Leveraging Artificial Intelligence to Manage a Sustainable Transition In Viticulture "STIV"

MODULO 2: Transizione digitale nella viticoltura

La viticoltura di precisione rappresenta una rivoluzione nella gestione dei vigneti, combinando tecnologia avanzata, analisi dei dati e conoscenze agronomiche per adattarsi alle sfide climatiche, ambientali e qualitative del settore vitivinicolo. In questo modulo esploreremo i suoi fondamenti, gli strumenti chiave e le applicazioni pratiche per una produzione più efficiente e sostenibile.

Avviso legale

Finanziato dall'Unione europea. Le opinioni espresse appartengono, tuttavia, al solo o ai soli autori e non riflettono necessariamente le opinioni dell'Unione europea o dell'Agenzia esecutiva europea per l'istruzione e la cultura (EACEA). Né l'Unione europea né l'EACEA possono esserne ritenute responsabili.

20/02/2026

The STIV consortium

université de BORDEAUX

CROPT

FONDAZIONE COMUNITARIA DI AGRIGENTO E TRAPANI

ESCUELA DE VITICULTURA Y ENOLOGÍA FÉLIX JIMÉNEZ DE REQUENA

LaUNIÓ Llauradora i Ramadera

Erasmus+
Arricchisce la vita, apre la mente.

Co-funded by the European Union

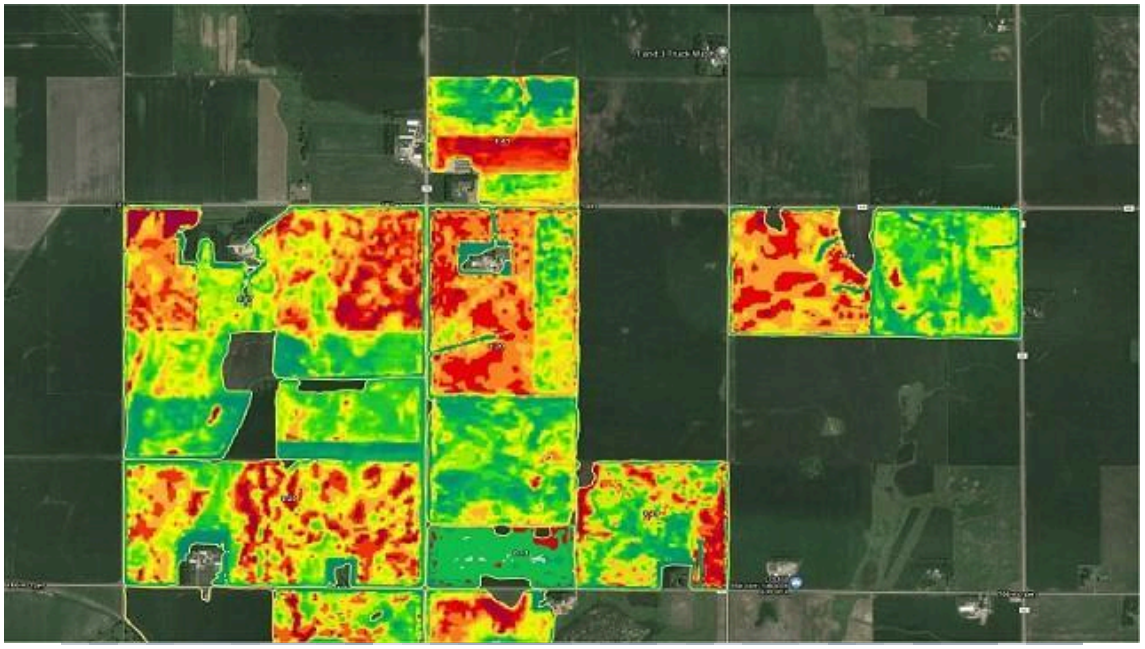
Contenuto

1. Introduzione alla viticoltura di precisione.....2
2. Fondamenti della visualizzazione digitale dei vigneti.....6
3. Tecnologie di monitoraggio intelligente nel vigneto.....9
4. Modellazione predittiva e gestione avanzata dei dati..... 15
5. Sistemi di supporto decisionale (DSS) nella viticoltura di precisione..... 30
6. Sfide e opportunità della digitalizzazione nella viticoltura.....41
7. Valutazione strategica dell'adozione delle tecnologie.....47
Bibliografia..... 56
ALLEGATO I – Domande di verifica..... 60
ALLEGATO II – Attività didattica: "Scegliere le tecnologie giuste per due aziende vinicole con problemi simili".....62

1. Introduzione alla viticoltura di precisione

La viticoltura di precisione è diventata una delle strategie più efficaci per affrontare le sfide attuali del settore vitivinicolo, tra cui: i cambiamenti climatici; la pressione sulle risorse naturali; la necessità di migliorare la qualità dei prodotti vitivinicoli e i requisiti di tracciabilità richiesti dai consumatori. La viticoltura di precisione si basa sull'osservazione sistematica, la misurazione continua e l'intervento su scala locale sul campo, che consente la gestione personalizzata della produzione in base alle peculiarità fisiche, biologiche e climatiche di ciascuna sottozona.

L'idea principale alla base della viticoltura di precisione è quella di riuscire a identificare e gestire la **variabilità spaziale e intra-parcellare del vigneto**. Fin dagli anni '80, studi pionieristici condotti da Smart (1985) e Bramley (2003) hanno dimostrato che, all'interno dello stesso appezzamento viticolo, esistono differenze marcate e tangibili in termini di vigore, contenuto di umidità e consistenza del suolo, esposizione al sole e pendenza, che comportano disparità in termini di resa e qualità dell'uva. Ignorare questa eterogeneità porta a una gestione agronomica inefficiente e non sostenibile dal punto di vista ambientale.



La gestione di precisione della viticoltura si basa su una serie di tecnologie che agiscono in modo interconnesso:

- **I sensori da campo**, che misurano l'umidità del suolo, la temperatura dell'aria, la pressione del vapore o la radiazione solare, possono essere installati a varie profondità e in vari punti all'interno della chioma delle piante per ottenere dati accurati e rappresentativi.



Figura 2. Sensore da campo. *Fonte: AGROTECH*

- **Il telerilevamento tramite satelliti e droni** misura indici quali NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), SAVI o NDRE, tutti e tre utilizzati per stimare il vigore vegetativo, lo stato nutrizionale o il potenziale fotosintetico della pianta.

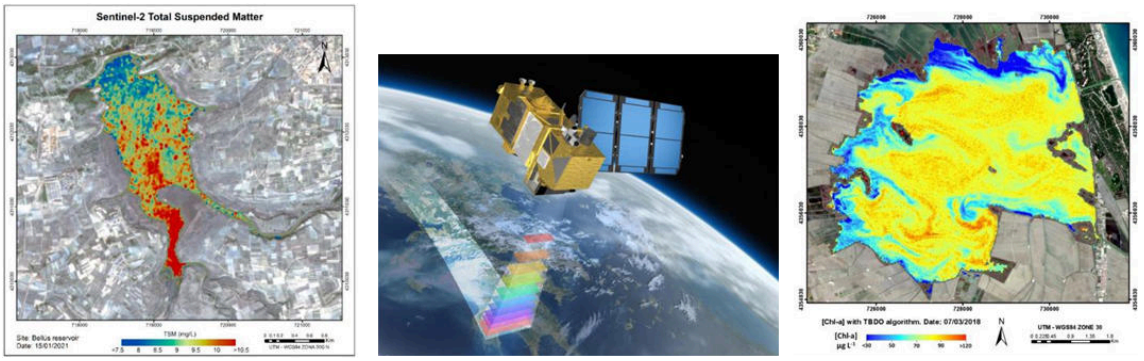


Figura 3. Telerilevamento via satellite per lo studio della qualità dell'acqua. *Fonte: gvSIG*

- **I sistemi informativi geografici (GIS),** che integrano dati spaziali e temporali per generare mappe di zonizzazione e prescrizioni agronomiche con risoluzioni che possono variare da 30 metri (Sentinel-2)

a 2-5 cm (UAV). **La zonizzazione** classifica i diversi terreni del vigneto per applicare una gestione adeguata a ciascun tipo di terreno. **La prescrizione** consiste nell'adattare la gestione della fertilizzazione e della protezione alle caratteristiche del vigneto sul campo.

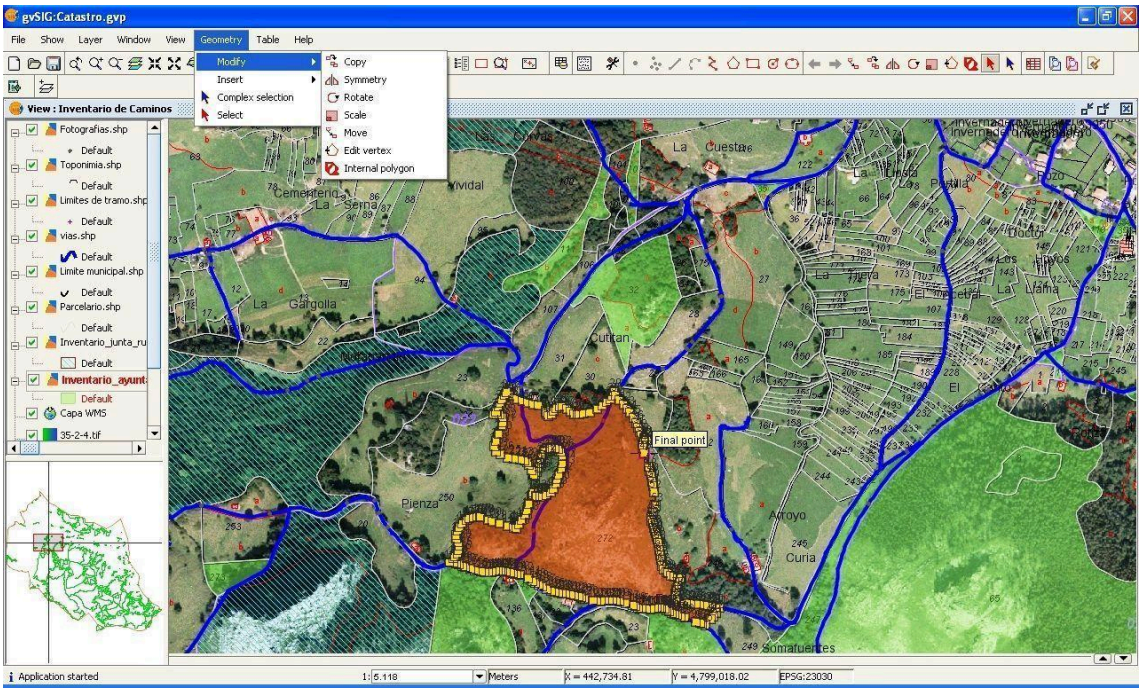


Figura 4. Suddivisione in zone di un terreno utilizzando il GIS. Fonte: Environmental Method

- **I modelli predittivi e gli algoritmi di intelligenza artificiale**, come le reti neurali, le macchine a supporto vettoriale (SVM) e la regressione random forest, trasformano i dati in informazioni e raccomandazioni utilizzabili. Le loro applicazioni spaziano dalla previsione della resa e della qualità dell'uva al rilevamento delle malattie e alle esigenze di irrigazione.

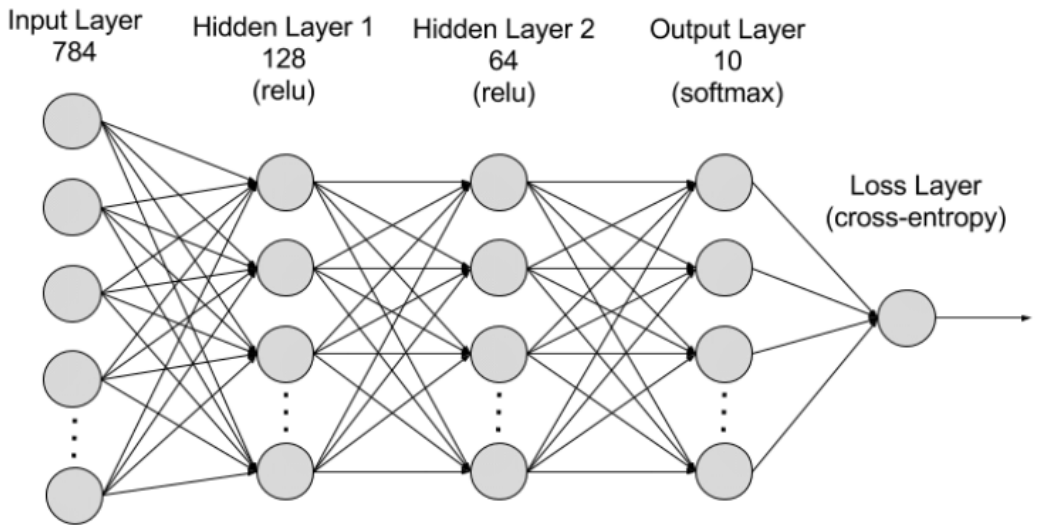


Figura 5. Funzionamento di una rete neurale artificiale. Fonte: AWS

- **Le piattaforme digitali di supporto decisionale** offrono pannelli interattivi, avvisi, registrazioni georeferenziate e connettività in tempo reale con macchinari e dispositivi IoT, consentendo la gestione remota del vigneto.

Grazie a questi strumenti, il viticoltore può identificare zone di gestione specifiche (SMA) all'interno del vigneto e applicare trattamenti differenziati, come l'irrigazione, la fertilizzazione, il controllo fitosanitario o la vendemmia selettiva, ottimizzando l'uso delle risorse e migliorando la qualità enologica. Ad esempio, in regioni come la Napa Valley (USA) o la Valle del Maipo (Cile), i sensori di umidità del suolo e le mappe NDVI sono stati utilizzati per stabilire linee di irrigazione settoriali, con un risparmio fino al 40% nel consumo di acqua senza ridurre la produttività.

Dal suo sviluppo iniziale con il GPS differenziale negli anni '90, la viticoltura di precisione si è evoluta verso sistemi più sofisticati, accessibili e adattabili. Il progresso della tecnologia digitale ha reso possibile la democratizzazione del suo utilizzo: oggi esistono sensori a basso costo, droni accessibili, software open source e piattaforme cloud che ne consentono l'adozione anche nelle aziende agricole di medie e piccole dimensioni. Progetti come VineScout (Spagna), GrapeLook (Sudafrica) o Vintel (Francia) hanno dimostrato l'efficacia di questi strumenti in varie condizioni pedoclimatiche (Baluja et al., 2012; Matese & Di Gennaro, 2015).

Inoltre, la viticoltura di precisione promuove anche la sostenibilità ambientale riducendo l'uso di prodotti fitosanitari, minimizzando l'impronta idrica e favorendo la biodiversità. La sua integrazione con pratiche agricole rigenerative, viticoltura biologica e certificazioni come HVE (Haute Valeur Environnementale), rafforza il suo ruolo di strumento chiave nella transizione ecologica del settore.

Per tutti questi motivi, la viticoltura di precisione si presenta come uno strumento fondamentale per promuovere una viticoltura più intelligente, resiliente e sostenibile. Non sostituisce le conoscenze del viticoltore, ma le arricchisce fornendo una base oggettiva e aggiornata per il processo decisionale. Nel quadro della transizione digitale del settore agricolo europeo, questa disciplina si afferma come una delle chiavi per raggiungere gli obiettivi del Green Deal, della strategia "Farm to Fork" e della digitalizzazione dell'ambiente rurale.

2. Fondamenti della visualizzazione digitale dei vigneti

Una delle grandi sfide che la viticoltura di precisione deve affrontare non si limita alla raccolta dei dati, ma comprende anche la loro analisi e interpretazione. Man mano che le aziende vinicole incorporano sensori, stazioni meteorologiche, immagini satellitari e dati storici, viene prodotta una quantità sempre maggiore di informazioni che devono essere elaborate e trasformate in conoscenze utili. In questo senso, gli strumenti di visualizzazione dei dati e i modelli predittivi sono fondamentali per prendere decisioni informate, soprattutto se integrati in flussi di lavoro digitali che vanno dalla raccolta dei dati ad azioni agronomiche specifiche.

Visualizzazione dei dati nella viticoltura

La visualizzazione dei dati è un modo per mostrare in modo grafico e chiaro le informazioni quantitative raccolte nel vigneto. Grazie all'uso di mappe tematiche, grafici interattivi, modelli 3D e dashboard, diventa più facile comprendere fenomeni complessi come la variabilità spaziale, l'evoluzione delle stagioni, le condizioni microclimatiche, la densità dei germogli o l'indice di area fogliare. In altre parole, trasforma grandi quantità di dati tecnici in conoscenze visive comprensibili da tecnici, agricoltori e viticoltori, senza la necessità di una formazione avanzata nell'analisi dei dati.

I sistemi informativi geografici (GIS) sono strumenti fondamentali per la visualizzazione dei dati spaziali. Attraverso mappe relative a vigore (NDVI), umidità del suolo, resa, incidenza di malattie o stress termico, i viticoltori possono individuare modelli e aree critiche all'interno dei propri appezzamenti.

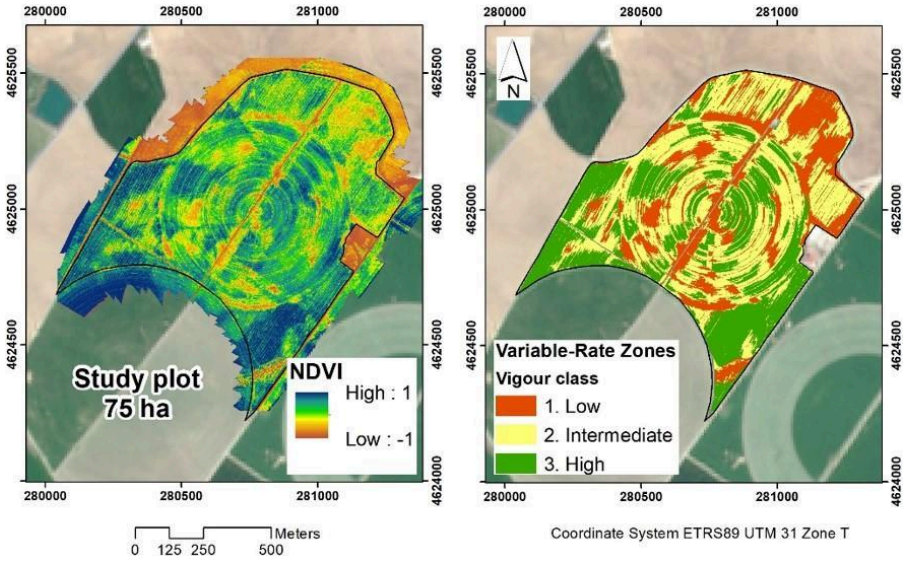


*Figura SEQ Figura * ARABIC 6. A sinistra: NDVI derivato dall'imaging multispettrale acquisito nel marzo 2019 per valutare lo stato di sviluppo dell'orzo al fine di determinare la fertilizzazione del pacciame con dosi variabili. A destra: zone di fertilizzazione variabile. Fonte: Jensen et al. (2011)*

In pratica, sono state sviluppate applicazioni specifiche come VineView, che facilita il monitoraggio visivo continuo del vigneto con strumenti di zonizzazione automatica, o soluzioni come Cropio e AgriWebb, che integrano i dati provenienti da sensori, macchinari e condizioni meteorologiche per creare modelli digitali in tempo reale. A livello europeo, iniziative come FutureFarm e SmartAgriHubs hanno dato un contributo importante allo sviluppo di piattaforme interoperabili per la visualizzazione agronomica.

