; $u_{\{F_i\}}$ è il termine d'errore.

- **Eterogeneità nelle pendenze (interazioni per area e indirizzo)**

$$G_i = \dots + \delta_1 \cdot (m_i \times Area\ geografica_i) + \delta_2 \cdot (m_i \times Indirizzo\ colturale_i) + u_{\{G_i\}}$$

dove δ_1 e δ_2 misurano come i gradienti dell'intensità variano rispettivamente tra aree e tra indirizzi colturali.

Ambito territoriale e imprese intervistate

Il disegno campionario, articolato in quattro macro-aree e composto da 3.087 imprese agricole, assicura una copertura dell'intero territorio nazionale, con una distribuzione relativamente equilibrata tra le aree settentrionali e il Mezzogiorno, dove Sud e Isole concentrano poco meno di un terzo delle unità. All'interno delle macro-aree si distinguono alcune regioni a maggiore peso relativo (Piemonte e Lombardia nel Nord-Ovest, Veneto ed Emilia-Romagna nel Nord-Est, Toscana al Centro, Puglia e Sicilia nel Mezzogiorno), che costituiscono i principali poli di osservazione. Nel complesso, la struttura del campione risulta coerente con il peso agricolo dei territori e con la loro diversa capacità di intercettare l'indagine, garantendo una rappresentazione sufficientemente articolata del sistema produttivo nazionale.

Resta inteso che, come per ogni indagine campionaria basata su partecipazione e questionario, la lettura delle differenze territoriali va accompagnata da cautela interpretativa, privilegiando confronti relativi e pattern robusti rispetto a inferenze puntuali.

Tabella 19: Distribuzione geografica aziende intervistate **AGRIcoltura100**

Distribuzione per macro-area

Macro-area	Imprese (n.)	% sul totale
Sud e Isole	877	28,41%
Nord-Est	810	26,24%
Nord-Ovest	799	25,88%
Centro	601	19,47%

Distribuzione regionale per macro-area

Macro-area	Regione	Imprese (n.)	% sulla macro-area	% sul totale
Nord-Ovest	Piemonte	365	45,68%	11,82%
Nord-Ovest	Lombardia	300	37,55%	9,72%
Nord-Ovest	Liguria	125	15,64%	4,05%
Nord-Ovest	Valle d'Aosta	9	1,13%	0,29%
Nord-Est	Veneto	333	41,11%	10,79%
Nord-Est	Emilia-Romagna	320	39,51%	10,37%
Nord-Est	Friuli-Venezia Giulia	81	10,00%	2,62%
Nord-Est	Trentino-Alto Adige	76	9,38%	2,46%
Centro	Toscana	248	41,26%	8,03%
Centro	Lazio	135	22,46%	4,37%
Centro	Umbria	116	19,30%	3,76%
Centro	Marche	102	16,97%	3,30%
Sud e Isole	Puglia	226	25,77%	7,32%
Sud e Isole	Sicilia	188	21,44%	6,09%
Sud e Isole	Campania	132	15,05%	4,28%
Sud e Isole	Calabria	121	13,80%	3,92%
Sud e Isole	Sardegna	79	9,01%	2,56%
Sud e Isole	Abruzzo	73	8,32%	2,36%
Sud e Isole	Basilicata	40	4,56%	1,30%
Sud e Isole	Molise	18	2,05%	0,58%

Definizione delle variabili e dei parametri

- m_i : intensità di adozione dell'impresa i ; conteggio di famiglie tecnologiche implementate.
- *Dimensione aziendale*: classe dimensionale dell'impresa i ; proxy di risorse organizzative e capacità d'investimento.
- *Area geografica*: vettore di variabili fittizie territoriali per l'impresa i con categoria di riferimento fissata ex ante.
- *Indirizzo culturale*: vettore di variabili fittizie per l'ordinamento produttivo dell'impresa i con categoria di riferimento fissata.
- *Fatturato*: livello o classe di fatturato nel periodo di riferimento; quando si opera su livelli si impiega $\ln(\text{Fatturato}_i)$.

- G_i : crescita del fatturato sul periodo disponibile, da classi ordinali a valori numerici mediante punti medi.
- $\alpha_A, \alpha_G, \alpha_F$: intercette delle rispettive equazioni.
- $\beta_{A^S}, \beta_{A^A}, \beta_{A^T}, \beta_{A^F}$: pendenze dell'equazione di adozione rispetto a dimensione, area, indirizzo e fatturato.
- γ_G, γ_F : contributo marginale di una tecnologia addizionale su crescita o su $\ln(\text{fatturato})$.
- $\theta_{G^S}, \theta_{G^A}, \theta_{G^T}, \theta_{G^F}; \theta_{F^S}, \theta_{F^A}, \theta_{F^T}$: coefficienti dei controlli nei modelli per G e $\ln(\text{fatturato})$.
- δ_1, δ_2 : variazioni delle pendenze di m per specifiche aree o indirizzi.
- $u_{\{A_i\}}, u_{\{G_i\}}, u_{\{F_i\}}$: termini di errore a media nulla che assorbono componenti non osservate.

Strumenti e modalità di calcolo

Le elaborazioni sono svolte in *Python 3.11*. Si utilizzano *pandas* per preparazione e ricodifiche (classi in punti medi per le variazioni, costruzione di m), *numpy* per trasformazioni numeriche e logaritmiche, *statsmodels* per stima OLS con covarianza robusta HC3, *scikit-learn* per validazione incrociata *k-fold* e diagnostiche ausiliarie, *matplotlib* per grafici standard. I notebook sono riproducibili con seed fissati; le variabili categoriali (area e indirizzo) sono codificate con dummies a categoria di riferimento fissa per stabilità interpretativa. La pipeline prevede verifica di schema e range, controllo di coerenza tra fatturato e classi dimensionali, gestione dei mancanti con liste complete per specificazione e controllo di bilanciamento per area, indirizzo e dimensione; costruzione dell'intensità m ; definizione dell'esito G quando disponibile oppure del log-fatturato in alternativa. Tutte le scelte di ricodifica sono tracciate per la replicabilità.

Diagnostiche e coerenza inferenziale

La forma funzionale è verificata con *test RESET* e ispezioni component-plus-residual; se emergono non linearità rispetto a m o alla dimensione, si introducono termini quadratici o spline limitate e se ne riportano i risultati in sensibilità. L'eteroschedasticità è testata con *Breusch-Pagan* e *White*; l'inferenza si fonda comunque su errori standard robusti *HC3*, appropriati anche in presenza di varianza non costante. La multicollinearità è valutata con *variance inflation factors* su tutte le specificazioni, con soglia di attenzione $VIF > 5$; in caso di superamento si adottano accorpamenti di classi, centering o l'esclusione della covariata meno informativa, documentando l'impatto sui

coefficienti di interesse γ_G e γ_F . L'influenza osservazionale è monitorata tramite leverage e distanza di Cook; in sensibilità si riportano stime con e senza punti influenti per testare la stabilità dei risultati. La robustezza e il confronto tra specificazioni sono supportati da *winsorization p1-p99* in sensibilità, confronto con *AIC/BIC* e validazione predittiva tramite *RMSE in k-fold (k=5/10)* con stratificazione per area e indirizzo per preservare la composizione; ove pertinente, si impiegano errori *cluster-robust* per area. Le assunzioni *OLS* non richiedono normalità dei residui per la consistenza dei coefficienti; l'affidabilità dell'inferenza discende dall'uso sistematico di *HC3* e, quando opportuno, da bootstrap sul coefficiente di *m*.

Nel complesso, l'impostazione consente di testare in modo coerente le domande **D1–D4** e le ipotesi **H1–H4** con un modello interpretabile, comparabile sugli esiti e dotato di diagnostiche solide. I capitoli successivi forniranno le specificazioni complete, le stime con coefficienti, errori standard, *p-values* e intervalli di confidenza, le metriche di adattamento e validazione, e le figure che illustrano i gradienti previsti di *m* e l'eterogeneità per area e indirizzo colturale.

5.2 Risultati descrittivi

Intensità di adozione (*m*).

La distribuzione dell'indicatore di intensità tecnologica *m* - conteggio delle famiglie tecnologiche implementate a livello d'impresa - risulta fortemente sbilanciata verso i livelli più bassi. La massa di imprese con *m=0* (1.959 unità) segnala che, nonostante l'ampia esposizione mediatica al tema "agritech", la penetrazione effettiva è ancora embrionale. Le frequenze decrescono rapidamente al crescere di *m* (617 con *m=1*, 225 con *m=2*, 127 con *m=3*, 97 con *m=4*, 62 con *m=5*), con un tasso di adozione "almeno una tecnologia" pari al 36,5%. Questo profilo è coerente con una dinamica di *early diffusion*: pochi pionieri ad alta intensità e una larga base di non adottanti, tipica dei mercati in cui costi di ingresso, incertezza sui benefici e complementarità organizzative (competenze, dati, processi) agiscono da barriere iniziali.

Le famiglie tecnologiche prese in considerazione sono le seguenti 5:

1. **Sistemi di monitoraggio e analisi dei dati** (es. sensori/centraline, satellite, droni; nel DB: "Utilizzo di sistemi di monitoraggio (...) e analisi dei dati rilevati").
2. **Sistemi di monitoraggio e controllo di mezzi/attrezzature agricole** (telemetria/controllo remoto di trattrici, attrezzi, ecc.).
3. **Automazione delle attività agricole in campo** (robot/attuatori, operazioni automatizzate).

4. **Meccanizzazione per l'Agricoltura 4.0** (macchine “4.0”/connesse, interfacce e protocolli dedicati).
5. **Software gestionali aziendali avanzati a supporto delle attività in campo** (gestionali/ERP agricoli, registri digitali operativi).

A cosa “equivalgono” nel calcolo

- L'intensità di adozione è:

$$m_i = \sum_{j=1}^5 \mathbf{1}\{\text{famiglia } j = \text{“Sì”}\} \Rightarrow m_i \in \{0, 1, 2, 3, 4, 5\}.$$

- Il **tasso di adozione** è la quota con $m \geq 1$.
- **Si=1; No=0.**
- La voce “**No, nessuna di queste**” (se presente) è solo un controllo di coerenza: se è “Sì”, allora tutte e 5 le famiglie dovrebbero essere “No” e quindi $m=0$

Cosa non rientra nel conteggio m

Nel DB ci sono anche le incidenze % su SAU delle pratiche 4.0 (lavorazione terreno, irrigazione, semina, diserbo, trattamenti, fertilizzazione, raccolta): non sono nuove famiglie, ma dettagli di copertura della famiglia 4). Le usiamo per misurare “quanto” della SAU è gestito in 4.0, non per aumentare m .

Esempio: se un'azienda ha “Sì” a **(1)** monitoraggio/analisi e **(5)** gestionale, “No” alle altre, allora $m=2$. Se tutte “No”, $m=0$. Se tutte “Sì”, $m=5$.

Tabella 20: Distribuzione dell'intensità di adozione m

m (n. famiglie tecnologiche)	N	Quota %
0	1.959	63,46
1	617	19,99
2	225	7,29
3	127	4,11
4	97	3,14
5	62	2,01
Adozione ($m \geq 1$)	1.128	36,54
Totale	3.087	100,00

Adozione e investimenti digitali (ultimo biennio).

Si definisce come “tasso di adozione” “almeno una tecnologia”: $adopt_i = 1(m_i \geq 1)$.

Il **tasso di adozione** è quindi:

$$\hat{p} = \frac{\#\{i : m_i \geq 1\}}{\#\{\text{imprese}\}} = \frac{3.087 - 1.959}{3.087} = \frac{1.128}{3.087} \approx \mathbf{36,54\%}.$$

Tabella 21: Tasso di adozione per intensità di investimenti digitali

Investimenti digitali (ultimi 2 anni)	Tasso di adozione (%)
Nessun/trascurabile	30,38
Impatto contenuto	61,90
Significativi	72,09

Adozione e scala di attività.

Tabella 22: Tasso di adozione per scala di attività

Scala di attività	Tasso di adozione (%)
Locale	25,40
Regionale / Pluriregionale	36,00
Nazionale	43,10
Internazionale	51,70

Eterogeneità territoriale (macro-aree).

Tabella 23: Tasso di adozione per Eterogeneità territoriale (macro-aree)

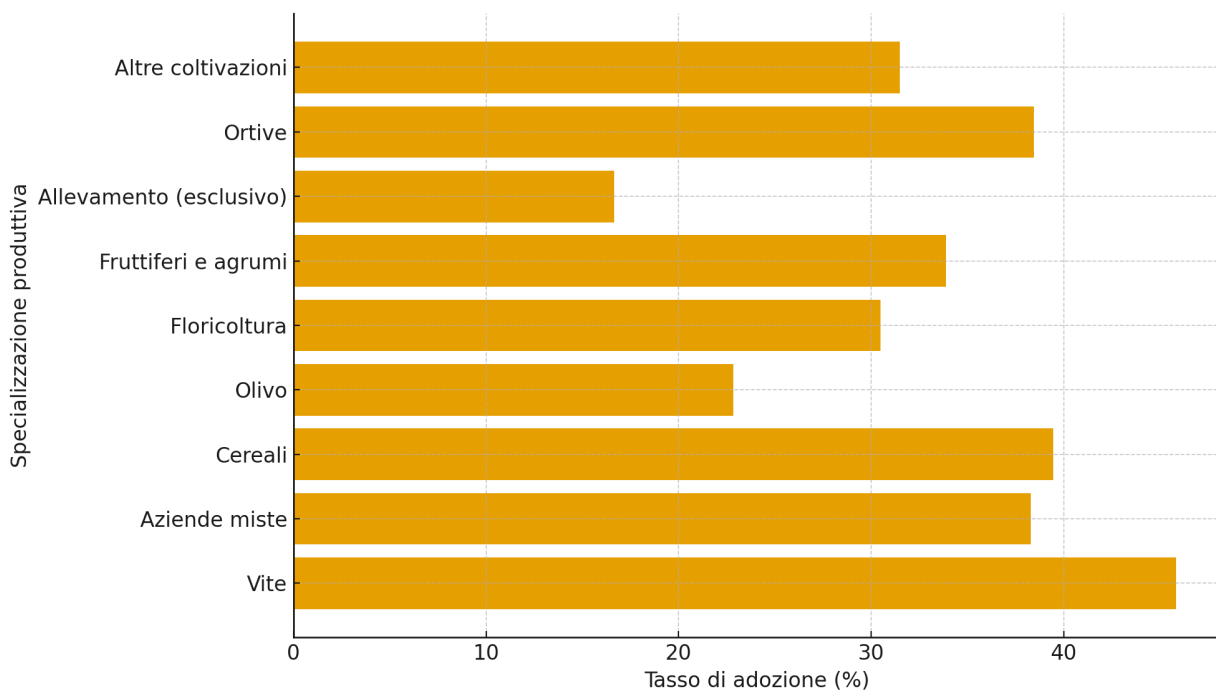
Macro-area	N	Tasso adozione (%)	m medio
1. Nord-Ovest	799	37.8	0.74
2. Nord-Est	810	40.74	0.78
3. Centro	601	37.27	0.66
4. Sud-Isole	877	31.01	0.60

