



DIPARTIMENTO DI SCIENZE AGRARIE ALIMENTARI E AMBIENTALI

CORSO DI LAUREA IN: SCIENZE E TECNOLOGIE AGRARIE

TECNICHE DI PRECISIONE NELLA VITICOLTURA

PRECISION TECHNIQUES IN VITICULTURE

TIPO TESI: COMPILATIVA

Studente:
ANTONIO AMICI

Relatore:
PROF. ESTER FOPPA PEDRETTI

ANNO ACCADEMICO 2022-2023

Alla parte di me che si voleva arrendere.

Alla mia famiglia che ha reso tutto possibile.

A te, il mio faro costante di amore e sostegno, Nazzarena.

SOMMARIO

ELENCO DELLE TABELLE.....	5
ELENCO DELLE FIGURE	6
ACRONIMI E ABBREVIAZIONI.....	7
CAPITOLO 1 INTRODUZIONE E SCOPO DELLA TESI.....	9
CAPITOLO 2 APPLICAZIONE DELL'AGRICOLTURA DI PRECISIONE NELLA VITICOLTURA	11
2.1 Variabilità spaziale e temporale	12
2.2 Gestione della variabilità.....	13
CAPITOLO 3 LE TECNOLOGIE NELLA VITICOLTURA DI PRECISIONE	14
3.1 Storia ed evoluzione delle tecniche di precisione	14
3.1.1 GNSS	14
3.1.2 GPS.....	15
3.1.3 GIS.....	16
3.2 Remote sensing	17
3.2.1 Satelliti	17
3.2.2 Aerei	18
3.2.3 Droni.....	19
3.2.4 Vantaggi nell'uso dei droni (VI)	21
3.3 Proximal sensing.....	22
3.3.1 Sensoristica nella viticoltura	22
3.3.2 Differenze tra remote e proximal sensing.....	24
CAPITOLO 4 MONITORAGGIO NELLA VITICOLTURA DI PRECISIONE.....	25
4.1 Monitoraggio del suolo	25
4.1.1 Resistività elettrica (ERT).....	25
4.1.2 Conducibilità elettrica (CE)	26
4.2 Monitoraggio della chioma	29
4.2.1 Confronto tra gli indici di vegetazione	31

4.2.2 Confronto fra UAS e satellite (Sentinel-2)	32
4.2.3 LAI.....	33
4.2.4 Proximal e remote sensing per mappare la variabilità	34
4.2.5 Wireless sensor network.....	34
4.3 Monitoraggio della qualità	37
4.4 Monitoraggio delle malattie	40
4.4.1 DSS	40
4.5 Monitoraggio dell'acqua	42
4.6 Monitoraggio delle rese	43
CAPITOLO 5 L' AUTOMAZIONE NELLA NUOVA VITICOLTURA.....	44
5.1 Macchine operatrici a rateo variabile (VRT).....	44
5.1.1 Sfolgiatrice VRT	44
5.1.2 Irroratrici VRT	45
5.1.3 Spandiconcime VRT	46
5.1.4 Vendemmiatrici selettive.....	47
5.2 Agrobot.....	47
5.2.1 L'intelligenza artificiale nel vigneto.....	49
5.2.2 Applicazione della robotica in viticoltura.....	49
5.2.3 VINEROBOT	50
5.2.4 VINBOT	50
5.2.5 GRAPE	50
5.2.6 PRIMBOT.....	51
5.2.7 AGBOT II E BONIROB	51
CONCLUSIONI	52
BIBLIOGRAFIA	54
SITOGRAFIA.....	59

ELENCO TABELLE

Tabella 5.1: Vantaggi e svantaggi nell'uso di agrobot.....	48
--	----

ELENCO DELLE FIGURE

Figura 3-1: Sistemi GPS E GNSS.....	15
Figura 3-2: Satellite Sentinel2.....	18
Figura 3-3: Aerei per il telerilevamento in agricoltura.....	19
Figura 3-5: Droni ad ala rotante.....	20
Figura 3.4: Droni ad ala fissa.....	20
Figura 4-1: Piattaforma con sensori per la resistività elettrica (a), esempio di mappe di resistività (b).....	26
Figura 4.2: Piattaforma mobile con sensori in grado di misurare la conducibilità elettrica ...	27
Figura 4.3: Sensori prossimali multispettrali.....	30
Figura 4-4: App VitiCanopy per valutare il vigore vegetativo della vite.....	33
Figura 4-5: Architettura di un sistema wireless sensor network (WSN).....	35
Figura 4-6: Strumenti per il monitoraggio della qualità (a) Multiplex, (b) Spectron.....	39
Figura 4-7: Architettura dei DSS.....	41
Figura 5-1: Defogliatrice VRT.....	45
Figura 5-2: Esempi di macchine a rateo variabile (a) Irroratrice VRT, (b) Spandiconcime VRT.....	47
Figura 5-3: Esempi di agrobot utilizzati in viticoltura (a) Vinbot, (b) GRAPE.....	51

ACRONIMI E ABBREVIAZIONI

NDVI	Normalized Difference Vegetation Index
GPS	Global Positioning System
GIS	Geographic Information System / sistemi di informazione geografica
VP	Viticultura di precisione
GNSS	Sistemi globali di navigazione satellitare
GLONASS	Global Navigation Satellite System
BEIDOU	Chinese Beidou Navigation Satellite System
ESA	European Space Agency
RTK	Real time Kinematic
SBAS	Satellite based augmentation system
SPAD	Soil Plant Analysis Development
LIDAR	Light Detection and Ranging
UAS	Unmanned Aircraft System
SAPR	Sistema aereo a pilotaggio remoto
ERT	Resistività elettrica
CE	Conducibilità elettrica
ECa	Conducibilità apparente
EMI	Electromagnetic induction
VI	Indice di vegetazione
NIR	Near Infrared Reflectance
NDRE	Normalized Difference Red-Edge Index
MSAVI	Modified Soil Adjusted Vegetation Index

NDWI	Normalized Difference Water Index
FVC	Fraction of Vegetation Cover
FAPAR	Fraction of Photosynthetically Active Radiation
CHLRE	Chlorophyll Red-Edge
NDMI	Normalized Difference Moisture Index
LAI	Indice di superficie fogliare
WSN	Wireless sensor network
IoT	Internet of Things
DSS	Decision Support System
CWSI	Stress idrico delle colture
Ψ_s	Misura del potenziale
VRT	Macchine operatrici a rateo variabile

Capitolo 1

INTRODUZIONE E SCOPO DELLA TESI

Al giorno d'oggi, l'agricoltura si trova a dover fronteggiare varie problematiche: i costi di produzione che aumentano mentre crollano quelli di vendita, la sempre più serrata competizione con i mercati esteri e le forti richieste di standard qualitativi sempre maggiori. Per ovviare a tali difficoltà si è reso necessario un incremento dell'efficienza produttiva. Per far sì che ciò accadesse, l'agricoltura è entrata nell'era dell'informazione grazie all'avvento di quella che viene chiamata agricoltura di precisione. Questo nuovo tipo di approccio può essere inteso come un insieme di conoscenze e tecnologie che, sulla base della variabilità osservata, consente il monitoraggio delle risposte vegeto-produttive delle piante; grazie a queste informazioni, è poi possibile adeguare la gestione agronomica dell'appezzamento in modo da raggiungere un livello produttivo e qualitativo sempre più elevato. È bene sottolineare che l'agricoltura di precisione e i suoi sistemi di monitoraggio, devono rispettare diversi presupposti importanti: devono essere non distruttivi, devono avere una buona ripetibilità e costi sostenibili e l'acquisizione dei dati deve essere rapida e precisa. Con la dicitura agricoltura 4.0 intendiamo quindi tutto l'insieme di tecnologie di precisione che, attraverso l'interconnessione, individuano prontamente le fitopatie e le fisiopatie, inoltre migliorano le produzioni e le condizioni di lavoro. Il concetto centrale dell'agricoltura di precisione prevede che diversi input necessari al singolo appezzamento ai fini della produzione, quali possono essere nutrienti e acqua, variano sensibilmente nello spazio e nel tempo. L'utilizzo delle tecniche di precisione implica che i tassi di applicazione degli input si adeguino in relazione alle esigenze sito-specifiche passando così ad una gestione eterogenea piuttosto che uniforme. L'efficientamento nei riguardi dei fattori di produzione, se condotto correttamente, si traduce in benefici sociali ed economici. Regolare l'uso degli input di produzione in maniera specifica all'interno di un terreno comporta inoltre anche una gestione migliore delle risorse dal punto di vista ambientale e della sicurezza alimentare: le perdite di acqua e l'uso fitochimico non necessario sono limitati e si previene inoltre il sovradosaggio di input agricoli e quindi la fuoriuscita di nutrienti e pesticidi. “Negli ultimi anni l'attenzione in tal senso si è concentrata sull'utilizzo di sensori di varia natura (ottici, ad ultrasuoni, ecc.) che sono in grado di fornire

informazioni dettagliate sulle condizioni della coltura, sulla base delle quali operare un'ottimizzazione dei fattori produttivi e delle pratiche agronomiche. In estrema sintesi, i sensori di tipo ottico, che risultano quelli attualmente più diffusi, rilevano le risposte spettrali delle chiome in funzione della loro espressione vegetativa: i più utilizzati operano nelle bande del visibile e del vicino infrarosso, consentendo l'acquisizione di immagini e la loro elaborazione sotto forma di indici di vegetazione” (P. Carnevali; Jacopo Cricco, 2012). Gli indici di vegetazione sono indici grafici derivati dal rapporto tra la luce diffusa in diverse bande e secondo diverse combinazioni. Uno degli indici più conosciuti per valutare la vigoria della biomassa è l'NDVI (Normalized Difference Vegetation Index). Gli indici di vegetazione possono essere correlati per ottenere risposte più esaustive sui processi fisiologici in corso e su possibili alterazioni. L'utilizzo di software GIS (Geographic Information System), ovvero sistemi di informazione geografica fondamentali ai fini della gestione di informazioni georeferenziate, è stato favorito dalla possibilità di legare le letture effettuate a determinate coordinate geografiche, ottenute attraverso i sistemi GPS (Global Positioning System). Una volta che un punto, ad esempio una pianta, è stato univocamente identificato da una coppia di coordinate, è possibile associare ad esso tutti gli attributi che si desiderino (rischi di malattie, principali parametri tecnologici e fenologici, entità delle produzioni, ecc.). Nel caso di letture con sensori ottici ad ogni coppia di coordinate corrisponde un valore di un dato indice di vegetazione. L'accessibilità a sistemi GPS sempre più avanzati ha reso tali informazioni estremamente dettagliate, garantendo l'identificazione di un punto con una precisione centimetrica (Bullock & Kitchen, 2007).

Capitolo 2

APPLICAZIONE DELL'AGRICOLTURA DI PRECISIONE IN VITICOLTURA

L'agricoltura di precisione applicata in viticoltura prende il nome di viticoltura di precisione (VP). “Il grande traguardo della viticoltura di precisione è quello di conoscere lo stato, la salute, il vigore e le necessità fisiologiche delle viti appartenenti a differenti zone del vigneto cui saranno state individuate le precise coordinate geografiche (operazione detta di georeferenziazione) ed adeguare le tecniche colturali in maniera puntuale alle esigenze, in modo che siano gli strumenti informatici ad aiutarci a gestire in maniera ampiamente automatizzata un enorme numero di piante” (I). L'utilizzo delle tecniche di precisione in viticoltura è più recente rispetto ad altre colture. Questo ritardo non è stato dovuto al disinteresse dei viticoltori, ma dalle difficoltà legate alle caratteristiche del vigneto: una chioma discontinua e organizzata in filari, richiede delle immagini con risoluzione più elevata per discriminare la chioma stessa dal suolo. I vigneti sono caratterizzati, soprattutto nel territorio italiano, da un'importante eterogeneità risalente sia a fattori strutturali come il clima, la morfologia e il suolo, sia a fattori dinamici come le pratiche colturali e le variazioni stagionali del clima. È possibile riscontrare la variabilità anche su un solo appezzamento, principalmente in quelli di grandi dimensioni, se non persino lungo lo stesso filare. Lo scopo per il quale viene adoperata l'agricoltura di precisione è quello di monitorare e gestire tale variabilità, ottimizzando così le pratiche agronomiche e massimizzando il potenziale enologico. Si dovrà quindi collegare la viticoltura di precisione al concetto di zonazione, cioè l'attività che permette di individuare le aree del vigneto omogenee tra loro e le cui uve potranno permettere di ottenere vini con delle specifiche caratteristiche organolettiche. È ora necessario dare un significato al concetto di Qualità del vigneto, “definita come un insieme di informazioni agronomiche (pedologia, microclima, stato vegetativo, stato idrico della coltivazione, ecc.) utili ai fini della caratterizzazione di un determinato appezzamento o parti di esso. La combinazione, secondo protocolli specifici, delle diverse informazioni ottenute permette in secondo luogo l'ottenimento di una caratterizzazione quanti-qualitativa delle uve stesse (resa ad ettaro, tenore zuccherino, acidità, polifenoli, ecc.)” (Vieri & Spezia, 2010). La VP prevede un primo monitoraggio dei parametri legati al vigneto. Successivamente i dati

vengono elaborati e valutati ed infine vengono messe in atto tutte le pratiche agronomiche specifiche (concimazioni, cimature, sfogliature, diradamento grappoli, epoca di vendemmia). Molteplici strumenti utili al monitoraggio del vigneto sono stati messi a punto negli anni dal mondo della ricerca, e diversi fra questi sono già operativi nelle aziende. Visti i costi sempre più accessibili, queste tecnologie hanno avuto modo di diffondersi sempre più, considerando anche la necessità delle aziende di gestire appezzamenti sempre più estesi e sulla base di processi meccanizzati e criteri oggettivi (L.G. Santesteban, 2019). La viticoltura di precisione (VP) predilige l'utilizzo di diversi sistemi informatici per mappare e quantificare la variabilità con l'obiettivo di poterla gestire meglio e in funzione dei bisogni di ciascuna pianta (gestione sito-specifica). Sono diversi gli strumenti che possono essere utilizzati a tale scopo: sensori prossimali (a terra), sensori in remoto (aereo, drone o telerilevamento da satellite), sistemi informativi geografici (GIS), sistemi satellitari globali di navigazione (GNSS) e robotica. Nel mondo, i paesi dove gli strumenti relativi alla viticoltura di precisione risultano avere una maggiore applicazione sono la California, l'Australia e la Francia; anche l'Italia figura tra questi ma solo il 23% delle aziende utilizza tali strumenti. Le regioni italiane dove queste tecniche di viticoltura hanno uno sviluppo più sostenuto sono il Veneto, la Toscana e la Sicilia, vuoi per l'elevata estensione delle superfici, vuoi per la mole maggiore di giovani agricoltori più attenti alle innovazioni (II).

2.1 Variabilità spaziale e temporale

La variabilità all'interno di un vigneto ha un notevole impatto sulle rese e sulla qualità dei prodotti. La comprensione di questa variabilità è essenziale per gestirla in modo efficace, ottimizzando l'irrigazione e la fertilizzazione, riducendo gli impatti ambientali e aumentando la produttività complessiva. All'interno di un vigneto singolo, possiamo individuare due tipi di variabilità: la variabilità spaziale e la variabilità temporale. La variabilità spaziale è influenzata da diversi fattori di natura fisica, chimica e ambientale. Questi fattori includono la topografia del terreno (come l'esposizione e le pendenze), le caratteristiche del suolo, le pratiche agronomiche adottate, lo stato fitosanitario delle piante e le condizioni microclimatiche. La variabilità spaziale ha un impatto significativo sullo sviluppo delle piante e sulle decisioni di gestione da adottare. Nell'ambito dell'agricoltura, sono disponibili diverse tecnologie che consentono ai viticoltori di mappare la variabilità spaziale in modo rapido e a costi competitivi. Queste tecnologie si basano sull'acquisizione di misure di riflettanza spettrale, mappe di resa e l'uso di sensori geofisici. La variabilità temporale è legata a fattori come le condizioni meteorologiche che variano tra gli anni e all'interno dello stesso anno,

nonché a eventi eccezionali e occasionali come gelate, grandinate o periodi di stress idrico. Anche le malattie delle piante, gli attacchi dei parassiti e i cambiamenti nelle pratiche di gestione del vigneto in diversi anni influenzano la variabilità temporale dei vigneti. È importante notare che le condizioni meteorologiche sono strettamente correlate allo sviluppo degli agenti patogeni e, di conseguenza, alle rese delle colture e al ciclo di sviluppo delle piante in generale.