Inoltre, strumenti di business intelligence come Power BI, Tableau o Qlik Sense consentono di integrare dati provenienti da varie fonti, quali sensori, condizioni meteorologiche e analisi del suolo, e di presentarli in dashboard personalizzabili. Queste dashboard possono essere configurate per inviare avvisi automatici, generare report periodici o simulare diversi scenari di gestione agronomica. Oggi esistono diverse piattaforme commerciali dedicate al settore vitivinicolo, come VineSignal, Farm360 o Datagrapes, che offrono soluzioni specifiche per il settore vitivinicolo, tra cui funzioni di geolocalizzazione, gestione dei lotti, confronto temporale e visualizzazione storica.

La visualizzazione non solo migliora il processo decisionale, ma facilita anche la comunicazione tra tecnici, enologi, operatori sul campo e manager, consentendo una gestione più coordinata e informata. Infatti, in molte cantine moderne, i pannelli di visualizzazione sono integrati nei centri di controllo delle operazioni e vengono aggiornati in tempo reale grazie alla sincronizzazione con stazioni meteorologiche, sensori sul campo e macchinari collegati.

Modellizzazione predittiva e analisi avanzata

La modellizzazione predittiva si basa sull'uso di algoritmi statistici e tecniche di intelligenza artificiale per prevedere il comportamento futuro del vigneto, tenendo conto di varie variabili osservate. Questa metodologia ci consente di passare da una gestione reattiva a una più proattiva, anticipando i rischi e ottimizzando l'uso delle risorse. In un ambiente in continua evoluzione e influenzato dai cambiamenti climatici, la capacità di prevedere diversi scenari e agire in anticipo diventa un vantaggio strategico inestimabile.

Esistono diversi tipi di modelli utilizzati nella viticoltura, ciascuno con un obiettivo e uno scopo specifici:

1. **Modelli fenologici**: prevedono quando si verificano le fasi critiche dello sviluppo della vite, come il germogliamento, la fioritura, l'invaiatura e la maturazione. Questi modelli si basano su variabili climatiche quali la temperatura cumulativa (gradi-giorno), la fotoperiodicità e l'umidità relativa. Strumenti come Phenoclim, VitiMeteo e STICS sono in grado di simulare lo sviluppo fenologico con grande precisione, il che aiuta a pianificare in modo più efficiente le attività in campo e le operazioni in cantina.

2. **Modelli fitosanitari**: anticipano la comparsa di malattie fungine, come la peronospora (Plasmopara viticola), l'oidio (Uncinula necator) e la botrite (Botrytis cinerea). Questi modelli si basano su parametri quali la temperatura, l'umidità fogliare e la quantità di precipitazioni. Alcuni dei modelli più comunemente utilizzati sono quello di Goidanich per l'oidio e quello di Broome per la botrite. Esistono inoltre modelli più complessi che includono variabili microclimatiche della chioma, interazioni pianta-patogeno e parametri di sensibilità a seconda della varietà.
3. **Modelli idrici**: questi modelli sono responsabili del calcolo del bilancio idrico nel suolo e del potenziale stress idrico che la pianta può subire, utilizzando sensori di umidità, dati meteorologici e caratteristiche del suolo. Grazie a questi modelli è possibile programmare l'irrigazione con precisione, evitando sia il deficit che l'eccesso d'acqua. La combinazione dei dati provenienti dai sensori e dai modelli come AquaCrop o Hydrus è stata convalidata nelle regioni viticole del Mediterraneo, come il sud della Francia, la Castiglia-La Mancia o la Sardegna, e ha dato risultati molto positivi, riducendo il consumo d'acqua senza influire sulla resa.
4. **Modelli di resa e qualità**: sono dedicati alla stima della produzione prevista (kg/ha) e dei parametri enologici quali il contenuto zuccherino, l'acidità o gli antociani. Vengono utilizzate tecniche di apprendimento automatico, quali regressione lineare, alberi decisionali, reti neurali artificiali (ANN) e metodi di assemblaggio come la foresta casuale, che vengono addestrati con dati storici e variabili in tempo reale. In recenti studi condotti nei vigneti della Rioja e del Priorat, i modelli di foresta casuale hanno mostrato un errore di previsione inferiore al 10% nella resa e una correlazione superiore a 0,85 con la qualità prevista dell'uva.
5. **Gemelli digitali**: rappresentano digitalmente un vigneto reale, integrando tutti i livelli di informazione in una simulazione virtuale che consente di valutare scenari futuri e pianificare interventi. Questi sistemi combinano modellazione 3D, dinamiche di sistema e sensori connessi per rappresentare lo stato del vigneto in tempo reale. Progetti europei come SmartVitiNet, VINIoT o DIGIWINE stanno guidando questa transizione verso una gestione basata sui dati gemelli, con applicazioni nella pianificazione, tracciabilità e simulazione di strategie agronomiche.
6. **Modelli socioeconomici integrati**: in un'ottica più recente, alcuni progetti stanno sviluppando modelli che integrano fattori agronomici con variabili economiche, sociali e di mercato, rendendo possibile prevedere l'impatto economico di diverse pratiche di gestione o scenari climatici. Questi strumenti sono fondamentali per le politiche pubbliche, le cooperative e le grandi aziende vinicole che gestiscono catene di approvvigionamento complesse.

Sfide e prospettive future

Nonostante i progressi compiuti, l'efficace implementazione di questi strumenti richiede il superamento di diverse sfide:

- La qualità, l'omogeneità e la standardizzazione dei dati sono fondamentali per ottenere modelli affidabili.
- È necessaria una formazione tecnica e agronomica avanzata per interpretare correttamente i risultati ed evitare errori nel processo decisionale.
- L'interoperabilità tra piattaforme digitali e dispositivi di diversi produttori rimane un limite tecnico e commerciale.
- L'investimento iniziale può essere elevato, soprattutto nelle piccole aziende agricole, anche se i benefici si manifestano nel medio e lungo termine..

In futuro, si prevede una maggiore integrazione tra le piattaforme, la comparsa di assistenti digitali agricoli (AgBots) e l'uso massiccio dell'intelligenza artificiale generativa per simulare comportamenti agronomici. Allo stesso modo, aumenterà l'uso di sensori non invasivi, algoritmi autoregolanti e tecnologie blockchain per garantire la tracciabilità e l'integrità delle informazioni generate, contribuendo a rafforzare la trasparenza nella catena del valore del vino.

3. Tecnologie di monitoraggio intelligente nel vigneto

Il monitoraggio intelligente in viticoltura è il sistema sensoriale digitale del vigneto: una rete integrata di dispositivi e tecnologie che acquisiscono informazioni accurate e costanti sullo stato del suolo, della pianta e dell'ambiente. Questo monitoraggio scalabile e automatizzato consente di anticipare eventi avversi, ottimizzare le risorse e prendere decisioni informate. I componenti principali di questa rete sensoriale sono descritti in dettaglio di seguito, con esempi di applicazioni reali e riferimenti che ne dimostrano l'utilità.

3.1 Reti di sensori wireless sul terreno

Le reti di sensori wireless (WSN) applicate al suolo rappresentano un'innovazione fondamentale nella viticoltura di precisione. Queste reti si basano sull'installazione di nodi intelligenti distribuiti strategicamente nel vigneto e collegati tramite tecnologie a basso consumo energetico come LoRaWAN o Zigbee. I nodi sono in grado di misurare parametri chiave quali l'umidità del suolo, la temperatura, la conduttività elettrica o il pH, trasmettendo queste informazioni in tempo reale a una stazione base, al cloud e infine a piattaforme digitali per l'analisi e l'interpretazione.

L'uso di queste reti ha dimostrato vantaggi tangibili. Ad esempio, i sistemi implementati nelle regioni viticole come La Rioja hanno permesso di ridurre il

consumo di acqua grazie a un'irrigazione più adeguata alle condizioni meteorologiche e del suolo. Allo stesso modo, in alcune zone della Francia, reti simili sono state utilizzate per rilevare le condizioni di gelo e attivare allarmi preventivi, migliorando la capacità di risposta dei viticoltori senza la necessità di una presenza fisica costante sul campo.

I suoi principali vantaggi includono bassi costi operativi, autonomia energetica (fino a diverse stagioni senza necessità di manutenzione) e adattabilità a diverse configurazioni del terreno. Tuttavia, richiedono un'attenta pianificazione per la loro installazione, nonché una calibrazione periodica e la verifica della copertura wireless, soprattutto nei vigneti con orografia complessa o di grande estensione.

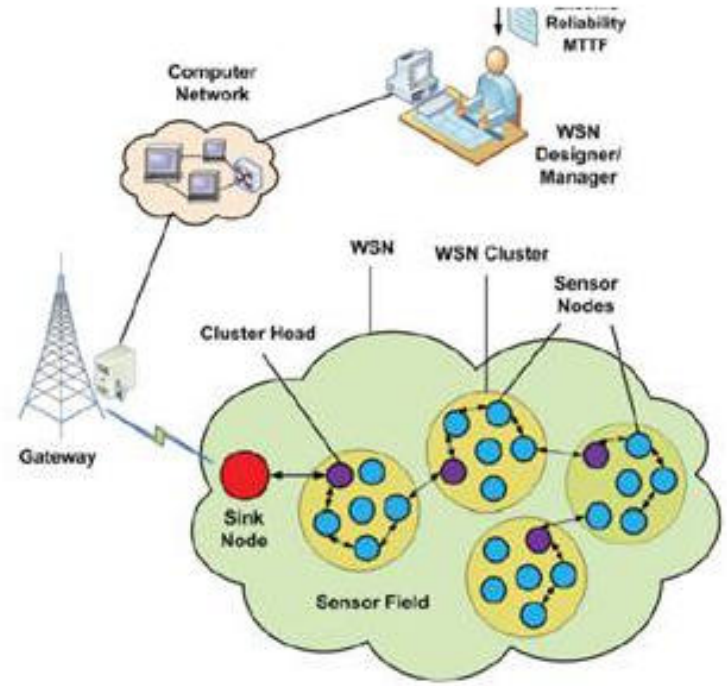


Figura 7. Architettura della rete di sensori wireless. Fonte: Bolivar et al.

3.2 Telerilevamento con droni e satelliti

Il telerilevamento aereo ha trasformato la gestione dei vigneti consentendo una mappatura accurata, frequente e scalabile. I satelliti offrono una copertura regolare, giornaliera o settimanale, utile per il monitoraggio su larga scala, mentre i droni (UAS) consentono voli su richiesta, acquisendo immagini ad alta risoluzione spaziale (2-5 cm), fondamentali per le decisioni relative ai terreni.

Utilizzando telecamere multispettrali, che combinano spettri visibili, nel vicino infrarosso e termici, e dispositivi iperspettrali più avanzati, è possibile

calcolare una serie di indici di vegetazione quali NDVI, NDRE, SAVI o GI. Questi indicatori consentono di valutare il vigore delle piante, rilevare lo stress idrico, determinare lo stato fenologico e rivelare carenze nutrizionali non visibili all'occhio umano.

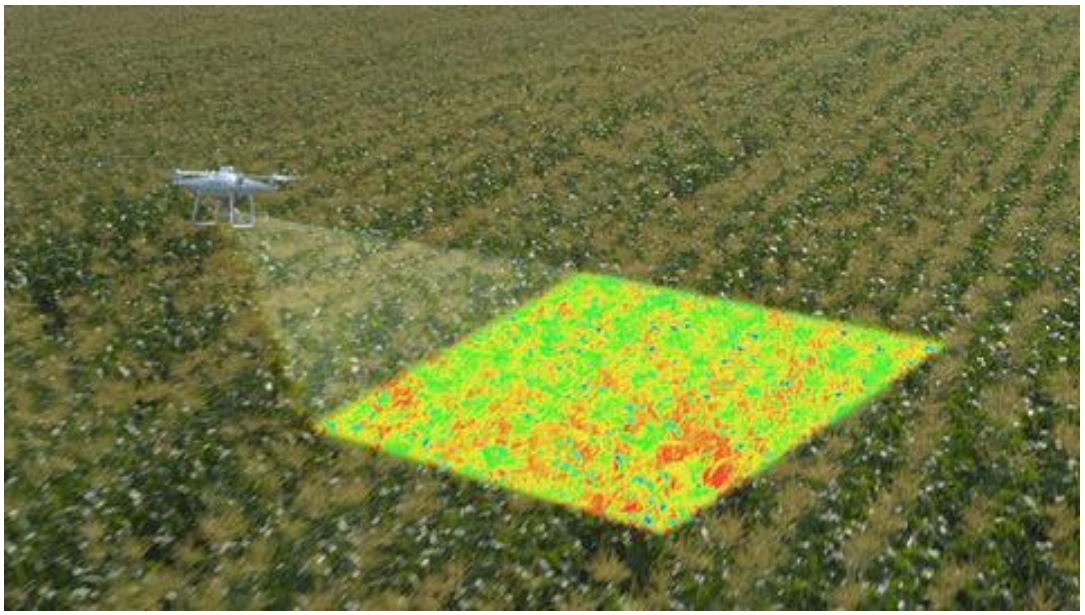


Figura 8. Telerilevamento tramite drone. Fonte: Cielito Drone Enterprise

Alcuni casi d'uso hanno dimostrato il loro impatto agronomico. Nelle aziende viticole, la combinazione di immagini termiche e multispettrali ha permesso di anticipare con diversi giorni di anticipo malattie come la botrite o eventi di stress idrico. È stato inoltre documentato come l'integrazione settimanale delle mappe nelle piattaforme GIS abbia facilitato decisioni più tempestive in merito alla vendemmia, contribuendo a una maggiore omogeneità nella qualità finale del vino.

Più recentemente, l'uso dell'intelligenza artificiale insieme a questi dati spettrali consente il rilevamento precoce di parassiti, muffe o oidio prima che si manifestino visivamente. Algoritmi basati su reti neurali elaborano bande specifiche dello spettro per generare mappe di rischio georeferenziate che guidano gli interventi.

3.3 Reti meteorologiche ad alta risoluzione

Oltre al monitoraggio diretto del suolo e delle piante, le reti meteorologiche svolgono un ruolo fondamentale nel processo decisionale agronomico. Le stazioni autonome, dotate di sensori per la temperatura,

l'umidità relativa, la radiazione solare, la pressione atmosferica, le precipitazioni e la velocità del vento, consentono una comprensione dinamica dell'ambiente microclimatico del vigneto.

Questi sistemi consentono di applicare modelli predittivi per anticipare i rischi fitosanitari, come quelli associati alla muffa o alla botrite, rilevando automaticamente condizioni di rischio specifiche. Queste informazioni consentono al viticoltore di adattare la frequenza e la tempistica dei trattamenti fitosanitari, evitando applicazioni non necessarie e ottenendo, in esperienze reali, riduzioni fino al 30% nell'uso di fungicidi.



Figura 9. Stazione meteorologica per la coltivazione. *Fonte: Meteosierra*

Inoltre, le stagioni climatiche consentono di prevedere eventi estremi come gelate primaverili o episodi di stress termico. La sua integrazione con piattaforme automatizzate ha dimostrato di ridurre le perdite di produzione di oltre il 40% grazie all'attivazione tempestiva di sistemi antigelo come irrigatori o riscaldatori.

Quando integrate con sensori del suolo e delle piante, queste stazioni completano il ciclo di sensorizzazione del vigneto, fornendo una visione olistica, multiscalare e predittiva che migliora la resilienza e la sostenibilità della gestione viticola.

3.4 Sensori fogliari e della linfa

Nella viticoltura di precisione, comprendere il comportamento del suolo non è sufficiente: è fondamentale conoscere come la pianta risponde fisiologicamente alle condizioni dell'ambiente. A tal fine, vengono utilizzati sensori specializzati per rilevare in tempo reale gli indicatori di stress e il consumo idrico della vite.

I sensori fogliari, progettati per misurare la pressione turgorale delle foglie, consentono di rilevare l'insorgere dello stress idrico prima che si manifesti nel suolo. Questo tipo di monitoraggio permette di anticipare l'irrigazione, adeguando le decisioni alla fisiologia delle piante e non solo ai parametri edafici o climatici. Questi dispositivi si sono rivelati particolarmente utili durante le ondate di calore o le siccità prolungate.

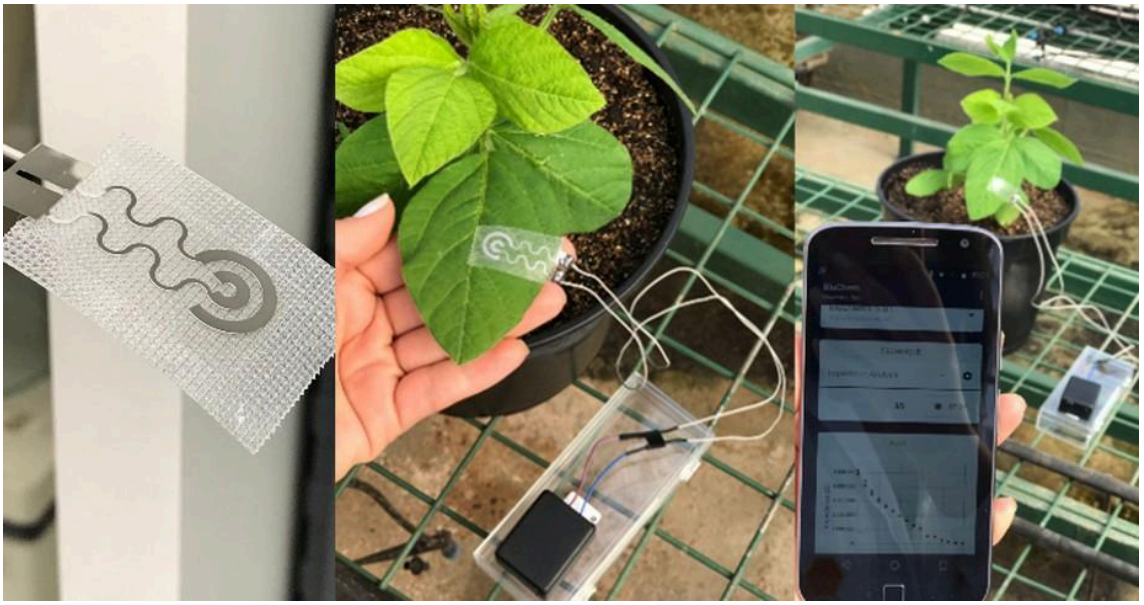


Figura 10. Sensore fogliare per il rilevamento della perdita d'acqua. Fonte: Um Só Planeta

D'altra parte, i sensori di flusso della linfa quantificano il flusso d'acqua trasportato dalle radici alla chioma. Questi dati riflettono il consumo idrico reale della pianta e consentono di ottimizzare la gestione dell'irrigazione in base alla sua effettiva domanda. In esperimenti con cultivar di Chardonnay e Cabernet Sauvignon, il suo utilizzo ha permesso di ridurre il consumo idrico senza compromettere la maturazione, migliorando l'omogeneità dell'acidità e la concentrazione fenolica del mosto.