Adozione per attività produttiva

Tabella 24: Distribuzione per specializzazione produttiva

Specializzazione produttiva	N	Quota %
Allevamento (esclusivo)	192	6,22
Altre coltivazioni	108	3,5
Aziende miste	632	20,47
Cereali	474	15,35
Floricoltura	246	7,97
Fruttiferi e agrumi	242	7,84
Olivo	254	8,23
Ortive	169	5,47
Vite	770	24,94

Grafico 9: Tasso di adozione per specializzazione

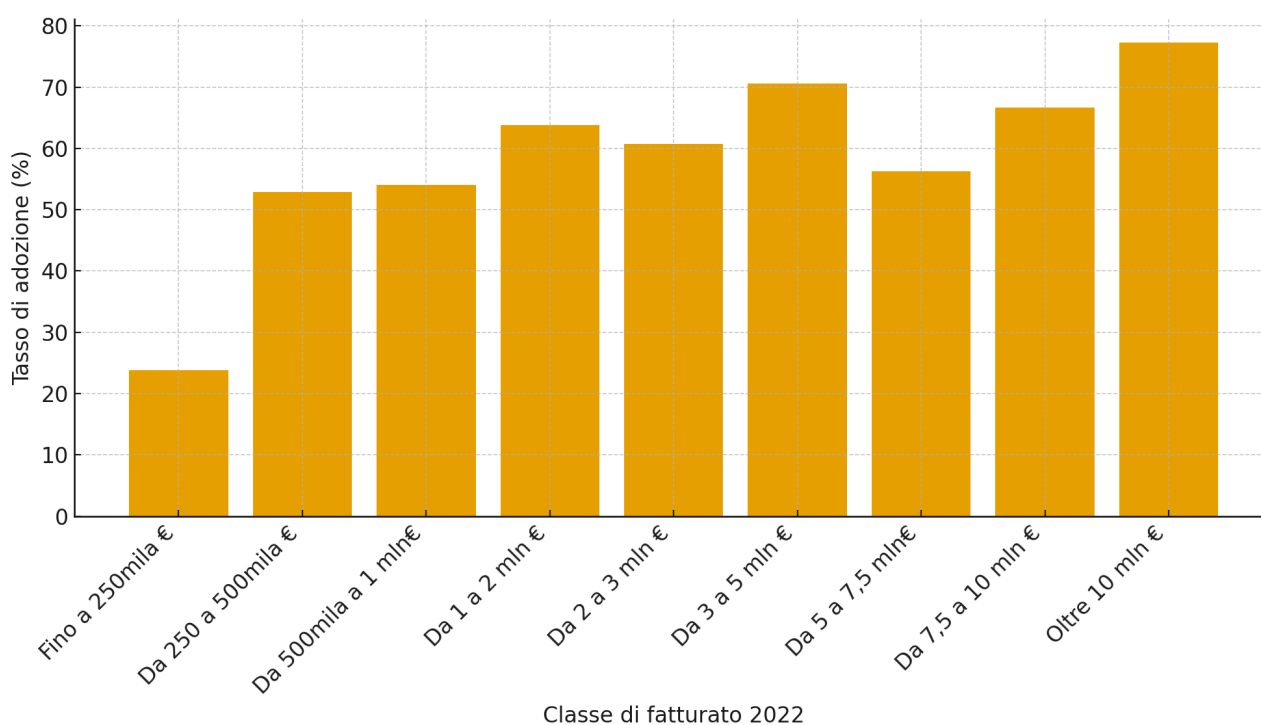


Adozione per classe di fatturato: struttura del campione, gradienti e meccanismi

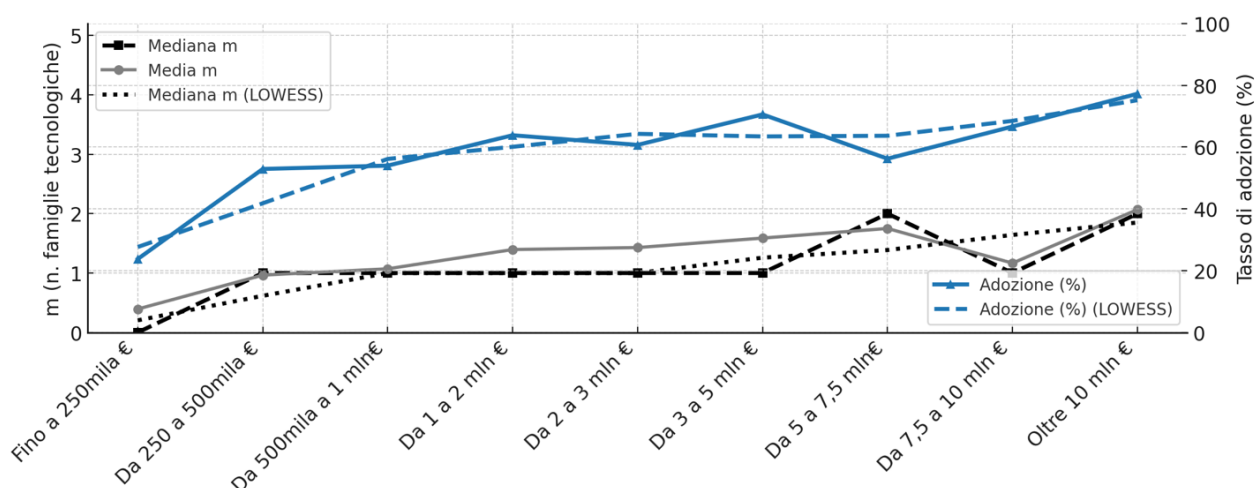
Tabella 25: Distribuzione aziende per classe di fatturato

Classe di fatturato 2022	N	Quota %
Fino a 250mila €	1.926	62.39
Da 250 a 500mila €	427	13.83
Da 500mila a 1 mln€	311	10.07
Da 1 a 2 mln €	177	5.73
Da 2 a 3 mln €	84	2.72
Da 3 a 5 mln €	68	2.2
Da 5 a 7,5 mln€	32	1.04
Da 7,5 a 10 mln €	18	0.58
Oltre 10 mln €	44	1.43

Grafico 10: Tasso di adozione per classe di fatturato



Adozione per classe di fatturato: mediana/media di m e tasso di adozione con interpolazione LOWESS



5.3 Interpretazione complessiva dei risultati: esiti e ipotesi dei determinanti, eterogeneità e impatti economico-istituzionali

L'insieme delle evidenze descrittive conferma che la diffusione delle tecnologie digitali nelle aziende agricole italiane è ancora in una fase iniziale, ma segue pattern piuttosto chiari in termini di determinanti, eterogeneità e possibili implicazioni economico-istituzionali. La distribuzione dell'intensità di adozione mostra infatti una forte concentrazione di imprese con $m = 0$ (63,5% del campione), a fronte di un 36,5% di aziende che hanno adottato almeno una famiglia tecnologica ($m \geq 1$). La maggioranza delle imprese "adottanti" si colloca comunque su livelli di intensità molto bassi ($m = 1$ nel 20% dei casi, $m = 2$ nel 7,3%), mentre quote via via più ridotte raggiungono livelli più elevati (fino a $m = 5$). Questo profilo è coerente con una dinamica di *early diffusion*, caratterizzata da una base ampia di non adottanti e da una minoranza di imprese che sperimenta ancora in modo limitato il portafoglio di soluzioni digitali disponibili.

La relazione tra adozione e intensità di investimenti digitali negli ultimi due anni suggerisce una chiara complementarità tra decisioni di spesa e uso effettivo delle tecnologie: il tasso di adozione passa da circa il 30% tra le imprese che dichiarano investimenti nulli o trascurabili a oltre il 60% e il 70% tra quelle che riportano investimenti a impatto "contenuto" o "significativo". Questo gradiente indica che l'adozione non è un fenomeno meramente opportunistico o episodico, ma tende a radicarsi laddove l'impresa incorpora la dimensione digitale nella propria strategia di investimento, confermando l'esistenza di complementarità tra capitale fisico/immateriale e capitale organizzativo necessario a sostenere il cambiamento tecnologico.

Un altro risultato strutturale riguarda il legame tra scala di attività e probabilità di adozione. I tassi di adozione crescono in modo monotono lungo il gradiente "locale-internazionale": dal 25,4% delle

imprese che operano prevalentemente in mercati locali si passa al 36% per quelle regionali/pluriregionali, al 43,1% per le imprese con mercato nazionale, fino a oltre il 50% per le aziende con sbocco internazionale. Ciò suggerisce che la digitalizzazione sia più diffusa laddove l'impresa è esposta a mercati più ampi e competitivi, nei quali la qualità dell'informazione, la tracciabilità e l'efficienza dei processi diventano condizioni necessarie per rimanere sul mercato. In questo senso, l'internazionalizzazione e l'ampiezza del mercato servito appaiono come importanti driver dell'adozione.

Le evidenze mettono inoltre in luce un marcato profilo di eterogeneità territoriale. I tassi di adozione e il valore medio di *m* risultano più elevati nelle macro-aree del Nord (Nord-Ovest e Nord-Est), intermedi nel Centro e sensibilmente più bassi nel Sud e nelle Isole, dove il tasso di adozione si ferma poco sopra il 30% e l'intensità media è inferiore. Questo disallineamento non è solo quantitativo, ma riflette verosimilmente differenze nelle dotazioni infrastrutturali, nella disponibilità di servizi di consulenza e nel grado di integrazione delle aziende agricole nelle filiere più organizzate. L'eterogeneità territoriale appare quindi come una delle dimensioni principali del *digital divide* agricolo, con implicazioni dirette per la coesione territoriale e per il disegno di politiche mirate.

Dal punto di vista settoriale, la distribuzione per specializzazione produttiva mostra la forte presenza di comparti strutturalmente rilevanti per l'agricoltura italiana – in particolare la vite, le aziende miste, i cereali, l'olivo – accanto a segmenti più ristretti (ortive, floricoltura, allevamenti esclusivi, fruttiferi e agrumi). Pur non avendo nella tabella i tassi di adozione per ciascun comparto, il grafico associato suggerisce un quadro eterogeneo, in cui alcuni settori – tipicamente quelli più orientati a filiere organizzate, standard qualitativi elevati o forte integrazione con l'industria di trasformazione – tendono a mostrare livelli di adozione più elevati. Ciò è coerente con l'idea che l'innovazione digitale si diffonda più rapidamente dove la domanda di informazione, tracciabilità e coordinamento di filiera è più stringente.

Infine, la distribuzione per classe di fatturato mostra un campione dominato da imprese di piccola dimensione economica (oltre il 60% sotto i 250 mila euro), con quote via via decrescenti nelle classi superiori. Il grafico sul tasso di adozione per classe di fatturato – pur non riportato in forma tabellare – suggerisce l'esistenza di un gradiente positivo tra dimensione economica e probabilità di adottare tecnologie digitali: al crescere del fatturato aumenta la capacità di sostenere investimenti specifici, di assumere personale con competenze adeguate o di rivolgersi a servizi esterni di supporto tecnologico. In questo senso, la concentrazione del campione nelle classi di fatturato più basse aiuta a interpretare il livello complessivamente ancora contenuto dell'adozione e suggerisce che una parte del ritardo digitale sia riconducibile a vincoli di scala e di capitalizzazione.

Nel loro insieme, questi risultati delineano un quadro in cui la digitalizzazione agricola è ancora limitata nella diffusione e nella profondità, ma si concentra in modo selettivo in alcuni profili di impresa: aziende più grandi dal punto di vista economico, inserite in mercati più ampi, localizzate nelle aree più sviluppate, spesso collegate a filiere strutturate e più esposte a pressioni competitive e regolatorie. Le implicazioni economico-istituzionali sono rilevanti: da un lato, la transizione digitale rischia di ampliare i divari esistenti, favorendo le imprese già più forti; dall'altro, proprio l'individuazione chiara di queste eterogeneità offre indicazioni preziose per le politiche pubbliche e gli strumenti di supporto, che dovranno essere disegnati in modo da ridurre i vincoli di scala, territoriali e informativi che oggi frenano una parte consistente delle aziende agricole dall'intraprendere percorsi di innovazione digitale.

Il meccanismo può essere interpretato in termini di *regimi di funzionamento*. Esiste un regime in cui le tecnologie digitali restano accessorie, adottate in forma puntuale, senza effetti di sistema; ed esiste un regime in cui le tecnologie diventano parte integrante della funzione di produzione, modificandone i coefficienti e i rendimenti. Nel primo caso, i ritorni sono incerti e discontinui; nel secondo, diventano progressivamente strutturali. La transizione dall'uno all'altro regime non è lineare: richiede il superamento di soglie organizzative, cognitive e infrastrutturali che solo una parte delle imprese riesce a varcare. I dati dimostrano che tale transizione è favorita da una combinazione di fattori: disponibilità di infrastrutture *ICT*, presenza di capitale umano qualificato, inserimento in filiere esigenti e capacità di fare massa critica attraverso dimensioni aziendali più ampie o forme di cooperazione.

In questo senso, la digitalizzazione agricola non può essere interpretata come un "bene a scaffale" acquistabile sul mercato, ma come un *capitale organizzativo cumulativo*. La produttività delle tecnologie cresce con l'uso e con l'integrazione, generando economie di scopo che riducono la variabilità delle operazioni e stabilizzano i risultati. Quando i moduli rimangono isolati, i benefici sono modesti e spesso non giustificano i costi; quando invece vengono orchestrati, emergono capacità nuove: riduzione sistematica di input, tempestività nella reazione a shock, tracciabilità documentale, apertura a canali *premium*. È su questo piano che la resilienza economica si intreccia con la digitalizzazione: le imprese con *m* più elevato mostrano non solo livelli medi di fatturato superiori, ma anche una maggiore capacità di adattamento a cicli avversi.

Il raffronto con altre esperienze europee rafforza tale lettura. In Francia, la strategia *Agriculture Innovation 2025* ha posto al centro proprio la logica dell'orchestrazione: non un catalogo di dispositivi, ma l'integrazione tra sensori, piattaforme gestionali e servizi di consulenza digitale. I risultati mostrano che le regioni con cooperative vitivinicole e orticole più strutturate hanno sperimentato un'accelerazione dell'adozione non per effetto di incentivi individuali, ma grazie a

modelli di filiera che hanno reso collettivamente conveniente la transizione. In Spagna, il *Sistema de Información de Explotaciones (SIEEX)*, introdotto a partire dal 2023 come parte del Piano Strategico PAC, impone a tutte le aziende agricole la registrazione digitale delle pratiche colturali: una misura che, lungi dall'essere solo burocratica, sta agendo come vincolo esterno e “*standard di filiera*” per spostare la mediana della distribuzione. In Olanda, infine, il modello dei *data hubs* territoriali - piattaforme condivise per l'agricoltura di precisione promosse da consorzi di imprese e istituti di ricerca - ha dimostrato che la condivisione di dati riduce i costi di apprendimento, migliora la qualità delle prescrizioni e genera un circuito virtuoso in cui anche le imprese più piccole possono accedere a economie di scala collettive.

Il confronto suggerisce che tre sono i punti critici da considerare. Il primo riguarda la soglia del “*primo miglio digitale*”: senza connettività e strumenti di base, i dispositivi restano inerti. La seconda riguarda l'interoperabilità: dove le soluzioni sono chiuse e proprietarie, il valore si frammenta e le esternalità positive non emergono. La terza riguarda la scala, intesa non solo come dimensione individuale, ma come possibilità di condividere infrastrutture, dati e servizi all'interno di reti territoriali o settoriali. L'esperienza italiana, fotografata dai dati analizzati, mostra segnali chiari in questa direzione: la mediana di m ferma a zero nella maggioranza dei comparti non dipende da mancanza di interesse, ma da un insieme di barriere che impediscono il superamento delle soglie iniziali.