2.2 Gestione della variabilità

Per gestire in modo efficace la variabilità nella viticoltura, è fondamentale comprendere i fattori che influenzano la qualità e la resa delle uve e quanto questi possano essere influenzati dalle pratiche agronomiche. Le condizioni climatiche, i terreni, lo stato fitosanitario delle piante, la disponibilità di nutrienti e lo stress idrico contribuiscono ad influenzare lo stato delle chiome e le mappe di resa. Identificare zone di gestione uniformi, aree in cui il suolo può essere considerato relativamente omogeneo, è un requisito essenziale per implementare tecniche di gestione specifiche del sito. A seconda del periodo di sviluppo della coltura, ci sono diverse possibilità di applicazione, ma anche senza investimenti tecnologici aggiuntivi, è possibile monitorare l'andamento della qualità selezionando punti di campionamento delle uve in base alle variazioni mappate nel suolo per l'analisi qualitativa. L'obiettivo pratico è quello di applicare i principi della viticoltura di precisione, basati sulla conoscenza della variabilità, per raggiungere la qualità desiderata e la sostenibilità ambientale nella produzione.

Capitolo 3

TECNOLOGIE IN VITICOLTURA DI PRECISIONE

3.1 Storia ed evoluzione delle tecniche di precisione

La viticoltura di precisione è una disciplina relativamente nuova che ha cominciato a svilupparsi solo a metà degli anni '80. “Si è diffusa principalmente grazie a quattro fattori: la disponibilità di sistemi accurati di navigazione satellitare (GNSS); lo sviluppo di software GIS per l'analisi di dati spaziali e geografici; la crescente disponibilità di informazioni georeferenziate acquisite a distanza; lo sviluppo delle tecnologie a tasso variabile” (L. G. Santesteban, 2019). La prima applicazione di tali sistemi risale agli anni '20 dove venne campionato il pH del suolo per creare una mappa di prescrizione al fine di correggere tale indice. Negli anni '80 sono arrivati sul mercato i primi sensori per misurare le proprietà geoelettriche del suolo. Negli anni '90 è diventato disponibile il GPS per uso civile, che ha consentito la guida GNSS nei trattori; inoltre, per la prima volta si è assistiti alla distribuzione di fertilizzante a rateo variabile e sono state utilizzate immagini satellitari e aeree per discriminare le aree con caratteristiche diverse nel campo. In questo periodo iniziavano ad essere utilizzati anche sensori ottici montati su macchine agricole per monitorare il vigore vegetativo. Alla fine del secolo fu sviluppato lo standard ISOBUS, un protocollo di comunicazione tra trattori e macchine operatrici (M. Ammoniaci; S. Kartsiotis, 2021). Attualmente, sono stati e vengono condotti molti studi di ricerca per implementare le nuove tecnologie in azienda o svilupparne di nuove in grado di migliorare l'intera gestione dell'azienda per una maggiore sostenibilità.

3.1.1 GNSS

Per trovare informazioni sulla posizione, l'approccio più comune include l'uso di un sistema globale di navigazione satellitare (GNSS) (fig. 3-1) che fornisce agli utenti una posizione tridimensionale (3D) altamente accurata in modo rapido e tempestivo. Ci sono diversi sistemi GNSS operativi quali: il GPS (Global Positioning System) degli Stati Uniti, il GLONASS (Global Navigation Satellite System) della Russia, BeiDou (Chinese Beidou Navigation Satellite System), il sistema satellitare giapponese QZSS e la costellazione indiana NAVIC.

In Europa è GALILEO la costellazione di satelliti per il posizionamento, sviluppata dall'ESA (European Space Agency) e utile per applicazioni civili e ambientali. (J. Guo; X. Li, 2018). Il satellite trasmette segnali a basi di controllo poste a terra, le quali provvedono a correggere ogni errore del satellite (errori del segnare radio, errori del clock, errori delle effemeridi, errori di riflessioni multiple) e calcolano il tempo impiegato dal segnale per giungere a destinazione, così da ottenere la reale posizione del satellite (VI). Mediante l'utilizzo di più satelliti è possibile localizzare la posizione dell'utente che richiede tale servizio. È possibile utilizzare i sistemi di posizionamento satellitare per predisporre sistemi di guida assistita o semi-automatica. Vengono utilizzate tecniche RTK (Real Time Kinematic) e SBAS (satellite based augmentation system) le quali sono in grado di fornire una precisione di localizzazione centimetrica, mediante a una rete di stazioni di riferimento fisse a terra per correggere le posizioni indicate dai sistemi satellitari (M. Sozzi, 2021).

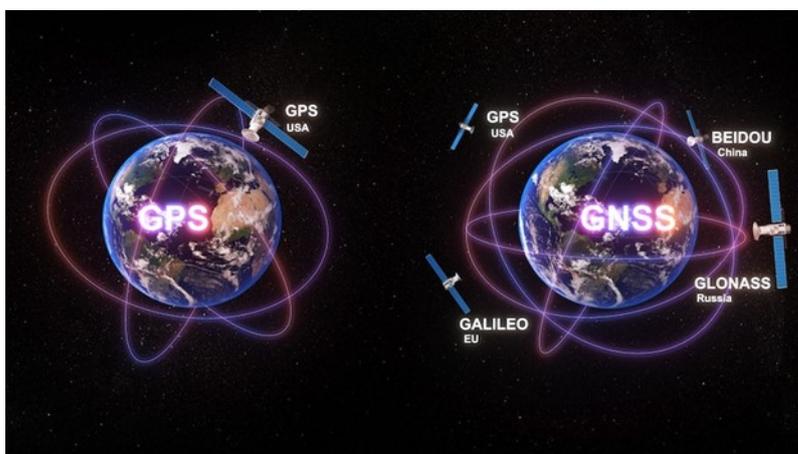


Figura 3-1 Sistemi GPS E GNSS (Amrita Pathak, 2022)

3.1.2 GPS

L'obiettivo primario nel processo di monitoraggio è l'acquisizione massima di informazioni georeferenziate all'interno del vigneto. La geolocalizzazione stima la posizione geografica di un oggetto nella superficie terrestre. È il primo passo verso la viticoltura di precisione dal momento che tutti i dati rilevanti e i tipi di monitoraggio devono essere associati alla loro posizione nel vigneto per essere utili. La georeferenziazione è il processo che consente di trovare la relazione tra l'informazione spaziale e la sua posizione geografica. In questo modo, i dati spaziali rilevati nel vigneto come le proprietà fisiche del suolo e il contenuto di acqua o fertilizzanti, vengono confrontati con la loro posizione. Il sistema più significativo di questa tipologia è il GPS (Global Positioning System). L'applicazione dei sistemi GPS risulta

essenziale nella fase di impianto di un vigneto. Le trapiantatrici più diffuse (Wagner, Clemens, Fornasier) possono essere tutte equipaggiate con i kit-GPS e con il software di guida assistita dove l'operatore attraverso un computer di bordo può impostare le varie caratteristiche del vigneto da impiantare: misure dell'interfilare e della distanza delle barbatelle nella stessa fila, orientamento dei filari e l'inizio delle testate. Una volta all'interno dell'area d'impianto, attivati tutti i dispositivi, la ruota di posa della trapiantatrice entrerà in funzione automaticamente avviando il posizionamento delle barbatelle. L'operatore dovrà esclusivamente controllare che il tutto funzioni correttamente assicurandosi, tramite il display in cabina, che la trattoria segua la linea ideale di lavoro, e intervenire eventualmente in casi di guasti. Avere un vigneto mappato fornisce l'informazione della posizione esatta di ogni singola pianta dell'apezzamento che porta ad agevolare il lavoro in vigna con i mezzi a guida automatica (III).

3.1.3 GIS

Il GPS ha aperto la strada all'utilizzo di software GIS (Sistemi di informazione geografica), ovvero sistemi informatici essenziali per gestire le informazioni georeferenziate. I Sistemi Informativi Geografici nella viticoltura di precisione sono strumenti tecnologici che permettono di acquisire, elaborare e visualizzare dati geografici correlati alla gestione del vigneto. Questi sistemi consentono agli agricoltori di mappare e analizzare le variazioni spaziali delle caratteristiche del terreno, delle condizioni climatiche e delle colture stesse. I GIS forniscono numerosi vantaggi nella viticoltura di precisione. Innanzitutto, consentono di identificare e gestire le zone del vigneto con caratteristiche omogenee, in modo da applicare pratiche agronomiche specifiche in base alle esigenze di ciascuna area. Inoltre, consentono di monitorare e controllare le condizioni del vigneto in tempo reale, grazie all'integrazione di dati provenienti da sensori e strumenti di rilevamento remoto. Questo monitoraggio costante permette di rilevare precocemente eventuali problemi, come malattie o stress idrico, e di adottare misure correttive tempestive. I GIS facilitano la gestione dei dati agricoli, permettendo di archiviare, organizzare e analizzare informazioni dettagliate sul vigneto nel corso del tempo. Ciò favorisce la presa di decisioni basate su evidenze scientifiche e consente di valutare l'efficacia delle pratiche agronomiche adottate nel tempo. Nel caso di letture con sensori ottici, ad ogni coppia di coordinate corrisponde un valore di un dato indice di vegetazione (M Vieri; G. Spezia, 2010).

3.2 Remote sensing

Si parla di remote sensing o telerilevamento nel momento in cui, i rilievi, vengono effettuati da considerevole distanza mediante l'utilizzo di satelliti, aerei o droni. Il telerilevamento applicato alla viticoltura di precisione si è dimostrato essere uno strumento utile per lo studio della variabilità spaziale nel vigneto. "I sistemi di remote sensing permettono la cattura di immagini su porzioni di territorio più o meno estese in funzione della distanza da cui si effettua tale acquisizione: di norma si passa da alcuni chilometri quadrati di aerei e droni a poche centinaia di chilometri quadrati di satelliti. Generalmente si parla di risoluzioni spaziali di 2,4-4 m nel caso dei satelliti più comunemente utilizzati (quali Ikonos e Quickbird) e da 30 cm a 1 m nel caso di droni ed aerei" (P. Carnevali; J. Cricco, 2013). I sistemi di telerilevamento sono caratterizzati da sensori ottici come telecamere nel visibile, sensori multispettrali, i quali rilevano bande specifiche per l'analisi della vegetazione, sensori termici, utili per misurare la temperatura degli impianti e identificare lo stress idrico, e sensori iperspettrali, che consentono di effettuare analisi approfondite sulle colture e per lo studio delle malattie.

3.2.1 Satelliti

I satelliti vengono utilizzati da 40 anni in agricoltura di precisione, a partire dal lancio del satellite Landsat-1 che risale all'anno 1972. Tale satellite era dotato di un sensore multispettrale e forniva una risoluzione spaziale di 80 metri per pixel con intervalli di rivisitazione di circa diciotto giorni. Nel 1984 venne lanciato Landsat-5 che forniva immagini nel vicino infrarosso e nelle bande termiche con una risoluzione spaziale di 30 metri (A. Matese; S. Di Gennaro, 2015). Uno dei satelliti più utilizzati in viticoltura di precisione, il Sentinel-2 (fig. 3-2), monta uno strumento ottico denominato MSI (strumento multispettrale) in grado di campionare tredici bande spettrali fino a una risoluzione di 10 m. Il principale vantaggio del Sentinel-2 rispetto ad altri satelliti, è che i dati sono open-source; quindi, totalmente gratuiti e scaricabili tramite sito web: Copernicus Hub. (M. Ammoniaci; S. Kartsiotis, 2021). Un altro satellite ad alta risoluzione è il Rapid-Eye, che acquisisce immagini in cinque bande multispettrali con una risoluzione di 5 metri (III). Un altro satellite è il World View 3, lanciato con successo nell'agosto 2014: le sue ventinove bande sono in grado di fornire risoluzioni di 0,30 metri nello spettro visibile, 1,30 metri nel multispettrale e 3,70 metri nell'infrarosso a onde corte, con una frequenza di rivisitazione compresa tra uno e quattro giorni (A. Matese; S. Di Gennaro, 2015). L'uso dei satelliti nel telerilevamento ha un grande potenziale, ma le risoluzioni spaziali non sono sufficienti per la viticoltura di precisione a causa del ristretto spazio tra le viti.



Figura 3-2 Satellite Sentinel2 (fonte ESA)

3.2.2 Aerei

Gli aerei (fig. 3-3) consentono di monitorare vaste aree, anche trasportando carichi pesanti, fornendo così la possibilità di gestire più sensori contemporaneamente. L'uso degli aerei aggira alcune limitazioni dell'applicazione satellitare andando a programmare l'acquisizione delle immagini con una maggiore risoluzione al suolo, a seconda dell'altitudine di volo. Tuttavia, la ridotta flessibilità di acquisizione del tempo, causata dal rigido programma di volo, e gli elevati costi operativi, lo rendono economicamente fattibile solo su aree superiori a 10 ha (A. Matese; S. Di Gennaro, 2015). Inoltre, prima dell'effettivo volo si devono aspettare le autorizzazioni necessarie poiché, in ogni Paese, ci sono zone non percorribili come carceri, edifici o aree militari, aeroporti, bersagli sensibili, aree riservate, vietate e pericolose. Le autorità pubbliche forniscono mappe ed elenchi dettagliati su queste aree al fine di informare i piloti se nella zona di rilevamento sono presenti alcune attività aeree (es. esercitazioni militari) e in quali altitudini di volo, ore, giorni e mesi possono aver luogo (M. Ammoniaci; S. Kartsiotis, 2021). Un esempio di velivolo utilizzato nella viticoltura di precisione è lo Sky Arrow 650, costruito interamente in carbonio, con un'autonomia di volo di circa sei ore. È un aereo flessibile, che può decollare e atterrare in aeroporti con una lunghezza di pista di soli 500 m (V).



Figura 3-3 Aerei usati per il telerilevamento in agricoltura

3.2.3 Droni

Grazie allo sviluppo tecnologico nel campo dell'automazione la viticoltura di precisione si è avvalsa di nuove soluzioni per il monitoraggio remoto delle colture, tra le quali spicca l'utilizzo degli UAS (Unmanned Aircraft System), comunemente noti come droni. A livello internazionale, questi prendono il nome di SAPR (sistema aereo a pilotaggio remoto), potendo essere controllati da remoto tramite software o app. I droni possono montare diversi sensori, che consentono un'ampia gamma di attività di monitoraggio (A. Matese, 2016); Inoltre, forniscono una risoluzione spaziale molto elevata a terra (fino al centimetro) e hanno la possibilità di ottenere un monitoraggio flessibile e tempestivo, grazie ai ridotti tempi di pianificazione di volo. Queste caratteristiche li rendono ideali per appezzamenti di piccole-medie dimensioni (1–20 ettari), soprattutto in aree caratterizzate da elevata eterogeneità. La pianificazione della missione UAS è abbastanza semplice e può essere eseguita utilizzando un'applicazione nella quale viene inserita l'area da mappare e vengono impostati i parametri di volo. A seconda dello scenario applicativo (pianura, collina, estensione del campo), è possibile scegliere UAS ad ala fissa (fig. 3-4) o ad ala rotante (fig. 3-5). Nello specifico, gli UAS ad ala fissa consentono il monitoraggio di aree estese (decine di ettari) in modo più efficace, specie se non frammentate e in zone pianeggianti, avendo un'elevata velocità operativa e tempi di volo elevati (fino a 1 ora), ma richiedono più abilità nel pilotaggio e spazi di atterraggio sufficientemente ampi. D'altra parte, gli UAS ad ala rotante sono più facili da usare e consentono un miglior monitoraggio di piccole aree (fino a 20 ettari), anche frammentate, avendo un'elevata versatilità operativa e bassi tempi di volo (fino a 30 minuti) (M. Ammoniaci; S. Kartsiotis, 2021). Rispetto ai satelliti, gli UAS hanno una risoluzione molto più elevata che fornisce immagini con un dettaglio maggiore permettendo di distinguere

la fila dall'interfilare, al contrario dei satelliti che forniscono immagini con un vigore maggiore poiché incorporano sia chioma che terreno, alterando così i dati del vigore o della temperatura della chioma (A. Matese; S. Di Gennaro, 2018). I droni presentano due importanti limitazioni: la prima è l'autonomia, che solitamente varia tra i 30 e i 60 minuti, mentre la seconda è l'operatività poiché per poter volare in sicurezza, secondo l'Ente Nazionale per l'Aviazione Civile, il pilota del drone è tenuto ad essere in possesso di idonea licenza di volo e di un'assicurazione di responsabilità civile in caso di incidenti e danni a terzi. Dal punto di vista economico, la tecnologia UAS è risultata attuabile, soprattutto nei vigneti con più di 40 ettari o per le cooperative agricole con lotti di vigneti frammentati (A. Matese; S. Di Gennaro, 2015).