Entrambe le tecnologie consentono di passare da una gestione dell'irrigazione basata su un calendario o su sensori del suolo a una strategia incentrata sulla risposta reale e dinamica della pianta, aumentando l'efficienza idrica e la qualità enologica.

3.5 Piattaforme integrative e IoT agricolo

La vera utilità delle tecnologie digitali nella viticoltura emerge quando queste vengono integrate in un'architettura coerente che consente di trasformare dati dispersi in decisioni agronomiche precise e automatizzate.

Le piattaforme avanzate combinano le informazioni provenienti dai sensori di umidità del suolo, dalle stazioni meteorologiche, dai droni e dai satelliti in un'unica interfaccia. Questa integrazione consente di visualizzare mappe dinamiche dello stress idrico (CWSI), del vigore vegetativo, dello stato di salute e della distribuzione dei parassiti. Sulla base di algoritmi personalizzati, il sistema propone azioni di gestione quali l'irrigazione settoriale, le applicazioni fitosanitarie o gli allarmi preventivi. Inoltre, può essere integrato con sistemi di irrigazione automatizzati tramite valvole intelligenti, che vengono attivate in base a soglie definite.

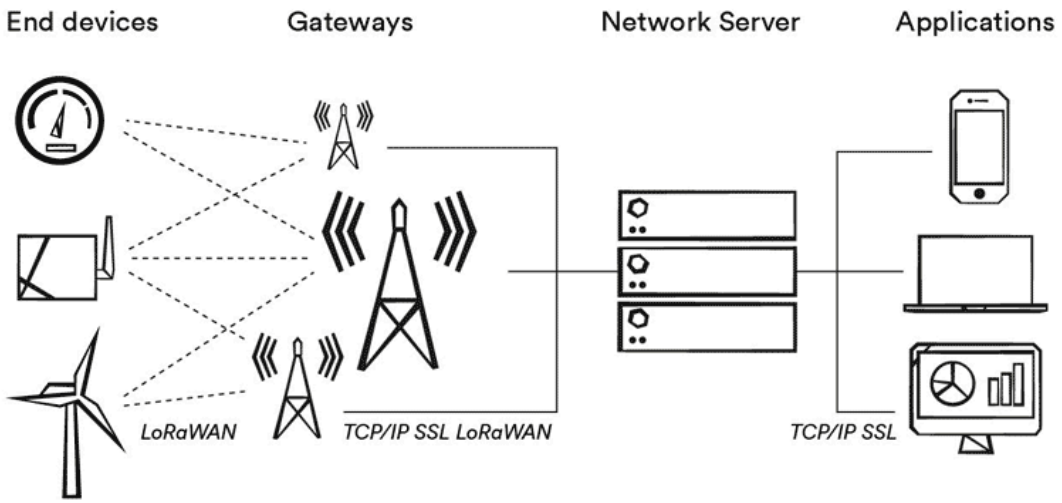


Figura 11. Sistema LoRaWan. Fonte: Actility

Nelle aree con limitazioni di connettività, le reti di comunicazione a lungo raggio e bassa potenza (LoRaWAN) hanno dimostrato la loro capacità di mantenere le stazioni di monitoraggio in funzione in modo autonomo per più di un anno, trasmettendo dati a intervalli regolari senza la necessità di infrastrutture elettriche esterne.

La tendenza attuale è quella di piattaforme collaborative e aperte, dove diversi attori del settore condividono informazioni per il benchmarking, il monitoraggio territoriale o la ricerca applicata. Questa sinergia non solo

aumenta l'efficienza individuale, ma genera anche intelligenza collettiva per il processo decisionale su scala regionale.

4. Modellazione predittiva e gestione avanzata dei dati

La trasformazione dei dati agronomici in informazioni utili è al centro del vigneto digitale. Grazie a sistemi di visualizzazione avanzati e modelli predittivi, i viticoltori possono anticipare le tendenze, valutare i rischi, pianificare le attività e migliorare i risultati qualitativi ed economici di ogni campagna. Questa sezione descrive in dettaglio come funzionano questi strumenti, quali tecnologie incorporano, quali risultati offrono e come vengono applicati nella pratica.

4.1 Sistemi informativi geografici (GIS) e mappe interattive

I sistemi informativi geografici (GIS) sono uno strumento fondamentale per la viticoltura di precisione, poiché consentono di integrare e analizzare più livelli di informazioni spaziali. Questi livelli includono l'altimetria, le mappe di vigore derivate dagli indici di vegetazione (come l'NDVI), la mappatura del suolo, il clima locale e la resa storica dei terreni. Con questi dati è possibile generare mappe di prescrizione che delimitano le Zone di Gestione Specifiche (SMA), guidando decisioni differenziate in materia di irrigazione, fertilizzazione, controllo dei parassiti o raccolta selettiva.

In Europa esistono diversi esempi di applicazione. In Spagna, piattaforme come SIGPAC e il Geoportale dell'Istituto Geografico Nazionale consentono ai viticoltori e ai tecnici di accedere alle informazioni relative alle parcelle e di combinarle con i dati relativi al suolo e alla topografia. In Francia, regioni come Bordeaux e la Borgogna hanno sviluppato sistemi di mappatura del terroir (ad esempio Vitimap) che integrano i dati climatici e pedologici per caratterizzare l'idoneità viticola. In Portogallo, il progetto VineGIS nella valle del Douro combina il GIS con sensori e telerilevamento satellitare per la gestione integrata dei vigneti. In Italia, iniziative come WineGIS in Toscana e Piemonte hanno permesso di correlare varietà di uva, condizioni pedoclimatiche e pratiche di gestione.

Su scala continentale, il programma europeo Copernicus e le immagini satellitari Sentinel-2 sono diventati una fonte fondamentale per il monitoraggio regolare dei vigneti, facilitando la mappatura del vigore e l'individuazione delle eterogeneità all'interno degli appezzamenti. Allo stesso modo, piattaforme commerciali come Terranis (Francia) o EviWine (Italia/Spagna) offrono soluzioni che integrano GIS, dati satellitari e modelli predittivi per ottimizzare la gestione degli input.

Più recentemente, l'integrazione di immagini iperspettrali acquisite dai droni e l'uso di tecniche di apprendimento automatico hanno reso possibile individuare le aree critiche all'interno dei vigneti senza bisogno di intervento manuale. Queste innovazioni riducono significativamente i tempi di analisi e migliorano la precisione nella delimitazione delle EMA, contribuendo a una gestione più sostenibile ed efficiente delle risorse nella viticoltura europea.



Figura 12. Quinto anniversario di Sentinel - 2° Fonte: AIRBUS

4.2 Dashboard e piattaforme digitali

Le piattaforme digitali odierne non si limitano a presentare mappe statiche: trasformano i dati sensoriali e remoti in esperienze visive interattive, accessibili da computer, tablet o dispositivi mobili. Questi strumenti consentono ai viticoltori di gestire i propri vigneti in modo dinamico e sulla base di dati in tempo reale.

Alcune delle caratteristiche più rilevanti includono:

- **Curve temporali interattive**, che mostrano l'evoluzione di indicatori chiave quali NDVI, umidità del suolo, temperatura ambiente o stress idrico.
- **Allarmi georeferenziati**, classificati in base al livello di rischio (basso, medio, alto), accompagnati da raccomandazioni operative precise quali "attivare l'irrigazione a goccia nel settore A" o "applicare un trattamento fitosanitario urgente".
- **Confronto anno su anno delle campagne**, che consente di identificare deviazioni o anomalie nello sviluppo del raccolto rispetto agli anni precedenti.
- **Registrazione digitale degli interventi**, quali irrigazione, applicazioni fitosanitarie o raccolti, con informazioni dettagliate su data, dose e luogo.

Questi dati arricchiscono il sistema e ne rafforzano la capacità di formulare raccomandazioni future.

Piattaforme come *vite.net®* o *AgriWebb* consentono di gestire l'intero ciclo produttivo dal proprio telefono cellulare. In Europa, una validazione pilota ha dimostrato che un'interfaccia progettata in collaborazione diretta con gli utenti ha ridotto del 40% il tempo necessario per interpretare le informazioni agronomiche (CORDIS, 2023).



Figura 13. Gestione in tempo reale dal dispositivo mobile. Fonte: AgriWebb

4.3 Modelli predittivi e algoritmi di intelligenza artificiale

Previsione delle prestazioni

Nel quadro della viticoltura di precisione, la **previsione della resa** è diventata uno strumento essenziale non solo per la pianificazione agronomica, ma anche per la **gestione logistica, commerciale e finanziaria** delle aziende vinicole. L'integrazione delle tecniche di machine learning e deep learning nell'analisi di dati provenienti da più fonti (immagini satellitari, variabili climatiche, sensori sul campo e dati storici) consente di anticipare con estrema precisione la produzione di uva e vari indicatori di qualità in diversi momenti del ciclo fenologico.

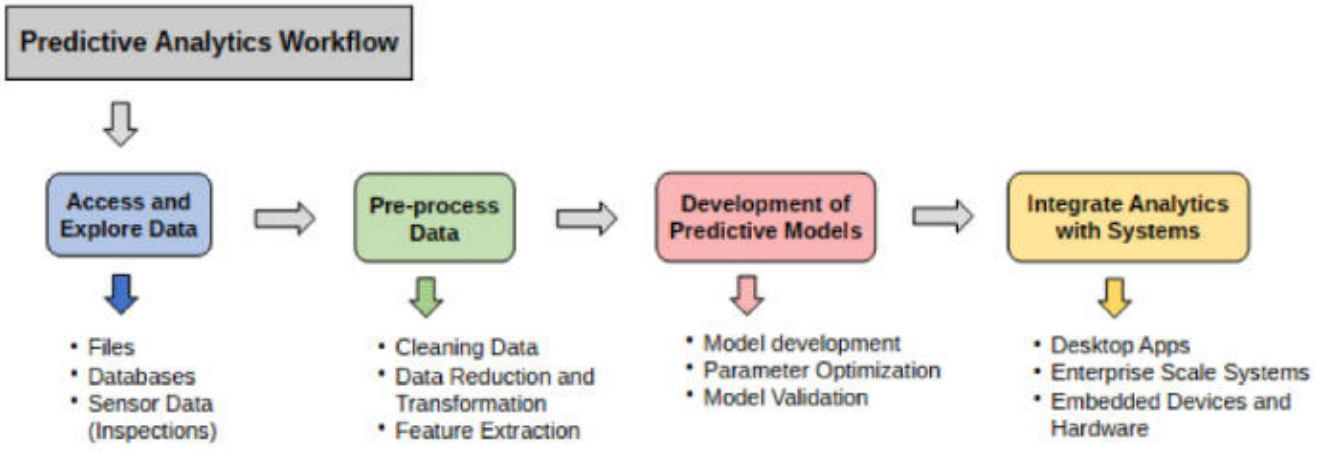


Figure 14. Predictive analytics workflow. *Source: Silva et al, 2021*

Previsione delle prestazioni con reti neurali

Uno degli approcci più promettenti nella previsione della resa viticola è l'uso delle reti **LSTM (Long Short-Term Memory)**, un tipo di rete neurale ricorrente in grado di gestire serie temporali con dati meteorologici, indici di vegetazione e date fenologiche. Uno studio condotto nella **regione dell'Alto Douro (Portogallo**), applicando LSTM alle immagini **Sentinel-2** (in particolare NDVI) e ai dati climatici storici, è riuscito a prevedere la resa con un **errore assoluto medio (MAE) di 672 kg/ha** e una **deviazione percentuale dell'8%** dai dati effettivi durante la campagna 2020. Questo modello è stato valutato con successo in diversi comuni, dimostrando la sua utilità nell'anticipare il raccolto diverse settimane prima della raccolta (Fernandes et al., 2022).

Altri modelli ancora più sofisticati, come **CMAViT (Crop Monitoring and Assessment for Viticulture),** integrano più livelli di dati: clima, gestione agronomica, immagini satellitari e conoscenze specialistiche. Questo modello utilizza un'architettura basata su **Vision Transformers (ViT),** un tipo di rete neurale all'avanguardia che elabora le immagini come sequenze di informazioni. Nelle validazioni effettuate nelle regioni dell'Europa meridionale, **CMAViT ha raggiunto un coefficiente di determinazione R^2 di 0,84 e un MAPE (errore percentuale assoluto medio) dell'8,2%,** migliorando significativamente le previsioni rispetto ai modelli classici come la regressione lineare o gli alberi decisionali (Gomes et al., 2023).

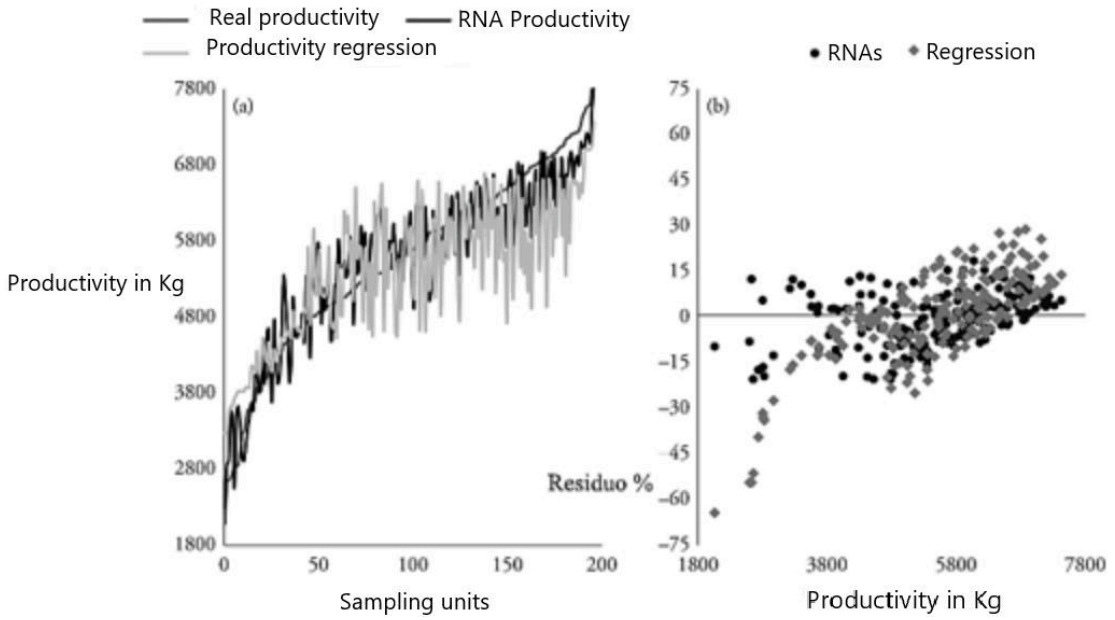


Figura 15. Modellizzazione predittiva dei dati. Fonte: Eduardo Berra Villaseñor

Diagnosi precoce delle malattie e dello stress delle piante

L'identificazione precoce delle malattie della vite è un'altra delle applicazioni chiave dell'intelligenza artificiale nella viticoltura. Attraverso l'elaborazione di immagini multispettrali catturate da droni (UAV) e la loro analisi con **reti neurali convoluzionali (CNN),** è stato possibile rilevare sintomi incipienti di malattie come **la peronospora (Plasmopara viticola)** o **botrite (Botrytis cinerea)** con livelli di accuratezza superiori al **92% a livello di pixel**, anche prima della comparsa di segni visibili sul campo (Kerkech et al., 2020).

Queste reti, addestrate con immagini contrassegnate provenienti da diverse campagne, hanno dimostrato la loro capacità di generare **mappe di rischio georeferenziate**, che consentono interventi fitosanitari localizzati, riducendo l'uso superfluo di fungicidi e migliorando la tracciabilità sanitaria del vigneto.

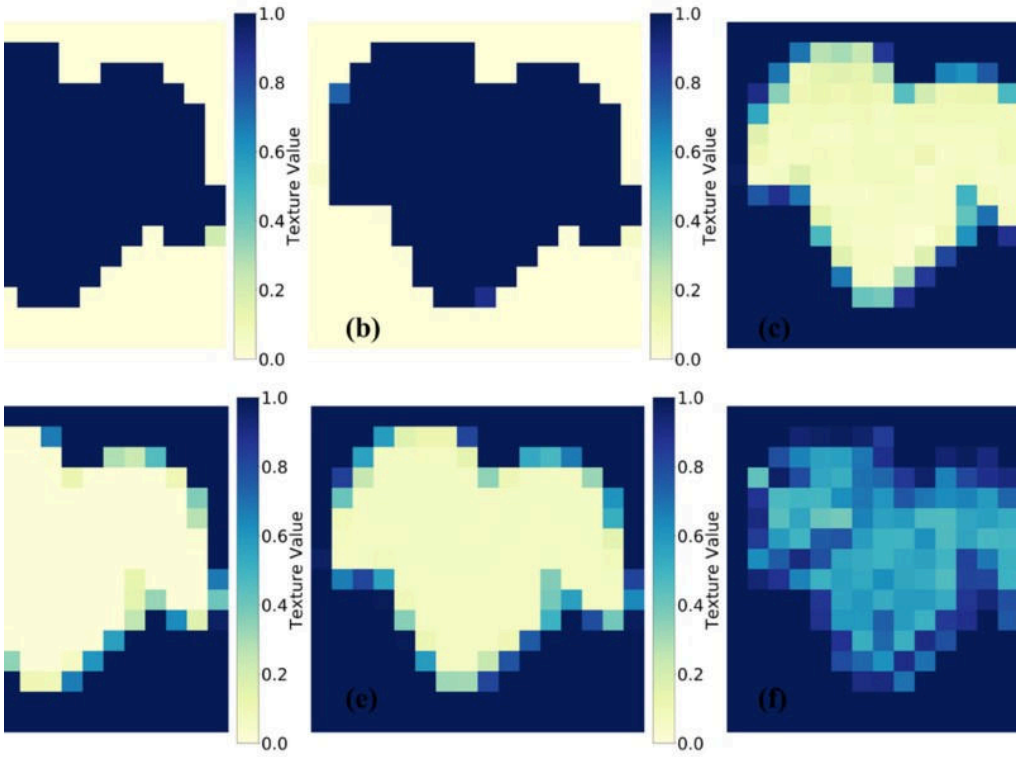


Figura 16. Diagnosi delle malattie fogliari mediante IA. Fonte: Elsherbiny et al.

Stima della qualità della frutta

Oltre alla resa e alla salute del vigneto, l'intelligenza artificiale è stata applicata anche alla **previsione dei parametri di qualità dei frutti**, in particolare il contenuto zuccherino **(°Brix), l'acidità totale, i polifenoli** e il potenziale aromatico. Correlando immagini NDVI multitemporali acquisite da droni, sensori fogliari e dati analitici di laboratorio, diversi studi sono riusciti a stimare il valore di questi indicatori.

In un recente esperimento, sono stati utilizzati algoritmi **AutoML (Automated Machine Learning)** per prevedere il °Brix sulla base dell'NDVI registrato in diverse fasi fenologiche. Algoritmi quali **Support Vector Machines (SVM), regressione polinomiale**, e **Extra Trees Regressor** hanno offerto coefficienti di determinazione compresi tra **R^2 = 0,44 e 0,53**, risultati considerati accettabili tenendo conto dell'elevata variabilità fisiologica e del suolo negli appezzamenti vitati (Silva et al., 2021). Sebbene ancora in fase sperimentale, questi modelli potrebbero consentire una **vendemmia differenziata in termini di qualità**, indirizzando i grappoli ottimali verso vinificazioni di alta qualità e ottimizzando la redditività del vigneto.