La riflessione di *policy* che ne deriva è duplice. Da un lato, gli strumenti pubblici devono essere disegnati per abbattere simultaneamente tre barriere: quella infrastrutturale (connettività e dispositivi di base), quella cognitivo (competenze e assistenza di prossimità) e quella istituzionale (interoperabilità e regole chiare di data governance). Dall'altro lato, occorre valorizzare i corpi intermedi come agenti di orchestrazione: cooperative, organizzazioni di produttori, consorzi di tutela e associazioni di categoria sono nelle condizioni di aggregare domanda, negoziare condizioni di interoperabilità e garantire fiducia nei processi di condivisione dei dati. Senza questa dimensione collettiva, il rischio è che la digitalizzazione rimanga confinata a “isole di eccellenza” e non produca effetti sistemici.

La traiettoria auspicabile è quella in cui la trasformazione della mediana, più che della media, diventa indicatore del successo. Portare una quota crescente di imprese da $m=0$ a $m \geq 1$, e consolidare $m=2$ o $m=3$ come nuova normalità nei comparti standardizzabili, significa ridurre i divari, diminuire la dispersione delle performance e rafforzare la competitività complessiva del sistema agricolo. In questa prospettiva, grafici rappresentati, derivanti dalle analisi svolte, non sono semplici illustrazioni descrittive, ma vere e proprie mappe di traiettorie: scenari che, a seconda delle politiche adottate,

possono tradursi in un'evoluzione inerziale, con persistente dualismo tra punte avanzate e base stagnante, oppure in una trasformazione strutturale capace di innalzare l'intera distribuzione.

In ultima analisi, l'innovazione digitale agricola deve essere interpretata come un *problema di sistema* e non di singolo dispositivo. La condizione necessaria per il successo non è la diffusione numerica di sensori o piattaforme, ma la capacità di costruire un'architettura che renda tali strumenti interoperabili, economicamente sostenibili e socialmente legittimati. È su questa capacità di coordinamento - tra politica pubblica, corpi intermedi e imprese - che si gioca la possibilità di trasformare la digitalizzazione da "adozione di vetrina" a infrastruttura produttiva, in grado di sostenere resilienza, competitività e sostenibilità del comparto nel lungo periodo.

5.4 Determinanti dell'adozione delle tecnologie digitali

L'analisi svolta nei capitoli precedenti ha ricostruito il quadro teorico e istituzionale della trasformazione digitale nel sistema agroalimentare, illustrando le principali traiettorie tecnologiche (agricoltura di precisione, agricoltura 4.0, piattaforme gestionali, sensori, DSS, ecc.) e discutendo le evidenze disponibili per il caso italiano. L'esame descrittivo dei dati **AGRIcoltura100** ha evidenziato, da un lato, un livello ancora contenuto di penetrazione delle tecnologie digitali nel campione considerato e, dall'altro, una marcata eterogeneità tra imprese in termini di intensità di adozione, orientamento alla sostenibilità e posizionamento di mercato. In particolare, la distribuzione dell'indicatore di intensità tecnologica mostra una forte concentrazione di imprese non adottanti e una quota relativamente ridotta di aziende che impiegano più famiglie tecnologiche, configurando un quadro riconducibile alle fasi iniziali di diffusione: pochi pionieri e una base ampia di ritardatari.

Queste evidenze, pur informative, rimangono di natura prevalentemente descrittiva. Esse consentono di individuare correlazioni apparenti tra caratteristiche aziendali (dimensione economica, orientamento produttivo, scala di attività, profilo imprenditoriale, pratiche ambientali) e comportamento digitale, ma non permettono di stabilire quali fattori incidano in modo autonomo sulla probabilità di adozione una volta considerato congiuntamente l'insieme delle altre variabili rilevanti. Ad esempio, resta da chiarire se il maggiore ricorso alle tecnologie digitali da parte delle imprese biologiche dipenda effettivamente dall'orientamento alla qualità e alla sostenibilità, oppure rifletta differenze pregresse in termini di solidità economica, scala organizzativa o capitale umano.

Per affrontare questi interrogativi, la presente sezione introduce un'analisi microeconomica finalizzata a stimare in modo formale le determinanti dell'adozione digitale.

L'obiettivo è duplice:

- (i) identificare un nucleo di variabili che, a parità delle altre condizioni, risulta associato in maniera statisticamente significativa alla decisione di investire in tecnologie digitali;
- (ii) quantificare l'ordine di grandezza di tali associazioni in termini di variazioni della probabilità di adozione.

Data la natura dicotomica della variabile dipendente – che assume valore 1 se l'impresa ha effettuato almeno un investimento digitale negli ultimi due anni e 0 altrimenti – si ricorre a un *modello di regressione logistica binaria (logit)*, strumento ampiamente utilizzato negli studi sull'adozione di innovazioni in agricoltura e, più recentemente, delle tecnologie di precisione e digitali. Il modello consente di stimare la probabilità di adozione come funzione di un vettore di covariate, rispettando le proprietà statistiche associate a esiti binari e tenendo conto del fatto che, nel campione considerato, l'evento “adozione” è relativamente raro.

Le variabili esplicative incluse nella specificazione finale sono state selezionate a partire dall'ampio set informativo dell'indagine **AGRIcoltura100** con una duplice logica:

- (i) rappresentare i principali domini teoricamente rilevanti per la digitalizzazione (condizioni economiche, scala organizzativa, capitale umano, orientamento alla sostenibilità, contesto territoriale, aspettative sul futuro);
- (ii) (ii) preservare una sufficiente robustezza statistica delle stime, evitando ridondanze e problemi di collinearità.

I paragrafi che seguono illustrano nel dettaglio la specificazione del modello, la codifica delle variabili e le statistiche descrittive, discutono la qualità di adattamento, presentano i risultati delle stime e li interpretano in chiave comparata rispetto alla letteratura, traendo infine alcune implicazioni di policy.

5.5.1 Disegno empirico e specificazione del modello *logit*

L'obiettivo del modello è rappresentare la probabilità che l'impresa “i” effettui almeno un investimento in tecnologie digitali negli ultimi due anni. A tal fine, si definisce una variabile dipendente binaria $AdozioneDigitale_i$ così costruita:

- $AdozioneDigitale_i = 1$ se l'azienda ha sostenuto almeno un investimento in tecnologie digitali;
- $AdozioneDigitale_i = 0$ in caso contrario.

Data la natura dicotomica dell'esito, si stima un modello di regressione logistica binaria (*logit*), in cui la probabilità condizionata di adozione è scritta come:

$$\begin{aligned}
 P(\text{AdozioneDigitale}_i = 1 \mid X_i) &= \Lambda(\beta_0 + \beta_1 \text{FatturatoBasso}_i + \beta_2 \text{ScalaAttivitàElevata}_i + \beta_3 \text{AziendaBiologica}_i \\
 &+ \beta_4 \text{GiovaneImprenditore}_i + \beta_5 \text{AziendaInUtile}_i + \beta_6 \text{AreaGeograficaSvantaggiata}_i \\
 &+ \beta_7 \text{ImpegnoTutelaAmbientale}_i + \beta_8 \text{VisioneAmbientaleNegativa}_i)
 \end{aligned}$$

Dove $\Lambda(z) = \frac{e^z}{1+e^z}$ è la funzione logistica, β_0 è l'intercetta e X_i è il vettore delle variabili esplicative.

La scelta del modello *logit* è coerente con la definizione della variabile dipendente come indicatore dicotomico di adozione (1 = l'impresa ha effettuato almeno un investimento digitale; 0 = altrimenti). In presenza di un esito binario, il *logit* consente di stimare una probabilità condizionata che rispetta i vincoli dell'intervallo [0; 1] e offre una lettura interpretabile dell'associazione tra caratteristiche aziendali e territoriali e propensione all'adozione. Inoltre, nel campione considerato l'evento "adozione" presenta un'incidenza relativamente contenuta; in tale contesto, il ricorso a una specificazione logistica risulta appropriato per analizzare la decisione discreta di ingresso nel digitale, evitando le criticità delle specificazioni lineari per esiti binari (in particolare, predizioni fuori intervallo e varianza non costante).

Accanto alla decisione di adozione, il database consente di costruire un indicatore di intensità m , definito come conteggio delle famiglie tecnologiche adottate dall'impresa. Per tale variabile, modelli per dati di conteggio (Poisson o Negative Binomial) costituiscono alternative naturali, poiché permettono di modellare direttamente la profondità dell'adozione e di distinguere tra determinanti dell'"ingresso" nel digitale e determinanti dell'intensificazione d'uso. In particolare, la specificazione Negative Binomial risulta preferibile quando la varianza supera la media, condizione frequente nei dati aziendali.

La distribuzione empirica di m evidenzia inoltre una quota elevata di osservazioni nulle ($m = 0$), interpretabili come esito di meccanismi non necessariamente coincidenti: (i) imprese "strutturalmente" non in condizione di adottare per assenza di condizioni abilitanti minime; (ii) imprese potenzialmente adottanti che non hanno ancora investito. In presenza di tale struttura, modelli *zero-inflated* (Zero-Inflated Poisson o Zero-Inflated Negative Binomial) consentono di separare un processo che genera zeri "strutturali" da un processo di conteggio relativo all'intensità condizionata. Nel presente lavoro il *logit* è adottato come specificazione principale poiché, in questa sezione, l'attenzione è rivolta alla decisione di adozione (soglia $m \geq 1$) e alla sua associazione con un insieme

di covariate interpretabili in chiave economico-organizzativa e territoriale. Le specificazioni per conteggi e le estensioni zero-inflated rappresentano tuttavia sviluppi metodologicamente coerenti con la struttura dei dati e, in prospettiva, consentirebbero di distinguere più nettamente tra ingresso nel digitale e intensificazione dell'adozione.

Nel modello finale, ottenuto dopo la fase esplorativa e di selezione, sono dunque incluse le seguenti variabili dicotomiche, rinominate in modo leggibile per la presentazione.

Variabili esplicative e criteri di ricodifica

Un aspetto rilevante della specificazione riguarda la trasformazione delle classi di risposta del questionario, in molti casi articolate su più livelli ordinati, in un insieme di variabili binarie. Questa scelta metodologica risponde a due obiettivi principali:

- (i) concentrare l'analisi su alcune configurazioni aziendali e territoriali considerate particolarmente rilevanti sul piano teorico, che corrispondono di norma alle code delle distribuzioni (ad esempio: la fascia di fatturato più bassa, la presenza più elevata di giovani, le aziende che operano su scala nazionale o internazionale), cioè ai gruppi di imprese che si discostano in modo netto dalla media del campione;
- (ii) mantenere il modello sufficientemente leggibile e stabile, evitando un'eccessiva proliferazione di variabili fittizie con scarso contenuto informativo e forte sovrapposizione tra loro.

Nei paragrafi che seguono, per ciascuna variabile vengono quindi illustrati sia il significato sostantivo sia i criteri adottati per l'aggregazione e la ricodifica delle classi di risposta originarie.

Fatturato basso ($FatturatoBasso_i$): La variabile di partenza è la *classe di fatturato complessivo aziendale (anno 2022)*, rilevata su più intervalli ordinati (da “fino a 250 mila euro” fino a “oltre 10 milioni di euro”).

- $FatturatoBasso_i = 1$ se l'azienda appartiene alla *classe più bassa di fatturato*;
- $FatturatoBasso_i = 0$ se l'azienda rientra in qualunque altra classe.

In questo modo si isolano le imprese che operano nella fascia economicamente più fragile, per le quali è teoricamente più probabile che i costi fissi di ingresso della digitalizzazione rappresentino un vincolo rilevante. L'effetto atteso sul comportamento di adozione è negativo.

Scala di attività elevata (*ScalaAttivitàElevata_i*) La variabile originaria misura la *scala geografica di attività* dell'azienda su una scala ordinale (locale; regionale/pluriregionale; nazionale; internazionale).

- *ScalaAttivitàElevata_i* = 1 se l'azienda dichiara di operare su *scala nazionale o internazionale*;
- *ScalaAttivitàElevata_i* = 0 se l'attività è limitata al livello locale o regionale.

Questa variabile consente di distinguere tra imprese che operano principalmente su mercati di prossimità e imprese che competono su mercati più ampi, per le quali la gestione delle relazioni di scambio, dei flussi informativi e dei requisiti di tracciabilità risulta più articolata.

In questo caso l'effetto atteso sulla probabilità di adozione è positivo.

Azienda biologica (*AziendaBiologica_i*) L'informazione di partenza riguarda la pratica di agricoltura biologica, con una scala che distingue tra: assenza di agricoltura biologica, intenzione futura, sperimentazione/assenza di certificazione, e biologico certificato.

- *AziendaBiologica_i* = 1 se l'azienda pratica agricoltura biologica in modo effettivo, includendo sia le unità in fase avanzata di sperimentazione sia quelle che hanno già ottenuto la certificazione;
- *AziendaBiologica_i* = 0 se l'azienda non pratica il biologico o si limita a esprimere un'intenzione futura non ancora tradotta in cambiamenti operativi.

In questo modo la variabile consente di distinguere tra imprese che hanno già incorporato nella propria organizzazione i vincoli e le opportunità connesse all'agricoltura biologica – in termini di tracciabilità, sistemi di controllo e gestione degli input – e imprese che continuano a operare secondo modelli convenzionali. Alla luce della stretta complementarità tra qualità, sostenibilità e strumenti digitali di monitoraggio e gestione, per le prime ci si attende un effetto positivo sulla probabilità di adozione delle tecnologie digitali.

Giovane imprenditore (*GiovaneImprenditore_i*) Nel questionario sono rilevate sia la *percentuale di under 35 sul totale addetti* (classi percentuali) sia informazioni sulla presenza di giovani in ruoli chiave. La variabile utilizzata nel modello sintetizza queste dimensioni, individuando i casi in cui la componente giovanile assume un peso effettivo nelle decisioni aziendali.

- $GiovaneImprenditore_i = 1$ se l'azienda appartiene alle classi di *maggiore presenza di under 35* e/o se i giovani ricoprono ruoli decisionali rilevanti;
- $GiovaneImprenditore_i = 0$ nelle restanti configurazioni.

La variabile così costruita oppone le imprese in cui la componente giovanile esercita un ruolo di leadership o co-leadership a quelle guidate in prevalenza da imprenditori in età più matura. In coerenza con l'evidenza empirica disponibile sul ruolo del capitale umano nei processi di innovazione, per le prime ci si attende un effetto marcatamente positivo sulla probabilità di adozione di tecnologie digitali.

Azienda in utile ($AziendaInUtile_i$) La variabile originaria misura l'*utile* (in percentuale sul fatturato), articolato in classi crescenti (fino al 5%, 5–10%, 10–20%, oltre 20%, ecc.).

- $AziendaInUtile_i = 1$ se l'azienda dichiara un *utile positivo*, indipendentemente dalla classe di intensità;
- $AziendaInUtile_i = 0$ in caso di pareggio o perdita.

In questo modo la variabile distingue in modo netto tra imprese che operano in condizioni di redditività positiva e imprese che non generano utile. Per le prime ci si attende un effetto positivo sulla probabilità di adozione, poiché una maggiore solidità economico-finanziaria accresce la capacità di sostenere i costi iniziali e i rischi connessi agli investimenti in tecnologie digitali.