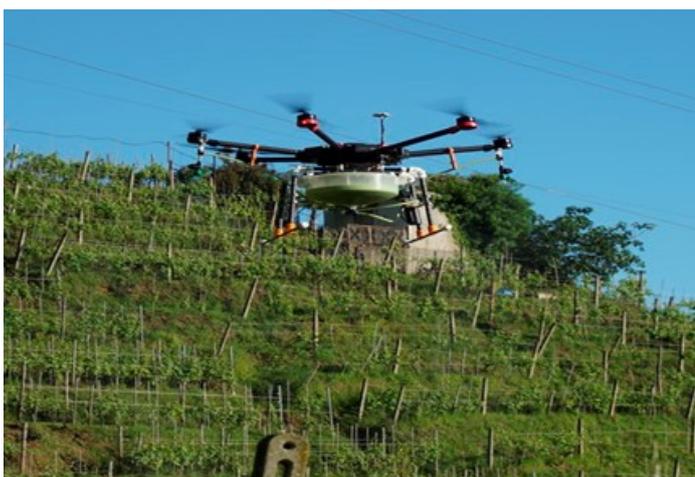


Figura 3-5 Droni ad ala rotante (fonte agriexpo)



Figura 3-4 Droni ad ala fissa (fonte agriexpo)

3.2.4 *Vantaggi nell'uso dei droni (VI)*

I droni offrono numerosi vantaggi nell'ambito della viticoltura di precisione, fornendo una serie di opportunità e benefici che possono migliorare significativamente la gestione dei vigneti. Di seguito, sono elencati i principali vantaggi dei droni nella viticoltura di precisione.

- **Conoscenza del territorio:** i droni consentono di ottenere una visione dettagliata e completa del vigneto, permettendo agli agricoltori di acquisire una conoscenza approfondita delle caratteristiche del terreno, delle condizioni climatiche e delle variazioni spaziali all'interno dell'area coltivata.
- **Vantaggi ambientali:** l'utilizzo dei droni riduce la necessità di interventi chimici su larga scala, consentendo un'agricoltura più sostenibile e riducendo l'impatto ambientale. Ciò si traduce in una minore dispersione di prodotti chimici nell'ambiente e una maggiore conservazione della biodiversità.
- **Supporto per la difesa fitosanitaria:** i droni possono essere utilizzati per il monitoraggio delle malattie delle piante e delle infestazioni di parassiti, consentendo agli agricoltori di intervenire tempestivamente con trattamenti mirati, riducendo così l'uso eccessivo di pesticidi.
- **Monitoraggio continuo e costante:** grazie alla loro capacità di volo e ai sensori integrati, i droni consentono un monitoraggio costante delle condizioni del vigneto. Possono acquisire dati in tempo reale su parametri come umidità del suolo, temperatura, vigore delle piante e maturazione dei grappoli, fornendo agli agricoltori informazioni dettagliate per prendere decisioni informate.
- **Interventi mirati:** i droni permettono di eseguire interventi mirati, come la somministrazione di fertilizzanti o di trattamenti fitosanitari, in modo preciso e localizzato. Questo permette un utilizzo più efficiente delle risorse, riducendo gli sprechi e migliorando l'efficacia degli interventi.
- **Misure non distruttive:** ripetibili nel tempo e in fasi successive alla stagione vegetativa; i droni possono effettuare misurazioni non invasive e ripetibili su ogni pianta del vigneto, consentendo un monitoraggio accurato nel corso della stagione vegetativa e una valutazione precisa delle variazioni nel tempo.
- **Nessun contatto con la coltura:** a differenza di altri mezzi di monitoraggio o intervento, i droni non entrano in contatto diretto con le piante del vigneto, riducendo il rischio di danneggiarle o trasmettere malattie.
- **Misure rapide e idonee a essere effettuate anche da veicoli in movimento:** i droni possono effettuare misurazioni e acquisire immagini rapidamente, consentendo una

copertura efficiente del vigneto. Inoltre, possono essere utilizzati anche durante lo spostamento in volo, riducendo il tempo necessario per l'acquisizione dei dati.

- Vantaggi economici: l'utilizzo dei droni può portare a una maggiore efficienza operativa e a una riduzione dei costi di gestione del vigneto. La possibilità di identificare tempestivamente problemi o carenze nelle piante consente di intervenire in modo mirato, riducendo le perdite di produzione e ottimizzando l'uso delle risorse.
- Vantaggi per i consumatori: l'utilizzo dei droni consente di effettuare analisi dei residui chimici sulle uve, garantendo la produzione di vini di alta qualità e rispettosi delle normative sulla sicurezza alimentare.

3.3 Proximal sensing

La viticoltura di precisione per il monitoraggio e l'analisi colturale può avvalersi di sistemi di monitoraggio prossimale. Questi sistemi di monitoraggio, operando all'interno dei filari del vigneto e quindi a poca distanza dal bersaglio, forniscono dati georeferenziati sullo stato vegetativo della parete fogliare con elevata accuratezza. "Utilizzano sensori con acquisizione ad altissima frequenza a cui si aggiungono GPS ad alta precisione e PC portatili, per la georeferenziazione e la registrazione delle letture" (P. Carnevali; J. Cricco, 2012). Attraverso queste tecniche è possibile ottenere rapidamente e a costi relativamente contenuti informazioni su suolo, copertura vegetale, stato nutrizionale, efficienza del sistema fotosintetico e del processo di evapotraspirazione, stato idrico, concentrazione di pigmenti, stato fitosanitario e risposta produttiva (M. Ammoniaci; S. Kartsiotis, 2021). L'elaborazione dei dati multispettrali, ottenuti dai vari sistemi di rilevamento, richiede l'implementazione di opportune procedure al fine di generare mappe tematiche che visualizzino in modo accurato lo stato vegetativo del vigneto oggetto di studio. Nel corso degli anni, sono stati sviluppati diversi indici di vegetazione con l'obiettivo di confrontare analiticamente la biomassa del vigneto, misurata attraverso diverse lunghezze d'onda.

3.3.1 Sensoristica nella viticoltura

Il monitoraggio delle colture è l'attività gestionale che impegna in misura maggiore l'agricoltore. Infatti, solo avendo un controllo costante sui propri appezzamenti è possibile intervenire in modo tempestivo ed efficace. Per il monitoraggio del vigneto vengono utilizzati essenzialmente tre tipologie di sensori: ottici, ad ultrasuoni e laser. Dall'analisi dettagliata dei sensori, quelli ottici e ad ultrasuoni risultano essere i più utilizzati e idonei a monitorare la

chioma rispetto a quelli laser. Tra i sensori ottici più utilizzati troviamo i sensori radiometrici, che consente la raccolta di informazioni importanti per la misura dello stato vegetativo del vigneto. L'uso di tali sensori si basa sulla misura della radiazione elettromagnetica riflessa dalla parete vegetativa nelle bande del rosso e del vicino infrarosso (680-750 nanometri). Un altro tipo di sensore ottico è il fluorimetro, che misura la fluorescenza, fenomeno che rappresenta la quantità di energia luminosa dissipata da parte della clorofilla, che può essere utilizzata per valutare precocemente l'insorgenza di una condizione di stress nella pianta (M. Ammoniaci; S. Kartsiotis, 2021). Due sensori ottici molto diffusi al momento in agricoltura sono GreenSeeker (Trimble, Sunnyvale, CA, USA), nei diversi modelli disponibili e gli SPAD (Soil Plant Analysis Development) meters (Konica Minolta, Japan). GreenSeeker fornisce una misura dell'NDVI, emettendo lunghezze d'onda nel rosso (660 nm) e nell'infrarosso (770 nm) e rilevandone la riflettanza da parte della pianta. Esistono versioni diverse, utilizzabili in mano dall'operatore oppure da montare su trattore (E. Rutto; D. Arnall, 2009). Lo SPAD meter funziona in modo simile, ma è costituito da una sorta di molletta che va chiusa sulla singola foglia. La luce è emessa nel rosso (650 nm), frequenza correlata al picco di attività della clorofilla, e a 940 nm, frequenza legata allo spessore della foglia e al contenuto di umidità, ed è misurata l'assorbanza del tessuto vegetale (A. Freidenreich; G. Barraza, 2019). I sensori ad ultrasuoni sono più semplici e molto più economici rispetto ai sensori ottici. Viene emesso un segnale acustico ad elevata frequenza, che rimbalza sulla superficie vegetale e torna al ricevitore. Sulla base del tempo di ritorno si ha una stima della distanza tra il dispositivo e l'oggetto. Combinando più sensori (almeno tre) e rilevazioni continue nel tempo, è possibile ottenere in tempo reale una stima accurata del volume della vegetazione (J. Llorens; E. Gil, 2011). Anche la tecnologia laser è stata usata in diverse occasioni per caratterizzare la chioma di colture arboree. In particolare, si usano dei dispositivi LIDAR (Light Detection and Ranging), in grado di misurare la distanza da un oggetto rilevando il tempo che un impulso laser impiega per raggiungerlo. A differenza dei precedenti, questo tipo di sensore è impiegabile sia nel proximal sensing che nel remote sensing da aereo o drone, in quanto può funzionare anche a distanze notevoli dall'obiettivo (M. Ammoniaci; S. Kartsiotis, 2018). Inoltre, un rilievo tramite proximal sensing ha una risoluzione maggiore rispetto ad uno da remoto, dove difficilmente si scende sotto 1 metro. Attualmente, solo una selezione limitata dei sensori menzionati può essere impiegata per l'applicazione "on-the-go" nella viticoltura di precisione. Questo approccio consente il monitoraggio e l'adattamento in tempo reale delle macchine operative a tasso variabile, offrendo un controllo più preciso e automatico. Tuttavia, è importante notare che, nella maggior parte dei casi, i dati raccolti devono essere elaborati e

tradotti in informazioni utili prima di poter essere inseriti nel terminale di bordo della trattrice tramite la comunicazione ISOBUS. In aggiunta a ciò, il processo di elaborazione dei dati è essenziale per estrarre informazioni significative e guidare le decisioni operative. Questa fase di analisi consente di trasformare i dati grezzi provenienti dai sensori in indicazioni pratiche, come mappe di prescrizione o istruzioni per l'applicazione di fertilizzanti o fitofarmaci. L'utilizzo dell'interfaccia ISOBUS è particolarmente vantaggioso poiché consente una comunicazione standardizzata tra il terminale di bordo della trattrice e le macchine agricole. Ciò significa che le informazioni elaborate possono essere facilmente trasferite e utilizzate dalle diverse attrezzature compatibili con ISOBUS, garantendo una maggiore flessibilità e interoperabilità. L'applicazione a rateo variabile più diffusa risulta essere quella della concimazione azotata, che consente di modulare il rilascio di fertilizzanti proporzionalmente al vigore della vegetazione e dunque dosando il prodotto in modo adattato alle necessità della coltura (F. Marinello; M. Sozzi, 2017).

3.3.2 Differenze tra remote e proximal sensing

La prima differenza sostanziale tra i due tipi di monitoraggio risiede nel fatto che sfruttano tipologie differenti di luce. Mentre nel remote sensing viene calcolata la quantità di luce solare riflessa dalla vegetazione, nel proximal sensing si utilizzano degli strumenti portatili che emettono luce artificiale per le loro misurazioni. Questa differenza di rilevazione rende difficoltoso confrontare i dati acquisiti tramite i due sistemi. Un limite, per quanto riguarda il rilevamento tramite satellite, è legato alle condizioni metereologiche poiché, in caso di copertura nuvolosa, l'obiettivo non può essere visto. Questo non avviene nel caso di osservazioni di tipo prossimale. Un'ulteriore differenza tra proximal e remote sensing è data dalla necessità, nel caso delle immagini da telerilevamento, di effettuare una serie di correzioni e di elaborazioni in seguito all'acquisizione; tali aggiustamenti permettono di diminuire gli eventuali errori di analisi al fine di non falsare il calcolo degli indici di vegetazione. L'osservazione effettuata con sensori portatili permette di inquadrare la sola parete vegetale e non necessita di particolari correzioni, ma solamente di un'opportuna spazializzazione del dato mediante software GIS (P. Carnevali; J. Cricco, 2012).

Capitolo 4

SISTEMI DI MONITORAGGIO IN VITICOLTURA

4.1 Monitoraggio del suolo

Un'importante applicazione innovativa nella viticoltura di precisione consiste nell'adoperare sensori prossimali al fine di studiare la variabilità di un suolo. Lo sviluppo ottimale della vite dipende da una serie di caratteristiche del suolo quali: nutrienti, disponibilità di acqua, tessitura, struttura del terreno e drenaggio del suolo. Andando ad agire su tutti questi fattori si possono aiutare i viticoltori e i produttori di vino a utilizzare strumenti di agricoltura di precisione per migliorare le operazioni colturali come l'irrigazione, la concimazione, la potatura e la raccolta (M. Ammoniaci; S. Kartsiotis, 2021). I sondaggi tradizionali del suolo e la sua analisi richiedono molto tempo e soprattutto sono costosi nel momento in cui vengono richieste mappe ad alta risoluzione. Per far fronte ai costi dei metodi tradizionali sono utilizzati una serie di sensori che misurano alcune grandezze fisiche che verranno correlate alle proprietà fisiche e chimiche di un terreno quali nutrienti, struttura, tessitura e contenuto d'acqua. Negli ultimi due decenni, dopo la maturazione di strumenti GPS e sistemi GIS, molti strumenti tecnologici sono stati sviluppati per migliorare le informazioni spaziali e temporali del suolo. Attualmente i metodi geofisici che utilizzano i suddetti sensori sono quelli di maggior successo in grado di fornire informazioni agronomiche rilevanti che consentono di determinare le zone di gestione per l'agricoltura di precisione e sui nutrienti del suolo (A. Matese; S. Di Gennaro, 2015).

4.1.1 Resistività elettrica (ERT)

La resistività elettrica è la capacità di un suolo di opporre resistenza al passaggio di corrente elettrica. La misurazione avviene tramite piattaforme mobili (fig. 4-1 a) che propagano deboli correnti elettriche nel terreno e successivamente vengono misurate le differenze di potenziale da alcuni elettrodi. Le informazioni georeferenziate su ERT e morfologia del terreno possono essere la base per l'identificazione rapida e non distruttiva di zone di gestione differenziale del vigneto in base al comportamento del suolo e possono essere molto utili nella viticoltura di precisione (M. Ammoniaci; S. Kartsiotis, 2021). Degli studi hanno permesso di sviluppare dei

modelli tramite dei sensori di resistività elettrica per valutare la quantità di acqua presente in un dato appezzamento (fig. 4-1 b). L'interpretazione dei modelli presentati ha evidenziato le relazioni non lineari tra resistività elettrica e disponibilità idrica del suolo e la presenza di forti interazioni tra proprietà del suolo e variazioni di resistività elettrica (M.C. Andrenelli; S. Magini, 2013).