4.4 Mappe delle prescrizioni e tecnologia VRT

I modelli predittivi applicati alla viticoltura non solo generano informazioni analitiche, ma culminano in uno strumento operativo fondamentale: le mappe di prescrizione. Queste mappe digitali rappresentano la **traduzione spaziale delle analisi dei dati**, indicando **dosi specifiche di input** – come acqua, fertilizzanti o prodotti fitosanitari – adattate alle **aree di gestione specifiche (SMA)** del vigneto. Si tratta di una delle applicazioni più avanzate e tangibili della viticoltura di precisione, in cui la raccolta dei dati viene direttamente convertita in azioni differenziate sul campo.

Queste mappe, solitamente generate utilizzando piattaforme GIS (Geographic Information Systems), possono essere esportate in formati compatibili con le moderne macchine agricole (ad esempio shapefile o GeoTIFF) e importate direttamente su trattori, irroratrici o attrezzature di fertirrigazione dotate di sistemi VRT (Variable Rate Technology). In questo modo, ogni area del vigneto riceve il trattamento esatto di cui ha bisogno, in base alla diagnosi generata da sensori, modelli o immagini satellitari.

Benefici e risultati verificati

Numerosi studi condotti sia in Europa che in America hanno dimostrato i vantaggi tangibili dell'utilizzo di mappe di prescrizione con tecnologia VRT nella pratica enologica. Ad esempio, una ricerca condotta dal **Centro comune di ricerca (CCR) dell'Unione europea** nei vigneti di Spagna, Italia e Germania ha documentato **una riduzione media dal 20 al 30% nell'uso di fertilizzanti e prodotti fitosanitari**, nonché una diminuzione del **deflusso superficiale e della contaminazione diffusa delle acque sotterranee** (Vendrell et al., 2020). L'applicazione localizzata ha inoltre favorito una **maggiore omogeneità nel vigore e nella resa del vigneto**, contribuendo a una migliore qualità enologica.

In **Argentina**, gli esperimenti condotti nella provincia di Mendoza con trattori dotati di dosatori VRT – alimentati da mappe dell'azoto generate da droni e dati provenienti da sensori fogliari – hanno permesso di **ridurre l'applicazione di fertilizzanti azotati del 25%**, senza compromettere lo sviluppo vegetativo o la qualità dell'uva. Inoltre, è stato osservato un aumento dell'efficienza nell'uso dell'azoto (NUE), con minori perdite per lisciviazione (Castro et al., 2021).

Nel frattempo, in **Cile e nel sud della Francia**, l'uso di **irroratori intelligenti** abbinati a telecamere con visione artificiale ha permesso di individuare le foglie malate con sintomi iniziali di oidio e muffa. Questo rilevamento ha attivato le valvole di applicazione solo nelle aree colpite, con una conseguente **riduzione fino al 40% del volume di fungicidi utilizzati**, senza compromettere il controllo sanitario del raccolto (Guillén et al., 2022). Questa tecnica contribuisce anche a ridurre gli sprechi nei prodotti finali e migliora la sostenibilità del processo di vinificazione.

Queste esperienze riflettono come la combinazione di **modellizzazione, mappatura digitale e meccanizzazione avanzata** non solo ottimizzi gli input, ma introduca anche un nuovo paradigma operativo nella viticoltura: una gestione personalizzata, efficace e rispettosa dell'ambiente.



Figura 17. Distributore automatico Green Patrol per il controllo dei parassiti. Fonte: SmartProtect

4.5 Azione automatizzata: collegare la previsione all'intervento

Il livello più avanzato della viticoltura digitale si raggiunge quando il **ciclo di gestione delle informazioni agronomiche** è completamente chiuso, ovvero quando i dati raccolti dai sensori ed elaborati dai modelli predittivi **portano a decisioni automatizzate o semi-automatizzate**, eseguite direttamente sul vigneto attraverso sistemi connessi. Questo approccio, noto come **"dai dati all'azione",** rappresenta l'apice della gestione di precisione del vino, combinando monitoraggio in tempo reale, intelligenza artificiale e automazione agricola.

In questo modello, **i sistemi di supporto decisionale (DSS)** non sono più solo strumenti di consultazione e analisi, ma piuttosto **piattaforme operative in grado di attivare dispositivi fisici**, dalle valvole di irrigazione alle mietitrici automatiche. Ciò consente **risposte immediate, oggettive e costanti basate sui**

dati, eliminando i ritardi e riducendo la dipendenza dall'osservazione manuale o dall'interpretazione soggettiva.

Esempi funzionali di automazione intelligente

1. **Attivazione automatica dell'irrigazione:** In molte aziende vinicole tecnologicamente avanzate, **le valvole di irrigazione a goccia sono collegate a stazioni meteorologiche e sensori di umidità del suolo**. Queste valvole ricevono segnali dal DSS quando i livelli di umidità scendono al di sotto delle soglie preimpostate, attivando l'irrigazione solo nelle ZME necessarie e per il tempo necessario. Piattaforme come **SmartVitis** e **iRooM** integrano già questa funzionalità nei vigneti in Italia e in California, consentendo un risparmio idrico fino al **30% senza ridurre la resa o la qualità** (Matese & Di Gennaro, 2021).



Figura 18. Irrigazione automatizzata. Fonte: verdeesvida

2. **Avvisi automatici e attivazione dei macchinari:** I sistemi avanzati di gestione agricola inviano **notifiche immediate dei rischi fitosanitari rilevati dai modelli predittivi**, come condizioni favorevoli alla muffa o alla botrite. Questi avvisi possono essere configurati per attivare direttamente **irroratrici autonome o trattori guidati da GPS**, se autorizzati dall'operatore, o consentire al tecnico responsabile di prendere decisioni informate in tempo reale. Un esempio è il sistema **CropX**, che integra l'analisi della chioma, i dati climatici e le previsioni per generare allarmi attivabili a livello di appezzamento (CropX, 2023).



Figura 19. Strumento di ritaglio per la notifica degli avvisi. Fonte: Cropx

3. **Raccolta segmentata basata sulla maturazione differenziale:** La raccolta selettiva **per zone di maturazione** è un'altra applicazione di rilievo. Il DSS, utilizzando immagini NDVI e sensori ottici che misurano **gli indici di colore, clorofilla e solidi solubili (°Brix)**, è in grado di identificare quando ciascuna ZME ha raggiunto la maturità ottimale. Ciò consente di programmare la raccolta in fasi o persino **di attivare raccoglitrici automatiche dotate di telecamere iperspettrali** che selezionano i grappoli maturi in tempo reale. Alcuni modelli di **raccoglitrici intelligenti come la New Holland Braud 9090X** incorporano già sensori di qualità dei frutti che consentono questo tipo di automazione avanzata (New Holland, 2022).



Figure 20. SCF chlorophyll sensor for in-situ measurement in the field.Source: innova

Progetti europei all'avanguardia

Progetti europei come **AI GRAPE,** sviluppati congiuntamente da centri di ricerca in **Italia e Slovenia**, sono nella fase di implementazione di una piattaforma completa che riunisce tutte queste funzionalità: sensori sul campo, analisi con intelligenza artificiale e **automazione di attività quali l'irrigazione, l'applicazione di prodotti fitosanitari e la raccolta**. L'obiettivo è quello di creare un ecosistema completamente chiuso, in cui le decisioni agronomiche vengano

eseguite senza l'intervento umano, mantenendo la tracciabilità e la registrazione nel cloud (CORDIS, 2023).

Questo passaggio all'automazione intelligente rappresenta il passo successivo nell'evoluzione dei vigneti digitali. Consente non solo di ridurre i costi e minimizzare gli errori umani, ma anche di **rispondere in modo più rapido e accurato alle mutevoli condizioni**, quali siccità, piogge impreviste o focolai di malattie. L'integrazione di queste tecnologie rafforza la sostenibilità del sistema produttivo e lo adatta meglio alle sfide climatiche e di mercato del XXI secolo.

4.6 Casi di studio approfonditi

L'adozione delle tecnologie di agricoltura digitale nei vigneti europei sta producendo risultati tangibili che dimostrano il valore pratico dell'integrazione di sensori, algoritmi predittivi e automazione. Di seguito sono riportati due casi eccellenti di **viticoltura di precisione** nella penisola iberica: uno a livello di appezzamento nella **Ribera del Duero (Spagna)** e un altro a livello regionale nella **regione vinicola del Douro (Portogallo).**

Caso 1: Vigneto altamente tecnologico nella Ribera del Duero (Spagna)

In un vigneto di alta gamma nella Ribera del Duero è stato implementato un sistema integrato di monitoraggio e gestione intelligente nel corso di tre campagne consecutive. Il progetto comprendeva:

1. **Sensori del suolo e stazioni meteorologiche locali**, installati per registrare dati in tempo reale su umidità, temperatura, conducibilità e precipitazioni, con rilevamenti ogni 15 minuti.
2. **Immagini settimanali acquisite da droni (UAV)** dotati di telecamere multispettrali, che consentono il calcolo di indici di vegetazione quali NDVI e SAVI ad alta risoluzione (2,5 cm/pixel).
3. **Applicazione di algoritmi di reti neurali LSTM (Long Short-Term Memory)**, addestrati con dati storici relativi al clima, alla fenologia e ai raccolti precedenti, in grado di prevedere la resa e l'insorgenza di malattie.
4. **Creazione di mappe di prescrizione** per l'adeguamento dei prodotti per l'irrigazione e fitosanitari in base a specifiche zone di gestione (EMZ).
5. **Automazione dell'irrigazione** tramite valvole collegate alla piattaforma di supporto decisionale (DSS) e **irroratrici VRT** in grado di adattare le dosi in tempo reale.

6. **Pannello di controllo mobile per la gestione integrata**, in cui venivano registrate tutte le operazioni effettuate, con tracciabilità di data, dose, posizione GPS e operatore.

I risultati quantificati dopo due anni di utilizzo hanno evidenziato miglioramenti significativi:

- **Riduzione del consumo idrico del 30%,** grazie a un programma di irrigazione basato sullo stress idrico e sullo stato fenologico.
- **Riduzione del 25% dell'uso di fungicidi,** grazie ad applicazioni selettive guidate da modelli predittivi.
- **Aumento dell'omogeneità della resa del vigneto**, con un miglioramento medio di **+12% in kg/ha**, soprattutto nei terreni con minore capacità di ritenzione.
- **Riconoscimenti ottenuti in concorsi regionali di qualità**, in cui i vini prodotti hanno ottenuto punteggi eccellenti nelle valutazioni sensoriali e nelle schede tecniche.

Questo caso illustra il potenziale della viticoltura digitale completamente integrata, in cui gli interventi agronomici vengono adeguati in tempo reale ai dati fisiologici, climatici e spaziali (González-Fernández et al., 2022; Matese & Di Gennaro, 2021).



Figura 21. L'uso dei droni nelle cantine della Ribera del Duero. Fonte: Computing

Caso 2: Modello di previsione regionale nella regione del Douro (Portogallo)

Su scala più ampia, l'**Instituto Nacional de Investigação Agrária e Veterinária (INIAV)** in Portogallo ha sviluppato un modello di previsione della resa viticola

per la regione dell'**Alto Douro**, utilizzando immagini satellitari e il deep learning. Il sistema, denominato **InfoSolo** , combina:

- Immagini multitemporali di **Sentinel-2** con indici di vegetazione (NDVI) estratti durante le fasi di fioritura e invaiatura.
- Variabili meteorologiche storiche e in tempo reale (temperatura media, irraggiamento solare, accumulo di gradi-giorno).
- Addestramento di modelli con reti neurali LSTM, in grado di cogliere sequenze temporali non lineari.

I risultati hanno indicato un **errore assoluto medio (MAE) di 672 kg/ha**, equivalente a una **deviazione relativa del 17 %.** Quando le previsioni sono state effettuate all'invaiatura, l'accuratezza è migliorata con errori **inferiori a ±8%,** sufficienti per usi operativi quali la logistica della vendemmia e la pianificazione macroeconomica regionale (Fernandes et al., 2022).

Questi modelli sono stati testati in diversi comuni viticoli e si sono dimostrati scalabili, consentendo di elaborare **mappe delle prestazioni previste** a livello regionale. Ciò ha facilitato **la pianificazione dei trasporti, l'organizzazione dei magazzini e la previsione dei contratti di vendita**, nonché la convalida delle assicurazioni agricole.

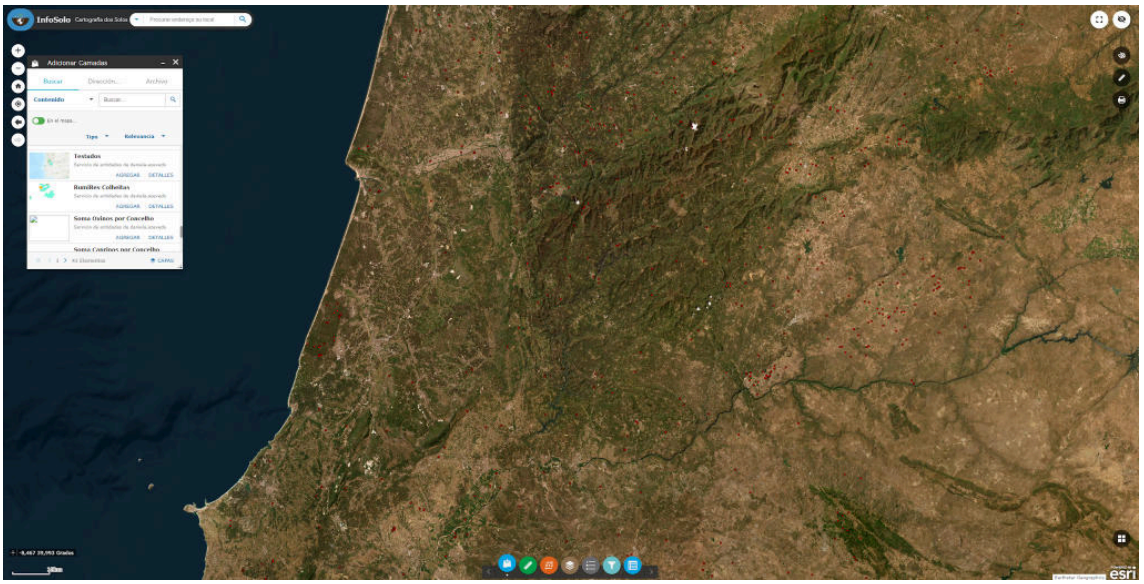


Figura 22. Sistema di mappatura InfoSolo. Fonte: InfoSolo

4.7 Vantaggi e sfide nella pratica

L'adozione delle tecnologie digitali e dei sistemi di supporto decisionale nel settore vitivinicolo sta trasformando radicalmente i processi di produzione, gestione e commercializzazione del vino. L'implementazione di sensori, modelli predittivi, piattaforme integrate e automazione consente non solo di migliorare l'efficienza operativa, ma anche di introdurre una nuova cultura del lavoro basata su dati oggettivi e su un processo decisionale informato.

1. **Vantaggi immediati e verificabili**

2. **Processo decisionale basato su dati reali:** Uno dei vantaggi più tangibili del vigneto digitale è il **progressivo abbandono dell'intuizione soggettiva** o dell'esperienza non sistematizzata, per orientarsi verso un **processo decisionale basato su dati empirici, misurati e analizzati**. Ciò consente di attuare interventi agronomici con maggiore precisione, coerenza e tracciabilità, migliorando sia la gestione che i risultati in ogni campagna (Matese & Di Gennaro, 2021; Bramley, 2009).

3. **Significativa riduzione dell'uso delle risorse:** Diversi studi dimostrano che l'applicazione delle tecnologie di precisione consente di ridurre l'uso di fattori di produzione agricoli (acqua, fertilizzanti, prodotti fitosanitari) in **una percentuale compresa tra il 20% e il 40%,** a seconda del grado di integrazione tecnologica. Questa efficienza non solo riduce i costi economici, ma **mitiga anche gli impatti ambientali negativi** quali l'inquinamento diffuso o lo sfruttamento eccessivo delle risorse naturali (Vendrell et al., 2020).

4. **Miglioramento della qualità dei frutti e della sostenibilità:** La possibilità di intervenire in modo mirato, in base alle esigenze di ciascuna zona del vigneto, **ottimizza l'equilibrio vegetativo-riproduttivo della vite**, migliora la qualità dell'uva (maggiore concentrazione di zuccheri, antociani, acidità equilibrata) e favorisce una **produzione più sostenibile e resiliente** di fronte ai cambiamenti climatici (González-Fernández et al., 2022).

5. **Capacità di anticipazione logistica e commerciale:** I modelli predittivi di resa e maturità consentono **di pianificare in anticipo la vendemmia**, di gestire meglio la manodopera e di anticipare gli accordi commerciali. Essi facilitano inoltre la programmazione in cantina (ricezione, fermentazione, pigiatura) e la **negoziazione dei contratti di acquisto e vendita** sulla base di dati verificati e non di stime soggettive (Fernandes et al., 2022).

Sfide tecniche e organizzative ancora da affrontare

1. **Efficace integrazione tra hardware, software e macchinari Nonostante i progressi tecnologici, una delle principali sfide rimane l'interoperabilità tra dispositivi e piattaforme**. I sensori provenienti da diverse fonti, i software di analisi, i macchinari VRT e i sistemi di gestione devono essere

correttamente integrati affinché il flusso di informazioni sia continuo e affidabile (Matese et al., 2022). La mancanza di standard universali nel settore agricolo rende difficile questo compito.

2. **Capacità di elaborazione e archiviazione in tempo reale Il volume di dati generato dai vigneti connessi è notevole e richiede infrastrutture di elaborazione dati nel cloud**, sistemi di edge computing o reti a bassa latenza. Per prendere decisioni in tempo reale — ad esempio, in caso di allerta gelo o di raccomandazioni relative all'irrigazione — il sistema deve funzionare con elevata disponibilità e ritardi minimi (CropX, 2023).
3. **Sviluppo di interfacce intuitive e di facile utilizzo: i dashboard e le visualizzazioni sono spesso progettati da sviluppatori privi di esperienza agronomica, il che li rende difficili da utilizzare per i tecnici sul campo. È quindi necessaria una co-creazione tra utenti finali e progettisti**, basata sui principi di usabilità e di progettazione incentrata sull'utente. In progetti come **vite.net®**, interfacce ben progettate hanno dimostrato di **ridurre i tempi di interpretazione dei dati fino al 40%** (CORDIS, 2021).
4. **Formazione continua del personale e calibrazione del sistema: la tecnologia da sola non basta a trasformare la gestione vitivinicola. È fondamentale una formazione specifica per interpretare i dati**, comprendere le mappe di prescrizione, calibrare i sensori e regolare i parametri. Inoltre, i sensori devono **essere ricalibrati periodicamente** per mantenere l'accuratezza delle misurazioni, specialmente in presenza di condizioni climatiche variabili (Bongiovanni & Lowenberg-DeBoer, 2004).