Area geografica svantaggiata ($AreaGeograficaSvantaggiata_i$) Nel dataset l'ubicazione dell'azienda è rilevata sia a livello di *macro-area geografica* (Nord-Ovest, Nord-Est, Centro, Sud e Isole) sia a livello regionale. A partire da tali informazioni, è stata definita una variabile che identifica i contesti con dotazioni infrastrutturali relativamente deboli e maggiori criticità di accesso ai servizi.

- $AreaGeograficaSvantaggiata_i = 1$ se l'azienda è localizzata in macro-aree e regioni caratterizzate da condizioni infrastrutturali e di connettività più fragili;
- $AreaGeograficaSvantaggiata_i = 0$ negli altri casi.

La variabile così definita permette di rappresentare l'effetto di un divario territoriale nelle condizioni abilitanti la digitalizzazione, senza introdurre un numero eccessivo di categorie geografiche nel modello. In coerenza con questa lettura, per le imprese localizzate in contesti svantaggiati ci si attende un effetto negativo sulla probabilità di adozione.

Impegno in tutela ambientale ($ImpegnoTutelaAmbientale_i$) Il questionario comprende un insieme articolato di domande relative a *pratiche di gestione sostenibile del suolo*, riduzione dell'uso di input chimici, gestione dei residui, tutela della biodiversità, adesione a programmi e disciplinari ambientali, ecc., prevalentemente in forma di variabili dicotomiche (sì/no, nessuna di queste).

Piuttosto che includere singolarmente tutte le voci – con il rischio di collinearità e scarsa leggibilità – si è costruito un *indicatore sintetico*:

- $ImpegnoTutelaAmbientale_i = 1$ se l'azienda dichiara almeno un *insieme strutturato di pratiche* riconducibili alla tutela ambientale (ad esempio, combinazioni di pratiche di gestione del suolo, riduzione degli input, monitoraggio degli impatti, adesione a programmi o disciplinari);
- $ImpegnoTutelaAmbientale_i = 0$ se le pratiche risultano assenti o limitate a interventi sporadici e non sistematici.

In questo modo la variabile consente di distinguere tra imprese che hanno effettivamente integrato la dimensione ambientale nelle proprie routine gestionali e imprese che non l'hanno ancora fatto. Per le prime l'effetto atteso sulla propensione alla digitalizzazione è positivo, alla luce del ruolo svolto dalle tecnologie digitali nel supportare una gestione più efficiente e sistematicamente misurabile delle risorse aziendali.

5.5.2 Statistiche quantitative e qualitative delle variabili

L'evidenza empirica derivante dal modello *logit* consente di stimare in modo coerente e sufficientemente robusto la probabilità che un'azienda effettui investimenti digitali. Il valore dello *Pseudo-R² di McFadden* (0,1956) si colloca nella fascia 0,10–0,20, tipica di un adattamento discreto nei modelli per variabili dipendenti binarie e fenomeni caratterizzati da bassa incidenza. La capacità discriminante dello stimatore è confermata dall'area sotto la curva *ROC* pari a 0,8094, valore che rientra nell'intervallo generalmente considerato “molto buono” nella pratica empirica. La percentuale di corretta classificazione (91,94%) riflette un'elevata specificità, dovuta alla forte asimmetria della variabile dipendente: gli adottanti sono numericamente molto inferiori ai non adottanti, con conseguente riduzione della sensibilità (12,26%). Questa configurazione è del tutto coerente con la natura rara dell'evento osservato e non compromette la validità interpretativa dei coefficienti.

La Tabella 25 riporta i risultati del modello *logit* in termini di coefficienti (*log-odds*), errori standard robusti, *p-value* e *odds ratio exp* (β). I coefficienti esprimono la variazione del logaritmo del

rapporto tra le probabilità di adozione e di non adozione a seguito di una variazione unitaria della covariata, mentre gli odds ratio consentono una lettura più immediata in termini di aumento o riduzione relativa delle probabilità: valori superiori a 1 indicano un'associazione positiva con l'adozione, valori inferiori a 1 un'associazione negativa.

Gli effetti marginali in termini di variazione di probabilità sono discussi nei paragrafi successivi.

Tabella 26: Risultati del modello *logit* sull'adozione di tecnologie digitali

Variabile	Coefficiente	Std. Err.	p-value	Odds Ratio (exp β)
Fatturato basso	-1,174	0,292	0,000	0,31
Scala di attività elevata	0,753	0,290	0,009	2,12
Azienda biologica	1,011	0,416	0,015	2,75
Giovane imprenditore	1,239	0,275	0,000	3,45
Azienda in utile	0,476	0,223	0,032	1,61
Area geografica svantaggiata	-1,056	0,360	0,003	0,35
Impegno in tutela ambientale	0,818	0,275	0,003	2,27
Visione ambientale negativa	-1,737	0,615	0,005	0,18
Costante	-2,616	1,195	0,029	0,07

Sul versante economico-organizzativo, l'analisi mostra un insieme di effetti particolarmente nitidi. Il coefficiente fortemente negativo associato a *Fatturato basso* (-1,174; $p < 0,001$), con un *odds ratio* pari a 0,31, indica che le imprese collocate nella fascia inferiore di fatturato presentano probabilità relative di adozione di poco più di un terzo rispetto alle altre, a parità di condizioni; in termini di probabilità, ciò si traduce in una riduzione di circa 7,8 punti percentuali della probabilità di effettuare investimenti digitali. Per converso, la *Scala di attività elevata* mostra un coefficiente positivo (0,753; $p = 0,009$) e un *odds ratio* superiore a 2, segnalando che operare su scala nazionale o internazionale più che raddoppia le probabilità relative di adozione e si associa, in media, a un incremento di circa 5,3 punti percentuali nella probabilità di investimento. Anche la variabile *Azienda in utile* (0,476; $p = 0,032$; $OR \approx 1,61$) rafforza l'idea che la digitalizzazione tenda a radicarsi soprattutto nelle imprese economicamente solide e inserite in filiere più complesse: la presenza di un utile positivo aumenta la probabilità stimata di adozione di circa 3,1 punti percentuali.

Coerentemente con quanto discusso a proposito del capitale umano e dell'orientamento strategico, *Giovane imprenditore* presenta uno dei coefficienti più elevati del modello (1,239; $p < 0,001$), con un *odds ratio* pari a 3,45: le imprese in cui gli under 35 rivestono un ruolo decisionale rilevante hanno probabilità relative di adozione oltre tre volte superiori rispetto alle altre, con un incremento medio stimato di circa 11,2 punti percentuali nella probabilità di investimento digitale. In modo analogo, *Azienda biologica* (1,011; $p = 0,015$; $OR \approx 2,75$) e *Impegno in tutela ambientale* (0,818; $p = 0,003$; $OR \approx 2,27$) mostrano effetti positivi e di entità consistente: la pratica dell'agricoltura biologica è

associata a un aumento di *circa 8,8 punti percentuali* della probabilità di adozione, mentre la presenza di iniziative strutturate di tutela ambientale si accompagna a un incremento di *circa 5,4 punti percentuali*, confermando empiricamente la complementarità tra traiettorie competitive fondate su qualità e sostenibilità e ricorso alle tecnologie digitali per il monitoraggio dei processi, la gestione degli input e la tracciabilità.

Infine, le variabili che intercettano vincoli territoriali e cognitivi presentano effetti negativi di ampia magnitudine. La localizzazione in *area geografica svantaggiata* ($-1,056$; $p=0,003$; $OR\approx 0,35$) riduce in modo sostanziale le probabilità relative di adozione, restituendo l'immagine di un mercato *digital divide* territoriale: a parità delle altre condizioni, tale configurazione si traduce in una diminuzione di *circa 7,4 punti percentuali* della probabilità di effettuare investimenti digitali, segnalando che in assenza di dotazioni adeguate di connettività e servizi di supporto anche imprese potenzialmente motivate incontrano ostacoli rilevanti nell'implementazione di soluzioni digitali. Ancora più pronunciato è l'effetto associato a *Visione ambientale negativa* ($-1,737$; $p=0,005$; $OR\approx 0,18$), che segnala come una valutazione marcatamente negativa delle prospettive ambientali dell'agricoltura - intesa come aspettativa di un peggioramento delle condizioni ecologiche e climatiche del settore e di una crescente difficoltà a governarne gli impatti - si traduca in una riduzione di *circa 8,8 punti percentuali* della probabilità di adottare tecnologie digitali con orizzonte temporale medio-lungo.

La Tabella 26 integra queste informazioni riportando, per ciascuna variabile, la descrizione sintetica, la codifica impiegata nel modello e gli estremi degli intervalli di confidenza al 95%. Essa consente di collegare in maniera immediata il contenuto sostantivo delle variabili con l'intensità e la precisione delle stime ottenute.

Tabella 27: Descrizione e statistiche descrittive delle variabili incluse nel modello logit (N = 1.800)

Variabile	Descrizione	Tipo / Codifica	Coefficiente	Errore standard	IC 95% inf.	IC 95% sup.
Fatturato basso	Azienda nella classe di fatturato complessivo più bassa	Dummy (1 = classe di fatturato più bassa; 0 = altre classi)	-1,174	0,292	-1,747	-0,601
Scala di attività elevata	Scala di attività nazionale o internazionale	Dummy (1 = scala nazionale/internazionale; 0 = locale/regionale)	0,753	0,290	0,185	1,320
Azienda biologica	Impresa che pratica agricoltura biologica (categoria considerata nel modello: bio = 1)	Dummy (1 = azienda biologica; 0 = non biologica)	1,011	0,416	0,195	1,827
Giovane imprenditore	Presenza significativa di under 35 in posizioni decisionali (under35 = 3)	Dummy (1 = alta presenza di under 35 decisori; 0 = altre situazioni)	1,239	0,275	0,701	1,778
Azienda in utile	Impresa con utile positivo sul fatturato complessivo (Utile = 1)	Dummy (1 = utile > 0; 0 = pareggio o perdita)	0,476	0,223	0,040	0,913
Area geografica svantaggiata	Localizzazione in area con dotazioni infrastrutturali relativamente deboli (Areageografica = 1)	Dummy (1 = area geografica svantaggiata; 0 = altre aree)	-1,056	0,360	-1,762	-0,350
Impegno in tutela ambientale	Presenza di iniziative strutturate di tutela ambientale (tutela_amb = 1)	Dummy (1 = sì; 0 = no)	0,818	0,275	0,278	1,358
Visione ambientale negativa	Valutazione pessimistica del futuro ambientale dell'agricoltura (fut_amb = 1)	Dummy (1 = visione fortemente negativa; 0 = valutazione neutra/positiva)	-1,737	0,615	-2,943	-0,532
Costante	Intercetta del modello	-	-2,616	1,195	-4,959	-0,273

Le stime del modello *logit* risultano pienamente coerenti con l'impianto teorico delineato nei paragrafi precedenti e consentono di delineare in modo più preciso il profilo delle imprese maggiormente inclini alla digitalizzazione. Le variabili riconducibili alle **condizioni economiche e organizzative** restituiscono un quadro particolarmente nitido: l'appartenenza alla classe di fatturato più bassa si associa a una marcata riduzione dei *log-odds* di adozione, segnalando che le imprese in condizioni di maggiore fragilità economica presentano una probabilità significativamente inferiore di investire in tecnologie digitali. Per converso, l'operatività su una scala di attività nazionale o internazionale e la presenza di un utile positivo si collegano a un incremento statisticamente rilevante della probabilità di adozione. Ne deriva l'immagine di una digitalizzazione che tende a radicarsi prevalentemente in aziende dotate di adeguate risorse finanziarie e inserite in filiere articolate, nelle quali la gestione dei flussi informativi, degli obblighi di tracciabilità e delle relazioni di scambio rende l'impiego di soluzioni digitali non solo possibile, ma anche razionalmente conveniente.

Un secondo nucleo di risultati riguarda il **capitale umano e l'orientamento strategico** dell'impresa. La presenza di una leadership giovane emerge come uno dei determinanti più incisivi del modello: le aziende in cui gli under 35 rivestono un ruolo decisionale significativo manifestano una propensione all'adozione sensibilmente più elevata, confermando il ruolo delle competenze, della familiarità con il digitale e di una maggiore disponibilità al cambiamento nei processi di innovazione. In coerenza con questa lettura, le imprese che praticano agricoltura biologica e quelle che dichiarano un impegno strutturato nella tutela ambientale presentano una probabilità di adozione superiore rispetto alle altre. Ciò suggerisce che le traiettorie competitive fondate su qualità e sostenibilità tendono a essere accompagnate dall'impiego di strumenti digitali per il monitoraggio dei processi, la gestione degli input e la dimostrazione della conformità a standard ambientali e di prodotto, rafforzando l'idea di una complementarità strutturale tra transizione "green" e transizione digitale.

Infine, si delineano con particolare chiarezza alcune dimensioni di **vincolo territoriale e cognitivo**. La localizzazione in aree in cui sono carenti o del tutto assenti le infrastrutture risulta associata a una riduzione significativa della probabilità di adozione, segnalando l'esistenza di un vero e proprio *digital divide* territoriale: in assenza di dotazioni adeguate di connettività e servizi di supporto, anche imprese potenzialmente motivate incontrano ostacoli rilevanti nell'implementazione di soluzioni digitali. A ciò si aggiunge l'effetto negativo di una valutazione marcatamente negativa delle prospettive ambientali dell'agricoltura, intesa come aspettativa di un peggioramento delle condizioni ecologiche e climatiche del settore e di una crescente difficoltà a governarne gli impatti. Tale percezione si traduce in una minore propensione a intraprendere investimenti con orizzonte temporale medio-lungo, indebolendo le aspettative di rendimento delle scelte innovative. Nel loro insieme, questi risultati restituiscono l'immagine di una digitalizzazione agricola che non dipende

semplicemente da differenze di dimensione fisica o di specializzazione produttiva, ma rappresenta l'esito di una combinazione specifica di risorse economiche, complessità organizzativa, profili imprenditoriali, orientamenti a qualità e sostenibilità, condizioni territoriali e aspettative sul futuro del settore.

Un ultimo elemento merita attenzione riguardo alle **variabili non significative**. Numerose covariate considerate nella fase esplorativa - tra cui la superficie agricola utilizzata, alcuni indicatori di manodopera, diverse specializzazioni produttive e taluni aspetti dei rapporti di filiera - non risultano statisticamente significative nel modello finale. Ciò suggerisce che, nel campione **AGRIcoltura100**, la propensione all'adozione digitale non è spiegata in via prioritaria da caratteristiche strutturali "tradizionali" (ad esempio la dimensione fisica in ettari), ma dipende piuttosto da una combinazione di condizioni economiche (livello di fatturato e redditività), scala organizzativa (orizzonte geografico delle attività), profilo imprenditoriale (presenza di giovani in posizioni decisionali), orientamento alla qualità e alla sostenibilità, oltre che dal contesto territoriale e dalle aspettative sul futuro. Per alcune categorie dummy non stimate, la mancata valorizzazione è riconducibile a fenomeni di collinearità perfetta o a scarsa variabilità interna, aspetti tipici dei modelli che includono un numero elevato di variabili categoriali. Anche questa evidenza converge verso un'interpretazione in cui l'adozione delle tecnologie digitali riflette soprattutto scelte gestionali, strategie di posizionamento e condizioni di contesto, più che meri tratti strutturali dell'azienda agricola.