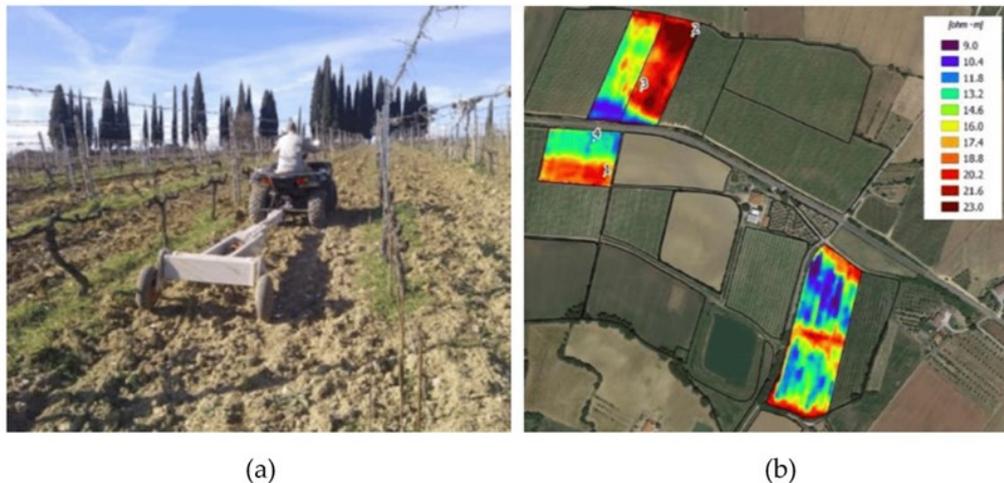


Figura 4-1 (a) piattaforma con sensori per la resistività elettrica, (b) esempio di mappa di resistività (fonte: *State of the Art of Monitoring Technologies and Data Processing for Precision Viticulture*, M. Ammoniaci, S. Kartsiotis, 2021)

4.1.2 Conducibilità elettrica (CE)

Nell'agricoltura di precisione esistono sensori prossimali installati su piattaforme mobili che consentono di stimare la conducibilità elettrica apparente (Eca) (fig. 4-2). Il principio dei sensori EMI (electromagnetic induction) consiste nel generare un campo magnetico primario che induce correnti elettriche molto piccole nel terreno, che a sua volta genera un campo magnetico secondario misurato da un sensore ricevente. I sensori sono progettati in modo che il campo magnetico secondario e primario siano linearmente proporzionali alla conducibilità del suolo. Le correnti elettriche continue generate artificialmente sono applicate al suolo e in un secondo momento vengono misurate le differenze di potenziale. I modelli che rappresentano le differenze di potenziali forniscono informazioni sulla forma delle eterogeneità del sottosuolo e le loro proprietà elettriche (B. Tisseyre; H. Ojeda, 2007). I sensori di conducibilità risultano essere più diffusi e più utilizzati rispetto ai sensori di resistività. La profondità di esplorazione del profilo del suolo è proporzionale (per materiale omogeneo) alla distanza tra le sonde per sensori T e alla distanza tra le bobine di trasmissione e di rilevamento per sensori EMI. L'Eca può essere influenzato da diverse proprietà del suolo; pertanto, è

generalmente necessario un programma di campionamento e analisi del suolo in modo che le proprietà del suolo abbiano la maggiore influenza possibile sulla variabilità spaziale dell'ECa. Come per i sensori di RE, anche per quelli di CE, la presenza di metallo come pali d'acciaio o fili di ferro, può influenzare i risultati. La distorsione causata da oggetti metallici nei vigneti è oggetto di ricerca attuale (E. Martini; C. Comina, 2013).



Figura 4-2 Piattaforma mobile con sensori in grado di misurare la conducibilità elettrica (fonte: State of the Art of Monitoring Technologies and Data Processing for Precision Viticulture, M. Ammoniaci, S. Kartsiotis, 2021)

A fronte dell'aumento del costo dei fertilizzanti, principalmente nitrati (N), fosfati (P) e potassio (K), gli agricoltori sono alla ricerca di modi per ottimizzare la resa delle piante riducendo al minimo la loro applicazione e il loro consumo. Poiché questi macronutrienti in un campo coltivato variano anche su piccola scala, numerosi ricercatori hanno sviluppato tecniche di rilevamento in grado di mappare la presenza di queste sostanze chimiche. Mediante la valutazione della conducibilità elettrica è stato possibile rilevare la variabilità spaziale per l'applicazione sito-specifica dei fertilizzanti. Per migliorare la caratterizzazione di singoli profili di suolo, il metodo EMI può essere accoppiato a quello della resistività elettrica (ERT) per aumentare la risoluzione del sottosuolo (B. Tisseyre; H. Ojeda, 2007) e comprendere meglio la conformazione geologica sulla quale si è sviluppato il terreno più superficiale. Il principale vincolo comportato dai suddetti metodi è che, se usati singolarmente, spiegano solo pochi parametri. La fusione di dati provenienti da vari sensori può fornire una soluzione a questo problema. La fusione dei dati ha portato agli strumenti appropriati per l'aggregazione dei dati e la conseguente spiegazione della variabilità spaziale e temporale per la gestione sito-specifica nei vigneti. Un problema critico, tuttavia, sorge quando è necessario analizzare

congiuntamente dati multi-sorgente di diverso tipo. Il problema predominante con i sensori geofisici è che il segnale dipende dalle proprietà di un dato terreno. Nel caso dei sensori ECa, il valore ECa dipende da diversi fattori: contenuto di umidità del suolo, contenuto di argille nel suolo, mineralogia argillosa del suolo, capacità di scambio cationico, densità apparente del suolo e temperatura del suolo (M.C. Andrenelli; S. Magini, 2013). Sebbene questo segnale possa essere scomposto per estrarre le singole proprietà del suolo, spesso richiede più sensori da far funzionare contemporaneamente e/o temporaneamente.

Sono stati condotti diversi studi che hanno portato a modelli di variabilità più dettagliati mediante la fusione di dati derivanti da metodologie differenti. Uno studio svolto in un appezzamento di vigneto in Grecia ha permesso di confrontare dati mediante l'utilizzo di sensori di conducibilità elettrica e sensori prossimali per analizzare la chioma (E. Anastasiou; A. Castrignanò, 2019). Il confronto tra le mappe di variabilità del suolo e di quelle della chioma evidenziano modelli spaziali simili. Questo indica che la variabilità del vigore può essere fortemente legata alla variabilità del suolo. In ogni caso l'uso integrativo di diversi sensori può rivelarsi un utile supporto per la gestione sito-specifica a qualsiasi scala spaziale. Altri studi del suolo confrontati con dati NDVI hanno mostrato una buona correlazione tra le classi di suolo e le mappe NDVI e hanno rivelato che le classi di suolo a tessitura più fine avevano la vigoria più alta, mentre le classi di terreno a tessitura più grossolana (che hanno una minore capacità di ritenzione idrica rispetto alle classi di tessitura del suolo più fini) avevano il vigore più basso durante la stagione di crescita. Nella progettazione sono stati presi in considerazione molti fattori, tra cui: periodo di campagna durante una fase fenologica della vite quando il vigore potrebbe essere stato influenzato dalla variabilità del suolo (S. S. Hubbard; M. Schmutz, 2021); condizioni di umidità del suolo che hanno consentito a ECa di discriminare la variabilità del suolo; profondità di indagine EMI appropriata per l'imaging sull'intera zona inerente alla profondità della radice della vite; le scale caratteristiche di lunghezza laterale del suolo e la relativa variabilità vegetale alle risoluzioni spaziali EMI e NDVI; l'elusione dalle infrastrutture metalliche del vigneto che possono causare rumore nei set di dati geofisici. L'uso congiunto di dataset EMI e NDVI potrebbe anche essere esplorato per studiare come le relazioni suolo-pianta e la loro variabilità spaziale cambino in risposta alle condizioni meteorologiche e alle pratiche di gestione. I positivi risultati di questo studio pongono le basi per future direzioni di ricerca (S. S. Hubbard; M. Schmutz, 2021).

4.2 Monitoraggio della chioma

Lo studio e il monitoraggio della variabilità della chioma si ottiene attraverso l'applicazione di tecnologie mirate. Attualmente vengono utilizzate due metodi principali per il monitoraggio di chioma e vigore: sistemi di telerilevamento (remote sensing) e sistemi di monitoraggio a terra mediante sensori ottici (proximal sensing) (fig. 4-3). Le tecniche di remote sensing, con aerei o satelliti, possono caratterizzare la variabilità spaziale presente in vigneto all'interno della stessa forma di allevamento e dunque agevolare l'applicazione differenziata degli interventi agronomici per promuovere crescita e rese omogenee, con un conseguente miglioramento economico attraverso la limitazione dei costi di input e dell'impatto ambientale, fornendo migliori condizioni di vita per le piante insieme a una maggiore longevità delle medesime. Molto importante risulta essere la risoluzione delle immagini elaborate, infatti nelle risoluzioni più grossolane le immagini tenderanno a omettere dettagli rilevanti. Le immagini con risoluzione maggiore hanno dimostrato di essere efficaci, tuttavia richiedono un'elaborazione più dettagliata. I sensori multispettrali nel telerilevamento sono strumenti in grado di registrare la quantità di energia riflessa e trasmessa dagli oggetti della superficie terrestre nelle diverse lunghezze d'onda dello spettro elettromagnetico. Nella loro applicazione agricola, la quantità di radiazione riflessa e trasmessa nella regione del visibile (400-700 nm) è relativamente bassa, ad eccezione del picco nella regione del verde (struttura cellulare e pigmenti fotosintetici). Nel vicino infrarosso (700-1350 nm) le foglie assorbono poco, causa la struttura fogliare e quindi la riflettanza e la trasmittanza sono molto alte (R, Perria; P, Storchi, 2012). I sistemi di monitoraggio a terra mediante sensori ottici evitano i problemi associati ai pixel misti di suolo, erba e chioma di vite da telerilevamento. Sono progettati per essere montati su macchine da vigneto e compiere le varie misurazioni della chioma durante le normali operazioni in vigna come la potatura o l'irrorazione di antiparassitari. Dovrebbe fornire dati temporali più tempestivi sulla chioma durante la stagione vegetativa e quindi più opportunità per gestire la variabilità della resa (A. Matese; S.F. Di Gennaro, 2019).



Figura 4-3 sensori prossimali multispettrali (fonte: State of the Art of Monitoring Technologies and Data Processing for Precision Viticulture, M. Ammoniaci, S. Kartsiotis, 2021)

Non molti anni fa i costi di acquisizione di immagini tramite remote sensing erano notevolmente alti ma recentemente si sono abbassati permettendo ad ogni singolo agricoltore l'acquisizione di mappe multispettrali. Aspetti negativi possono essere la sicurezza dell'acquisizione dei dati in una determinata finestra temporale e con particolari caratteristiche e la loro immediata disponibilità per una gestione tempestiva della variabilità. I rilievi satellitari possono mappare grandi aree contemporaneamente, tuttavia, hanno ancora una risoluzione grossolana e sono limitati da un'eventuale copertura nuvolosa o da vincoli consistenti nel mettere in relazione i tempi delle immagini con fasi fenologiche specifiche a causa della tempistica di acquisizioni delle immagini (M. Ammoniaci; S. Kartsiotis, 2021). I droni sono stati recentemente incorporati nel telerilevamento dei vigneti, in quanto offrono un'elevata flessibilità di utilizzo, bassi costi operativi e una risoluzione spaziale molto elevata. I dati dell'indice di vegetazione possono essere raccolti utilizzando telecamere multispettrali equipaggiate sui droni (A. Matese; S.F. Di Gennaro, 2019). Questi mezzi sono adatti per applicazioni su piccola scala e di ricerca ma il loro carico utile limitato e la breve durata del volo rimangono ancora punti di debolezza per la loro implementazione su larga scala nella agricoltura di precisione.

Con l'obiettivo di fornire linee guida per la scelta dell'appropriata piattaforma di rilevamento in funzione della scala di analisi nella viticoltura di precisione studi hanno riportato che, basandosi sul confronto di diverse piattaforme di telerilevamento, si evidenzia che risoluzioni diverse forniscono risultati simili nel caso di vigneti caratterizzati da gradienti vegetativi

pronunciati e grandi grappoli in vigneto. Al contrario, nei vigneti caratterizzati da piccoli gradienti di vegetazione, le immagini a bassa risoluzione non riescono a rappresentare la variabilità all'interno del vigneto. L'analisi dei costi mostra che, al di là degli aspetti tecnici, esiste un pareggio economico tra UAS e le altre piattaforme tra 5 e 50 ha di copertura dell'area; tuttavia, la risoluzione rimane maggiore per l'UAS (M. Ammoniaci; S. Kartsiotis, 2021).

Il telerilevamento consente inoltre di elaborare informazioni dirette sui suoli in base a parametri quali la temperatura superficiale, il contenuto in acqua, la copertura della chioma. L'utilizzo dei sistemi informativi geografici rende possibile integrare immagini da telerilevamento, informazioni geomorfologiche (pendenze, fasce altimetriche, esposizioni), meteorologiche, cartografiche. È quindi possibile utilizzare il telerilevamento integrato in un sistema informativo geografico (GIS) per realizzare zonazioni viticole in tempi ristretti (A. Castagnoli; P. Dosso, 2002). L'approfondimento e l'illuminazione di questo aspetto potrebbe essere molto utile per strategie viticole specifiche come la vendemmia selettiva, considerando che la data di vendemmia può essere scelta per sfruttare un determinato parametro qualitativo dell'uva piuttosto che un altro.

Gli strumenti di telerilevamento sono in grado di fornire le caratteristiche della chioma mediante l'uso di indici di vegetazione che permettono di valutare le variazioni della crescita all'interno del vigneto, così facendo si possono mappare i cambiamenti che avvengono tra un anno e l'altro.

4.2.1 *Confronto tra gli indici di vegetazione*

L'indice di vegetazione (VI) è un indicatore grafico utilizzato in agricoltura per valutare lo stato di una pianta attraverso l'osservazione dello spettro riflesso in più bande. Le piante sono colpite dalla luce solare, tendono ad assorbire una certa quota e a rifletterne una parte nel vicino infrarosso (NIR), invisibile all'occhio umano. Le foglie in condizioni di stress o senescenti mostreranno più luce rossa rispetto alle foglie verdi e sane (A. Pal Singh; A. Yerudkar, 2022). Alcuni studi hanno dimostrato che le misure del vigore della vite, mediante indici di vegetazione come il Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), possono fornire informazioni utili per ottimizzare la gestione della produzione dell'uva e quindi aumentare la redditività per i viticoltori. Esistono collegamenti tra le caratteristiche fisiche delle chiome e i parametri enologici delle uve, derivati da misurazioni successive come acido malico, composti fenolici, antociani, zuccheri e pH. Oltre all'NDVI, esistono numerosi indici quali: Normalized Difference Red-Edge Index (NDRE), Modified Soil Adjusted Vegetation Index (MSAVI), Normalized Difference Water Index (NDWI), Fraction of Vegetation Cover (FVC) e Fraction of Photosynthetically Active Radiation (FAPAR) legato alla radiazione

vigorosa e fotosinteticamente attiva assorbita dalle foglie più verdi e più sane (N. Darra; E. Psomiadis, 2021). Altri indici sono correlati a singole caratteristiche della chioma, ad esempio: il Chlorophyll Red-Edge (CHLRE) correlato alla clorofilla presente nella pianta, e quindi in grado di rilevare deficit dello stato vegetativo, e il Normalized Difference Moisture Index (NDMI) correlato al deficit idrico (E. Mattioli; S. Antognelli, 2017).

Focalizzando l'attenzione sull'NDVI, questo indice definisce lo stato di salute della pianta considerando lo spettro che riflette nel vicino infrarosso e quello nel campo del visibile (lunghezze d'onda rosse). L'NDVI viene quindi utilizzato per capire se le piante sono sane e quanta biomassa hanno. Quando il campo è coperto di foglie sane, l'indice NDVI sale. Se c'è un'area con molta vegetazione, allora NDVI potrebbe non essere in grado di vedere cambiamenti molto piccoli nella vegetazione. Oltre a monitorare la salute delle piante è molto importante per determinare l'altezza della chioma, il contenuto di clorofilla, quando iniziare ad usare fertilizzante e quando iniziare l'irrigazione (A. Pal Singh; A. Yerudkar, 2022). In numerose indagini, le letture NDVI nei vigneti sono state correlate all'indice di area fogliare (LAI). Il rapporto tra NDVI e LAI del vigneto è ben noto perché NDVI è fortemente legato alla quantità lorda di clorofilla. L'aumento della superficie fogliare porta a una maggiore quantità lorda di clorofilla per unità di superficie del vigneto. L'NDVI non ha una connessione lineare con LAI (E. Mattioli; S. Antognelli, 2017).