5. Sistemi di supporto decisionale (DSS) nella viticoltura di precisione

Nell'era della trasformazione digitale in agricoltura, i **sistemi di supporto decisionale (DSS)** si sono affermati come il fulcro operativo della viticoltura di precisione. La loro funzione è quella di integrare, elaborare e analizzare informazioni complesse provenienti dal vigneto, generando **raccomandazioni agronomiche oggettive, tempestive e personalizzate**. Questi sistemi costituiscono la struttura cognitiva che consente di **trasformare i dati in conoscenza** e la conoscenza in azione, al servizio di una produzione vinicola più efficiente, sostenibile e resiliente (Gómez-Candón et al., 2020; Matese & Di Gennaro, 2021).

5.1 Che cos'è un DSS e qual è la sua funzione?

Un DSS può essere definito come una **piattaforma tecnologica che combina modelli predittivi, algoritmi agronomici e dati in tempo reale** per generare istruzioni pratiche e automatizzate da applicare sul campo. Ad esempio: un DSS progettato per un'azienda vinicola può, all'inizio della giornata, raccogliere variabili quali l'umidità del suolo, la temperatura dell'aria, le previsioni meteorologiche, immagini satellitari o da drone e l'agenda operativa del team sul campo. Sulla base di queste informazioni, il sistema applica modelli fenologici, soglie di stress idrico, previsioni sulle malattie e strategie agronomiche predefinite per fornire raccomandazioni tattiche quali:

- "Effettuare un'irrigazione di 8 mm nella zona di gestione specifica (ZME) 3."
- "Rischio moderato di muffa nei terreni esposti a nord."
- "Domani, per prima cosa, controlla la maturità fenologica nei filari 12-16."

Questa capacità di sintetizzare ed eseguire in tempo reale rende il DSS un **assistente agronomico digitale**, in grado di operare con livelli di precisione e rapidità irraggiungibili per il lavoro manuale o l'intuizione tradizionale (Bongiovanni & Lowenberg-DeBoer, 2004; Finger et al., 2019).

Tuttavia, l'ambito di applicazione di un DSS va oltre l'esecuzione tattica. Questi sistemi fungono anche da **archivi di informazioni storiche**: registrano ogni intervento effettuato (data, dose, macchinari utilizzati, operatore responsabile), il che consente di **effettuare analisi comparative tra campagne, varietà o appezzamenti**. Grazie all'accumulo di dati e ai principi dell'apprendimento automatico, i DSS possono migliorare nel tempo: regolano le soglie di intervento, ricalibrano i modelli e personalizzano ulteriormente le loro raccomandazioni sulla base della storia del vigneto e delle risposte osservate in ciascun ciclo produttivo (Pérez-Delgado et al., 2023).

L'obiettivo finale di questi sistemi è quello di facilitare il passaggio da una **viticoltura reattiva** – che interviene sui problemi solo una volta individuati – a

una viticoltura proattiva **e predittiva**, in grado di **anticipare i rischi, pianificare in anticipo e ottimizzare le risorse**. In questo senso, i DSS costituiscono un ponte tra l'agricoltura di precisione e i concetti emergenti di **agricoltura intelligente e viticoltura 5.0**, dove convergono sostenibilità, efficienza e digitalizzazione (Zarco-Tejada et al., 2014; Finger et al., 2019).

Tra i vari esempi di implementazione dei modelli di supporto decisionale (SDM) nella viticoltura figurano piattaforme come **Vite.net®**, sviluppata da Horta srl in Italia, o **SmartVitis**, un progetto coordinato dall'Università di Firenze, che è stato validato in vigneti situati in Toscana, nella Rioja e in Borgogna. Entrambe le soluzioni integrano sensori climatici, immagini multispettrali, modelli fenologici e mappe di prescrizione, consentendo di intervenire con una precisione senza precedenti in tutte le fasi del ciclo viticolo.



Figura 23. Indicatori di rischio del DSS Vite.net. Fonte: Vite.net

5.2 Architettura tecnica di un sistema decisionale di supporto (DSS) per la viticoltura

A **Decision Support System (DSS)** in digital viticulture organizes the transformation of data into operational actions in a structured way. This flow can be divided into six main stages, each with a fundamental purpose in agronomic management:

1. Acquisizione multisensoriale

Il primo passo consiste nel raccogliere informazioni da varie fonti fisiche:

- **Sensori del suolo**: capacitivi, tensiometrici o FDR, utili per misurare l'umidità e la conduttività elettrica (Ojha et al., 2015).
- **Sensori in situ aggiuntivi**: ad esempio, misuratori di pressione fogliare (LeafSen), sensori di flusso di linfa o di pH, che forniscono informazioni sullo stato fisiologico della vite (LeafSensor, 2023; Steppe et al., 2008).
- **Stazioni meteorologiche**: per monitorare temperatura, umidità, vento, irraggiamento e precipitazioni (Jones et al., 2010).
- **Immagini remote**: immagini satellitari (Sentinel-2), immagini multispettrali acquisite da UAV e immagini termiche, che consentono di calcolare indici quali l'NDVI o il CWSI (Delegido et al., 2011; Matese & Di Gennaro, 2015).
- **Dati manuali**: quali date di potatura, varietà, tipi di trattamento, densità di impianto, ecc.

La combinazione di queste fonti genera set di dati ricchi ed eterogenei che alimentano il sistema di gestione.

2. Pre-elaborazione dei dati

Prima dell'analisi, i dati devono essere elaborati:

- **Rilevamento e correzione dei valori anomali**.
- **Calibrazione periodica dei sensori** per correggere eventuali errori sistematici o derive (Ammoniaci et al., 2021).
- **Interpolazione temporale e spaziale** per uniformare la risoluzione dei dati.
- **Conversione delle unità** secondo gli standard operativi (mm, °C, ecc.).

Questa fase garantisce che i dati siano coerenti, comparabili e idonei all'elaborazione.

3. Motore di calcolo

Le routine algoritmiche elaborano i dati pre-elaborati utilizzando:

- **Chiare regole agronomiche**, quali i gradi-giorno (GDD) e i modelli fenologici basati sulle fasi BBCH (Brisson et al., 2003).
- **Sistemi di allerta fitosanitaria** quali l'indice di Gubler-Thomas o i modelli EPI per la botrite e l'oidio (Gubler et al., 1999).
- **Modelli predittivi basati sull'intelligenza artificiale:** machine learning (ML) o deep learning (DL) per stimare lo stress idrico, l'incidenza dei parassiti o la resa (Fernandes et al., 2022; Kerkech et al., 2020).
- **Generazione di mappe di prescrizione** per l'irrigazione e i trattamenti a dosaggio variabile (VRT) in base a aree specifiche (Ammoniaci et al., 2021).

Ciò genera informazioni gerarchiche tra la diagnosi e le raccomandazioni operative.

4. Action Engine

I risultati si traducono in azioni concrete:

- **Esportazione delle mappe VRT** verso trattori, fertirrigatori o irroratrici, apparecchiature comunemente utilizzate nell'agricoltura moderna (Ammoniaci et al., 2021).
- **Notifiche automatiche**, inviate tramite cellulare, e-mail o web, che indicano quando e dove intervenire sul campo.
- **Attivatori automatici** che gestiscono le valvole di irrigazione o degli irrigatori direttamente tramite segnali digitali.

Con questa struttura, il DSS cessa di avere un ruolo consultivo e diventa un **esecutore parziale automatico**.

5. Interfaccia utente (UX/HMI)

L'interazione con il sistema deve essere chiara ed efficace:

- **Visualizzazioni intuitive**, tra cui mappe interattive e curve temporali relative all'NDVI, all'umidità, allo stress idrico, ecc. (Ammoniaci et al., 2021).
- **Notifiche classificate** ("urgente", "da controllare", "normale"), che aiutano a stabilire le priorità delle azioni.
- **Registro geolocalizzato delle attività**: irrigazione, trattamenti o raccolta, con piena tracciabilità e accesso alla cronologia delle campagne.

Una buona esperienza utente garantisce l'utilità e l'adozione da parte dei tecnici e dei viticoltori.

6. Effetto dinamico e apprendimento continuo

I sistemi DSS funzionano in un **ciclo di retroazione costante**:

- Verificano i risultati di ogni intervento (ad esempio, la risposta al trattamento o lo stato idrico dopo l'irrigazione).
- Affinano le soglie e adattano i modelli in base all'efficienza osservata.
- Incorporano nuovi dati nella cronologia, consentendo agli algoritmi di essere progressivamente adeguati e migliorati (Pérez-Delgado et al., 2023).

Questo ciclo rende il DSS uno strumento che non solo esegue, ma **impara e si evolve**.

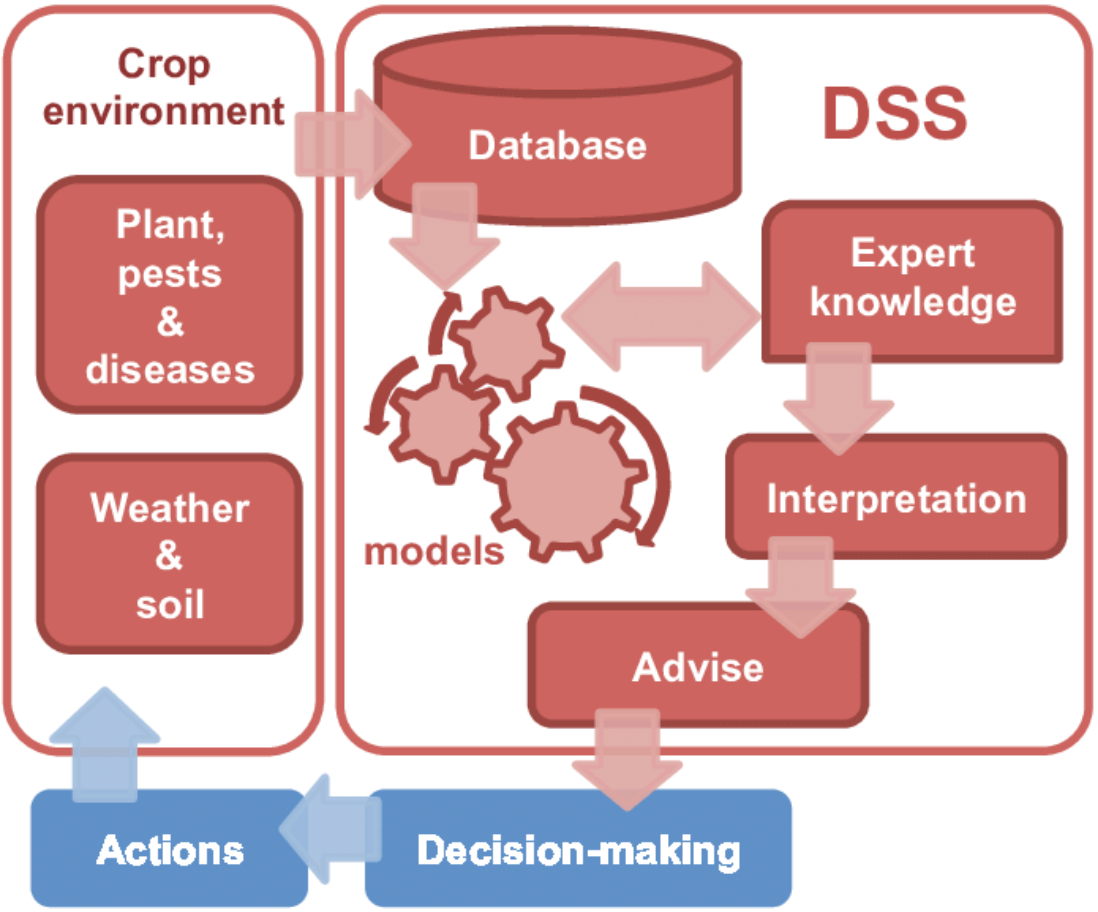


Figura 24. Esempio di DSS per il trattamento di malattie in coltura. Fonte: Vittorio et al. 2012

5.3 Modelli e algoritmi utilizzati nei sistemi di supporto decisionale

Modellizzazione fenologica e analisi della maturità

La modellizzazione fenologica combina diverse fonti di informazione – temperatura cumulativa (GDD), date tradizionali di germogliazione e maturazione, dati satellitari – per definire una **finestra di raccolta** flessibile di 57 giorni anziché una data fissa. Questo approccio migliora l'adattamento della raccolta alle condizioni climatiche dell'anno, facilitando decisioni di raccolta più accurate (Chuine et al., 2013; Basile et al., 2023).

Modellizzazione dei rischi fitosanitari

I criteri tradizionali, come **Gubler-Thomas** e l'**Indice di Rischio Epidemiologico (EPI),** sono stati potenziati grazie all'integrazione con l'intelligenza artificiale. Questi nuovi sistemi incorporano variabili quali temperatura, umidità, evapotraspirazione e microclima secondo lo ZME, generando **allarmi automatici** che evitano applicazioni non necessarie di fungicidi. In alcuni casi, il suo utilizzo è stato ridotto fino al **32%,** senza compromettere la tutela della salute (Gubler et al., 1999; Ayaz et al., 2019).

Modellizzazione dello stress idrico

La modellizzazione del bilancio idrico del vigneto, in combinazione con sensori di umidità del suolo e di pressione fogliare, consente di anticipare eventuali carenze e di avviare l'irrigazione prima che la pianta subisca uno stress. Questo approccio ha ridotto il consumo idrico del **15-20%**, consentendo un intervento tempestivo e mirato (LeafSensor, 2023; Steppe et al., 2008).

Previsione delle prestazioni

Le variabili di sensorializzazione, i dati meteorologici, le serie storiche e i dati raccolti dai droni vengono integrati in modelli quali **Random Forest** o **LSTM.** Nella Rioja Alavesa, un modello LSTM ha raggiunto una **precisione dell'87%** nella stima dei chilogrammi di uva per ettaro utilizzando i dati di diverse campagne (Fernandes et al., 2022).

Rilevamento automatico di parassiti e malattie

L'uso delle **reti neurali convoluzionali (CNN)** applicate alle immagini multispettrali consente di identificare macchie fogliari, muffa, oidio o botrite con un'affidabilità superiore al **90%**, attivando soglie di intervento automatico (Kerkech et al., 2020; Ayaz et al., 2019).

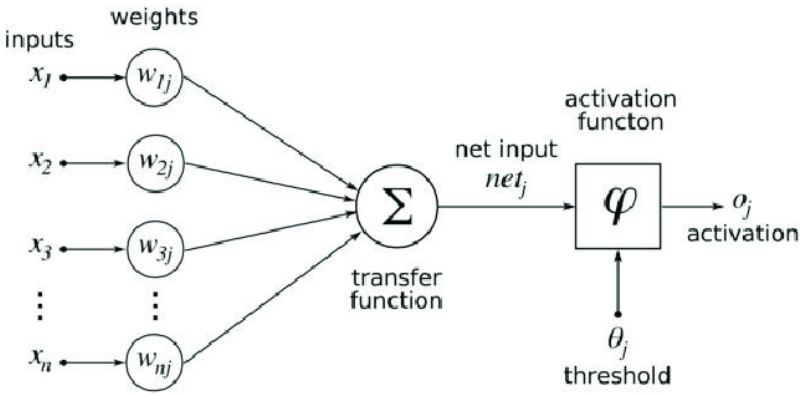


Figura 25. Rappresentazione schematica di un neurone artificiale. Fonte: Ünal, Z. 2020.

5.4 Esperienze concrete e risultati sul campo

Lo sviluppo e l'implementazione dei sistemi di supporto decisionale (DSS) hanno rivoluzionato la gestione vitivinicola, consentendo l'integrazione di tecnologie di raccolta dati, analisi predittiva e visualizzazione, e traducendole in azioni agronomiche concrete. Di seguito sono riportati alcuni dei progetti e delle piattaforme più rappresentativi che ne illustrano il potenziale applicativo:

Progetto VINTAGE

Questo progetto europeo, realizzato in importanti regioni viticole quali **La Rioja (Spagna), la Toscana (Italia) e la Borgogna (Francia)**, ha dato prova di risultati eccezionali in termini di efficienza. Il sistema ha integrato moduli di irrigazione intelligente, salute delle piante e raccolta differenziata, con una riduzione degli input compresa tra **il 20 e il 30%** grazie a tecniche di raccolta segmentata, trattamenti just-in-time e all'uso di sensori in tempo reale (CORDIS, 2022).

Uno degli aspetti fondamentali è stata la progettazione della sua **interfaccia intuitiva**, sviluppata e testata in collaborazione con i viticoltori locali. Grazie a ciò, il sistema ha ottenuto un elevato tasso di adozione, dimostrando che **l'usabilità è un fattore determinante** nell'integrazione delle soluzioni digitali nelle aziende agricole di piccole e medie dimensioni.

Figura 26. Progetto VINTAGE

VineSens

Un sistema DSS modulare pensato per le aziende vinicole a conduzione familiare e i piccoli produttori, sviluppato da un consorzio spagnolo. Questo sistema combina **sensori di umidità, temperatura, pressione e parametri ambientali**, insieme a un semplice motore di regole agronomiche, il tutto integrato in una piattaforma web di facile utilizzo.

In un caso di applicazione nella Rioja, **VineSens ha permesso di ridurre il consumo idrico del 18%** senza compromettere lo stato di salute del vigneto, anche in condizioni climatiche avverse (VineSens, 2020). Il sistema dimostra che, anche con risorse limitate, è possibile applicare i principi della viticoltura di precisione in modo efficace ed economico.

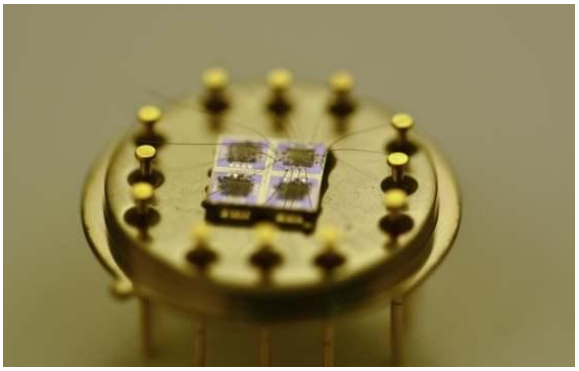


Figura 27. Integrazione del sensore VinesSens. Fonte: Dani Ortega

GrapeDSS

Una piattaforma commerciale scalabile utilizzata in diversi continenti, pensata per aziende vinicole di ogni dimensione. I suoi moduli includono:

- **Modelli di alimentazione equilibrata**, adeguati al terreno e alla varietà.
- **Selezione di portainnesti** ottimizzata per le condizioni climatiche e patologiche locali.
- **Pianificazione della fumigazione** basata su allerte fitosanitarie, NDVI e dati meteorologici.

Il suo **design mobile-first** lo rende particolarmente utile in contesti in cui si fa ampio ricorso ai dispositivi mobili e all'accesso remoto. Inoltre, consente di esportare le mappe VRT direttamente sulle macchine collegate, facilitando una gestione agronomica differenziata.



Figura 28. Progetto GrapeDSS

Progetto AI-GRAPE

Un progetto transnazionale incentrato sull'uso dell'intelligenza artificiale per **la diagnosi precoce dei parassiti** e la gestione agronomica ottimizzata. Si basa sull'uso combinato di **droni, sensori da campo e reti neurali convoluzionali** per identificare i sintomi di malattie quali l'oidio, la ruggine o la botrite, prima che siano visibili a occhio nudo.

Attualmente in fase avanzata di validazione, il progetto mira a ottenere una **riduzione del 20% nell'uso di pesticidi** e un **aumento della resa del 15%** nell'arco di 24 mesi (CORDIS, 2023). La sua attenzione alla sostenibilità e alla riduzione degli interventi chimici lo rende un modello fondamentale per la viticoltura di transizione ecologica.