5.5 Inquadramento dei risultati nel dibattito scientifico e implicazioni per la transizione digitale

Nel complesso, i risultati del modello *logit* si collocano in continuità con la letteratura sull'adozione delle tecnologie di precisione e, più in generale, delle tecnologie digitali in agricoltura, pur evidenziando alcune specificità riconducibili al contesto italiano e al perimetro informativo dell'indagine AGRIcoltura100. La forte penalizzazione associata alla classe di fatturato più bassa e, specularmente, il ruolo positivo della redditività aziendale confermano l'ipotesi secondo cui la digitalizzazione richiede condizioni minime di solidità economica: le imprese con capacità finanziarie limitate incontrano maggiori difficoltà ad assorbire i costi fissi iniziali, a sostenere gli oneri di apprendimento e a gestire il rischio percepito dell'investimento. Tale evidenza è in linea con numerosi studi che individuano nella dimensione economica, nella capacità di autofinanziamento e nell'accesso al capitale alcuni dei driver centrali dell'adozione delle tecnologie avanzate, sia nel caso italiano sia in contesti internazionali. Lavori quali Federici et al. (2020) per l'Italia e le analisi comparative di Lowenberg-DeBoer e Erickson (2019) o Qiu et al. (2019) documentano, in tal senso, come i vincoli

finanziari possano rallentare la diffusione delle tecnologie di precisione anche in presenza di benefici potenziali elevati, convergendo con quanto emerge dal campione **AGRIcoltura100**.

Il modello mette inoltre in luce la centralità dell'età e del capitale umano, mostrando che la presenza di una quota elevata di giovani under 35 in posizione decisionale costituisce il determinante più incisivo della probabilità di adozione. Tale risultato si inserisce nella tradizione di studi che collegano l'adozione di innovazioni agricole al livello di istruzione, all'apertura al cambiamento e alla capacità di interagire con reti di conoscenza e servizi di consulenza, secondo la logica delineata da Rogers nella teoria della diffusione delle innovazioni e ripresa nelle analisi più recenti sulla digitalizzazione dei sistemi di conoscenza in agricoltura. Klerkx, Jakku e Labarthe (2019), ad esempio, mostrano come l'adozione di soluzioni di smart farming sia più probabile in presenza di imprenditori agricoli con profili formativi elevati, inseriti in reti di innovazione e supportati da *innovation brokers*. In questo quadro, le evidenze di **AGRIcoltura100** suggeriscono che la "leadership giovane" tenda a interpretare la digitalizzazione non come mera dotazione tecnica, ma come componente strutturale del modello di business e leva per riposizionare l'azienda all'interno della filiera.

Un ulteriore asse interpretativo riguarda l'orientamento alla qualità e alla sostenibilità ambientale. Il fatto che le aziende biologiche e le imprese con un impegno strutturato in iniziative di tutela ambientale presentino una probabilità significativamente più elevata di adottare tecnologie digitali risulta coerente con la letteratura che sottolinea la complementarità tra agricoltura di precisione, obiettivi ambientali e *sustainable intensification*. L'impiego sistematico dei dati per ottimizzare l'uso degli input, ridurre gli sprechi e monitorare gli impatti ambientali assume una rilevanza particolare nei sistemi produttivi che competono su qualità, tracciabilità e reputazione ambientale. In questo senso, i risultati del modello dialogano con i contributi di Finger et al. (2019) e Swinton et al. (2019), che evidenziano come le tecnologie di precisione possano contribuire congiuntamente alla performance economica e alla riduzione degli impatti ambientali, e con la letteratura sulla *sustainable intensification* che richiama la necessità di coniugare produttività, qualità e tutela delle risorse. Nel contesto italiano descritto da **AGRIcoltura100**, la domanda di soluzioni digitali sembra dunque emergere non soltanto da obiettivi di efficienza, ma anche da vincoli regolatori, requisiti di certificazione e strategie di posizionamento *premium* sui mercati, in coerenza con gli indirizzi di FAO, OECD e Commissione Europea in materia di digitalizzazione e transizione verde.

Sul piano territoriale, il modello evidenzia un divario particolarmente marcato: la localizzazione in aree in contesti territoriali a bassa dotazione di infrastrutture digitali riduce in misura significativa la probabilità di investimento digitale. Si tratta di un risultato pienamente coerente con la letteratura sul rurale, che documenta come la qualità delle infrastrutture di connettività, la densità dei servizi e la presenza di attori intermedi (cooperative, consulenti, fornitori di tecnologia) condizionino in modo

sostanziale la possibilità di implementare soluzioni *data-driven*. Studi quali Philip et al. (2021) mostrano come i differenziali di accesso alla banda larga e ai servizi digitali nelle aree rurali possano tradursi in ritardi strutturali nell'adozione delle innovazioni; allo stesso modo, i rapporti di FAO e OECD sulla *digitalisation of agriculture* insistono sulla necessità di affiancare agli incentivi all'adozione investimenti in infrastrutture, servizi di consulenza e sistemi di conoscenza e innovazione agricola (AKIS) territoriali. I risultati di **AGRIcoltura100** si inseriscono pienamente in questo quadro, suggerendo che misure orizzontali di incentivo all'acquisto di tecnologie - come i crediti d'imposta per l'Agricoltura 4.0 - siano necessarie ma non sufficienti se non accompagnate da interventi mirati sulle condizioni abilitanti di contesto.

Particolarmente rilevante, e meno esplorato nella letteratura rispetto ad altri fattori, è il ruolo delle percezioni e delle aspettative. L'associazione negativa tra visione ambientale pessimistica e probabilità di adozione indica che le imprese con una valutazione fortemente negativa del futuro ambientale dell'agricoltura risultano meno propense a intraprendere investimenti digitali. Questa evidenza è coerente con i contributi che richiamano l'attenzione su percezioni, aspettative e "beliefs" degli agricoltori come barriere soft all'innovazione, spesso trascurate rispetto ai vincoli di natura strutturale. Se l'orizzonte di lungo periodo è percepito come incerto o compromesso, risulta meno razionale impegnare risorse in investimenti specifici, anche qualora tali investimenti possano migliorare efficienza e resilienza. Da ciò discende che le politiche di promozione della digitalizzazione dovrebbero intervenire non soltanto sui costi e sugli incentivi, ma anche sulla costruzione di aspettative credibili e condivise circa il contributo delle tecnologie alla transizione sostenibile, in coerenza con i quadri strategici europei del Green Deal, della strategia Farm to Fork e delle iniziative sulla digitalizzazione dell'agricoltura.

Infine, il fatto che alcune variabili strutturali tradizionali - come la superficie agricola utilizzata o determinati indicatori di struttura della manodopera - non risultino significative distingue parzialmente queste evidenze da studi che attribuiscono un ruolo centrale alla dimensione fisica dell'azienda nell'adozione delle tecnologie di precisione. Una possibile interpretazione è che, nel campione **AGRIcoltura100**, la variabile cruciale non sia tanto la scala fisica in senso stretto, quanto la combinazione di solidità economica, complessità organizzativa e capacità manageriale, catturata da variabili quali fatturato, utile, scala di attività e profilo imprenditoriale. In questo senso, i risultati si avvicinano alle letture che enfatizzano la natura sistemica della digitalizzazione agricola - come nei contributi di Wolfert et al. (2017) e degli stessi Klerkx et al. (2019) - secondo cui l'adozione non è una scelta puramente tecnologica, ma l'esito di un'architettura istituzionale, organizzativa e di mercato che rende conveniente o meno trasformare i dati in capitale organizzativo incorporato nelle routine aziendali.

Dal punto di vista teorico, le evidenze descrittive ed econometriche risultano coerenti con i modelli di accettazione/adozione. Le differenze territoriali e dimensionali rimandano a **condizioni facilitanti** diseguali (infrastrutture digitali, servizi di consulenza, capitale umano), mentre la minore diffusione di strumenti ad alta intensità organizzativa (DSS e piattaforme integrate) è compatibile con una più elevata **percezione della complessità d'uso** e con vincoli di competenze. La concentrazione dell'adozione in specifici comparti può essere letta come esito di benefici attesi più elevati e di complementarità tecnologiche più facilmente realizzabili. In parallelo, una lettura socio-tecnica della digitalizzazione nelle aree rurali consente di interpretare i divari come esito di infrastrutture, interoperabilità e governance dei dati, oltre che di vincoli economici.

Nel loro insieme, i risultati confermano molti dei fattori già individuati in letteratura - ruolo della solidità economica, del capitale umano, delle condizioni territoriali e dell'orientamento alla sostenibilità - e al tempo stesso offrono un contributo originale sulla configurazione specifica con cui tali fattori si intrecciano nel sistema agroalimentare italiano, così come rappresentato dal campione **AGRIcoltura100**. Le implicazioni per la transizione digitale sono evidenti: per promuovere un'adozione diffusa e non selettiva delle tecnologie digitali non è sufficiente incentivare l'acquisto di strumenti hardware e software; occorre intervenire congiuntamente su condizioni economiche, assetti organizzativi, infrastrutture materiali e immateriali e aspettative degli attori, affinché la digitalizzazione possa tradursi in una trasformazione strutturale dei modelli produttivi e non in una semplice sovrapposizione di tecnologia a pratiche gestionali invariati.

6. Conclusioni

L'analisi sviluppata in questo lavoro, basata sulla banca dati **AGRIcoltura100** e su un percorso integrato di analisi descrittiva ed econometrica, mostra con sufficiente chiarezza che l'adozione delle tecnologie digitali nel sistema agroalimentare italiano non può essere letta come una scelta puntuale, né come esito della sola "propensione innovativa" del singolo imprenditore. L'evidenza empirica e il confronto con la letteratura convergono su una lettura diversa: la digitalizzazione agricola è il risultato di una specifica architettura istituzionale, organizzativa e di mercato, che definisce soglie di accesso, costi fissi, percorsi di apprendimento e margini effettivi di integrazione delle tecnologie nei processi aziendali. In questa prospettiva, le tecnologie digitali non sono elementi isolati, ma componenti di un ecosistema che funziona solo se sostenuto da capitale umano adeguato, interoperabilità, servizi di supporto e condizioni abilitanti diffuse lungo la filiera e nei territori; esse diventano, in altri termini, parte di un'infrastruttura cognitiva e organizzativa che ridisegna il modo in cui le imprese osservano, misurano, decidono e agiscono.

Tale impostazione è coerente con i modelli di accettazione e adozione (TAM/UTAUT) e con l'interpretazione socio-tecnica della digitalizzazione, che enfatizza il ruolo congiunto di benefici attesi, complessità d'uso e condizioni facilitanti.

La distribuzione dell'intensità digitale osservata nel campione **AGRIcoltura100** restituisce l'immagine di una diffusione ancora in fase embrionale. Una larga maggioranza di imprese non utilizza alcuna famiglia tecnologica digitale, mentre una minoranza si colloca su livelli bassi o intermedi di adozione. Questa configurazione è coerente con una fase iniziale del processo di diffusione, in cui il passaggio da assenza di adozione ($m=0$) a una prima tecnologia ($m=1$) rappresenta un vero e proprio salto di stato. L'ingresso nel digitale richiede infatti un "pacchetto minimo funzionante" composto da sensori, connettività, applicazioni e supporto tecnico: solo quando questo nucleo minimo è presente l'impresa può trasformare l'informazione grezza e dispersa in dato strutturato, e il dato in decisioni e azioni operative. In assenza di tale soglia tecnologico-organizzativa, la tecnologia rischia di rimanere un artefatto isolato, non integrato nelle routine e quindi destinato a un uso episodico o all'abbandono. Ne deriva che la variabile m , pur sintetica, non misura soltanto "quante" tecnologie sono presenti, ma approssima anche il grado di articolazione del sistema informativo aziendale e, indirettamente, la possibilità di utilizzo continuativo e integrato.

Una volta superata la soglia di ingresso, la combinazione di tecnologie - telemetria, sistemi di supporto alle decisioni, software gestionali, meccanizzazione 4.0 - genera rendimenti crescenti grazie a forti complementarità tecniche e organizzative. Ogni nuovo componente accresce il valore informativo degli altri, consolida la capacità dell'impresa di utilizzare i dati come input produttivo e

rende più fluida la traduzione del dato in azione. Il sistema informativo aziendale, in questa prospettiva, non è la semplice somma di singoli strumenti, ma un “*bundle*” coerente in cui sensori, piattaforme, macchine e competenze contribuiscono, insieme, a ridurre l’incertezza, migliorare la capacità predittiva e ottimizzare l’uso delle risorse. La digitalizzazione non procede dunque come accumulo lineare di strumenti, ma come costruzione progressiva di pacchetti tecnologici e organizzativi, la cui coerenza interna e integrazione nelle routine aziendali risultano decisive ai fini della generazione di valore. Questa dinamica è compatibile con l’ipotesi di complementarità tra tecnologie e capacità gestionali: l’efficacia dell’adozione dipende dalla possibilità di far dialogare strumenti e dati e di stabilizzare procedure di decisione e controllo.

Nel quadro così delineato, il modello *logit* consente di chiarire quali fattori discriminano in modo sistematico tra imprese adottanti e non adottanti, permettendo di superare una lettura meramente strutturale del fenomeno. Tre blocchi di risultati emergono con particolare robustezza. Il primo riguarda le condizioni economiche e organizzative. L’appartenenza alla classe di fatturato più basso riduce drasticamente la probabilità di adozione, mentre operare su scala nazionale o internazionale e registrare un utile positivo la incrementano in modo significativo. La digitalizzazione tende quindi a radicarsi prevalentemente in imprese dotate di risorse finanziarie adeguate, inserite in filiere articolate e caratterizzate da assetti gestionali complessi, in cui la gestione di flussi informativi, obblighi di tracciabilità e relazioni contrattuali strutturate rende razionale l’investimento in tecnologie digitali. In questo contesto, la dimensione “critica” non è tanto quella fisica in ettari, quanto la dimensione economica e la complessità organizzativa: il fatto che la superficie agricola utilizzata non emerga come determinante significativo, mentre assumono rilievo variabili legate a fatturato, redditività e scala di attività, conferma che a contare è la maturità organizzativa più che il mero margine di scala fisica. La tecnologia digitale, infatti, richiede non solo spazio produttivo, ma soprattutto capacità di assorbire costi fissi, sostenere investimenti indivisibili, coordinare processi più articolati e integrare nuove competenze nei circuiti decisionali. Le stime vanno tuttavia lette come associazioni condizionate alle covariate incluse, coerentemente con la natura trasversale dei dati e con l’assenza di una strategia identificativa causale.