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R}$$

dove NIR è la riflettanza alle lunghezze d'onda del vicino infrarosso e R è la riflettanza alle lunghezze d'onda nel rosso.

4.2.2 *Confronto fra UAS e satellite (Sentinel-2)*

Diversi studi hanno permesso di confrontare dati ottenuti da satellite Sentinel-2 e immagini ad alta risoluzione tramite UAS, con parametri chiave del suolo come biomassa, resa e composizione dell'uva campionati all'interno di diverse zone di vigore durante il momento della vendemmia (S. F. Di Gennaro; R. Dainelli, 2019). I risultati dimostrano buone correlazioni dei dati NDVI tra i due sistemi di monitoraggio che hanno fornito risultati simili nel caso di vigneti caratterizzati da forti gradienti di vegetazione e la presenza di grappoli abbondante. Le immagini a bassa risoluzione, tramite satellite o aerei, non riescono a rappresentare la variabilità nel vigneto. Inoltre, considerata la particolarità dei sistemi di allevamento a contropalliera, si evidenzia l'impossibilità di distinguere la chioma dall'interfilare interfilare nel caso di immagini a bassa risoluzione, cosa che limita l'applicabilità dei sistemi di monitoraggio tramite satelliti (A. Matese; P. Toscano, 2015).

Misurazioni differenti verranno ottenute su sistemi di allevamento differenti da quelle eseguite nello studio appena descritto.

4.2.3 LAI

L'indice di superficie fogliare (LAI), definito come “l'area totale di tessuto fogliare per unità di superficie del suolo” (J. M. Chen & Black, 1992), è un importante parametro agronomico correlato alla capacità fotosintetica, all'utilizzo delle acque, al microclima, al vigore della chioma, alla qualità dell'uva e al potenziale enologico.

Per tenere conto della variabilità locale di questo parametro si definiscono due categorie di metodi di stima dell'area fogliare: diretta e indiretta. I metodi distruttivi diretti, a causa della loro natura, offrono un interesse limitato ai coltivatori e persino agli scienziati che desiderano seguire la crescita della vite. I metodi indiretti utilizzano misurazioni ottiche basate sulla relazione tra la struttura della chioma e l'intercettazione della radiazione.

VitiCanopy (fig. 4-4) è una delle app più utilizzate che permette di misurare l'indice di superficie fogliare (LAI) nei vigneti attraverso immagini acquisite da smartphone/tablet.

Disponibile per sistemi operativi iOS, l'app permette di calcolare sia la LAI che la densità della chioma in modo da monitorare in modo semplice e veloce la crescita delle viti e il vigore dei vigneti (R. De Bei; S. Fuentes, 2016). Ogni risultato ottenuto con VitiCanopy è georeferenziato in modo da poterlo rappresentare tramite una mappa, la quale permette di visualizzare la variazione di vigoria dell'intero vigneto. Queste misure possono essere utilizzate per la gestione del vigneto (interventi agronomici), ma possono anche essere correlate alla quantità e alla qualità della produzione finale.

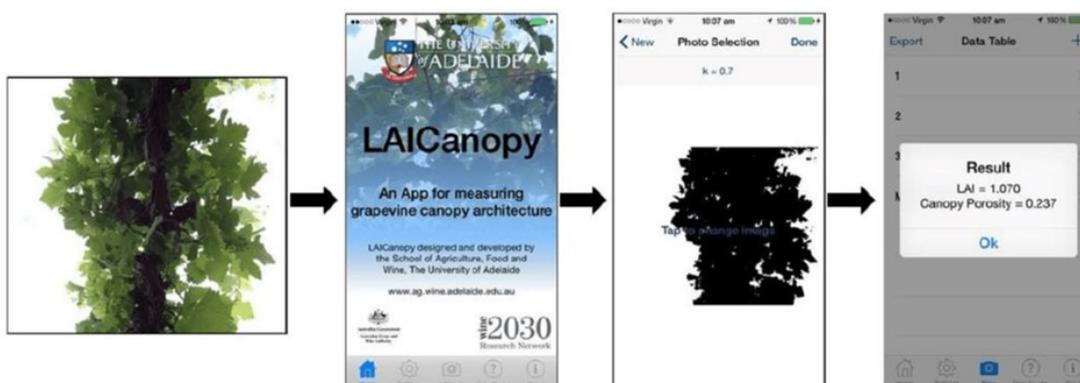


Figura 4-4 App VitiCanopy per valutare il vigore della vite (fonte: State of the Art of Monitoring Technologies and Data Processing for Precision Viticulture, M. Ammoniaci, S. Kartsiotis, 2021)

4.2.4 *Proximal e remote sensing per mappare la variabilità*

Molte ricerche riguardanti la viticoltura di Precisione sfruttano un'ampia gamma di tecnologie disponibili di telerilevamento e di rilevamento prossimale per descrivere la variabilità spaziale e temporale del vigneto. Il telerilevamento fornisce informazioni per aree estese al contrario del rilevamento prossimale, utilizzato principalmente per applicazioni su scala ridotta con una risoluzione più elevata.

I sensori prossimali hanno il vantaggio di avere una sorgente di luce propria, quindi, sono in grado di superare numerose restrizioni associate al telerilevamento satellitare o aereo. Queste limitazioni includono condizioni meteorologiche avverse ed effetti atmosferici. I sensori prossimali riducono la distanza tra la sorgente luminosa e il target e possono essere guidati verso la parte desiderata della chioma; pertanto, riducono l'effetto delle ombre, minimizzano le interferenze del suolo e migliorano il potenziale di rilevamento. I risultati dell'analisi prossimale e di telerilevamento rivelano una correlazione soddisfacente tra gli indici di vegetazione (NDVI), con la resa in specifici stadi di crescita della vite (N. Darra; E. Psomiadis, 2021).

4.2.5 *Wireless sensor network*

Nell'ultimo decennio, i sistemi di monitoraggio wireless sono stati utilizzati nella viticoltura di precisione al fine di comprendere la variabilità del vigneto, quindi suggerire pratiche gestionali appropriate per migliorare la qualità dei vini. Le reti di sensori wireless sono una rete di piccoli dispositivi di rilevamento noti come nodi di sensori, disposti in modo regolare lungo il vigneto, che collaborano tra loro per raccogliere, elaborare e comunicare dati fisici (fig. 4-5). L'applicazione principale di un WSN è l'acquisizione di parametri micrometeorologici a livello della chioma e del suolo. I sensori acquisiscono dati e inviano le informazioni raccolte al controllore (server centrale), che trasmette a sua volta queste informazioni al cloud o a un dispositivo portatile.

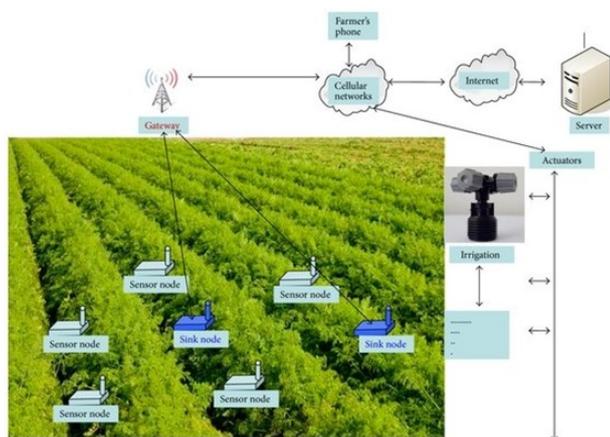


Figura 4-5 Architettura di un sistema wireless sensor network (WSN) (fonte: *Analysis and Solutions to 3G Gateway Issues in Agriculture; Zhihui Ge, Wei Liu; 2015*)

4.2.5.1 Vantaggi dei WSN

Basso consumo energetico: l'intero sistema di monitoraggio dovrebbe tenere conto del consumo di energia che dovrebbe essere ridotto al minimo il più possibile in ogni blocco del progetto del sistema. Tutti i componenti hardware del sistema di monitoraggio sono dotati di una batteria interna con un'autonomia di una settimana.

Basso costo: poiché il numero dei nodi sparsi nel vigneto sono elevati, essi devono essere il più economici possibile. La loro facile installazione e il basso costo di manutenzione rendono i WSN una soluzione conveniente per il monitoraggio. I WSN sono progettati per funzionare diversi anni, riducendo notevolmente le risorse umane per la manutenzione e la riparazione.

Manodopera ridotta: riduce efficacemente il fabbisogno di manodopera. L'agricoltore può controllare a distanza il suo sistema senza recarsi in campo. I nodi inoltre sono di dimensioni e peso ridotti e non richiedono cablaggio, ovvero sono facili da installare nella maggior parte dei luoghi e delle applicazioni.

Bassa velocità di trasmissione: per la trasmissione dei dati del sensore non sono necessarie velocità di trasmissione elevate. Ciò consente anche un minor consumo energetico e un tasso di errore ridotto durante la trasmissione dei dati.

I protocolli di comunicazione WSN più utilizzati in agricoltura sono (M. Ammoniaci; S. Kartsiotis, 2021):

- Cellulare (GSM, 3G, 4G), è il più adatto per applicazioni che richiedono un'altissima frequenza di dati ma è anche costoso e con un elevato consumo energetico;

- 6LoWPAN, è un protocollo di comunicazione basato su IP a basso costo, bassa larghezza di banda e basso consumo energetico;
- ZigBee, è un protocollo di comunicazione wireless con una struttura flessibile e un'elevata autonomia della batteria ma ha un breve raggio operativo con bassa velocità dati ed è anche meno sicuro rispetto ai sistemi basati su Wi-Fi;
- BLE, è un protocollo simile alla tecnologia Bluetooth, ha una larghezza di banda ridotta e un breve raggio operativo (circa 10 m);
- LoRaWAN, è un protocollo molto comune utilizzato in agricoltura grazie alla sua possibilità di coprire vaste aree con un basso consumo energetico.

4.2.5.2 NAV system

Il sistema NAV è un sistema di monitoraggio completo che ha dato flessibilità progettuale e di installazione, rispondendo pienamente agli obiettivi di monitoraggio in termini di efficienza energetica e prestazioni. Il sistema comprende una stazione agrometeorologica di base (Unità Master) e una serie di nodi periferici wireless (Unità Slave) ubicati nel vigneto. L'Unità Master è una tipica stazione di monitoraggio a punto singolo posta all'esterno del vigneto in un sito specifico, per la raccolta di dati agrometeorologici. Le Unità Slave sono stazioni multiple poste nel vigneto e dotate di sensori agrometeorologici per il monitoraggio ambientale sito-specifico, che memorizzano e trasmettono i dati all'Unità Master. Un software elabora i dati e un'interfaccia utente che opera sul server centrale fornisce il controllo in tempo reale (A. Matese; S.F. Di Gennaro, 2009). Pochi studi si occupano della WSN applicata alla agricoltura di precisione: alcuni articoli presentano una panoramica sullo sviluppo delle tecnologie dei sensori wireless e degli standard per le comunicazioni wireless applicati ai sensori wireless, altri si sono concentrati sull'importanza dell'efficienza energetica di WSN. Il sistema NAV offre una grande flessibilità, essendo personalizzabile in termini di sostituzione di sensori come il tipo di canale di acquisizione e la frequenza di acquisizione dati.

4.2.5.3 IoT system

Il sistema IoT (Internet of Things) è una rete di sensori wireless basata su Wi-Fi composta da nodi autonomi e autoalimentati distribuiti in un vigneto. Tali nodi comprendono sensori che consentono di ottenere una conoscenza esaustiva sui processi di viticoltura. Il sistema genera avvisi che avvertono i viticoltori delle misure da adottare e archivia i dati meteorologici storici raccolti da varie località del vigneto.

Per facilitare la gestione e la visualizzazione della situazione del vigneto, le informazioni ottenute vengono presentate attraverso un portale web di facile utilizzo (J.P. Pérez-Expósito; T. M. Fernández-Caramés, 2017).

4.2.5.4 Tecniche WSN e telerilevamento (UAS)

La combinazione dei dati georeferenziati WSN e delle immagini aeree consente lo sviluppo di un sistema completo di supporto alle decisioni che non solo rende possibile l'implementazione di strategie di intervento rapido, ma supporta anche azioni predittive per migliorare la produttività e la qualità riducendo al minimo i costi e il degrado ambientale. Queste due tecniche combinate permettono di avere alcuni vantaggi. Una rete di rilevamento intelligente permette di elaborare i dati da una serie di sensori in tempo reale insieme alla loro posizione e con immagini aeree. I dati verranno quindi visualizzati sulla mappa con le posizioni e le letture dei sensori (P. Spachos; S. Gregori; 2019). La rete di rilevamento intelligente si adatterà anche ai cambiamenti dinamici come la disponibilità di nodi e collegamenti, l'energia rimanente, la densità della chioma, le condizioni meteorologiche, la stagione e l'ora del giorno. Le misurazioni raccolte hanno già indotto i produttori di vino ad effettuare azioni correttive sul campo (in particolare i valori di temperatura e umidità relativa segnalavano la possibile comparsa di un'infezione fungina). Esperimenti hanno rivelato che, sia l'interfaccia utente della stazione base che i sistemi di allerta basati su SMS, hanno aumentato la consapevolezza della situazione, fornendo agli agricoltori lo stato di salute delle colture in tempo reale. In particolare, lo stato di temperatura e umidità delle parcelle di vigneto utili a prevenire danni e perdite dovute alle gelate (J. Valente; D. Sanz, 2011).

4.3 Monitoraggio della qualità

Risulta importante conoscere i vari parametri enologici delle uve (zuccheri, antociani, tannini, pH, acidità) per monitorare il vigneto durante la maturazione dei grappoli al fine di valutare un'epoca vendemmiale ottimale. Le operazioni preliminari di prelievo e preparazione del campione sono molto laboriose; ciò può ripercuotersi in modo negativo sul volume delle uve campionate, soprattutto quando si deve lavorare su vaste superfici. Inoltre, poiché in vigna esiste un'ampia eterogeneità di maturazione che varia sia fra i grappoli della stessa pianta e sia fra singoli acini all'interno del grappolo, affinché il campionamento risulti significativo diventa particolarmente importante lavorare su un numero maggiore di acini. Al contrario, si possono attuare misurazioni non distruttive che sono importanti sia per evitare sprechi di

materiale sia per scopi di ricerca poiché, lavorando sulle medesime bacche, non si incorre in errori di campionamento.

Si è perciò fatta strada la necessità di individuare metodi alternativi finalizzati alla misura della qualità dell'uva che possano, almeno per qualche aspetto, superare i limiti degli attuali metodi analitici disponibili. Lo strumento ideale dovrebbe consentire la misura contemporanea del maggior numero di parametri di 'qualità' possibile, essere maneggevole e facilmente trasportabile, in modo tale da poterlo utilizzare direttamente in campo senza il bisogno di effettuare lo stacco degli acini dalla pianta e, naturalmente, dovrebbe fornire una risposta veloce con un margine di errore accettabile.

Il monitoraggio non distruttivo dei parametri di qualità dell'uva è basato su sensori ottici montati su dispositivi manuali, portati da un operatore, utilizzati per misurazioni prossimali georeferenziate. Si possono utilizzare strumenti portatili, dove il capostipite di questo gruppo risulta essere il rifrattometro, strumento ottico portatile capace di misurare il tenore di solidi solubili nel succo dell'acino. Esistono strumenti spettroscopici, geolocalizzati, tra cui il Dualex4, strumento a pinza assemblabile in 3 versioni, una per la misura degli antociani, una per la misura dei flavonoli e una per gli acidi idrossicinnamici, ed il Multiplex (fig. 4-6 a) assemblabile in differenti configurazioni, capace di misurare differenti classi di polifenoli. Utilizzano sensori spettroscopici basati sulla misura della fluorescenza della clorofilla a circa 520nm, lunghezza d'onda corrispondente al picco di massima assorbanza degli antociani, e sulle proprietà schermanti dei polifenoli che si accumulano nel tessuto vegetale in esame (A. Ferrandino; C. Pagliarani; 2011). Per garantire la produzione di un vino di alta qualità che soddisfi le richieste del mercato, è essenziale comprendere il livello di antociani presente nelle uve a bacca rossa. Questo permette di determinare le strategie di raccolta dell'uva e le tecniche enologiche da utilizzare, al fine di ottenere un prodotto finale ottimale.