Figura 29. Progetto AI-GRAPE

Saggezza 4.0

Un progetto spagnolo incentrato sulla creazione di un **sistema decisionale modulare e integrativo**, in grado di funzionare in vigneti con diversi livelli di digitalizzazione. Il sistema si distingue per:

- Includere **modelli di previsione idrica e nutrizionale**, anche in assenza di sensori diretti.
- Utilizzare algoritmi adatti alle **varietà autoctone** e alle condizioni locali.

- Integrare una logica di apprendimento continuo attraverso l'analisi dei dati storici delle campagne.

Questo sistema DSS fornisce una stima affidabile dello stato idrico e nutrizionale sulla base di dati minimi, avvalendosi di tecniche di interpolazione e di regole empiriche validate sul campo, rendendolo ideale per la viticoltura nelle zone rurali con scarse infrastrutture tecnologiche.



Figura 30. Presentazione dei risultati del progetto WANUGRAPE 4.0. Fonte: Inagea

5.5 Fattori essenziali di successo in un sistema di supporto decisionale (DSS)

Affinché un **sistema di supporto decisionale (DSS)** possa avere un impatto realmente trasformativo nel contesto viticolo, deve essere integrato in modo efficiente nella realtà agronomica, sociale e tecnica dell'azienda agricola. Di seguito sono riportati gli elementi chiave che ne determinano l'efficacia:

1. Qualità costante dei dati

Le prestazioni del sistema dipendono direttamente dall'**affidabilità e dalla coerenza dei dati** raccolti. Ciò comporta **una calibrazione regolare dei sensori**, **una verifica fisica** delle letture sul campo e l'implementazione di procedure automatiche per individuare ed eliminare valori anomali o anomalie (Ammoniaci et al., 2021). Senza dati accurati, le raccomandazioni possono risultare disallineate rispetto alla realtà, riducendo la fiducia degli utenti.

2. Modellizzazione territoriale specifica

Ogni azienda vitivinicola presenta **microsistemi unici**, definiti dal tipo di terreno, dai vitigni, dai portainnesti e dalle condizioni microclimatiche locali. Per massimizzare l'accuratezza, i modelli dovrebbero essere **personalizzati per ogni contesto**: calibrati a livello di ZME (Zona di Gestione Specifica), adattati ai

modelli fenologici locali e adeguati alla ciclicità stagionale (Matese & Di Gennaro, 2015).

3. Interfaccia intuitiva e facile da usare

L'effettiva adozione dei sistemi di supporto decisionale (DSS) dipende in gran parte dall'**esperienza utente (UX).** L'interfaccia deve offrire dashboard chiare, visualizzazioni interattive, accesso remoto da dispositivi mobili ed ergonomia sviluppata attraverso la **co-creazione con i viticoltori**. Progetti come VINTAGE o vite.net® hanno dimostrato che il miglioramento dell'usabilità può **ridurre i tempi di interpretazione dei dati fino al 40%** (CORDIS, 2021).

4. Compatibilità tecnologica

Un buon sistema di supporto decisionale (DSS) deve essere **tecnologicamente interoperabile**: compatibile con sensori di diversi fornitori, in grado di esportare mappe in formati GIS/VRT e di connettersi tramite protocolli standard quali LoRaWAN o NB-IoT per garantire la connettività anche nelle zone rurali (Ojha et al., 2015).

5. Diffusione su larga scala

Non tutte le aziende agricole sono in grado di sostenere un investimento tecnologico di grande entità in un'unica soluzione. Per questo motivo, i sistemi devono essere **modulari**, consentendo loro di partire da componenti di base a basso costo (sensori, componenti software) e di espandersi progressivamente (gestione dell'irrigazione, salute delle piante, raccolta). Questa strategia modulare è stata applicata con successo in sistemi quali VineSens, GrapeDSS o WANUGRAPE4.0.

6. Formazione continua

Il successo del DSS dipende dal **capitale umano**. È fondamentale offrire una **formazione pratica e continua**, che comprenda workshop, assistenza tecnica e risorse visive per l'interpretazione di mappe, curve di stress o allerte fenologiche. Ciò garantisce una corretta applicazione delle raccomandazioni e favorisce l'adozione della tecnologia (Bramley, 2009).

7. Impulso istituzionale

Infine, il sostegno offerto dalle politiche pubbliche e dalle certificazioni funge da **acceleratore dell'adozione**. I sussidi nazionali o europei, le certificazioni ecologiche e i requisiti obbligatori di tracciabilità hanno fortemente incentivato gli investimenti nei sistemi di sostegno decisionale (DSS), poiché consentono il recupero dei costi, l'accesso a mercati di maggior valore e il rispetto delle normative ambientali (Wolfert et al., 2017).

6. Sfide e opportunità della digitalizzazione nella viticoltura

6.1 Opportunità tecnologiche e agronomiche

L'integrazione delle tecnologie digitali nella gestione dei vigneti offre numerose opportunità per ottimizzare la produzione, aumentare la sostenibilità e migliorare la redditività. Queste soluzioni consentono un intervento più mirato e adeguato alle reali esigenze di ogni zona del vigneto, grazie a sistemi avanzati di raccolta ed elaborazione dei dati.

Redditività basata sulla mappatura aerea

L'impiego di droni dotati di sensori multispettrali ha dimostrato la propria efficacia nell'individuare aree con maggiore o minore vigore all'interno dello stesso appezzamento. In studi condotti nei vigneti italiani, l'uso sistematico di questi dispositivi ha permesso di individuare tempestivamente problemi fitosanitari e di differenziare la gestione in base allo sviluppo vegetativo. Ciò si è tradotto in un significativo miglioramento della redditività e in una riduzione dei fattori di produzione grazie alla realizzazione di interventi più mirati (Serena Sofia et al., 2025).

Ottimizzazione dell'uso dell'acqua

Le tecnologie di telerilevamento, abbinate a sensori di umidità del suolo e delle piante, si sono dimostrate strumenti efficaci per migliorare la gestione dell’irrigazione. Queste consentono di adeguare l’apporto idrico alle reali esigenze del vigneto, evitando sia lo stress idrico che l’eccesso di irrigazione, con un impatto positivo sulla qualità dell’uva e sulla sostenibilità della coltura (Wang et al., 2021). Il risparmio idrico senza perdita di resa è stato confermato in diverse regioni viticole del Mediterraneo, tra cui Castilla-La Mancha, Languedoc e Sicilia.

Tracciabilità digitale e valore aggiunto

Uno dei vantaggi più significativi della digitalizzazione è la possibilità di registrare ogni operazione effettuata nel vigneto, dalla piantagione alla vendemmia fino alla vinificazione. Questa documentazione digitale non solo facilita la gestione interna, ma consente anche di dimostrare la conformità alle normative in materia di ambiente, salute e qualità. La tracciabilità completa diventa così uno strumento di marketing, poiché offre trasparenza al consumatore finale e facilita l'ottenimento di certificazioni quali quelle relative alla produzione biologica, alla produzione integrata o alla denominazione di origine.

I sistemi che consentono di registrare digitalmente le pratiche agricole, monitorare le condizioni meteorologiche e documentare i trattamenti contribuiscono inoltre a migliorare l'immagine di sostenibilità dell'azienda vinicola. In un contesto in cui i consumatori sono sempre più attenti all'origine e

all'impatto ambientale dei prodotti, questo aspetto rappresenta un valore aggiunto strategico.

6.2 Sfide tecnologiche e operative

Sebbene la transizione digitale nel settore vitivinicolo offra infinite opportunità, essa pone anche notevoli sfide tecniche, economiche e sociali che devono essere affrontate per garantirne l'adozione su larga scala. Questa sezione individua i principali ostacoli che la digitalizzazione del vigneto deve superare.

Costi iniziali e di manutenzione elevati

L'adozione di tecnologie avanzate quali sensori di umidità, stazioni meteorologiche connesse, droni dotati di telecamere multispettrali, piattaforme di gestione dei dati agricoli (FMIS) e macchinari per l'irrorazione a dosaggio variabile comporta un investimento iniziale significativo. Gli studi condotti nell'ambito del progetto RDI Precision a Bordeaux (Boraud et al., 2022) indicano che il costo totale di un sistema completo di viticoltura di precisione può facilmente superare i 100.000 €, senza contare i costi associati alla formazione tecnica, alla manutenzione, alle licenze software o agli abbonamenti alle piattaforme digitali. Questa barriera economica ne limita l'accesso principalmente alle grandi aziende agricole o alle cooperative, costringendo le aziende agricole di piccole e medie dimensioni a optare per modelli di economia condivisa o servizi on-demand (SaaS).

Interoperabilità limitata tra i sistemi

Una delle sfide principali nell'ecosistema digitale agricolo è l'interoperabilità tra dispositivi e piattaforme diversi. Spesso i sensori da campo utilizzano protocolli diversi (LoRaWAN, NB-IoT, Zigbee), mentre i trattori e le macchine agricole funzionano con interfacce chiuse o standard proprietari. Questa mancanza di integrazione costringe a sviluppare soluzioni specifiche o ad acquistare soluzioni complete da un unico fornitore, il che aumenta i costi, genera dipendenza tecnologica e limita la flessibilità del sistema (Wolfert et al., 2017). La necessità di stabilire standard aperti e quadri di interoperabilità è fondamentale per progredire verso una digitalizzazione efficace e accessibile.

Gestione dei big data nel settore agricolo

L'intensa digitalizzazione del vigneto comporta la raccolta quotidiana di migliaia di dati provenienti da sensori, immagini satellitari, droni, stazioni meteorologiche e piattaforme di gestione. Questo accumulo di informazioni, se non gestito correttamente, può trasformarsi in un problema anziché in una soluzione. La sfida consiste nel garantire un'archiviazione sicura nel cloud, il

supporto per API esterne, il filtraggio dei dati utili e la possibilità di visualizzarli in tempo reale in modo comprensibile per i tecnici sul campo. Ciò richiede non solo un'infrastruttura di cloud computing, ma anche personale con competenze avanzate in materia di IT e scienza dei dati (Kamilaris et al., 2017).

Calibrazione locale e destagionalizzazione

Affinché i sensori e i modelli predittivi funzionino con precisione, è fondamentale eseguire calibrazioni specifiche per ogni appezzamento, varietà e microclima. Ad esempio, un modello di previsione della muffa addestrato a Bordeaux potrebbe non funzionare correttamente nel Priorat se non si adatta alla fenologia locale e alle condizioni della chioma. Questa necessità di calibrazione e validazione continue richiede campionamenti sul campo, analisi agronomiche, aggiustamenti di sensibilità e controllo di qualità dei dati anno dopo anno (Tisseyre et al., 2018).

Problemi di connettività nelle zone rurali

La mancanza di infrastrutture di telecomunicazione in molte regioni rurali rimane un ostacolo fondamentale all'adozione di soluzioni digitali. In alcune zone viticole della Spagna, del Portogallo o dell'Europa orientale, così come nei paesi in via di sviluppo, permangono ancora limitazioni nell'accesso alle reti mobili o a Internet ad alta velocità. Ciò impedisce l'uso continuativo di servizi basati sul cloud o l'integrazione in tempo reale di dispositivi IoT, costringendo all'installazione di soluzioni locali quali reti LoRaWAN o sistemi di archiviazione offline (Verdouw et al., 2021).

Privacy, governance e titolarità dei dati

Con la digitalizzazione dei vigneti, la quantità di dati generati si moltiplica, sollevando importanti questioni etiche e giuridiche relative alla loro gestione e proprietà. Molti agricoltori esprimono preoccupazione per l'uso non autorizzato dei propri dati da parte dei fornitori di tecnologia o delle piattaforme digitali. L'Unione Europea ha riconosciuto questo problema e, attraverso la Strategia europea sui dati, ha stabilito che i dati agricoli generati sul campo appartengono al produttore, richiedendo il rispetto del Regolamento generale sulla protezione dei dati (GDPR) e promuovendo normative specifiche per il settore agroalimentare (Commissione Europea, 2020).

6.3 Sfide umane e culturali

Il passaggio alla viticoltura digitale non comporta solo l'adozione di tecnologie avanzate, ma anche un profondo cambiamento nella mentalità, nella cultura organizzativa e nelle dinamiche sociali del settore agricolo. Le sfide umane e culturali sono spesso più complesse e persistenti di quelle puramente tecniche, poiché riguardano valori, credenze e abitudini radicati in generazioni

di lavoro in vigna. Di seguito vengono esaminati i principali ostacoli in questa dimensione fondamentale della trasformazione digitale.

1. Resistenza al cambiamento

La riluttanza ad adottare nuove tecnologie è uno dei fattori che più limita l'espansione della viticoltura di precisione. Nelle regioni viticole tradizionali come La Rioja (Spagna), la Valle della Loira (Francia) o la Borgogna, dove la conoscenza empirica e l'osservazione diretta del vigneto hanno storicamente costituito la base delle conoscenze agronomiche, molti viticoltori percepiscono gli strumenti digitali come superflui, eccessivamente complessi o addirittura invasivi nei confronti della loro autonomia professionale. Una ricerca condotta da DataIntelo (2023) e dall'Università di Montpellier mostra che oltre il 45% dei viticoltori di età superiore ai 55 anni ritiene che la digitalizzazione riduca il loro controllo sul processo produttivo e complichi le decisioni che in precedenza venivano prese "a occhio" o sulla base dell'esperienza diretta.

2. Il divario nelle competenze digitali

L'uso efficace di sensori, piattaforme GIS, dashboard, droni e modelli predittivi richiede una nuova serie di competenze che tradizionalmente non fanno parte del bagaglio degli operatori del settore vitivinicolo. Concetti quali NDVI, evapotraspirazione, regressione o apprendimento automatico, ad esempio, richiedono conoscenze di base in statistica, informatica e gestione dei dati. L'esistenza di questo divario di competenze è stata documentata dalla Commissione Europea, la quale rileva che oltre il 60% dei lavoratori rurali non possiede competenze digitali di base (Commissione Europea, 2020). Ciò costringe le aziende agricole a integrare nuovi profili tecnici o a formare i propri lavoratori, il che rappresenta un investimento aggiuntivo in termini di tempo e risorse. Alcune soluzioni efficaci sono state la creazione di associazioni o cooperative locali che raggruppano i vigneti e finanziano la formazione congiunta o l'assunzione condivisa di personale tecnico specializzato.

3. Trasformazione dell'organizzazione agraria

La digitalizzazione modifica radicalmente il flusso operativo di un'azienda vitivinicola. Non è più sufficiente svolgere le attività secondo il calendario agricolo tradizionale; ora è necessario coordinare gli interventi sul campo in base agli avvisi digitali, prendere decisioni sulla base di mappe di prescrizione, registrare ogni operazione su piattaforme mobili e adattare i protocolli agronomici alla variabilità all'interno degli appezzamenti. Questo cambiamento comporta una riprogettazione delle routine lavorative, una nuova distribuzione delle funzioni all'interno del team di lavoro, nonché una pianificazione più dinamica e sensibile ai dati. Secondo studi dell'Università di Padova (Zambon et al., 2019), questa transizione organizzativa richiede leadership agronomica,

pianificazione partecipativa e, soprattutto, il coinvolgimento dei responsabili tecnici in tutte le fasi del processo di digitalizzazione.

4. Necessità di una collaborazione tra le agenzie

La trasformazione digitale non può essere affrontata da soli. L'esperienza dimostra che la sua adozione è più efficace quando avviene in contesti collaborativi, quali cooperative, denominazioni di origine (DO), associazioni agricole o cluster tecnologici. Queste reti consentono la condivisione di sensori, conoscenze, strumenti e servizi tecnici, riducendo i costi e accelerando la curva di apprendimento. Progetti pilota collettivi, come quelli sviluppati nell'ambito di SmartAgriHubs o del cluster Vitinnova in Spagna, hanno dimostrato che la collaborazione facilita l'accesso alle tecnologie emergenti, favorisce la fiducia tra gli attori e genera una cultura dell'innovazione più aperta e proattiva (Wolfert et al., 2017).

In questo senso, è fondamentale anche l'esistenza di una buona governance locale che coordini queste collaborazioni, garantisca un accesso equo alle risorse e promuova attività di formazione tecnica adeguate alle reali esigenze dei viticoltori.

6.4 Considerazioni economiche e modelli di adozione

L'impiego delle tecnologie digitali nella viticoltura comporta importanti implicazioni finanziarie e strategiche. Di seguito sono descritte le principali considerazioni che influenzano la sua effettiva adozione:

Impatto sul ritorno sull'investimento (ROI)

Studi condotti da economisti agrari stimano che gli investimenti nelle tecnologie digitali si ammortizzino in soli **3-5 anni**, soprattutto nelle aziende agricole con più di 20 ettari o nelle cooperative che traggono vantaggio dalle economie di scala. Questo ritorno deriva dalla riduzione del consumo idrico (20-30%) e dell'uso di input chimici, nonché dall'accesso a mercati premium grazie alla differenziazione dei prodotti e a una migliore percezione della qualità (Serena Sofia et al., 2025; Farmonaut, 2024; Tey & Brindal, 2012).

Modelli SaaS e di servizi gestiti

Le piattaforme agricole vengono sempre più spesso offerte secondo il **modello SaaS (Software as a Service)**, che riunisce sensori, piattaforma digitale e assistenza tecnica in un unico abbonamento annuale. Questo approccio elimina la necessità di un elevato investimento iniziale, adegua il costo al numero di ettari o di punti di rilevamento e facilita l'adozione graduale della tecnologia (Saiwa, 2023; Wikipedia, 2024).

Sovvenzioni e certificazioni

Gli aiuti all'agricoltura – come quelli previsti dal Programma di sviluppo rurale (PSR) o dai fondi europei o nazionali – e le certificazioni di produzione biologica o integrata rappresentano un importante incentivo economico. Una parte dei costi della digitalizzazione può essere coperta grazie a queste linee di sostegno, motivando le cantine a partecipare a iniziative collaborative che offrono anche vantaggi in termini di reputazione e l'accesso a nicchie di mercato specializzate.

Introduzione graduale della tecnologia

Una strategia efficace per attuare queste soluzioni consiste nel procedere **per fasi**:

- **Fase 1: Installazione della stazione meteorologica e del sensore del suolo.**
- **Fase 2: Impiego di droni per la mappatura aerea.**
- **Fase 3: Adozione di macchinari VRT e di sistemi di irrigazione automatizzati.**

Questo approccio consente di valutare i risultati specifici in ogni fase, adeguare il budget in base all'impatto e ridurre i rischi finanziari, facilitando la scalabilità progressiva dell'investimento (Kent Downs, 2021).

6.5 Tendenze emergenti

Vengono individuate cinque tendenze chiave nello sviluppo tecnologico e agronomico dei vigneti digitali, con il relativo potenziale di integrazione nei sistemi di gestione viticola.