Il secondo blocco riguarda il capitale umano e l’orientamento strategico. La presenza di una leadership giovane, misurata come quota significativa di under 35 in posizione decisionale, si configura come il determinante più incisivo della probabilità di adozione: le imprese guidate da giovani imprenditori presentano probabilità di investimento digitale molto più elevate rispetto alle altre. Questo risultato è pienamente coerente con la letteratura che collega l’adozione di innovazioni al livello di istruzione, all’apertura al cambiamento, alla familiarità con processi *data-driven* e alla capacità di interagire con reti di conoscenza e servizi di consulenza. Nel contesto **AGRIcoltura100**,

la “*leadership giovane*” interpreta la digitalizzazione come componente strutturale del modello di business e non come semplice dotazione tecnica, collocandola al centro di strategie di medio periodo che riguardano il posizionamento competitivo, la gestione del rischio e la capacità di rispondere a vincoli regolatori crescentemente esigenti. In modo analogo, le aziende che praticano agricoltura biologica o che implementano in modo sistematico pratiche di tutela ambientale presentano probabilità di adozione significativamente superiori. Ciò suggerisce una complementarità profonda tra digitalizzazione, qualità e sostenibilità: il digitale viene utilizzato come leva per migliorare la gestione degli input, documentare processi, dimostrare conformità a schemi certificativi, alimentare sistemi di tracciabilità avanzata e consolidare un posizionamento competitivo fondato su reputazione e affidabilità.

Il contributo teorico della tesi consiste nel ricondurre l’adozione delle tecnologie digitali a una logica che integra la dimensione comportamentale (benefici attesi e percezione della complessità d’uso) con i vincoli e gli abilitatori di contesto. In linea con TAM/UTAUT, l’adozione risulta più probabile quando i benefici sono credibili e quando infrastrutture, competenze e supporto riducono i costi di apprendimento; tuttavia, l’evidenza empirica suggerisce che la digitalizzazione operi soprattutto come infrastruttura organizzativa e cognitiva, i cui ritorni dipendono dall’interoperabilità dei dati, dai servizi di accompagnamento e dalla capacità di integrare stabilmente le soluzioni nei processi decisionali.

Il terzo blocco di risultati riguarda le dimensioni territoriali e cognitive della transizione digitale. Le imprese localizzate in aree svantaggiate dal punto di vista infrastrutturale, presentano una probabilità di adozione marcatamente più bassa, segnalando l’esistenza di un *digital divide* rurale che non dipende soltanto da differenze di reddito o di specializzazione, ma dalla presenza - o assenza - di veri ecosistemi digitali territoriali. Dove connettività, servizi, attori intermedi e filiere organizzate convergono, la soglia di ingresso si abbassa e l’innovazione tende a diffondersi come bene di rete: la densità di relazioni, la disponibilità di supporto tecnico e la presenza di progetti collettivi facilitano la sperimentazione, condividono il rischio, riducono i costi di apprendimento. Dove tali condizioni mancano, il digitale resta confinato a iniziative isolate, non scalabili e più vulnerabili all’abbandono, spesso legate all’iniziativa di singoli imprenditori “*pionieri*” senza adeguati meccanismi di accompagnamento. Ancora più interessante è l’effetto delle aspettative: una valutazione fortemente negativa delle prospettive ambientali dell’agricoltura riduce in modo drastico la probabilità di adozione, segnalando che percezioni e rappresentazioni del futuro agiscono come barriere “*soft*” che si sommano a quelle strutturali. Se il futuro ambientale del settore è percepito come incerto o compromesso, diventa meno razionale impegnare risorse in investimenti specifici a medio-lungo termine, anche là dove esisterebbero le capacità finanziarie per farlo. La digitalizzazione, in altre

parole, richiede non solo capitale economico e infrastrutture, ma anche un orizzonte di aspettative sufficientemente ampio da rendere sensata la costruzione di nuovi asset organizzativi.

Non meno significativo è ciò che il modello non mette in evidenza. Variabili strutturali classiche - come la superficie agricola utilizzata o alcuni indicatori di struttura della manodopera - non risultano statisticamente significative. Nel campione **AGRIcoltura100** la dimensione fisica conta meno della struttura economica, organizzativa e manageriale. L'adozione digitale appare così guidata più da condizioni di "*maturità organizzativa*" che da meri margini di scala, avvicinando i risultati alle interpretazioni che, in letteratura, sottolineano la natura sistemica della digitalizzazione agricola e il ruolo delle complementarità tra risorse, competenze e relazioni di filiera. In questa prospettiva, la singola variabile strutturale perde potere esplicativo se considerata isolatamente, mentre assume senso all'interno di un profilo composito che combina dimensione economica, modello gestionale, grado di integrazione nelle filiere, qualità del capitale umano e condizioni di contesto.

Queste evidenze sono in forte consonanza con la letteratura internazionale sull'adozione delle tecnologie di precisione e delle soluzioni smart farming, ma ne arricchiscono il quadro con alcuni tratti specifici del contesto italiano. La centralità della solidità economica e dell'accesso al capitale conferma gli studi che documentano l'effetto dei vincoli finanziari sulla diffusione delle tecnologie avanzate, anche in presenza di benefici potenziali elevati. Il rilievo del capitale umano e delle reti di conoscenza si iscrive nella tradizione di analisi sugli AKIS e sul ruolo degli *innovation brokers* nel colmare i divari di conoscenza e facilitare l'appropriazione dei benefici dell'innovazione. La complementarità tra digitalizzazione, qualità e sostenibilità è coerente con l'idea che l'agricoltura di precisione possa costituire una componente chiave della *sustainable intensification*, contribuendo simultaneamente alla performance economica e alla riduzione degli impatti ambientali. La presenza di un divario territoriale strutturale e il peso delle percezioni ambientali negative richiamano infine gli studi sul *digital divide* rurale e sulle barriere cognitive all'innovazione, che invitano a considerare la transizione digitale anche come processo culturale e decisionale, e non solo come aggiornamento tecnologico.

Alla luce di questi risultati, emergono alcune indicazioni per le strategie delle imprese agricole. La prima è che la digitalizzazione va concepita come investimento organizzativo, non come semplice spesa per beni strumentali. Ciò implica valutare non solo il costo di acquisizione delle tecnologie, ma anche gli oneri di formazione, adattamento dei processi, manutenzione organizzativa e coordinamento con consulenti e fornitori di servizi. Le esperienze più mature suggeriscono che l'adozione ha maggiori probabilità di generare valore quando si inserisce in un progetto aziendale chiaramente definito - riduzione di specifici costi, miglioramento di determinati indicatori agronomici e ambientali, accesso a mercati o schemi di qualità - e quando è accompagnata da una revisione delle

routine gestionali volta a incorporare stabilmente il dato nei processi decisionali. Il criterio di valutazione dell'investimento digitale non può essere ridotto al solo *payback* finanziario di breve periodo, ma deve includere la capacità della tecnologia di migliorare la qualità delle decisioni, di ridurre l'incertezza e di aumentare la resilienza dell'impresa rispetto a shock climatici, fitosanitari e di mercato.

Una seconda indicazione riguarda il carattere fortemente complementare delle tecnologie. Strategie di costruzione graduale di bundle coerenti, basati su soluzioni aperte, interoperabili e modulabili nel tempo, appaiono preferibili all'accumulo di strumenti eterogenei non comunicanti. La scelta di tecnologie che dialogano fra loro, che permettono di riutilizzare i dati in diversi punti della catena decisionale, che non vincolano l'impresa a un singolo fornitore in modo irreversibile, consente di ridurre il rischio di lock-in tecnologico e di preservare margini di flessibilità rispetto all'evoluzione futura delle soluzioni disponibili. In questo quadro, la capacità dell'imprenditore di negoziare condizioni contrattuali che tutelino l'accesso ai propri dati, la loro portabilità e la possibilità di integrarli in piattaforme diverse diventa parte integrante della competenza gestionale.

Una terza indicazione concerne la gestione delle competenze. L'importanza della leadership giovane evidenzia la necessità di investire in capitale umano, attraverso formazione interna, valorizzazione dei profili tecnici e gestionali, rafforzamento dei rapporti con consulenti specializzati, cooperative e organizzazioni di produttori. La competenza digitale non va intesa soltanto come capacità di utilizzare un software o un'interfaccia, ma come abilità di interpretare indicatori, leggere tendenze, dialogare con fornitori e consulenti su base informata, valutare criticamente i suggerimenti dei sistemi di supporto alle decisioni. In prospettiva, la capacità di leggere e utilizzare i dati è destinata a divenire una dimensione centrale del capitale imprenditoriale in agricoltura, al pari della conoscenza agronomica o della capacità di presidiare i mercati.

Infine, il legame tra digitalizzazione, qualità e sostenibilità suggerisce che le imprese impegnate in percorsi di agricoltura biologica, certificazioni o schemi di filiera "*premium*" possano utilizzare il digitale non solo per contenere i costi, ma per rafforzare il proprio posizionamento competitivo tramite tracciabilità avanzata, monitoraggio continuo delle prestazioni e maggiore affidabilità reputazionale. La capacità di documentare in modo oggettivo processi, input utilizzati e impatti ambientali può tradursi in accesso a canali di mercato più remunerativi, in potere negoziale crescente lungo la filiera e in una maggiore capacità di rispondere a richieste di trasparenza da parte dei consumatori e della regolazione.

Sul versante delle politiche pubbliche, le implicazioni sono altrettanto rilevanti. Il forte effetto di variabili quali redditività, scala di attività e capitale umano suggerisce che politiche esclusivamente centrate su incentivi all'investimento (ad esempio sussidi all'acquisto di macchinari 4.0) tendono a

favorire le imprese già più solide e strutturate, rischiando di ampliare anziché ridurre i divari esistenti. Ciò non implica che tali strumenti debbano essere abbandonati, ma che debbano essere inseriti in una strategia più ampia, che includa almeno tre dimensioni interconnesse: le condizioni abilitanti territoriali, la progettazione degli incentivi e le politiche della conoscenza.

Sul piano territoriale, gli effetti negativi associati alle aree geografiche svantaggiate mostrano che, in assenza di connettività adeguata, servizi di supporto e attori intermedi capaci di tradurre le tecnologie in soluzioni operative, gli incentivi all'acquisto hanno impatto limitato. Investimenti in banda larga rurale, infrastrutture di dati, hub territoriali di innovazione e rafforzamento degli AKIS locali dovrebbero essere considerati parte integrante delle politiche per l'agricoltura digitale, e non semplici misure "di contesto". In assenza di queste precondizioni, il rischio è quello di sovra-finanziare l'offerta di tecnologia senza creare le condizioni perché essa si trasformi in uso effettivo e in impatti misurabili su produttività, sostenibilità e resilienza.

Sul piano della progettazione degli incentivi, appare opportuno spostare l'attenzione da schemi che remunerano prevalentemente la spesa in capitale fisico a strumenti che riconoscano anche il valore dell'uso continuativo, della formazione, della consulenza e della partecipazione a progetti di filiera *data-driven*, eventualmente condizionando il sostegno al raggiungimento di risultati misurabili in termini di efficienza, qualità e performance ambientale. Meccanismi che premiano la continuità d'uso, la condivisione di dati, la partecipazione a piattaforme comuni o la riduzione documentata di input chimici e impatti ambientali possono allineare gli incentivi privati agli obiettivi collettivi, trasformando la digitalizzazione in leva di politiche agro-ambientali e di sviluppo rurale.

Sul piano della conoscenza, infine, la centralità della leadership giovane e il ruolo delle aspettative ambientali indicano che la transizione digitale è anche trasformazione cognitiva e culturale. Politiche di formazione continua, programmi di estensione, living lab e progetti dimostrativi diventano strumenti essenziali per ridurre l'attrito cognitivo, rendere tangibili i benefici potenziali delle tecnologie, costruire fiducia nel fatto che il digitale può contribuire, se ben governato, a rendere più gestibile la transizione ecologica. La comunicazione istituzionale e le iniziative di accompagnamento dovrebbero evitare sia narrazioni eccessivamente salvifiche, che rischiano di generare delusione, sia rappresentazioni esclusivamente difensive, che rafforzano atteggiamenti rinunciatari, e puntare invece su esempi concreti, misurabili e contestualizzati.

In questo scenario, i corpi intermedi - associazioni professionali, organizzazioni di categoria, cooperative, organizzazioni di produttori - assumono un ruolo strategico. La natura sistemica della digitalizzazione, evidenziata dai risultati, suggerisce che tali attori possano diventare veri e propri orchestratori di ecosistemi digitali territoriali, capaci di aggregare domanda, negoziare condizioni quadro con i fornitori tecnologici, promuovere standard e protocolli condivisi, sviluppare

infrastrutture comuni (piattaforme dati di filiera, reti di sensori, sistemi informativi condivisi) e fornire servizi tecnici e consulenziali di accompagnamento. La loro posizione intermedia tra imprese, mercato e istituzioni li rende potenziali garanti nella governance dei dati, chiamati a tutelare i diritti degli agricoltori, prevenire forme di dipendenza eccessiva da soluzioni proprietarie e favorire modelli di condivisione dei dati in grado di generare valore per l'intero sistema agroalimentare. In questa prospettiva, il rafforzamento organizzativo e professionale dei corpi intermedi diventa una componente essenziale delle politiche per l'agricoltura digitale, al pari degli investimenti infrastrutturali e degli incentivi economici.

La misurazione della digitalizzazione emerge, a sua volta, come elemento cruciale di governance. L'esperienza di **AGRIcoltura100** mostra come sia possibile costruire indicatori di adozione e intensità digitale capaci di cogliere non solo la presenza di singole tecnologie, ma la configurazione complessiva dei sistemi informativi aziendali. In prospettiva, la realizzazione di una dashboard nazionale e regionale, integrata con gli AKIS, che monitori nel tempo la quota di imprese adottanti, i livelli di intensità digitale, la continuità d'uso, l'interoperabilità dei sistemi e la diffusione di specifiche tecnologie, potrebbe costituire uno strumento essenziale di accountability e di orientamento delle politiche. La misurazione, lungi dall'essere un esercizio meramente descrittivo, diventa così un dispositivo di governo: permette di identificare le aree di ritardo, valutare l'efficacia degli interventi, correggerne le traiettorie e costruire un linguaggio comune tra decisori pubblici, imprese e corpi intermedi. La stessa definizione di indicatori condivisi di "maturità digitale" può contribuire a spostare il baricentro della discussione pubblica dall'enfasi sulle tecnologie disponibili alla valutazione dell'uso effettivo e dei risultati conseguiti.

Sviluppi metodologici

Come ogni esercizio empirico, anche questo lavoro presenta limiti che suggeriscono piste per future ricerche. Sul piano metodologico, un'estensione naturale dell'impianto empirico riguarda il passaggio da una lettura centrata sulla decisione di adozione (esito dicotomico) a una modellizzazione esplicita dell'intensità m , intesa come conteggio delle famiglie tecnologiche implementate. In tale prospettiva, l'impiego di modelli per dati di conteggio (Poisson o, in presenza di overdispersion, Negative Binomial) consentirebbe di stimare direttamente i determinanti della profondità dell'adozione. Inoltre, la presenza di una quota elevata di osservazioni nulle ($m = 0$) suggerisce la pertinenza di specificazioni *zero-inflated* (ZIP/ZINB), utili a distinguere tra non-adozione "strutturale" (assenza di condizioni abilitanti minime) e intensità condizionata per le imprese potenzialmente adottanti. Queste estensioni permetterebbero di separare in modo più netto il processo di ingresso nel digitale da quello

di intensificazione dell'adozione, rafforzando l'interpretazione dei meccanismi e la valutazione dell'efficacia delle politiche di sostegno.