Diversi studi sull'uso di questo strumento, nella determinazione del contenuto in antociani nei vitigni a bacca rossa, hanno concluso che, entro certi livelli di concentrazione degli antociani (circa 1300 mg/kg uva), lo strumento riesce a calcolare l'effettivo contenuto, mentre per concentrazioni superiori la sua capacità discriminatoria si riduce (A. Ferrandino; C. Pagliarani, 2011). Ci sarà quindi la necessità di sviluppare versioni aggiornate degli strumenti che consentano la misurazione del contenuto in antociani anche nel caso in cui i quantitativi accumulati nell'acino raggiungano concentrazioni superiori a quelle quantificabili dallo strumento. Essendo lo strumento fortemente dipendente dalla varietà di uva, sarà necessario tarare lo strumento caso per caso o, in alternativa, riferirsi alle curve di taratura proposte

assicurandosi preventivamente che esse siano state calcolate per vitigni con profilo antocianico simile a quello delle uve di cui si vuole conoscere la stima del colore.

Sarà necessario sviluppare nuove tecnologie, per il monitoraggio della qualità, in grado di misurare contemporaneamente più parametri. Tra i più importanti dispositivi di questo tipo troviamo lo Spectron (Pellenc SA, Pertuis Cedex, Francia) (fig. 4-6 b) (VII). È uno spettrofotometro portatile con GPS integrato, progettato per monitorare la maturazione dell'uva attraverso la misurazione non distruttiva dei parametri relativi alla qualità dell'uva come la concentrazione di zucchero, acidità, antociani e contenuto d'acqua.



Figura 4-6 Strumenti di precisione per il monitoraggio della qualità (a) Multiplex, (b) Spectron (fonte: *State of the Art of Monitoring Technologies and Data Processing for Precision Viticulture*, M. Ammoniaci, S. Kartsiotis, 2021)

Esistono inoltre gli Spettrometri NIR (Near Infrared Reflectance), ovvero spettroscopia nel vicino infrarosso. Sono strumenti che operano nel vicino infrarosso e sono in grado di valutare qualsiasi componente dell'acino d'uva misurando riflettanza e trasmittanza. Ad ogni gruppo chimico funzionale corrispondono assorbimenti caratteristici nel vicino infrarosso che vengono messi in relazione con qualsiasi classe di composti chimici delle uve. Data l'ampia gamma di sostanze determinabili con questa tecnica, quando sarà possibile la realizzazione di strumenti portatili a bassi costi e, contemporaneamente la ricerca ne avrà validato l'uso, per lo meno su certe classi di composti di interesse pratico, è probabile che essa rappresenterà il futuro della valutazione della qualità dell'uva (VIII).

4.4 Monitoraggio delle malattie

Malattie da insetti, agenti patogeni e altri organismi infettivi possono diventare un grave problema poiché compromettono la qualità e di conseguenza il prodotto finale. Una delle malattie dannose per la vite è l'oidio. È una grave malattia fungina della vite che, come per altre importanti colture speciali, causa gravi danni come la perdita di resa, il deprezzamento del vino e la riduzione della qualità del prodotto. Alcuni ricercatori hanno visto come i sensori ottici prossimali possono ricoprire un ruolo importante nell'identificazione di focolai di oidio, ma spesso le analisi fatte nelle prime fasi vegetative della vite sono state poco efficaci a causa della combinazione di piccole dimensioni dei germogli e ridotta presenza delle strutture fungine. Dalle immagini multispettrali prese sulle foglie di vite, nelle diverse angolature, si è visto che la sensibilità di rilevamento generalmente aumenta con l'angolo di visione, con un valore di picco ottenuto per immagini acquisite a 60° (R Oberti; M Marchi, 2014).

Hanno sviluppato un sistema robotico con rilevamento della malattia integrato, dotato di camere multispettrali e di una nuova irrorazione di precisione. I ricercatori hanno testato il sistema robotico su quattro diverse repliche della chioma della vite, provenienti da differenti appezzamenti e preparati in una serra allineando piante in vaso che esibiscono diverse livelli di malattia. I risultati sono stati molto soddisfacenti e hanno indicato che il robot riesce a rilevare e spruzzare automaticamente dall'85% al 100% dell'area malata all'interno della chioma e può ridurre l'uso di pesticidi dal 65% all' 85% rispetto a una convenzionale irrorazione omogenea della chioma (R. Oberti; M. Marchi, 2016).

4.4.1 DSS

I Decision Support System (DSS) sono software di supporto alle decisioni che si stanno diffondendo in agricoltura. I DSS (fig. 4-7) I DSS “simulano lo sviluppo dei patogeni e degli insetti in campo al fine di riconoscere i momenti più critici per la riuscita della campagna produttiva, nonché individuare quali siano le date o i periodi per intervenire con un trattamento al fine da massimizzare l'efficacia contro l'avversità, permettendo di raggiungere gli obiettivi di razionalizzazione e ottimizzazione delle risorse e dei fattori produttivi previsti dall'agricoltura di precisione” (IX). Questi sistemi di supporto esaminano il decorso di oidio, peronospora e altre malattie fungine, oppure riescono a simulare la crescita degli insetti secondo un modello previsionale. Sono diversi i DSS disponibili nel mercato per far fronte a diversi aspetti e applicabili sia in vigneto che in altre colture.

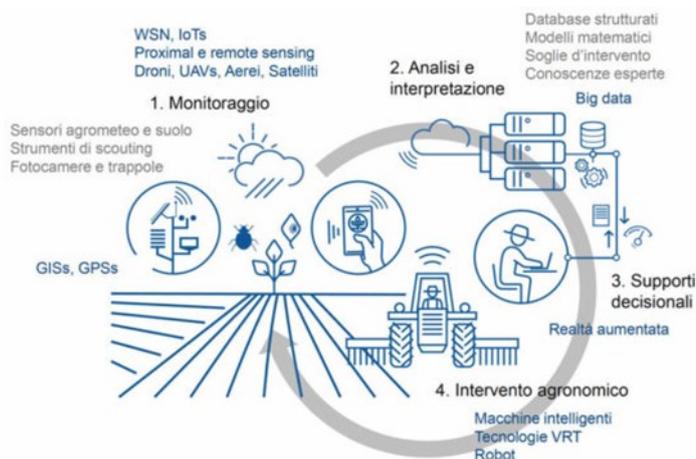


Figura 4-7 Architettura dei DSS (fonte: DSS, sistemi fondamentali per l'agricoltura di precisione di P. D'Antonio, C. Fiorentino; 2021)

Vite.net è uno dei sistemi di supporto alle decisioni più utilizzato in viticoltura, programmato per trasformare i fenomeni biologici altamente complessi di un vigneto in dati e confrontarli con modelli che permettono un'interpretazione della situazione precisa, fornendo così all'utente indicazioni per un eventuale trattamento fitosanitario. Questo porta a benefici significativi sia dal punto di vista economico, grazie alla riduzione dei costi e all'aumento dell'efficienza delle operazioni, sia dal punto di vista socio-ambientale, poiché si riducono i consumi di risorse come acqua, fertilizzanti, prodotti fitosanitari e energia non rinnovabile. I DSS sono sistemi complessi, ma modulari e flessibili capaci di comprendere i dati analizzati e restituire consigli importanti per l'agricoltore. È stato dimostrato che il costo dell'utilizzo di un DSS è molto variabile ma consente risparmi rispetto a una programmazione con sistemi tradizionali intorno al 30-35% sia in termini di prodotti fitosanitari che di lavoro (V. Rossi; S. legler, 2019).

Un altro DSS in viticoltura è Elaisian che sfrutta le informazioni raccolte da una stazione agrometeorologica, posizionata all'interno del campo per monitorare il microclima, combinate a dati storici e immagini satellitari. Si tratta di un servizio di data analysis, ovvero di elaborazione dati, che si avvale dell'Internet of Things (IoT), stesso sistema utilizzato nelle reti di sensori wireless (WSN). All'utente viene fornita, attraverso una web app, una serie di informazioni tramite messaggi di allerta per la prevenzione delle patologie riducendo così il numero dei trattamenti necessari e, di conseguenza, i costi di produzione (P. D'Antonio; C. Fiorentino, 2019).

4.5 Monitoraggio dell'acqua

“I cambiamenti climatici che si stanno verificando nel mondo, stanno portando gradualmente ad una riduzione della disponibilità idrica e ad un aumento delle temperature. Sapendo che circa il 70% dell'acqua viene utilizzata per le attività agricole, una delle sfide degli agricoltori del bacino del Mediterraneo è proprio quella di ridurre la quantità di acqua utilizzata attraverso una gestione idrica più efficiente” (X).

“La quantità di acqua richiesta da un vigneto dipende da diversi fattori, come le precipitazioni annue, l'evapotraspirazione, l'età delle piante, lo stadio di sviluppo, il periodo di crescita, il tipo di terreno, le condizioni ambientali, la varietà e le tecniche di coltivazione” (XI). Una delle principali misure da adottare nel settore vitivinicolo sarà un'adeguata strategia irrigua, in grado di efficientare l'uso dell'acqua e di monitorare lo stress idrico delle colture.

L'irrigazione di precisione nella viticoltura di precisione è un approccio che consente di ottimizzare l'uso dell'acqua per la coltivazione delle viti. Questo sistema si basa sull'applicazione mirata dell'acqua in base alle reali esigenze delle piante, tenendo conto di fattori come la varietà di uva, il tipo di suolo, le condizioni climatiche e le fasi di sviluppo della pianta. L'irrigazione di precisione offre numerosi vantaggi nella viticoltura di precisione. Innanzitutto, consente di migliorare la qualità delle uve e quindi del vino, poiché le piante ricevono l'acqua necessaria per un sano sviluppo e una corretta maturazione. Inoltre, riduce il rischio di stress idrico o eccesso di umidità, che possono causare malattie e ridurre la resa delle piante (XII). Le prime tecnologie applicate alla gestione dell'acqua nel vigneto consistevano nel collocare la foglia all'interno di una camera chiusa facendo rimanere il picciolo all'esterno. Successivamente si immetteva dell'azoto sotto pressione all'interno della camera fino al momento di fuoriuscita dal picciolo di una goccia di linfa. La pressione che registrata all'interno della camera, letta tramite un manometro, corrispondeva al potenziale idrico della foglia. Con tale metodo era possibile stabilire lo stato idrico della coltura in una determinata fase della stagione vegetativa. Le ultime tecnologie messe in atto nella viticoltura di precisione per la gestione dell'acqua riguardano l'utilizzo di tecniche ottiche (termografia IR e spettroscopia Vis/NIR) per valutare il grado di stress idrico in vigneto. Le analisi termografiche sono state realizzate mediante una fotocamera sensibile oltre che alla radiazione nella regione del visibile anche nell'infrarosso; in questo modo si è in grado di misurare la temperatura delle superfici, nel nostro caso quella delle foglie di vite ma anche le temperature del terreno. Infatti, durante la traspirazione delle foglie, l'acqua viene persa attraverso gli stomi e la temperatura delle foglie diminuisce, rendendolo un indicatore dello stato idrico delle piante. Tuttavia, se il processo di traspirazione si interrompe, poiché la dissipazione del calore

nella foglia non ha più luogo, la temperatura fogliare aumenta. Vengono utilizzati UAS, aerei o satelliti che forniscono una caratterizzazione dettagliata della temperatura calcolando l'indice di stress idrico delle colture (CWSI) e confrontati con il potenziale idrico dello stelo (Ψ_s) e la conduttanza stomatica (gs) per valutare la variabilità dello stato idrico in un vigneto. Dallo studio è emerso che tale tecnologia risulta efficace per stime istantanee e stagionali dello stato idrico (L.G. Santesteban; S.F. Di Gennaro, 2017).

Negli ultimi anni sono stati sviluppati strumenti portatili di facile utilizzo dedicati alla misura del potenziale idrico della vite in modo rapido direttamente in campo. Esistono infatti termocamere oppure spettroscopi che investono di radiazione luminosa il campione e misurano la componente riflessa, che viene visualizzata sul touch screen e registrata tramite un software di gestione dello strumento.

4.6 Monitoraggio delle rese

La mappatura e la previsione delle produzioni all'interno di un vigneto offrono notevoli benefici in termini di ottimizzazione dei processi aziendali, consentendo l'individuazione e il monitoraggio delle aree meno produttive. Tuttavia, è importante sottolineare che non è possibile basarsi esclusivamente sui dati dell'anno precedente per prevedere le rese di un determinato anno, poiché ogni stagione presenta caratteristiche uniche in termini di temperatura, umidità, precipitazioni e gestione agronomica. Tuttavia, è possibile effettuare previsioni sulle rese per l'anno corrente già alcune settimane o mesi prima. L'utilizzo dell'indice NDVI risulta utile per valutare le rese poiché le zone con una vegetazione più vigorosa tendono ad avere una produzione superiore rispetto a quelle con un vigore ridotto. I dati ottenuti andranno confrontati con dati ottenuti direttamente in campo poiché ci saranno numerose variabili coinvolte (andamento meteorologico stagionale, malattie, suolo, operazioni colturali) (S.F. Di Gennaro; P. Toscano, 2019).

Si possono inoltre ottenere delle mappe di resa che permettono ai viticoltori e ai produttori di vino di identificare le aree dove la resa è differente all'interno di uno stesso appezzamento. Esistono altre metodologie per stimare la resa che sfruttano celle di carico nei nastri trasportatori delle vendemmiatrici al fine di generare delle buone mappe spaziali. Attraverso dei monitor montati nella trattrice si visualizza la quantità di prodotto che si raccoglie in ogni parte dell'appezzamento (J. A. Taylor; L. Sánchez, 2016).

Capitolo 5

L'AUTOMAZIONE NELLA NUOVA VITICOLTURA

5.1 Macchine operatrici a rateo variabile (VRT)

L'evoluzione delle macchine per la viticoltura ha portato allo sviluppo di sistemi per la regolazione e il controllo delle macchine operatrici stesse, capaci di variare in modo continuo la risposta in funzione delle condizioni e delle caratteristiche del vigneto con il fine di ottimizzare l'uso delle risorse, ridurre le dispersioni energetiche e differenziare la qualità del prodotto ottenibile. La meccanizzazione della viticoltura, oltre ai nuovi sistemi di monitoraggio culturale e ambientale, si può avvalere oggi della geomatica e dell'informatica. Dalla loro combinazione si ottengono dati georeferenziati che, una volta elaborati, rendono possibili interventi meccanizzati a rateo variabile (M. Gatti; A. Garavani, 2016). Le applicazioni delle tecnologie a rateo variabile sono fundamentalmente di due tipi: nel primo caso vengono messe a punto attrezzature per una lavorazione sito-specifica del vigneto basata sulla lettura di mappe di prescrizione precedentemente ottenute attraverso un attento monitoraggio culturale e pedologico; nel secondo caso la macchina operatrice monta sensori in grado di rilevare uno o più parametri e di agire direttamente sul vigneto. Ad oggi, sono state documentate solo poche applicazioni della tecnologia a tasso variabile (VRT) (A. Matese; S. F. di Gennaro, 2015).

5.1.1 *Sfogliatrice VRT*

L'operazione di defogliazione, anche detta sfogliatura, è condotta in vari periodi compresi tra l'allegagione e la vendemmia ed il suo scopo principale riguarda l'apertura della vegetazione in prossimità della zona fruttifera con il conseguente miglioramento dell'efficacia dei trattamenti fitosanitari al fine di prevenire eventuali malattie. Le defogliatrici a rateo variabile (fig. 5-1) sono progettate per rimuovere le foglie in modo controllato, tenendo conto della diversa densità di vegetazione nelle diverse aree del vigneto. Questa tecnologia fa riferimento a mappe di vigore precedentemente ottenute da vari sistemi di telerilevamento (UAS, aerei, satellite). Tali mappe forniranno informazioni alla defogliatrice la quale provvederà ad

effettuare un'operazione più pronunciata nelle zone ad alta vigoria e una sfogliatura meno invadente nelle zone a bassa vigoria. Queste macchine rivoluzionarie permettono una riduzione del lavoro rispetto ad un'operazione manuale, da 40-60 ore per ettaro a 2/3 ore per ettaro (XIII). Defogliatrici e cimatrici VRT sono ritenute di importanza superiore persino rispetto alla concimazione VRT poiché permettono con maggiore efficacia di controllare la protezione e la maturazione dei grappoli.