1. Robotizzazione incentrata sull'individuo

I progressi nel campo della robotica autonoma per compiti specifici come la potatura stanno avanzando rapidamente. Piattaforme robotiche come **Bumblebee** – progettata per la potatura di singoli ceppi – e **HyQReal** – un robot quadrupede – hanno dimostrato la fattibilità tecnica, raggiungendo una precisione dell'**87%** e una durata della potatura di **213 secondi per vite**. Questi dati provengono da lavori presentati in archivi accademici come arXiv e ResearchGate. Il mercato globale della robotizzazione nella viticoltura ha generato **234 milioni di dollari nel 2024**, con previsioni di raggiungere **690 milioni di dollari entro il 2033**, rappresentando un tasso di crescita annuale composto (CAGR) del 13% secondo DataIntelo (DataIntelo, 2024).

2. IA spiegabile e integrata

Il concetto di **Intelligenza Artificiale Spiegabile (XAI)** sta prendendo piede su piattaforme come **AI-GRAPE,** dove i modelli non solo emettono allerte sui parassiti con cinque giorni di anticipo, ma consentono anche la verifica umana di tali allerte prima di applicare i trattamenti. È stato dimostrato che questa interfaccia ibrida riduce l'uso di pesticidi di circa **il 20%,** evitando falsi allarmi e ottimizzando l'applicazione dei prodotti (CORDIS, 2023).

3. Blockchain e tracciabilità trasparente

La tecnologia blockchain offre l'infrastruttura necessaria per registrare ogni intervento in vigna – irrigazione, trattamenti, date di vendemmia, macchinari utilizzati – in modo inalterabile e verificabile. Questo livello di tracciabilità rafforza la credibilità del prodotto e sostiene i prezzi nei mercati premium, biologici o a denominazione di origine (DO), consentendo a produttori e consumatori di seguire l'intero percorso dalla vite alla bottiglia (Kamilaris, 2019).

4. Hardware autonomo ed efficiente dal punto di vista energetico

La durata e l'autonomia dei dispositivi sul campo sono fondamentali per un sistema sostenibile. I sensori dotati di **energia solare**, i nodi LoRa autoalimentati e i dispositivi integrati riducono notevolmente i costi di manutenzione e ricarica. Questi dispositivi, ottimizzati per funzionare per diversi anni senza interventi, garantiscono una raccolta continua dei dati in ambienti isolati o con scarse infrastrutture (Ojha et al., 2015).

5. Standard universali per i dati e API aperte

La mancanza di interoperabilità rimane un ostacolo all'integrazione delle tecnologie agricole. L'adozione di standard emergenti quali **ISO SmartAgri o il formato di metadati** FSIS (Farm Sensor Interoperability Standard) consentirà a sensori, piattaforme e macchinari di scambiare dati in modo fluido e scalabile. La disponibilità di API aperte faciliterà lo sviluppo di un'**architettura agricola modulare**, con una minore dipendenza dai fornitori e una maggiore flessibilità per gli utenti finali (Wolfert et al., 2017).

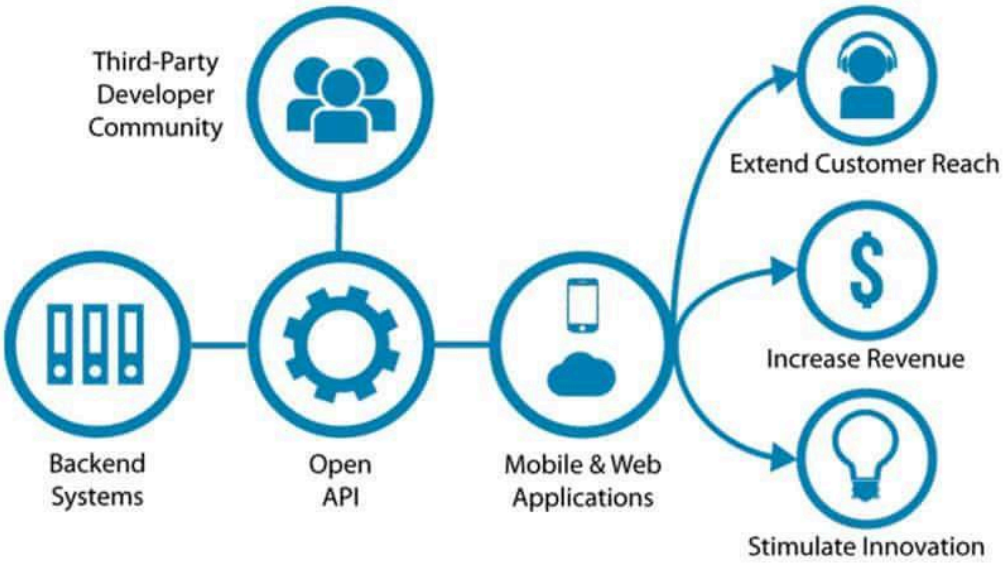


Figura 31. Struttura di un'API. Fonte: Maplink

7. Valutazione strategica dell'adozione delle tecnologie

L'adozione delle tecnologie digitali nella viticoltura va ben oltre un semplice aggiornamento strumentale. Influisce sulla struttura dei costi, sull'organizzazione quotidiana del lavoro, sulla gestione delle conoscenze, sulla tracciabilità e, sempre più, sul modo in cui le aziende agricole interagiscono con i fornitori di tecnologia e con i requisiti normativi. Per questo motivo, le decisioni di investimento non dovrebbero essere guidate esclusivamente dalla disponibilità degli strumenti o dalle tendenze di mercato, ma da una valutazione strategica che metta in relazione la tecnologia con un'esigenza reale, la capacità dell'azienda agricola di utilizzarla e il ritorno atteso.

I dati istituzionali e le analisi comparative concordano sul fatto che le tecnologie digitali possano migliorare la produttività, la sostenibilità e la resilienza, ma il loro impatto dipende da una serie di condizioni favorevoli: connettività, capitale umano, servizi di consulenza tecnica, accesso ai finanziamenti e interoperabilità tra le soluzioni (OCSE, 2022; Commissione europea, Centro comune di ricerca [JRC], 2025). In breve, la tecnologia non “funziona” da sola: crea valore quando viene integrata nelle routine di lavoro e tradotta in decisioni agronomiche e aziendali concrete (OCSE, 2022).

Per garantire che la valutazione sia concreta, è utile strutturare la decisione attorno a quattro domande guida. La prima riguarda il **valore**: quale beneficio specifico si intende ottenere (efficienza idrica, qualità, coordinamento della raccolta, tracciabilità, riduzione dei rischi climatici). La seconda riguarda il **costo totale**: non solo il prezzo di acquisto, ma anche licenze, manutenzione, sostituzioni, formazione e il tempo necessario per gestire i dati. La terza riguarda le **capacità**: chi utilizzerà il sistema, chi interpreterà i risultati, chi si occuperà della manutenzione delle attrezzature e quale supporto esterno sarà necessario. La quarta riguarda il **rischio**: dipendenza dal fornitore, obsolescenza, limitazioni di connettività e governance dei dati (OCSE, 2022; McFadden et al., 2022).

Tabella 1. Quadro di valutazione pratica (le «4 domande»)

Dimensione	Domanda chiave	Cosa è importante chiarire prima di investire
Valore	Quali miglioramenti concreti intendiamo ottenere?	Indicatori operativi (ad esempio: ridurre l'irrigazione, uniformare la maturazione, rafforzare la tracciabilità)
Costo totale	Qual è il costo effettivo su un periodo di 3-5 anni?	Acquisto + installazione + licenze + manutenzione + sostituzioni + tempo dedicato alla gestione dei dati

Dimensione	Domanda chiave	Cosa è importante chiarire prima di investire
Funzionalità	Chi lo utilizza e chi se ne occupa?	Ruoli, formazione, procedure, assistenza tecnica, continuità durante l'alta stagione
Rischio	Quali dipendenze introduce?	Dipendenza dal fornitore, interoperabilità, diritti sui dati, connettività, sicurezza informatica, obsolescenza

7.1. Vantaggi e svantaggi delle tecnologie digitali

Ogni innovazione crea opportunità, ma introduce anche nuove dipendenze e complessità. Comprendere questa dualità è essenziale per evitare investimenti guidati da aspettative irrealistiche o da pressioni commerciali. In agricoltura – e in particolare nelle colture di alto valore come l'uva – il beneficio più consistente si manifesta quando le informazioni digitali consentono il passaggio da decisioni "medianti" ("un appezzamento, una regola") a decisioni fondate sulla variabilità reale: diversi tipi di suolo, microclimi, modelli di vigore o condizioni idriche all'interno dello stesso appezzamento (OCSE, 2022; JRC, 2025).

Uno dei vantaggi più significativi è il miglioramento dei processi decisionali e della gestione dei rischi. Il telerilevamento (via satellite o con UAV) e le mappe di vigore o stress aiutano a identificare l'eterogeneità all'interno delle parcelle, a monitorarne l'evoluzione e a orientare gli interventi (irrigazione, raccolta selettiva, definizione delle priorità operative). In viticoltura, la letteratura tecnica conferma che ogni piattaforma offre un diverso compromesso tra risoluzione spaziale, frequenza di rivisitazione e costo; la scelta dell'opzione giusta dipende dagli obiettivi e dalle dimensioni dell'azienda agricola (Matese et al., 2015). Quando i dati climatici, pedologici e vegetali sono integrati nei sistemi di supporto decisionale, le aziende agricole possono anticipare meglio "quando agire" e "dove agire", riducendo l'incertezza operativa. L'OCSE sottolinea che il valore della digitalizzazione aumenta quando i dati si trasformano in decisioni attuabili, piuttosto che moltiplicare gli indicatori senza un chiaro quadro interpretativo (OCSE, 2022).

Un altro vantaggio comune è una maggiore efficienza nell'uso delle risorse (acqua, energia e fattori di produzione), con una sfumatura fondamentale: i risparmi tendono a concretizzarsi quando il monitoraggio è collegato a criteri agronomici e a chiari protocolli di intervento. Il monitoraggio da solo raramente produce risultati; sono invece le decisioni e le procedure a farlo (OCSE, 2022). La digitalizzazione spesso rafforza anche la tracciabilità e la conformità, consentendo registrazioni coerenti, audit più semplici e prove più solide per le certificazioni, fornendo non solo valore agronomico, ma anche valore commerciale e normativo (OCSE, 2022).

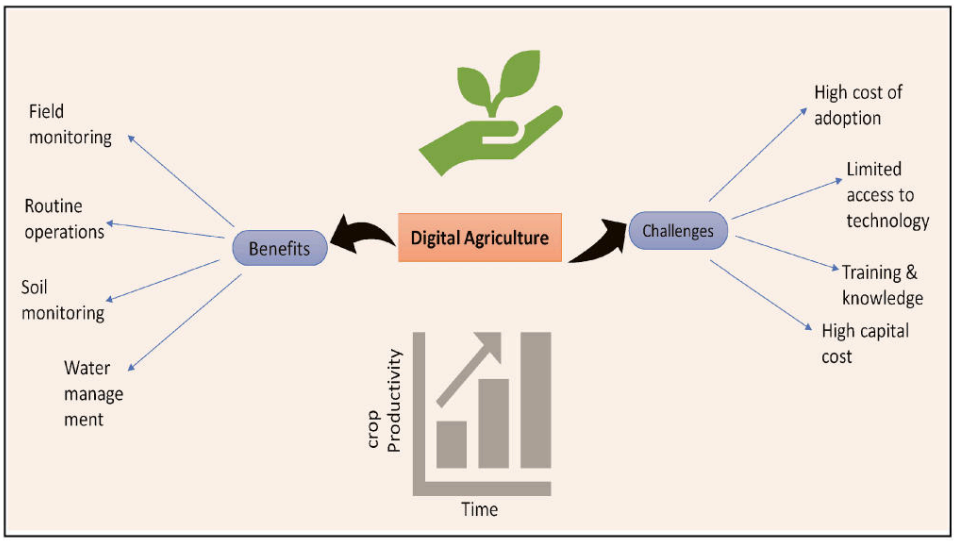


Figura 32. Rappresentazione schematica dei vantaggi e delle sfide della digitalizzazione in agricoltura. Fonte: Seeding a Sustainable Future: Navigating the Digital Horizon of Smart Agriculture

Per quanto riguarda i limiti, le analisi europee evidenziano ripetutamente una serie di ostacoli strutturali: connettività rurale insufficiente, competenze digitali disomogenee, costi iniziali e ricorrenti, nonché una frammentazione tecnologica che rende difficile l'integrazione dei dati tra le diverse piattaforme (JRC, 2025). La governance dei dati aggiunge un ulteriore livello strategico: chi possiede i dati, come vengono utilizzati, cosa succede ai set di dati storici e a quali condizioni i dati vengono condivisi o monetizzati. L'OCSE sottolinea che la fiducia nella digitalizzazione agricola è un requisito per un'adozione sostenibile, in particolare per le aziende agricole più piccole preoccupate di perdere il controllo delle informazioni strategiche (McFadden et al., 2022).

Table 2. Advantages and limitations by technology type.

Tecnologia	Vantaggi più frequenti	Limiti tipici
Stazione meteorologica / modelli di rischio	Previsione operativa; migliore pianificazione	Sono necessarie soglie e procedure di risposta; è richiesta la connettività
Sensori per il suolo e le piante	Regolazione precisa dell'irrigazione; monitoraggio dello stress	Installazione e taratura; manutenzione; capacità di interpretazione
Telerilevamento (satellite/UAV)	Mappe di vigore; suddivisione in zone; raccolta selettiva	Compromessi tra costo, frequenza e risoluzione; è necessaria una verifica sul campo

Tecnologia	Vantaggi più frequenti	Limiti tipici
DSS (sistema di supporto decisionale)	Trasforma i dati in consigli; riduce l'incertezza	Dipende dalla qualità dei dati; se non si comprendono bene, possono sembrare una "scatola nera"
Registro digitale / tracciabilità	Verifiche più semplici; documentazione ordinata; conformità	Richiede una registrazione meticolosa e un adeguamento costante

7.2. Costi di implementazione e manutenzione

Dal punto di vista del produttore, la domanda decisiva è spesso di natura economica: «Ne trarrò un vantaggio economico?». Il dibattito pubblico tende a mettere in risalto i benefici, ma i dati comparativi dimostrano che molti investimenti digitali non producono i risultati attesi perché le valutazioni sottovalutano i costi ricorrenti, il tempo dedicato alla gestione e gli adeguamenti organizzativi necessari per rendere operativi gli strumenti (OCSE, 2022; JRC, 2025). Nella viticoltura, dove i carichi di lavoro sono stagionali e l'incertezza climatica è elevata, questo aspetto è particolarmente critico.

Il costo reale di un sistema digitale raramente si limita al prezzo di acquisto. Oltre all'acquisto, le aziende agricole devono sostenere costi relativi all'installazione, alla calibrazione, alla connettività, alla formazione, alla manutenzione, alla sostituzione dei componenti, agli abbonamenti/alle licenze e al tempo necessario per raccogliere, convalidare e interpretare i dati. Nel loro insieme, questi elementi costituiscono il costo totale di proprietà (TCO), fondamentale per valutare la redditività su un orizzonte temporale realistico di 3-5 anni (OCSE, 2022). Anche l'ecosistema digitale si evolve rapidamente: aggiornamenti, modifiche al software, nuovi requisiti di sicurezza informatica e problemi di compatibilità possono aumentare i costi e ridurre la prevedibilità (McFadden et al., 2022).

Un aspetto spesso sottovalutato è il costo organizzativo. Se l'azienda agricola non ridefinisce chi controlla i dati, chi prende le decisioni, quando intervenire e come lo strumento si inserisce nelle routine quotidiane, la tecnologia rischia di essere sottoutilizzata. In pratica, parte di questo costo è costituito dal «costo di apprendimento»: il tempo investito per padroneggiare lo strumento, sviluppare protocolli, calibrare le soglie e verificare i risultati rispetto alla realtà sul campo.

Tabella 3. Struttura del costo totale di proprietà (TCO) nelle soluzioni digitali per l'agricoltura.

Blocco dei costi	Cosa comprende	Un aspetto spesso sottovalutato
Investimento iniziale	Dispositivi, installazione, taratura	«Mi interessa solo il prezzo del sensore o della piattaforma»
Operazioni	Abbonamenti, dati mobili, energia, materiali di consumo	Piccole spese ricorrenti che si accumulano

Blocco dei costi	Cosa comprende	Un aspetto spesso sottovalutato
Manutenzione	Controlli, sostituzioni, riparazioni	Dipendenza dai fornitori e costi legati ai tempi di inattività
Integrazione	Sistemi di interconnessione, esportazioni, flussi di dati	Interoperabilità tra marchi/piattaforme
Formazione	Aggiornamento iniziale e continuo delle competenze	Il personale impara «sul campo», sotto pressione
Tempo dedicato alla gestione dei dati	Verifica degli avvisi, convalida dei dati, registrazione	Mancanza di tempo nei periodi di picco di lavoro

7.3 Cosa valutare prima di investire nella tecnologia digitale

Una decisione di investimento solida spesso parte da una semplice domanda: quale problema specifico sto cercando di risolvere? I dati internazionali dimostrano costantemente che le implementazioni di successo partono dalla diagnosi produttiva e organizzativa piuttosto che dallo strumento; quando la tecnologia viene acquistata senza un chiaro obiettivo operativo, aumenta il rischio che venga abbandonata (OCSE, 2022; JRC, 2025).

Nella viticoltura, gli obiettivi si raggruppano solitamente in quattro categorie. In primo luogo, gli obiettivi di efficienza (acqua, energia, fattori di produzione). In secondo luogo, gli obiettivi di qualità (suddivisione in zone, vendemmia selettiva, uniformità di maturazione). In terzo luogo, gli obiettivi di conformità e tracciabilità. In quarto luogo, gli obiettivi di gestione del rischio (clima, malattie, incertezza operativa). È importante chiarire quale obiettivo sia predominante, poiché ciascuno richiede tecnologie e livelli di complessità diversi. Una stazione meteorologica e gli avvisi possono essere decisivi per la gestione del rischio di malattie; le reti di sensori e la mappatura possono essere più giustificate nelle strategie premium; e un registro digitale può risolvere gran parte degli oneri di conformità.

Una volta definito l'obiettivo, un secondo criterio è rappresentato dall'effettiva variabilità del vigneto. L'agricoltura di precisione tende a generare maggior valore laddove l'eterogeneità all'interno dei singoli appezzamenti è significativa; nei vigneti altamente uniformi, altre motivazioni (conformità normativa, coordinamento logistico, semplificazione amministrativa) possono prevalere nell'analisi di fattibilità (OCSE, 2022). Il terzo criterio è di natura umana: competenze e tempo a disposizione. L'UE sottolinea che la formazione continua e i servizi di consulenza sono fondamentali per sostenere la digitalizzazione; senza supporto, anche soluzioni ben scelte possono fallire perché non entrano mai a far parte del lavoro di routine (Rete PAC dell'UE, 2024).

Tabella 4. Matrice di proporzionalità: «fabbisogno–capacità–soluzione»

Profilo dell'azienda agricola	Bisogno primario	Capacità interna	Approccio digitale proporzionale
Piccolo/familiare	Avvisi e pianificazione; semplificazione della registrazione dei dati	Limitato	Soluzioni di base + servizi esterni mirati
Di fascia media, orientato alla qualità	Zonizzazione, raccolta selettiva, tracciabilità	Moderato	Sensori/telerilevamento + sistemi di supporto decisionale (DSS) con assistenza tecnica
Cooperativa / numerosi agricoltori	Coordinamento, uniformità, tracciabilità	Variabile	Piattaforme condivise + formazione + protocolli comuni
Su larga scala/intensivo	Ottimizzazione su larga scala e logistica	Alto	Integrazione dei dati + automazione progressiva

7.4 Modelli di adozione graduale delle tecnologie digitali

La trasformazione digitale raramente avviene in un colpo solo. I dati comparativi dimostrano che i processi più solidi procedono in modo graduale, accumulando esperienza, rafforzando la fiducia interna e valutando i risultati prima di passare a una scala più ampia (OCSE, 2022). Questo approccio è particolarmente rilevante nel settore vitivinicolo, dove l'incertezza climatica e la variabilità dei redditi rendono razionale la minimizzazione dei rischi.