La base dati **AGRIcoltura100**, pur ampia e ricca, è riferita a imprese caratterizzate da un certo grado di attenzione alla sostenibilità e non rappresenta l'intero universo delle aziende agricole italiane; i modelli stimati colgono in modo robusto associazioni statistiche, ma non consentono di identificare pienamente relazioni causali né di seguire longitudinalmente le traiettorie di adozione; la misura di intensità digitale, pur articolata, non cattura tutti gli aspetti qualitativi legati alla sofisticazione degli usi, alla qualità dei dati e all'effettiva integrazione delle tecnologie nei processi decisionali. Analisi longitudinali che seguano nel tempo le stesse imprese, approfondimenti settoriali e territoriali basati su metodi misti quantitativo-qualitativi e valutazioni controfattuali degli effetti delle politiche di sostegno alla digitalizzazione potrebbero arricchire ulteriormente il quadro, permettendo di osservare entrata, permanenza ed eventuale abbandono delle tecnologie digitali e di individuare le combinazioni di fattori che rendono la digitalizzazione non solo possibile ma sostenibile e durevole. Allo stesso tempo, un dialogo più stretto tra ricerche micro-aziendali e analisi macro-istituzionali potrebbe contribuire a chiarire come le scelte di *policy* si traducano, concretamente, in incentivi percepiti e in comportamenti di adozione.

Nel complesso, le evidenze raccolte suggeriscono che la digitalizzazione agricola, nel contesto italiano, non sia soltanto un processo tecnologico, ma una transizione istituzionale, organizzativa e cognitiva. Le tecnologie producono valore quando diventano capitale organizzativo incorporato in routine verificabili, quando i dati scorrono tra macchine, persone e istituzioni con attriti contenuti, quando gli incentivi pubblici sono disegnati per premiare l'uso e l'integrazione delle soluzioni digitali più che il mero acquisto, e quando le aspettative degli attori rispetto al futuro ambientale ed economico del settore rendono razionale investire in innovazione. Il contributo di questa tesi è quello di aver fornito un quadro integrato, empiricamente fondato e orientato alla *policy*, utile per progettare interventi capaci di trasformare la digitalizzazione da promessa tecnologica a processo solido, sistemico e generatore di valore reale per l'intero sistema agroalimentare italiano; ma la vera prova di maturità di questa trasformazione consisterà nella capacità collettiva, nei prossimi anni, di tradurre la crescita dell'offerta tecnologica in nuove forme di cooperazione, di governance e di equità lungo le filiere, lasciando aperta la domanda - decisiva - su chi governerà i dati, chi beneficerà dei cambiamenti e come verrà ridisegnato il ruolo dell'agricoltore in un'agricoltura sempre più guidata dall'informazione.

In questa prospettiva, alcune questioni appaiono particolarmente rilevanti e rimangono intenzionalmente aperte. La prima riguarda la distribuzione del valore generato dal digitale lungo le filiere. Se, come suggeriscono i risultati, la digitalizzazione tende a concentrarsi nelle imprese

economicamente più solide, meglio collegate ai mercati e dotate di maggior capitale umano, esiste il rischio che le tecnologie amplifichino asimmetrie già presenti, rafforzando la posizione degli attori più forti e comprimendo i margini di quelli più fragili. La capacità di raccogliere, elaborare e sfruttare i dati può tradursi in un vantaggio competitivo cumulativo, in grado di ridefinire rapporti di forza nella contrattazione, nell'accesso ai canali commerciali, nella possibilità di aderire a schemi di qualità. Da questo punto di vista, la digitalizzazione non è neutrale: essa apre opportunità, ma al tempo stesso pone un problema di giustizia distributiva e di equità tra territori, tipologie di impresa e posizioni nella filiera. Una politica agricola che voglia utilizzare il digitale come leva di coesione, anziché come fattore di polarizzazione, dovrà misurarsi esplicitamente con questi squilibri potenziali. Una seconda questione riguarda il rapporto tra automazione decisionale e ruolo dell'imprenditore. L'affermazione, sempre più frequente, di sistemi di supporto alle decisioni basati su modelli predittivi e, in prospettiva, su forme di intelligenza artificiale, solleva interrogativi sul tipo di competenze che saranno effettivamente richieste in azienda, sul rischio di dipendenza cognitiva da "black box" algoritmiche e sulla possibilità di preservare lo spazio per il giudizio professionale e l'esperienza tacita dell'agricoltore. Da un lato, la riduzione dell'onere cognitivo e la possibilità di simulare scenari complessi rappresentano un potenziale straordinario per migliorare la resilienza e la capacità adattiva delle imprese. Dall'altro, se l'architettura dei sistemi digitali non sarà progettata in modo da mantenere trasparenza, controllabilità e possibilità di contestazione informata delle raccomandazioni algoritmiche, esiste il rischio che l'imprenditore venga progressivamente confinato al ruolo di esecutore di prescrizioni generate altrove, perdendo parte della propria autonomia decisionale. La transizione verso un'agricoltura sempre più *data-driven* richiede quindi una riflessione non solo su quali decisioni possano essere automatizzate, ma su quali debbano rimanere, per ragioni etiche, sociali o di responsabilità, sotto il controllo finale dell'uomo.

Una terza linea di riflessione concerne l'intreccio tra digitalizzazione e transizione ecologica. I risultati di questa tesi suggeriscono che le imprese maggiormente impegnate su qualità e sostenibilità sono anche quelle più inclini ad adottare tecnologie digitali, e che la digitalizzazione può contribuire a migliorare l'efficienza nell'uso degli input, la tracciabilità e la capacità di misurare gli impatti ambientali. Tuttavia, rimane aperta la questione del bilancio complessivo tra benefici e costi ambientali del digitale stesso, in termini di consumo energetico, impronta materiale delle infrastrutture, dipendenza da catene globali di fornitura ad alta intensità di risorse critiche. Una politica che utilizzi il digitale come alleato della transizione verde dovrà interrogarsi non solo su come le tecnologie possano ridurre l'impatto dell'agricoltura, ma anche su come progettare infrastrutture e servizi digitali coerenti con gli obiettivi di neutralità climatica e di economia circolare. Da questo punto di vista, l'agricoltura digitale potrebbe diventare un laboratorio privilegiato per sperimentare

modelli di innovazione “*sobria*”, in cui l’aumento di informazione utile non coincida automaticamente con un incremento illimitato di complessità tecnica e materiale.

Una quarta questione riguarda il rapporto tra scala locale e scala globale. I dati, per loro natura, tendono a circolare oltre i confini aziendali e territoriali, alimentando piattaforme che operano su scale nazionali o transnazionali. Ciò apre possibilità significative di apprendimento collettivo, benchmarking e sviluppo di servizi avanzati, ma solleva anche interrogativi sulla capacità dei sistemi locali di mantenere un controllo significativo sulle traiettorie di sviluppo tecnologico che li riguardano. Se i modelli di analisi, gli algoritmi di previsione e le piattaforme di gestione sono progettati altrove, in che misura tengono conto delle specificità agronomiche, sociali e istituzionali dei territori in cui vengono applicati? E, specularmente, quali strumenti possono avere regioni, distretti e sistemi locali per influenzare, adattare o co-progettare le soluzioni digitali in funzione dei propri obiettivi di sviluppo rurale, di tutela del paesaggio, di coesione sociale? Una visione realmente multilivello della governance digitale dovrebbe prevedere non solo il trasferimento di soluzioni dall’alto verso il basso, ma anche la capacità dei territori di immettere nel sistema conoscenze, priorità e vincoli propri.

Infine, la digitalizzazione pone una domanda di fondo sul futuro del lavoro agricolo e sulla rappresentazione sociale dell’agricoltura. Se, come suggerito in questa tesi, il futuro dell’agricoltura digitale è in larga misura un futuro decisionale, in cui l’uso dei dati diventa componente essenziale del mestiere, occorrerà interrogarsi su come rendere tale futuro socialmente desiderabile e accessibile. Per alcuni, la prospettiva di un’agricoltura più tecnologica può rappresentare un fattore di attrazione, in particolare per i giovani con profili formativi avanzati; per altri, rischia di accentuare la percezione di distanza tra le richieste del sistema e le competenze disponibili, alimentando senso di esclusione e resistenze al cambiamento. Se l’obiettivo è rendere la digitalizzazione un vettore di rigenerazione del tessuto imprenditoriale e non un ulteriore filtro selettivo, la sfida consisterà nel costruire percorsi di accompagnamento che consentano anche alle imprese e ai territori oggi più distanti di partecipare, con gradi diversi di intensità, a questa trasformazione.

In questo orizzonte, il contributo della tesi è intenzionalmente interlocutorio: fornisce un quadro empirico solido e alcune chiavi interpretative per comprendere come la digitalizzazione si stia radicando nel sistema agroalimentare italiano, ma lascia aperte - addirittura rilancia - una serie di domande normative e strategiche che richiederanno, nei prossimi anni, un confronto serrato tra ricerca, imprese, istituzioni e società civile. Se le tecnologie digitali diventeranno una nuova infrastruttura di base dell’agricoltura, il modo in cui verranno governate determinerà non solo i livelli di efficienza e competitività del settore, ma anche la distribuzione dei benefici, la qualità della vita nei territori rurali e la stessa definizione di cosa significhi “*fare agricoltura*” in un’economia

dell'informazione. In ultima analisi, la questione non è soltanto se e quanto l'agricoltura italiana saprà digitalizzarsi, ma se saprà farlo in modo da rafforzare - e non indebolire - il legame tra produzione di cibo, cura dei territori e responsabilità verso le generazioni future.

Bibliografia

Articoli su rivista:

- Aubert, B. A., Schroeder, A., & Grimaudo, J. (2012). *IT as enabler of sustainable farming: An empirical analysis of farmers' adoption decision of precision agriculture technologies*. Proceedings of the 33rd International Conference on Information Systems (ICIS).
- Balafoutis, A. T., Beck, B., Fountas, S., Vangeyte, J., Van der Wal, T., Soto, I., Gómez-Barbero, M., Barnes, A., & Eory, V. (2017). *Precision agriculture technologies positively contributing to GHG emissions mitigation, farm productivity and economics*. Sustainability, 9(8), 1339.
- Bonelli, M., Borin, M., & Degli Esposti, E. (2020). *Sustainable and Precision Agriculture: What Is Required for the Transition?* Agriculture, vol. 10(5), 183.
- Bogue, R. (2019). *Robots in agriculture*. Industrial Robot: The International Journal of Robotics Research and Application, 46(1), 1–6.
- Blackmore, S., Fountas, S., Gemtos, T. A., & Vougioukas, S. (2020). *A vision for future precision agriculture*. In C. L. K. Machado & J. D. Adamchuk (Eds.), *Automation in Agriculture: Securing Food Supplies for Future Generations*. Boca Raton, FL: CRC Press.
- Bronson, K., & Knezevic, I. (2016). *Big Data in food and agriculture*. Big Data & Society, 3(1), 1–6.
- Chen, H., Li, C., & Chen, G. (2017). *Digital Warehouse Management Systems: Cost Reduction and Efficiency Improvement in Agriculture*. Journal of Agricultural Systems, vol. 29(4), 230-245.
- Chen, J., Li, C., & Chen, G. (2021). *Smart agriculture in China: Current status and future perspectives*. Agriculture, 11(3), 192. <https://doi.org/10.3390/agriculture11030192>
- Davis, F.D. (1989). *Perceived usefulness, perceived ease of use, and user acceptance of information technology*. MIS Quarterly 13(3), 319–340.
- De Gennaro, B., et al. (2022). *Agricoltura di precisione: Sfide e opportunità*. Rivista di Economia Agraria, anno 2022.
- Federici, M., Chiumenti, A., Martino, M., & Massa, D. (2020). *Adoption of Precision Agriculture Technologies: A Survey on Italian Farms*. Sustainability, vol. 12(21), 8875.
- Ferrari, A., Bacco, M., Gaber, K., Jedlitschka, A., Hess, S., Kaipainen, J., ... & Brunori, G. (2022). *Drivers, barriers and impacts of digitalisation in rural areas from the viewpoint of experts*. Information and Software Technology, 145, 106816.

- Finger, R., Swinton, S. M., El Benni, N., & Walter, A. (2019). *Precision farming at the nexus of agricultural production and the environment*. *Precision Agriculture*, 20(6), 1131–1135.
- García-Ruiz, J. M., Lana-Renault, N., Serrano-Muela, P., et al. (2020). *Advantages of an irrigation district in the transition towards sustainable agriculture: evidence from Monegros, Spain*. *Regional Environmental Change*, vol. 20, 114.
- Gajda, O., et al. (2020). *Blockchain in Agriculture and Food Supply Chains – Potential Applications, Current Developments, and Future Trends*. *Applied Sciences*, vol. 10(9), 3027.
- Gebbers, R., & Adamchuk, V. I. (2010). *Precision agriculture and food security*. *Science*, 327(5967), 828-831.
- Godfray, H. C. J., Beddington, J. R., Crute, I. R., Haddad, L., Lawrence, D., Muir, J. F., Pretty, J., Robinson, S., Thomas, S. M., & Toulmin, C. (2010). *Food security: The challenge of feeding 9 billion people*. *Science*, 327(5967), 812–818. <https://doi.org/10.1126/science.1185383>
- Gomez, J. (2020). *Satellite data analysis for precision agriculture*. *Journal of Agricultural Science*, vol. 10(3), 45-57.
- Gomez, J., et al. (2019). *Digital irrigation systems: A cost-saving approach for sustainable agriculture*. *Journal of Sustainable Agriculture*, vol. 15(1), 112-125.
- He, L., & Wu, F. (2018). Precision agriculture—a worldwide overview. *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 153, 22-27.
- Henke, R. (2018). *L'agricoltura italiana tra sostenibilità, innovazione e competitività*. Roma: INEA – CREA PB.
- Howell, S. T. (2017). *Financing innovation: Evidence from R&D grants*. *American Economic Review*, 107(4), 1136-1164.
- Iliopoulos, C., Theodorakopoulou, I., Giotis, T., & Brunori, G. (2025). *Perceptions of the Costs and Benefits of Farm Digitalisation in Europe*. *EuroChoices*, 24(2), 54-62.
- Jha, K., Doshi, A., Patel, P., & Shah, M. (2019). *A comprehensive review on automation in agriculture using artificial intelligence*. *Artificial Intelligence in Agriculture*, 2, 1-12.
- Jones, A., et al. (2020). Impact of Robotics on Agricultural Operational Costs: A Case Study Analysis. *Agricultural Systems*, vol. 58(2), 102-112.
- Kamilaris, A., Kartakoullis, A., & Prenafeta-Boldú, F. X. (2018). *A review on the applications of machine learning in agriculture*. *Computers and Electronics in Agriculture*, 147, 70-90.
- Klerkx, L., & Leeuwis, C. (2009). *Establishment and embedding of innovation brokers at different innovation system levels: Insights from the Dutch agricultural sector*. *Technological Forecasting and Social Change*, vol. 76(6), 849-860.