Figura 5-1 Defogliatrice VRT (fonte: tecnovict)

5.1.2 Irroratrici VRT

Nella gestione agronomica tradizionale, i trattamenti fitosanitari vengono eseguiti in maniera uniforme sull'intero vigneto. Tuttavia, per ridurre la quantità di soluzione distribuita e concentrarsi esclusivamente sulle zone infette, sono state sviluppate tecnologie di irrorazione a rateo variabile (fig. 5-2 a). La loro caratteristica principale è la precisione dell'intervento, che consente di regolare la quantità di soluzione, composta da agrofarmaci e acqua, in base alle dimensioni delle chiome anziché alla superficie terrestre da trattare. L'atomizzatore è dotato di un sistema di distribuzione proporzionale che utilizza i dati in tempo reale sulla dimensione delle chiome forniti da una coppia di sensori ad ultrasuoni posizionati sulla parte anteriore del trattore (XIV), insieme alla rilevazione della velocità. I vantaggi evidenti includono una distribuzione uniforme dei principi attivi, un risparmio di prodotto, un miglioramento della qualità del trattamento e una drastica riduzione della deriva, grazie alla capacità di mantenere costante la quantità di prodotto proporzionata alla superficie fogliare. Questo si differenzia dal trattamento tradizionale che tende a diminuire la copertura all'aumentare della densità delle

chiome. Inoltre, esiste un sistema di diserbo basato su un sensore ottico che misura la riflettanza su due bande di lunghezza d'onda (verde e vicino infrarosso). Utilizzando queste due bande, viene calcolato un indice che permette al sistema di rilevare la presenza di erbe infestanti tra le file o sotto la chioma delle viti e attivare l'applicazione dell'erbicida. Questo sistema consente un risparmio di erbicida fino al 75% (Chambre d'agriculture de l'Aude, 2005).

5.1.3 *Spandiconcime VRT*

La concimazione è diventata una delle prime pratiche agronomiche ad adottare l'applicazione a dosi variabili per migliorare la sostenibilità economica e ambientale della viticoltura. L'applicazione a dosi variabili implica la distribuzione mirata delle sostanze nutritive solo nelle aree e nelle quantità necessarie per soddisfare le esigenze delle piante e del terreno. L'obiettivo principale è ridurre la variabilità tra zone omogenee, quindi alle zone con una bassa vigoria viene associata una dose elevata di fertilizzante, mentre alle zone con una alta vigoria viene associata una dose bassa o nulla (V. Marco, 2011). La distribuzione mirata del concime all'interno del vigneto avviene tramite sistemi che possono adattare la dose in base alla posizione nel vigneto (fig. 5-2 b), grazie all'utilizzo di sistemi GNSS. Questi sistemi sono dotati di un meccanismo di calibrazione automatica basato su celle di carico, il che consente un'erogazione estremamente precisa del concime e elimina la necessità di noiose e ripetitive operazioni di taratura manuale del sistema prima dell'uso in campo. La concimazione fogliare potrebbe essere effettuata con le stesse modalità impiegando atomizzatori a rateo variabile, mentre sono in fase di sperimentazione soluzioni tecniche per vigneti sottoposti a fertirrigazione. Esistono spandiconcime “on-the-go” che sfruttano sensori montati sulla trattore insieme allo spandiconcime a rateo variabile, in comunicazione attraverso un computer di bordo. (M. Gatti; A. Garavani, 2016) Una volta fatta una prima taratura, il processo è completamente automatico: sulla base della vigoria identificata dal sensore, gli attuatori dello spandiconcime agiscono variando la dose in tempo reale. Questa tecnologia risulta essere efficace per le colture erbacee mentre risultano ancora poche le applicazioni nel vigneto.



(a)

(b)

Figura 5-2 Esempi di macchine a rateo variabile: (a) Irroratrice VRT, (b) Spandiconcime VRT (fonte: *State of the Art of Monitoring Technologies and Data Processing for Precision Viticulture*, M. Ammoniaci, S. Kartsiotis, 2021)

5.1.4 Vendemmiatrici selettive

Per far fronte alla variabilità di maturazione delle uve nel vigneto, anche sulla stessa fila, sono state sviluppate delle vendemmiatrici selettive in grado di raccogliere lotti differenti di uve per qualità o maturazione. Tale operazione può essere svolta nel momento del passaggio della macchina operatrice dividendo le uve nelle due tramogge laterali della vendemmiatrice e indirizzando poi i prodotti a due trattamenti diversi in cantina. Inoltre, quando i livelli di maturazione sono molto diversi, passando in giorni diversi, la vendemmiatrice apre tutti gli organi di raccolta nei tratti dove l'uva sarà sufficientemente matura (XV). Esistono nuove vendemmiatrici dotate di sistemi che permettono di raccogliere di notte, pratica utile quando le temperature, durante il giorno, sono troppo elevate. Queste macchine sono dotate di sistemi di guida automatica, apparati potenziati di illuminazione, telecamere per il controllo e il monitoraggio continuo di tutti i parametri operativi.

5.2 Agrobot

Se fino a qualche anno fa lo sviluppo di robot capaci di sostituire l'uomo sembrava pura fantasia, oggi sta diventando realtà grazie alla nascita e alla diffusione dei primi agrobot. Tali robot agricoli, possono gestire meglio la variabilità delle colture e quindi ridurre l'impatto

ambientale e migliorare la sostenibilità dal punto di vista economico (E.Vrochidou; K. Tziridis, 2021). L'aspettativa è che gli agrobot sostengano la viticoltura eseguendo operazioni di campo con la destrezza di un lavoratore esperto, migliorando i casi di applicazione e lavorando in varie condizioni ambientali. Tutti i robot esistenti sono progettati per compiti specifici e anche quando integrano un braccio robotico, possono funzionare in uno spazio di lavoro limitato. Per superare questo vincolo, si sta cercando di sviluppare robot modulari in grado di riconfigurare il proprio raggio d'azione e le loro dimensioni ma risulta molto difficile (G. Quaglia; C Visconte, 2020). Il futuro riserva molte sfide per la robotica in agricoltura e gli obiettivi dovrebbero essere quelli di renderla più adattabile ed efficiente, oltre che più conveniente. Negli Stati Uniti, dove le nuove tecnologie sono maggiormente affermate rispetto all'Europa, sono già commercializzati diversi robot, che svolgono varie operazioni di campo (XVI).

Purtroppo, attualmente in Italia non è consentito l'impiego di robot senza operatore per motivi di sicurezza. Poiché non ci sono leggi che regolamentano la guida autonoma, i robot non sono omologati per la circolazione su strada e quindi non possono essere utilizzati in campo viticolo. Attualmente, le applicazioni dei robot in viticoltura sono limitate a esperimenti e ricerche condotti in ambienti protetti e isolati, dove i robot possono operare in totale libertà senza causare danni. Tuttavia, a livello internazionale la situazione è diversa: gli Stati Uniti sono stati i primi a consentire l'uso di queste tecnologie in campo, mentre di recente anche l'Europa ha autorizzato la guida autonoma su strada, aprendo così la possibilità di utilizzare i robot anche in viticoltura.

Vantaggi	Svantaggi
possibilità di muoversi in completa autonomia	costo investimenti elevati
protezione dei lavoratori dagli effetti nocivi della manipolazione di prodotti chimici	tecnologie non ancora diffuse
riduzione uso pesticidi	Limiti legislativi (Italia)
tempestività di intervento	
controllo della coltura in tempo reale	

Tabella 5.1 Vantaggi e svantaggi nell'uso di agrobot

5.2.1 *L'intelligenza artificiale nel vigneto*

Sono stati sviluppati algoritmi di visione artificiale per la stima della maturazione dell'uva come alternativa non distruttiva, economica, ed ecologica. L'integrazione di tali algoritmi in robot autonomi è utile per il monitoraggio automatizzato del raccolto che consente ai coltivatori di migliorare la qualità delle colture raccolte riducendo la manodopera e le fonti di campionamento estensivo (E. Vrochidou; C. Bazinas, 2021). Nonostante l'automazione robotica in viticoltura sia ancora agli inizi, molti progetti sono in fase di sviluppo e alcuni sono già sul mercato. Sebbene i costi di acquisto e di esercizio degli agrobot potrebbero essere elevati nei primi anni, migliorandoli sarà un'ottima soluzione per la viticoltura di precisione, poiché la precisione porta a uve integre e quindi, al miglioramento della qualità delle uve.

5.2.2 *Applicazione della robotica in viticoltura*

Sono stati sviluppati robot vendemmiatrici in grado di svolgere compiti di vendemmia, vendemmia verde e defogliazione in completa autonomia e con la possibilità di personalizzare ogni operazione in base alle preferenze dell'utente. La vendemmia, inoltre, avviene in modo omogeneo, ovvero vengono raccolte solo uve con un livello di maturazione simile. Il sistema complessivo comprende tre unità inter dipendenti: un'unità aerea che fornisce immagini dei vigneti, un'unità di controllo remoto che costruisce mappe sulla base delle immagini aeree e l'unità di terra ARG che svolge l'operazione in campo. L'ARG naviga nell'interfilare del vigneto, raccoglie i dati sensoriali visualizzati tramite controllo remoto ed esegue l'operazione viticola selezionata nelle aree indicate dall'utente (E.Vrochidou; K. Tziridis, 2021). Una limitazione del sistema proposto è la necessità di un controllore umano dell'unità di controllo remoto necessaria per monitorare che il sistema e l'unità di terra Arg rispondano correttamente. Altre limitazioni riguardano l'autonomia limitata delle batterie e la gestione di eventuali ostacoli che incontra l'agrobot. Sono stati sviluppati agrobot per la gestione del vigneto che svolgono alcune pratiche colturali quali la defogliazione, il diradamento dei grappoli e la raccolta. Il software, associato al Robot, consente di selezionare le foglie che devono essere rimosse senza incidere negativamente sulla qualità dell'uva, elimina le uve non idonee (infette da malattie o piccole) e provvede alla vendemmia di uve mature per una raccolta omogenea (E. Bouloumpasi; S. Theocharis, 2020).

5.2.3 *VINEROBOT*

Un progetto europeo ha sviluppato un robot dotato di intelligenza artificiale che con tecnologie di rilevamento è in grado di misurare e monitorare alcuni parametri quali resa dell'uva, crescita vegetativa, stato idrico, contenuto di azoto e antociani delle uve in vigneto. Questo robot prende il nome di Vinerobot e utilizza diverse tecnologie di rilevamento non invasive, visione artificiale RGB e termografia per monitorare la temperatura del vigneto in movimento. (J. Tardaguila; F. Rovira-Mas).

5.2.4 *VINBOT*

Un progetto di ricerca europeo ha permesso di sviluppare un robot autonomo chiamato VINBOT (Autonomous cloud-computing vinerobot to optimization yield management and wine quality) (fig. 5-3 a), dotato di telecamera e diversi sensori per ottenere mappe della variabilità spaziale sia delle caratteristiche della chioma sia della resa di un appezzamento di vigneto. È dotato di sensori in grado di acquisire e analizzare immagini del vigneto fornendo una mappa 3D per determinare la resa e condividere le informazioni con i viticoltori (R.Guzmán, J.Ariño, 2016). Il robot acquisisce i dati ad una velocità operativa in grado di monitorare una superficie di 1 ha all'ora, è capace di muoversi su pendenze fino a 45° ed ha un'autonomia di 8 ore (A. Matese; S. F. Di Gennaro, 2015).

5.2.5 *GRAPE*

Un progetto italiano, in collaborazione con altri stati europei, ha permesso di sviluppare il progetto “GRAPE” (fig. 5-3 b) per la valutazione della densità della chioma e per effettuare trattamenti fitosanitari nel vigneto. Il robot è dotato di un braccio autonomo capace di collocare sulla vite dei dispenser di feromoni per la lotta integrata ai parassiti. Inoltre, è capace di muoversi all'interno del vigneto in completa autonomia senza la presenza di un operatore e mappa un vigneto fornendo un modello 3D con informazioni importanti per eventuali operazioni successive effettuate con macchinari a rateo variabile (XVI).

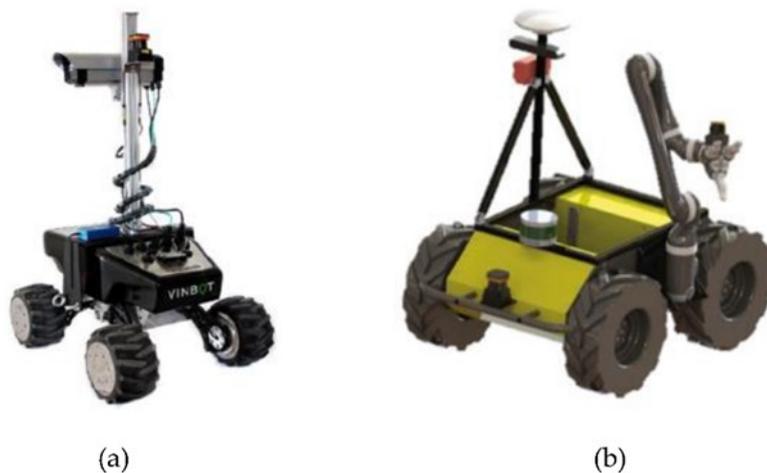


Figura 5-3 Esempi di Agrobot utilizzati in viticoltura: (a) Vinbot, (b) GRAPE (fonte: State of the Art of Monitoring Technologies and Data Processing for Precision Viticulture, M. Ammoniaci, S. Kartsiotis, 2021)

5.2.6 PRIMBOT

Un altro progetto “made in Italy” chiamato “PRIMBOT” riguarda lo sviluppo di un robot con quattro arti in grado di muoversi anche su vigneti in forte pendenza. È dotato di un braccio meccanico e diversi sensori che permettono di attuare una potatura invernale in completa autonomia, tramite algoritmi che forniscono ai robot indicazioni riguardanti i punti di taglio nella pianta. Attualmente il progetto riguarda solamente vigneti allevati a cordone speronato ma si cercherà in futuro di estendere la sua applicazione anche ad altri sistemi di impianto (XVI).

5.2.7 AGBOT II E BONIROB

Sono state sviluppate macchine in grado di rilevare erbe infestanti nel vigneto tramite sensori ed effettuare il diserbo soltanto nella zona interessata. Un esempio è il veicolo agricolo leggero AgBot II sviluppato dalla Queensland University of Technology per il rilevamento delle erbacce, l'irrorazione localizzata e la rimozione meccanica delle erbacce. Allo stesso modo, la partnership tra l'Università di Osnabrueck, la Amazonen-Werke e la società Robert Bosch GmbH, ha prodotto il BoniRob, un robot da campo multiuso per il monitoraggio del suolo, il rilievo delle erbe infestanti e l'applicazione mirata del trattamento erbicida (A. Matese; S. F. Di Gennaro, 2015).