In pratica, molti vigneti iniziano con un «livello base» di digitalizzazione: registrazione dei dati, informazioni meteorologiche e avvisi. Successivamente aggiungono il monitoraggio (sensori, mappe) e infine passano a sistemi integrati (DSS, automazione parziale). L’adozione graduale favorisce lo sviluppo delle capacità parallelamente all’aumento della complessità. Inoltre, i modelli basati sui servizi (voli con droni o analisi a pagamento) e i modelli cooperativi (infrastrutture condivise e capacità di consulenza) possono ridurre le barriere economiche e accelerare l'apprendimento collettivo, in linea con l'enfasi europea sulla formazione e sulle reti di innovazione agricola (Rete PAC dell'UE, 2024).

Tabella 5. Percorsi di adozione progressiva e in quali casi tendono a funzionare meglio

Percorso	Descrizione	Quando è più opportuno
Progetto pilota in fase limitata	Prova in un unico blocco/stagione	Quando il ROI o l'usabilità sono incerti
Servizi esterni	Pagamento in base all'utilizzo (drone, analisi, consulenza)	Aziende agricole di piccole e medie dimensioni con una bassa frequenza di utilizzo
Cooperativo/condiviso	Infrastruttura condivisa e assistenza	Regioni con molti coltivatori e risorse individuali limitate
Adozione graduale	Base → corso integrato della durata di 2–4 anni	Quando la sostenibilità a lungo termine e l'apprendimento sono priorità

Bibliografia

- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). *Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements*. FAO Irrigation and Drainage Paper 56.

- Ammoniaci, M., Kartsiotis, S.-P., Perria, R., & Storchi, P. (2021). State of the art of monitoring technologies and data processing for precision viticulture. *Agriculture, 11*(3), 201. https://doi.org/10.3390/agriculture11030201

- Aqeel-your-Rehman, Abbasi, A. Z., Islam, N., & Shaikh, Z. A. (2014). A review of wireless sensors and networks' applications in agriculture. *Computer Standards & Interfaces, 36*(2), 263–270. https://doi.org/10.1016/j.csi.2011.03.001

- Ayaz, M., Shehzad, N., Ahmad, I., & Sharif, K. (2019). Automated plant disease detection using machine learning. *Big Data and Cognitive Computing, 3*(2), 26. https://doi.org/10.3390/bdcc3020026

- Basile, K., et al. (2023). Deep learning phenology models for satellite-based grapevine monitoring. *Ives OpenScience*.

- Bindi, M., & Olesen, J. E. (2011). The responses of agriculture in Europe to climate change. *Regional Environmental Change, 11*(1), S151–S158. https://doi.org/10.1007/s10113-010-0173-x

- Bongiovanni, R., & Lowenberg-DeBoer, J. (2004). Precision agriculture and sustainability. *Precision Agriculture, 5*(4), 359–387. https://doi.org/10.1023/B:PRAG.0000040806.39604.aa

- Bramley, R. G. V. (2009). Lessons from nearly 20 years of precision viticulture research in Australia. *Australian Journal of Grape and Wine Research, 15*(1), 131–139. https://doi.org/10.1111/j.1755-0238.2009.00049.x

- Bramley, R. G. V., & Hamilton, R. P. (2007). Understanding variability in winegrape production systems. *Australian Journal of Grape and Wine Research, 13*(1), 32–45. https://doi.org/10.1111/j.1755-0238.2006.tb00039.x

- Broome, J. C., English, J. T., & Marois, J. J. (1995). Development of an infection model for Botrytis bunch rot of grapes based on temperature and duration of wetness. *Phytopathology, 85*(1), 97–102. https://doi.org/10.1094/Phyto-85-97

- Burrell, J., Brooke, T., & Beckwith, R. (2004). Vineyard computing: Sensor networks in agricultural production. *IEEE Pervasive Computing, 3*(1), 38–45. https://doi.org/10.1109/MPRV.2004.1269130

- Calonnec, A., Cartolaro, P., & Dubourdieu, D. (2008). Modelling disease development and assessing the impact of disease control strategies on powdery mildew in grapevine. *Plant Pathology, 57*(3), 493–508.

- Carmona, J. A., Tardaguila, J., & Diago, M. P. (2021). Predicting grapevine yield and grape quality with machine learning and UAV imagery. *Computers and Electronics in Agriculture, 187*, 106269. https://doi.org/10.1016/j.compag.2021.106269

- Castro, F., Sosa, A., & Carballo, J. (2021). Variable rate fertilization in viticulture using drone-based nitrogen mapping: A case study in Mendoza, Argentina. *Precision Agriculture, 22*(4), 973–990. https://doi.org/10.1007/s11119-020-09750-1

- Chuine, I., Bonhomme, M., Legave, J. M., García de Cortázar-Atauri, I., Charrier, G., & Lacointe, A. (2013). Can phenological models predict tree phenology accurately in the future? The unrevealed hurdle of endodormancy break. *Global Change Biology, 22*(10), 3444–3460.

- CORDIS. (2020). VINTAGE – Precision viticulture project summary. *EU Research Results*. https://cordis.europa.eu/project/id/226783

- CORDIS. (2023). AI-GRAPE: Artificial Intelligence-driven grapevine health monitoring. *EU H2020 Projects Database*. https://cordis.europa.eu/project/id/101060840

- Delmotte, F., Corio-Costet, M. F., & Delière, L. (2020). Integrated disease management and reduction of pesticide use in viticulture: Evaluation of decision support systems. *Science of the Total Environment, 731*, 139269. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139269

- Di Gennaro, S. F., Matese, A., & Vaccari, F. P. (2020). Advanced remote sensing and visualization techniques in precision viticulture. *Agronomy, 10*(7), 967. https://doi.org/10.3390/agronomy10070967

- Elsherbiny, O.; Elaraby, A.; Alahmadi, M.; Hamdan, M.; Gao, J.: "Rapid Grapevine Health Diagnosis Based on Digital Imaging and Deep Learning", Plants (Basel) ; 2024, 13 (1): 135. doi: 10.3390/plants13010135

- Fernandes, J. P., Silva, L., Gomes, M., & Oliveira, T. (2022). Yield prediction in viticulture using Sentinel-2 time series and LSTM neural

networks: A case study in Alto Douro Wine Region. *Remote Sensing, 14*(18), 4591. https://doi.org/10.3390/rs14184591

- Finger, R., Swinton, S. M., El Benni, N., & Walter, A. (2019). Precision farming at the nexus of agricultural production and the environment. *Annual Review of Resource Economics, 11*, 313–335. https://doi.org/10.1146/annurev-resource-100518-093929

- García, M., Hernández, L., & Santesteban, L. G. (2022). Digital twins in viticulture: Integration of real-time data for dynamic modeling. *Agronomy, 12*(4),856.

- Gubler, W. D., Rademacher, M. R., & Vasquez, S. J. (1999). Control of powdery mildew using the UC Davis Powdery Mildew Risk Index. *California Agriculture, 53*(1), 14–19. https://doi.org/10.3733/ca.v053n01p14

- Huang, Y., Wang, H., & Fuentes, S. (2022). Deep learning-based identification of foliar diseases in vineyards using UAV multispectral imaging. *Remote Sensing, 14*(12), 2803. https://doi.org/10.3390/rs14122803

- Kamilaris, A., Kartakoullis, A., & Prenafeta-Boldú, F. X. (2019). Blockchain in agriculture: A systematic review. *Agronomy, 9*(10), 18. https://doi.org/10.3390/agronomy9100661

- Kerkech, M., Hafiane, A., & Canals, R. (2020). Deep learning approach with colorimetric spaces and vegetation indices for disease detection in grapevines. *Computers and Electronics in Agriculture, 175*, 105528. https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105528

- Martínez-Casasnovas, J. A., Escolà, A., & Ramos, M. C. (2012). Site-specific management zones in precision viticulture: A review. *Precision Agriculture, 13*(5), 622–638. https://doi.org/10.1007/s11119-012-9272-6

- Matese, A., & Di Gennaro, n.d. (2015). Technology in precision viticulture: A state of the art review. *International Journal of Wine Research, 7*, 69–81. https://doi.org/10.2147/IJWR.S69405

- Ojha, T., Misra, S., & Raghuwanshi, N. S. (2015). Wireless sensor networks for agriculture: The state of the art in practice and future challenges. *Computers and Electronics in Agriculture, 118*, 66–84. https://doi.org/10.1016/j.compag.2015.08.011

- Rossi, V., Caffi, T., & Salinari, F. (2012). Helping farmers face the increasing complexity of decision-making for crop protection. Phytopathologia Mediterranea, 51, 457–479. https://doi.org/10.14601/Phytopathol_Mediterr-11038

- Rouse, J. W., Haas, R. H., Schell, J. A., & Deering, D. W. (1974). Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. *NASA Special Publication, 351*, 309.

- Santesteban, L. G., et al. (2017). Vineyard variability and digital viticulture: Current status and future perspectives. *Frontiers in Plant Science, 8*, 660. https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00660

- Tisseyre, B., Ojeda, H., & Taylor, J. A. (2011). New technologies and methodologies for site-specific viticulture. *OENO One, 45*(3), 123–134. https://doi.org/10.20870/oeno-one.2011.45.3.1507

- Ünal, Z. (2020). Smart farming becomes even smarter with deep learning—A bibliographical analysis. *IEEE Access, 8,* 105587–105609. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3000175

- Verdouw, C. N., Tekinerdogan, B., Beulens, A. J. M., & Wolfert, J. (2021). Digital twins in smart farming. *Agricultural Systems, 189*, 103046. https://doi.org/10.1016/j.agsy.2020.103046

- VineSens. (2020). Smart vineyard monitoring system. https://www.vine-sens.com

- Wolfert, S., Ge, L., Verdouw, C., & Bogaardt, M. J. (2017). Big Data in Smart Farming – A review. *Agricultural Systems, 153*, 69–80. https://doi.org/10.1016/j.agsy.2017.01.023

ALLEGATO I – Domande di verifica

Blocco 1: Introduzione alla viticoltura di precisione

1. Spiega con parole tue cosa si intende per «variabilità all'interno della parcella» e perché ignorarla comporta una gestione inefficiente e meno sostenibile.

2. Confronta due vantaggi ambientali e due vantaggi produttivi derivanti dalla gestione delle Zone di Gestione Specifiche (SEZ).

3. Descrivere un flusso di lavoro essenziale (in 5 fasi) per passare dall'osservazione del vigneto alla decisione relativa all'irrigazione settoriale.

4. Scegli un fattore (terreno, clima, pendenza o esposizione al sole) e spiega in che modo può influire in modo diverso sul vigore, sulla resa e sulla qualità all'interno dello stesso appezzamento.

5. Caso breve: un'azienda vinicola dichiara un risparmio idrico del 30-40% dopo aver suddiviso l'irrigazione in settori. Quali dati sarebbero indispensabili per giustificare questo risultato ed evitare distorsioni?

Blocco 2: Visualizzazione dei dati e modelli predittivi per la gestione dei vigneti

6. Distinguere tra "dati", "informazioni" e "conoscenza" utilizzando l'esempio dell'NDVI, dell'umidità del suolo e della decisione relativa al raccolto.

7. Spiegare i vantaggi e i limiti dell'uso delle reti neurali per prevedere le prestazioni rispetto a metodi più semplici (ad esempio, la regressione lineare).

8. Cosa si intende per «convalida» e «generalizzazione» di un modello in viticoltura? Proponete un protocollo di base per la validazione incrociata tra campagne.

9. Descrivi un caso in cui una visualizzazione "apparentemente chiara" porta a una decisione sbagliata. Come la eviteresti?

Blocco 3: Tecnologie di monitoraggio intelligente nel vigneto

10. Confronto tra sensori del suolo e sensori fogliari/della linfa: cosa misurano, quando utilizzarli e in che modo si integrano a vicenda.

11. Spiegare in che modo una rete di sensori wireless (WSN) ben progettata (LoRaWAN/Zigbee) aiuta a prevedere il gelo o lo stress idrico.

12. Distinguere tra l'uso dei satelliti (copertura, frequenza) e dei droni (risoluzione, puntualità) per la gestione all'interno dei singoli appezzamenti.

13. Quali errori di interoperabilità si verificano solitamente tra i sistemi GIS e i macchinari? Proporre delle soluzioni.

14. Confrontare l'impatto ambientale previsto della VRT rispetto alla gestione uniforme per quanto riguarda l'acqua, l'azoto e i fungicidi.

Blocco 4: Sistemi di supporto decisionale (DSS)

15. Descrivere il percorso di un sistema decisionale a supporto (DSS) per un vigneto, dalla raccolta dei dati all'attuazione delle azioni (6 fasi).

16. Elaborare un caso d'uso in cui il DSS raccomandi l'irrigazione nella zona ZME-3: quali dati lo attivano e quali condizioni lo inibiscono?

17. Come introdurresti un processo di apprendimento continuo nel DSS al termine di ogni campagna? Indica almeno 3 parametri che modificheresti.

18. Progettare una schermata per dispositivi mobili destinata agli operatori sul campo: cosa visualizzare, quali notifiche, quali azioni rapide.

Blocco 5: Sfide, persone e modelli di adozione

19. Individuare tre ostacoli di natura umana o culturale alla digitalizzazione e illustrare come affrontarli attraverso la formazione e la leadership.

20. Confronto tra l'acquisto di apparecchiature e i servizi SaaS/gestiti: rischi, costi ricorrenti e flessibilità.

21. Come distribuirebbe gli investimenti tra stazioni meteorologiche, sensori del suolo, droni e veicoli teleguidati (VRT) in un'azienda agricola con un budget limitato?

22. Presentare un caso di economia collaborativa (condivisione di droni/analisi dei dati nell'ambito dell'OD o di una cooperativa): regole e vantaggi.

ALLEGATO II – Attività didattica: "Scegliere le tecnologie giuste per due aziende vinicole con problemi simili"

Lo scopo di questa attività è aiutarti a riflettere in modo strategico sull'adozione delle tecnologie digitali nella viticoltura. Analizzerai due aziende vinicole che affrontano sfide agronomiche simili, ma che differiscono in modo significativo per dimensioni, capacità finanziaria e risorse interne.

Il tuo compito è quello di proporre soluzioni tecnologiche realistiche e adeguate per ogni azienda vinicola.

Entrambe le cantine si trovano ad affrontare i seguenti problemi ricorrenti:

- Vigore disomogeneo delle viti all'interno del vigneto.
- Stress idrico durante le ondate di calore estive.
- Focolai di malattie (in particolare l'oidio) dopo notti umide.
- Maturazione irregolare, che comporta difficoltà logistiche durante la raccolta.
- La necessità di ridurre i fattori di produzione (acqua, azoto, fungicidi) senza compromettere la resa o la qualità.

Il problema non è la differenza tra i due casi, bensì la loro capacità di investire nella tecnologia e di gestirla.

Azienda vinicola A – Di grandi dimensioni e solidissima dal punto di vista finanziario

- 220 ettari distribuiti su più siti.
- Responsabile tecnico e responsabile dei vigneti a tempo pieno.
- Accesso all'assistenza informatica (interna o esternalizzata).
- Elevata capacità finanziaria.
- Sfida principale: coordinamento e coerenza tra le diverse trame.

Azienda vinicola B – Piccola e con risorse limitate

- 18 ettari, per lo più contigui.
- A conduzione familiare, con 1-2 lavoratori stagionali.
- Tempo a disposizione per le pratiche amministrative limitato.
- Capacità finanziaria limitata.
- Sfida principale: gestione del tempo e strumenti semplici per il processo decisionale.

Puoi scegliere tra le seguenti opzioni tecnologiche:

1. Quaderno di campo digitale / App per la tracciabilità
2. Stazione meteorologica con notifiche sul cellulare
3. Mappe satellitari della vitalità (servizio di monitoraggio di base)
4. Servizio di monitoraggio con droni (voli in outsourcing)
5. Sonde per l'umidità del suolo
6. Supporto per la programmazione dell'irrigazione (app o consulenza)
7. Sistema di supporto decisionale (DSS) per l'irrigazione o le malattie
8. Attrezzature per l'applicazione a dosaggio variabile
9. Strumento di comunicazione e pianificazione per il team
10. Contratto di consulenza agronomica esterna

Non è necessario ricorrere a calcoli tecnici. Concentrati sul pensiero strategico, sulla proporzionalità e sulla fattibilità.

Compiti

1. Selezione della tecnologia (attività principale)

Per ogni azienda vinicola:

- **Scegliete tre tecnologie da implementare nel corso del primo anno.**
- **Motiva chiaramente la tua scelta.**

La tua motivazione dovrebbe spiegare:

- **Perché questa tecnologia è adatta alle dimensioni e alle possibilità economiche dell'azienda vinicola.**
- **In che modo affronta i problemi agronomici comuni.**
- **Perché è realistico realizzarlo nell'arco di una sola stagione di crescita.**
- **Perché non hai scelto alternative più complesse o costose?**

2. Definire quattro indicatori chiave di prestazione (KPI) per ciascuna cantina

Per ogni azienda vinicola, definire quattro indicatori chiave di prestazione (KPI) che possano essere misurati alla fine della stagione.

Gli indicatori chiave di prestazione (KPI) dovrebbero essere:

- **Semplice**
- **Misurabile**

- Realistico per un anno

Esempi (puoi adattarli o crearne di tuoi):

- % di riduzione del consumo idrico per l'irrigazione
- Meno applicazioni di fungicidi
- Maggiore uniformità di maturazione
- Meno interventi tardivi
- Riduzione dei tempi amministrativi
- Migliore coordinamento delle operazioni di raccolta

Spiega brevemente perché ogni KPI è rilevante.

3. Descrivere il processo «Dati → Decisione → Azione»

Per ogni azienda vinicola, descrivere a parole:

- Un processo decisionale in materia di irrigazione
- Un processo decisionale per la gestione delle malattie

Spiegare:

- Quali dati vengono raccolti
- Chi lo recensisce
- Come viene presa la decisione finale
- Quali misure vengono adottate sul campo

Non sono necessari schemi tecnici. È sufficiente una spiegazione chiara.

4. Identificazione e mitigazione dei rischi

Per ogni azienda vinicola:

- Indica due rischi realistici legati all'adozione della tecnologia.
- Proponi una misura di mitigazione per ciascun rischio.

Esempi di rischi:

- Sovraccarico di lavoro del personale
- Costi dell'abbonamento
- Mancanza di competenze digitali
- Eccessiva dipendenza da un fornitore
- Tecnologia non utilizzata in modo coerente

5. Piano di comunicazione

Spiegare in che modo verranno comunicati i risultati:

- Alla direzione (prospettiva economica e strategica)
- Al team del vigneto (dal punto di vista operativo)

Sii preciso e concreto.