- Klerkx, L., & Leeuwis, C. (2010). *Establishment and embedding of innovation brokers at different innovation system levels: Insights from the Dutch agricultural sector*. *Technological Forecasting and Social Change*, 77(6), 849-860.
- Klerkx, L., Jakku, E., & Labarthe, P. (2019). *A review of social science on digital agriculture, smart farming and agriculture 4.0: New contributions and a future research agenda*. *NJAS - Wageningen Journal of Life Sciences*, 90–91, 100315.
- Lampridi, M. G., Sørensen, C. G., & Bochtis, D. (2019). *A case-based economic assessment of robotics employment in precision arable farming*. *Agronomy*, 9(7), 318.
- Läßle, D., Renwick, A., & Thorne, F. (2017). *Measuring the impact of innovation adoption in agriculture using propensity score matching*. *Agricultural Economics*, 48(2), 187-194.
- Li, J., et al. (2019). *Digital Certification Systems for Agricultural Products: Expanding Market Opportunities*. *Journal of Agricultural Economics*, vol. 45(2), 112-125.
- Lioutas, E. D., Charatsari, C., & De Rosa, M. (2019). *Smart farming and short food supply chains: Are they compatible?* *Technological Forecasting and Social Change*, 144, 249-260.
- Lowenberg-DeBoer, J., & Erickson, B. (2019). *Setting the record straight on precision agriculture adoption*. *Agricultural Systems*, 177, 102-656.
- Matthews, A. (2013). *Greening agricultural payments in the EU's Common Agricultural Policy*. *Bio-based and Applied Economics*, 2(1), 1-27.
- Philip, L., Cottrill, C., Farrington, J., Williams, F., & Ashmore, F. (2021). *The digital divide: Patterns, policy, and scenarios for rural broadband in the UK*. *Journal of Rural Studies*, 82, 176–186.
- Pretty, J., & Bharucha, Z. P. (2014). *Sustainable intensification in agricultural systems*. *Annals of Botany*, vol. 114(8), 1571-1596.
- Pretty, J., Benton, T.G., Bharucha, Z.P., et al. (2018). *Global assessment of agricultural system redesign for sustainable intensification*. *Nature Sustainability*, vol. 1, 441-446.
- Qiu, Z., Jiang, S., Qi, L., et al. (2019). *Adoption of precision agricultural practices in China: patterns, determinants, and impacts on agricultural productivity and the environment*. *Journal of Cleaner Production*, vol. 235, 632-643.
- Rijswijk, K., Klerkx, L., & Turner, J. A. (2019). *Digitalisation of agricultural knowledge and innovation systems: A framework for analysis*. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 3, 36.
- Rijswijk, K., et al., (2021). *Digital transformation of agriculture and rural areas: A socio-cyber-physical system framework to support responsabilisation*. *Journal of Rural Studies*, 85, 79-90.
- Rogers, E. M. (2003). *Diffusion of Innovations* (5th ed.). Free Press.

- Rojas, R., Bruns, C., & Möller, K. (2016). *Computer vision applied to agriculture*. In J. Stafford (Ed.), *Precision Agriculture '15*. Wageningen: Wageningen Academic Publishers.
- Russo, M., Biagini, L., & Modica, G. (2020). *Digital Agriculture: Opportunities and Challenges for Sustainable Development*. *Sustainability*, 12(14), 5602.
- Schimmelpfennig, D. (2016). *Farm profits and adoption of precision agriculture*. Economic Research Report No. 217. Washington, DC: U.S. Department of Agriculture, Economic Research Service.
- Smith, A., et al. (2018). *The impact of drone technology on crop yield*. *Agricultural Engineering Journal*, vol. 25(2), 78-89.
- Swinnen, J., & Squicciarini, M. (2020). *Technology and the Future of Food and Agriculture*. *Journal of Food Systems*, vol. 12(1), 43-59.
- Van Evert, F. K., Fountas, S., Blackmore, S., & Sørensen, C. G. (2019). *Robotics and automation for crop production*. *Annual Review of Control, Robotics, and Autonomous Systems*, 2, 423-444.
- Venkatesh, V., Morris, M.G., Davis, G.B., & Davis, F.D. (2003). *User acceptance of information technology: Toward a unified view*. *MIS Quarterly*, 27(3), 425-478.
- Wang, L., et al. (2018). *Impact of Online Platforms on Agricultural Sales: A Case Study Analysis*. *Journal of Agricultural Economics*, vol. 42(3), 99-114.
- Wolfert, S., Ge, L., Verdouw, C., & Bogaardt, M. J. (2017). *Big data in smart farming: A review*. *Agricultural Systems*, vol. 153, 69-80.
- Yengoh, G. T., Ardö, J., & Chidumayo, E. N. (2018). *Agricultural intensification and its implications for rural livelihoods in Africa*. Cham: Springer.
- Zhang, Q., Song, H., & Wu, Y. (2020). *Big Data and AI in Agriculture: Future Directions*. *Agricultural Systems*, vol. 183, 102850.
- Zhou, Y., Yang, G., Li, C., & Yang, X. (2021). *Deep learning-based crop disease recognition: A review*. *Computers and Electronics in Agriculture*, 187, 106279.

Capitoli di volume:

- Klerkx, L., & Leeuwis, C. (2009). *Establishment and embedding of innovation brokers at different innovation system levels*. In: Klerkx, L., & Leeuwis, C. (eds.), *Technological Forecasting and Social Change*, Elsevier, Amsterdam, 849-860.
- Swinton, S. M., El Benni, N., & Walter, A. (2019). *Precision Agriculture for Sustainability and Environmental Protection*. In: Smith, P. (ed.), *Technological Innovations in Agriculture*, Springer Nature, New York, 305-327.

Libri:

- Esposti, R. (2007). *Regional Growth and Policies in the European Union*, Springer, Berlin.
- Gallo, P. (2021). *Innovazione e Sostenibilità in Agricoltura*, Franco Angeli, Milano.
- Hunt, E. D. (2019). *Digital Agriculture: Evolution and Advances*, Springer Nature, New York.
- Lowenberg-DeBoer, J., Erickson, B., & Penson, J. (2020). *The Digital Agriculture Transformation*, Oxford University Press, Oxford.
- OECD. (2020). *Agricultural Policy Monitoring and Evaluation*, OECD Publishing, Paris.
- Spadoni C., Valmori I. (2023). *Agricoltura digitale: Innovazioni e tecnologie per l'agricoltura sostenibile di oggi e di domani*. Patron Editore Bologna.

Fonti normative e rapporti:

- Agricolus. (2020). PAC: Il Modello AKIS, tra Ricerca e Innovazione. Disponibile su: <https://www.agricolus.com>
- Agronotizie. (2020). Tecnologia in agricoltura: differenze tra grandi e piccole aziende. Disponibile su: [https://www.agronotizie.it/agricoltura-economia/tecnologia-in-agricoltura-
quale-utilizzo-da-parte-delle-grandi-e-piccole-aziende/](https://www.agronotizie.it/agricoltura-economia/tecnologia-in-agricoltura-quale-utilizzo-da-parte-delle-grandi-e-piccole-aziende/)
- Bayerisches Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten. (2019). Landwirtschaftliche Förderung in Bayern. Disponibile su: <https://www.stmelf.bayern.de>
- BMEL – Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft. (2022). *Digitalpolitik in der Landwirtschaft – Status und Perspektiven*. Berlin: BMEL.
- CREA. (2023). AKIS (Agricultural Knowledge and Innovation System). Disponibile su: <https://www.crea.gov.it>
- Confagricoltura. (2021). *PNRR: Le proposte di Confagricoltura per il rilancio del settore agricolo*.
- Confagricoltura & Reale Mutua. (2024). *Rapporto Agricoltura 100: Analisi su rischi, innovazione e sostenibilità del settore agricolo italiano*
- European Commission. (2020). Digital Solutions for Improving Food Safety in the EU. Disponibile su: [https://ec.europa.eu/jrc/en/publication/eur-scientific-and-technical-research-
reports/digital-solutions-improving-food-safety-eu](https://ec.europa.eu/jrc/en/publication/eur-scientific-and-technical-research-reports/digital-solutions-improving-food-safety-eu)
- European Commission. (2020). *Farm to Fork Strategy*. Disponibile su: https://ec.europa.eu/info/strategy/farm-fork_en

- European Commission. (2021). Agricultural Knowledge and Innovation Systems (AKIS): Boosting Innovation and Knowledge Flows Across Europe. Disponibile su: <https://ec.europa.eu>
- European Commission. (2023). *Digital Transformation in Agriculture*. Publications Office of the European Union. <https://op.europa.eu/>
- European Commission. (2023). *The Digitalisation of Agriculture in the European Union*. Directorate-General for Agriculture and Rural Development.
- European Parliament. (2021). Precision Agriculture in Europe: Legal, Ethical and Societal Perspectives. European Parliamentary Research Service, Brussels.
- EUROSTAT. (2020). ICT Use in Agriculture. Disponibile su: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/ICT_use_in_agriculture
- FAO. (2019). *Digital Agriculture Transformation Framework*. Disponibile su: <https://www.fao.org/documents/card/en/c/cb3343en>
- FAO. (2020). Digital Agriculture: Opportunities and Challenges. Disponibile su: <https://www.fao.org>
- FAO. (2020). Digital Technologies for Food Safety and Traceability in Food Value Chains. Disponibile su: <https://www.fao.org/documents/card/en/c/cb3343en>
- FAO. (2020). *The State of Food Security and Nutrition in the World 2020*. Disponibile su: <http://www.fao.org/state-of-food-security-nutrition/en/>
- FAO. (2022). *The State of Food and Agriculture 2022: Leveraging automation in agriculture for enhanced productivity and sustainability*. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- FederUnacoma. (2021). *Rapporto di metà anno: mercato delle macchine agricole e tendenze dell'Agricoltura 4.0*
- FranceAgriMer. (2022). *Panorama des principales filières agricoles et agroalimentaires*. Montreuil: FranceAgriMer.
- FranceAgriMer. (2022). *L'agriculture de précision en France: Un état des lieux*. Montreuil: FranceAgriMer.
- Generalitat de Catalunya. (2020). Programa de Desenvolupament Rural 2014-2020. Disponibile su: <https://agricultura.gencat.cat/ca/departament>
- Governo Italiano – Presidenza del Consiglio dei Ministri. (2021). *Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza (PNRR)*. Disponibile su https://www.governo.it/sites/governo.it/files/PNRR_0.pdf

- IEA. (2020). *Impact of Autonomous Machinery on Agricultural Labor Costs: A Comparative Analysis*. Paris: International Energy Agency.
- Image Line. (2023). *Indagine sull'adozione delle tecnologie digitali in agricoltura 2023*. Faenza: Image Line Srl.
- Innovarurale. (2019). *Il Sistema della Conoscenza e dell'Innovazione in Italia (AKIS Italia)*. Disponibile su: <https://www.innovarurale.it>
- IoT Analytics. (2020). *State of the IoT 2020: 12 billion IoT connections, and counting*
- IRAA. (2020). *Digital Traceability Systems in Agriculture: Enhancing Consumer Confidence and Market Access*. New York: IRAA Publishing.
- ISTAT. (2021). *Indagine sull'uso delle tecnologie dell'informazione e della comunicazione (ICT) nelle imprese agricole italiane*. Disponibile su: <https://www.istat.it/it/archivio/261912>
- ISTAT. (2023). *Rapporto Annuale sull'Agricoltura*. Recuperato da <https://www.istat.it>
- Landwirtschaftskammer Burgenland. (2021). *Jahresbericht 2021*. Eisenstadt: Landwirtschaftskammer Burgenland.
- MarketsandMarkets. (2023). *Precision Farming Market by Technology, Offering, Application and Region – Global Forecast to 2027*
- MarketsandMarkets. (2023). *Digital Agriculture Market by Application, Component, and Region – Global Forecast to 2028*.
- Ministero dell'Economia e delle Finanze. (2021). *Documento di Economia e Finanza 2021*. Roma: MEF.
- Ministero delle Politiche Agricole Alimentari e Forestali – MIPAAF. (2020). *Piano Nazionale Agricoltura 4.0: Misure per la digitalizzazione del settore agricolo*
- Ministero delle Politiche Agricole, Alimentari e Forestali. (2021). *Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza (PNRR) - Misura 4.1*. Disponibile su: <https://www.politicheagricole.it/flex/cm/pages/ServeBLOB.php/L/IT/IDPagina/14427>
- Ministère de l'Agriculture, de l'Agroalimentaire et de la Forêt. (2015). *Agriculture – Innovation 2025: Rapport au Ministre de l'Agriculture*. Paris: Gouvernement français. Disponibile su <https://agriculture.gouv.fr/sites/minagri/files/rapport-agriculture-innovation2025.pdf>
- Ministerie van Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit. (2021). *Visie landbouw, natuur en voedsel: Waardevol en verbonden*. Den Haag: Ministerie van LNV. Disponibile su <https://www.rijksoverheid.nl/documenten/rapporten/2021/06/10/visie-landbouw-natuur-en-voedsel-waardevol-en-verbonden>

- OECD. (2019). *Agricultural Policies in OECD Countries: At a Glance 2019*. Disponibile su: https://www.oecd-ilibrary.org/agriculture-and-food/agricultural-policies-in-oecd-countries-at-a-glance-2019_2c9d47d4-en
- OECD. (2019). *Digital Opportunities for Better Agricultural Policies*. Organisation for Economic Co-operation and Development.
- OECD. (2020). *The Digitalisation of Agriculture and Food: Implications for Future Productivity, Growth and Employment*. Disponibile su: https://www.oecd-ilibrary.org/agriculture-and-food/the-digitalisation-of-agriculture-and-food_2c9d47d4-en
- OCSE. (2020). *Rural 3.0: A Framework for Rural Development*. Disponibile su: <https://www.oecd.org/cfe/regional-policy/Rural-3-0-A-Framework-for-Rural-Development.pdf>
- OMS. (2019). *Digitalization in Food Safety: A Joint FAO/WHO Meeting Report*. Disponibile su: <https://www.who.int/publications/i/item/9789241515905>
- Osservatorio Smart Agrifood – Politecnico di Milano e Università degli Studi di Brescia. (2023). *Rapporto Smart Agrifood 2023*. Milano: Osservatori Digital Innovation, School of Management, Politecnico di Milano.
- Rapporto AGRicoltura100, Edizione 2024
- Regione Emilia-Romagna. (2020). *Programma di Sviluppo Rurale 2014-2020*. Disponibile su: <https://agricoltura.regione.emilia-romagna.it>
- Regione Toscana. (2021). *Piano di Sviluppo Rurale 2014-2020*. Disponibile su: <https://www.regione.toscana.it>
- Regione Puglia. (2020). *Programma di Sviluppo Rurale 2014–2020*. Disponibile su <https://psr.regione.puglia.it>
- Regione Siciliana. (2021). *Programma di Sviluppo Rurale 2014–2020*. Disponibile su <https://www.prsicilia.it>
- Regione Valle d’Aosta. (2023). *AKIS - Sistema di Conoscenza e Innovazione in Agricoltura*. Disponibile su: <https://www.regione.vda.it>
- Regolamento (UE) n. 1305/2013 del Parlamento Europeo e del Consiglio del 17 dicembre 2013 relativo al sostegno allo sviluppo rurale da parte del Fondo europeo agricolo per lo sviluppo rurale (FEASR). Disponibile su: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/?uri=CELEX%3A32013R1305>
- Veneto Agricoltura. (2021). *Politiche e Azioni Europee per l’Innovazione: Il Ruolo dell’AKIS*. Disponibile su: <https://www.venetoagricoltura.org>

- WEF. (2019). *Digital Transformation Initiative: Agriculture and Food Systems*. Geneva: World Economic Forum.
- World Bank. (2012). *Agricultural Innovation Systems: An Investment Sourcebook*. The World Bank.
- World Bank. (2017). *Agriculture in Africa: Telling Myths from Facts*. Washington DC: World Bank.
- World Bank. (2021). *Harvesting Prosperity: Technology and Productivity Growth in Agriculture*. Washington, DC: World Bank.