CONCLUSIONI

Lo scopo di questa tesi è fornire una panoramica sullo stato attuale delle tecnologie nel campo della viticoltura di precisione, che mirano a ridurre i costi di gestione delle colture e migliorare la qualità della produzione, garantendo allo stesso tempo la sostenibilità ambientale attraverso un uso razionale di prodotti chimici e acqua. Negli ultimi tempi, queste tecnologie hanno mostrato un rapido sviluppo e una maggiore applicabilità grazie a costi ridotti, facilità d'uso e versatilità. Strumenti come i droni (UAV), gli aerei, i satelliti e i sensori prossimali vengono utilizzati nella viticoltura di precisione per creare un sistema completo di supporto alle decisioni (DSS), che consente ai viticoltori e agli agronomi di prendere decisioni migliori al momento giusto e nel luogo giusto. Tuttavia, è importante selezionare la tecnologia di precisione più adatta per ogni specifica applicazione. Mentre i satelliti e gli aerei sono ottimi per creare mappe di prescrizione per l'applicazione a tasso variabile, i satelliti presentano limitazioni legate alla risoluzione delle immagini, mentre gli aerei comportano costi operativi elevati. Al contrario, i droni offrono un'alta risoluzione, flessibilità d'uso e tempi di intervento rapidi, ma sono economicamente fattibili solo per piccole aree (circa 10 ettari). Il risultato finale è la creazione di una mappa operativa, nota come mappa di prescrizione, che può essere caricata sulle macchine a tasso variabile (VRT) per ottimizzare le operazioni in campo, come la fertilizzazione, la defogliazione, l'irrigazione, i trattamenti fitosanitari e la raccolta. Attualmente, le tecnologie di monitoraggio remoto, prossimale e le macchine a tasso variabile vengono applicate su larga scala, mentre l'utilizzo dei robot è ancora in fase sperimentale. È stato dimostrato che la viticoltura di precisione è uno strumento efficace per i viticoltori e gli agronomi, ma ci sono ancora ostacoli da superare prima che queste tecnologie possano diffondersi appieno. Oltre a esplorare ulteriormente il potenziale di queste tecnologie, è necessario fornire una formazione adeguata agli operatori agricoli per comprendere e utilizzare correttamente queste tecnologie. Inoltre, le aziende vitivinicole che adottano tecniche e strumenti di viticoltura di precisione sono ancora relativamente poche e c'è un ritardo nell'applicazione pratica a livello commerciale. La sfida per il prossimo decennio sarà promuovere un cambiamento culturale nell'approccio alla conoscenza e alla gestione del vigneto, consentendo agli agricoltori di adottare e sfruttare appieno le grandi potenzialità di

queste tecnologie. In Italia, il settore vitivinicolo è caratterizzato da aziende di dimensioni medie e piccole, con una grande diversità di varietà di uva coltivate. La complessità del sistema e gli investimenti iniziali significativi rappresentano ulteriori sfide. Tuttavia, i risultati positivi sono evidenti, ed è necessario avere il coraggio di fare scelte coraggiose. Per favorire la diffusione di queste innovazioni imprenditoriali, è fondamentale attuare una trasformazione strutturale e progettuale all'interno delle aziende vitivinicole, garantendo la capacità di installare, configurare e mantenere in modo efficiente le nuove tecnologie. Gli imprenditori devono essere in grado di identificare le soluzioni tecnologiche più adatte alle specifiche esigenze aziendali, affrontando gli investimenti iniziali rischiosi e giustificandoli nel contesto delle aziende italiane. Inoltre, è importante che l'Italia e l'Europa si impegnino attivamente nel fornire finanziamenti adeguati alla diffusione delle tecniche di precisione, che rappresentano un'opportunità pratica per i viticoltori, offrendo benefici tangibili a fronte di costi sostenibili.

BIBLIOGRAFIA

- D. S. Bullock; N. Kitchen; D. G. Bullock, Multidisciplinary Teams: A Necessity for Research in Precision Agriculture Systems, *Crop Science*, 2007, 1765-1769, 47(5)
- Santesteban L, Precision viticulture and advanced analytics. A short review, *Food Chemistry*, (2019), 58-62, 279.
- L. Genesio; T. De Filippis; F. Di Gennaro; E. Fiorillo; A. Matese; J. Primicerio; L. Rocchi; F.P. Vaccari, *La viticoltura di precisione*, 2012
- M. Ammoniaci; S. Kartsiotis, State of the Art of Monitoring Technologies and Data Processing for Precision Viticulture, (2021), 11(3), 201.
- M. Sozzi, *Introduzione alla viticoltura di precisione, Innovazioni digitali in viticoltura*, 2021
- M Vieri; G. Spezia; P. Pagni, *Ingegneria delle produzioni viticole: stato dell'arte e future applicazioni*, 2010, *Italus Hortus* 17 (1).
- P. Carnevali; J. Cricco; L. Toninato; L. Brancadoro, *VITICOLTURA DI PRECISIONE: OBIETTIVI E APPLICAZIONI SITO-SPECIFICHE*, *VIGNEVINI*, 2013.
- A. Matese; S. Di Gennaro, Technology in precision viticulture: A state of the art review, *International Journal of Wine Research*, 2015, 69-81, 7(1)
- A. Matese; S. Di Gennaro, Practical Applications of a Multisensor UAV Platform Based on Multispectral, Thermal and RGB High Resolution Images in Precision Viticulture, *Agriculture (Switzerland)*, 2018, 8(7)
- A. Matese, *Agricoltura di precisione e uso sostenibile delle risorse Istituto di Biometeorologia, Consiglio nazionale delle ricerche: Istituto di Biometeorologia*, 2017
- E. Rutto; D. Arnall, The History of the GreenSeeker™ Sensor, Oklahoma cooperative extension service, 2009, PSS-2260

- A. Freidenreich; G. Barraza; K. Jayachandran; A. Khoddamzadeh, Precision Agriculture Application for Sustainable Nitrogen Management of *Justicia brandegeana* Using Optical Sensor Technology, *Agriculture (Switzerland)*, 2019, 9(5)
- J. Llorens; E. Gil; J. Llop; A. Escolà, Ultrasonic and LIDAR Sensors for Electronic Canopy Characterization in Vineyards: Advances to Improve Pesticide Application Methods, *Sensors*, 2011, 2177- 2194, 11(2)
- F. Marinello; M. Sozzi; A. Cogato, Sensori di monitoraggio: dalla teoria al campo, *L'Informatore Agrario*, 00/2017
- M.C. Andrenelli; S. Magini; S. Pellegrini; R. Perria; N. Vignozzi; E.A.C. Costantini, The use of the ARP© system to reduce the costs of soil survey for precision viticulture, *Journal of Applied Geophysics*, 2013, 24-34,99
- B. TISSEYRE; H. OJEDA; J. TAYLOR, NEW TECHNOLOGIES AND METHODOLOGIES FOR SITE-SPECIFIC VITICULTURE, *J. Int. Sci. Vigne Vin*, 2007, 63-7
- E. Martini; C. Comina; S. Priori; E.A.C. Costantini, A combined geophysical-pedological approach for precision viticulture in the Chianti hills, *Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata*, 2013, 165-181, 54
- E. Anastasiou; A. Castrignanò; K. Arvanitis; S. Fountas, A multi-source data fusion approach to assess spatial-temporal variability and delineate homogeneous zones: A use case in a table grape vineyard in Greece, *Science of The Total Environment*, 2019, 155-163
- S. S. Hubbard; M. Schmutz; A. Balde; N. Falco, Estimation of soil classes and their relationship to grapevine vigor in a Bordeaux vineyard: advancing the practical joint use of electromagnetic induction (EMI) and NDVI datasets for precision viticulture, *Precision Agriculture*, 2021, 22:1353–1376
- A. Castagnoli; P. Dosso, Servizi ad alta tecnologia per la viticoltura di precisione, supplemento all'informatore agrario, 2002
- R, Perria, P, Storchi, Applicazione delle tecnologie di telerilevamento a supporto della gestione del vigneto, rivista internet di viticoltura ed enologia, 2012, 3/1
- A. Matese; S.F. Di Gennaro; L.G. Santesteban, Methods to compare the spatial variability of UAV-based spectral and geometric information with ground autocorrelated data. A case of study for precision viticulture, *Computers and Electronics in Agriculture*, 2019, 931-940

- Pal Singh; A. Yerudkar; V. Mariani; L. Iannelli; L. Glielmo, A Bibliometric Review of the Use of Unmanned Aerial Vehicles in Precision Agriculture and Precision Viticulture for Sensing Applications, *Remote Sensing*, 2022, 14(7)
- N. Darra; E. Psomiadis; A. Kasimati; A. Anastasiou; E. Anastasiou; Fountas, Remote and Proximal Sensing-Derived Spectral Indices and Biophysical Variables for Spatial Variation Determination in Vineyards, *Agronomy*, 2021, 11(4)
- E. Mattioli; S. Antognelli; A. Natale; V. Sartoretti, Il Remote Sensing per l'individuazione delle Zone di Gestione nei vigneti, *GEOMedia*, 2017
- R. De Bei; S. Fuentes; M. Gilliam; S. Tyerman, VitiCanopy: A Free Computer App to Estimate Canopy Vigor and Porosity for Grapevine, *Sensors*, 2016, 16(4)
- S. F. Di Gennaro; R. Dainelli; A. Palliotti; P. Toscano; A. Matese, Sentinel-2 Validation for Spatial Variability Assessment in Overhead Trellis System Viticulture Versus UAV and Agronomic Data, *Remote Sensing*, 2019, 11(21)
- A. Matese; P. Toscano; S. F. Di Gennaro, Intercomparison of UAV, Aircraft and Satellite Remote Sensing Platforms for Precision Viticulture, *Remote Sensing*, 2015, 7(3)
- A. Matese; S.F. Di Gennaro; A. Zaldei; L. Genesio; F.P. Vaccari, A wireless sensor network for precision viticulture: The NAV system, *Computers and Electronics in Agriculture*, 2009, 69(1)
- P. Spachos; S. Gregori, Integration of Wireless Sensor Networks and Smart UAVs for Precision Viticulture, *IEEE Internet Computing*, 2019, 23(3)
- J. P. Perez-Exposito; T. M. Fernandez-Carames; P. Fraga-Lamas; L. Castedo, An IoT Monitoring System for Precision Viticulture, *Proceedings - 2017 IEEE International Conference on Internet of Things, IEEE Green Computing and Communications, IEEE Cyber, Physical and Social Computing, IEEE Smart Data, iThings-GreenCom-CPSCom-SmartData*, 2017, 662-669
- J. Valente; D. Sanz; A. Barrientos; J. del Cerro; Á. Ribeiro; C. Rossi, An Air-Ground Wireless Sensor Network for Crop Monitoring, *Sensors*, 2011, 11(6)
- Ferrandino A.; C. Pagliarani; F. Torchio; F. Torchio, METODI OTTICI NON DISTRUTTIVI PER IL MONITORAGGIO DELLA MATURAZIONE IN UVE A BACCA COLORATA, 2011, researchgate

- R. Oberti; M. Marchi; P. Tirelli; A. Calcante; M. Iriti; A. N. Borghese, Automatic detection of powdery mildew on grapevine leaves by image analysis: Optimal view-angle range to increase the sensitivity, *Computers and Electronics in Agriculture*, 2016, 1-8, 104
- R. Oberti; M. Marchi; P. Tirelli; A. Calcante, Selective spraying of grapevines for disease control using a modular agricultural robot, *Biosystems Engineering*, 2016, 203-215, 146
- V. Rossi; S. Iegler, DSS, il volto utile dell'evoluzione digitale, *terraèvita*, 2019
- P. D'Antonio; C. Fiorentino; M. Massari; F. Modugno, DSS, sistemi fondamentali per l'agricoltura di precisione, *L'informatore agrario*, 2021
- L.G. Santesteban; S.F. Di Gennaro; A. Herrero-Langreo; C. Miranda; J.B. Royo; A. Matese, High-resolution UAV-based thermal imaging to estimate the instantaneous and seasonal variability of plant water status within a vineyard, *Agricultural Water Management*, 2017, 49-59, 183
- S.F. Di Gennaro; P. Toscano; P. Cinat; A. Berton; A. Matese, A precision viticulture UAV-based approach for early yield prediction in vineyard, *John V. Stafford*, 2019
- J. A. Taylor; L. Sánchez; B. Sams; L. Haggerty; R. Jakubowski; S. Djafour; T. R. Bates, Evaluation of a commercial grape yield monitor for use mid-season and at-harvest, *Journal international des sciences de la vigne et du vin*, 2016, 50, 2
- M. Gatti; A. Garavani; S. Poni, Potenzialità della concimazione di precisione del vigneto, *vq numero cinque*, 2016
- M. Gatti; A. Garavani; S. Poni, Potenzialità della concimazione di precisione del vigneto, *vq numero cinque*, 2016
- E. Vrochidou; K. Tziridis; A. Nikolaou; T. Kalampokas, An Autonomous Grape-Harvester Robot: Integrated System Architecture, *Electronics*, 2021, 1056, 10(9)
- G. Quaglia; C. Visconte; L. Scimmi, Design of a UGV Powered by Solar Energy for Precision Agriculture, *Robotics*, 2020, 13, 9(1)
- E. BOULOUMPASI; S. THEOCHARIS; A. KARAMPATEA; EXPLORATION OF VITICULTURAL TASKS TO BE PERFORMED BY AN AUTONOMOUS ROBOT: POSSIBILITIES AND LIMITATIONS, *Proceedings of the XI International Scientific Agricultural Symposium "Agrosym"*, 2020

- J. Fernández-Navales; V. Saiz-Rubio, I. Barrio; Monitoring and Mapping Vineyard Water Status Using Non-Invasive Technologies by a Ground Robot, Remote Sensing, 2021, 2830, 13(14)
- R. Guzmán; J. Ariño; R. Navarro; C.M. Lopes; J. Graça, Autonomous hybrid gps/reactive navigation of an unmanned ground vehicle for precision viticulture – VINBOT, 2016
- J. Tardaguila; F. Rovira-Mas; J. Blasco; V. Saiz-Rubio, VineRobot: A new robot for vineyard monitoring using non-invasive sensing technologies, VINEROBOT
- Gai J.; Xiang L.; Tang L.; Using a depth camera for crop row detection and mapping for under-canopy navigation of agricultural robotic vehicle, Computers and Electronics in Agriculture, 2021, 106301, 188

SITOGRAFIA

- I. La viticoltura di precisione, <https://www.tecnovict.com/viticoltura-di-precisione/>, 01/07/2023
- II. Viticoltura di precisione, presente solo nel 23% delle aziende italiane, <https://www.informatoreagrario.it/news/viticoltura-precisione-presente-solo-nel-23-delle-aziende-italiane/>, 15/02/2022
- III. T. Cinquemani, Viticoltura di precisione, ecco i primi passi per iniziare, <https://agronotizie.imagelinenetwork.com/agrimeccanica/2017/03/21/viticoltura-di-precisione-ecco-i-primi-passi-per-iniziare/53100>, 05/06/2022
- IV. Sistema satellitare globale di navigazione, Wikipedia https://it.wikipedia.org/wiki/Sistema_satellitare_globale_di_navigazione, 01/07/2023
- V. Misure da piattaforma mobile, <http://bioquar.isafom.cnr.it/it/campagne-di-misura/misure-da-piattaforma-mobile/12-rilievi-aerei.html>, 28/05/2023
- VI. Il Drone e la Viticoltura di Precisione, <https://blog.analistgroup.com/viticoltura-di-precisione-con-il-drone/>, 07/07/2022
- VII. Le Spectron™, un capteur piéton pour le suivi de la maturation du raisin, <https://itap.inrae.fr/?p=3595>, 02/03/2022
- VIII. Spettroscopia NIR. Near Infrared Reflectance Spectroscopy, <https://www.lazoovet.it/nir>, 10/03/2022
- IX. Meno mezzi tecnici, più DSS, <https://vigneviniequalita.edagricole.it/vigneto/viticoltura-di-precisione/meno-mezzi-tecnici-piu-dss/>, 02/07/2023
- X. Veg-i-Trade: coltivare la lattuga per IV gamma utilizzando il 25% di acqua in meno, <https://www.freshplaza.it/article/4048879/veg-i-trade-coltivare-la-lattuga-per-iv-gamma-utilizzando-il-25-di-acqua-in-meno/>, 02/07/2023
- XI. Irrigazione della vite e gestione dell'acqua, <https://wikifarmer.com/it/irrigazione-della-vite-e-gestione-dellacqua/#:~:text=La%20quantit%C3%A0%20di%20acqua%20richiesta,e%20le%20tecniche%20di%20coltivazione>, 02/03/2023
- XII. IRRIGAZIONE DI PRECISIONE, <http://www.idrotech.it/irrigazione-di-precisione/> 21/03/2022
- XIII. Sfogliatrice a Rateo Variabile Mod. 111 S VRT, <https://www.tecnovict.com/sfogliatrice-a-rateo-variabile-mod-111-s-vrt/>, 20/05/2023

- XIV. Atomizzatori pneumatici a Rateo Variabile (VRT),
<https://vigneviniequalita.edagricole.it/vigneto/meccanizzazione-vigneto/atomizzatori-pneumatici-rateo-variabile-vrt/>, 15/11/2022
- XV. Vendemmia selettiva, la strategia vincente,
<https://agronotizie.imaginenetwork.com/agrimeccanica/2018/09/03/vendemmia-selettiva-la-strategia-vincente/59500>, 06/03/2023
- XVI. Nella viticoltura del domani entrano i robot, <https://www.meccagri.it/nella-viticultura-del-domani-entrano-i-robot/>, 06/03/2023