



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA
Dipartimento di Agronomia Animali Alimenti Risorse
Naturali e Ambiente

Corso di laurea in Scienze e Tecnologie Alimentari

**USO DEL TELERILEVAMENTO COME
STRUMENTO DI SUPPORTO ALLA
PRODUZIONE DI MIELE**

Relatore:
Prof. Guerrini Lorenzo
Correlatore:
Dott. Marco Sozzi

Laureando: Francesco Schiesari
Matricola n. 1221726

ANNO ACCADEMICO 2022/2023

Sommario

Il miele è da sempre uno degli alimenti naturali più importanti per l'uomo. Nell'ultimo decennio, tra le pratiche che maggiormente hanno rivoluzionato il settore agroalimentare, l'agricoltura di precisione (*Precision Agriculture-AP*) ricopre sicuramente un ruolo di primaria importanza. Si tratta di un approccio moderno di gestione dell'agricoltura basato sull'utilizzo di tecniche digitali per monitorare e razionalizzare i processi di produzione con l'obiettivo di gestire in maniera innovativa la produzione, per ottenere una maggiore resa senza trascurare, ma anzi valorizzando la sostenibilità. In particolare, il telerilevamento (*Remote Sensing-RS*) è ampiamente utilizzato nelle scienze agrarie per comprendere meglio la variazione spaziale e temporale del vigore e della produttività delle colture e per il monitoraggio su una vasta gamma di fattori. Le applicazioni di telerilevamento in agricoltura si basano sull'interazione della radiazione elettromagnetica con il suolo o il materiale vegetale, e ha permesso: la mappatura delle colture, la stima dei parametri biofisici e la previsione delle rese. In questa tesi si approfondisce il tema del telerilevamento, e le sue possibili applicazioni come strumento di supporto all'apicoltura e alla produzione del miele, prendendo come riferimento studi trovati in letteratura per comprendere le interazioni dei diversi fattori che determinano la produzione e la qualità del miele.

Alla mia famiglia, per essermi sempre stata accanto.

Ai miei amici, per avermi sempre supportato.

Ad Alice, per aver creduto in me.

A me stesso, per non essermi mai arreso.

Indice

Introduzione	1
Capitolo 1	3
Il miele.....	3
1.1 Cenni storici sull'apicoltura e sul miele	3
1.2 L'ape.....	4
1.2.1 Cenni di sistematica.....	4
1.2.2 <i>Apis mellifera L.</i>	5
1.2.3 Il ciclo biologico delle api	5
1.2.4 La società apistica	8
1.3 La flora apistica.....	9
1.3.1 La flora apistica italiana.....	10
1.4 Prodotti dell'apicoltura.....	11
1.4.1 Pappa reale.....	11
1.4.2 Propoli.....	11
1.4.3 Cera d'api.....	12
1.4.3 Veleno d'api.....	12
1.5 Il miele	13
1.5.1 Il nettare	14
1.5.2 La melata	16
1.5.3 La formazione del miele	16
1.5.4 La composizione del miele.....	18
1.5.5 Qualità del miele	21
Capitolo 2	23
Il telerilevamento.....	23
2.1 L'agricoltura di precisione.....	23
2.2 Lo studio del suolo.....	24
2.2.1 La variabilità	24
2.2.2 Cenni di caratterizzazione del suolo e della vegetazione.....	26
2.3 Il telerilevamento – <i>Remote Sensing</i>	28
2.3.1 La radiazione elettromagnetica.....	29
2.3.2 Lo spettro elettromagnetico	30
2.3.3 I fenomeni di interazione	31
2.4 Sensori e piattaforme	32
2.4.1 Risoluzione dei sensori usati per il RS	33
2.4.2 Satelliti – <i>Spaceborne platforms</i>	34
2.4.3 Aerei e UAV – <i>Airborne platforms</i>	36
Capitolo 3	37
Telerilevamento per la produzione di miele.....	37
3.1 Il RS applicato alla produzione di miele.....	37
3.1.1 Uso del RS per la previsione dei raccolti di miele	37

<i>3.1.2 Uso del RS nella creazione di modelli Machine Learning per la previsione di raccolti di miele</i>	39
3.2 Il RS in apicoltura	40
<i>3.2.1 Geographical Information System per lo sviluppo dell'apicoltura</i>	40
<i>3.2.2 Uso del RS per valutare i servizi ecosistemici</i>	42
3.3 Potenzialità future del RS	43
Conclusioni	45
Bibliografia	46
Sitografia	52

Introduzione

Gli insetti impollinatori svolgono un ruolo essenziale nell'ecosistema planetario, trasferendo il polline alle colture e alla vegetazione autoctona. La misura in cui le comunità di impollinatori variano, sia spazialmente che temporalmente, ha importanti implicazioni per l'ecologia, la conservazione e la produzione agroalimentare, in particolare di miele. Tra le pratiche che maggiormente hanno rivoluzionato l'approccio nell'ultimo decennio, l'agricoltura di precisione (*Precision Agriculture-AP*) ricopre sicuramente un ruolo di primaria importanza. Si tratta di un approccio moderno di gestione dell'agricoltura, basato sull'utilizzo di tecniche digitali per monitorare e razionalizzare i processi di produzione con l'obiettivo di gestire in maniera innovativa la produzione, in modo da ottenere una maggiore resa senza trascurare, ma anzi valorizzando la sostenibilità. A livello globale, il telerilevamento (*Remote Sensing-RS*) sta assistendo nel comprendere meglio la variazione spaziale e temporale del vigore e della produttività delle colture e per il monitoraggio su una vasta gamma di fattori (Zhang et al., 2002; Diacono et al., 2012). Il Remote Sensing (RS) è definito come "lo studio da distanze elevate di oggetti o fenomeni attraverso l'acquisizione, l'elaborazione e l'analisi della radiazione elettromagnetica a diverse lunghezze d'onda" (Kancheva, 2013). Esso è ampiamente utilizzato nelle scienze agrarie, esempi specifici includono la mappatura di modelli spaziali dei tipi di impollinazione o la previsione e la mappatura della resa (Campbell e Fearn, 2018; Campbell, 2020; Campbell et al., 2020). In particolare, la ricerca sull'impollinazione delle colture ha utilizzato il RS per comprendere l'uso dell'habitat su scala regionale da parte degli insetti impollinatori: essi sono mobili e alcuni possono percorrere molti chilometri per cercare cibo e nidificare e questi aspetti hanno implicazioni importanti, tanto per l'agricoltore a monte quanto per l'azienda a valle, e devono essere tenuti in considerazione soprattutto perché i cambiamenti climatici operano una pressione selettiva nei confronti dei diversi ecosistemi. La misurazione dell'impatto della variabilità spaziale e temporale nelle comunità di insetti impollinatori è ancora limitata per la ricerca sull'impollinazione delle colture, ma esiste un grande potenziale per l'integrazione del RS in campo

agro-alimentare. Infatti, l'integrazione di questo tipo di tecnologia fornirebbe informazioni più dettagliate su importanti variabili ambientali che possono essere comparate e potrebbero anche essere usate, oltre che per modellare e mappare le distribuzioni delle specie di impollinatori e cultivar, anche per fare previsioni sui prodotti alimentari stessi, come il miele.

Capitolo 1

Il miele

In questo capitolo si parlerà di uno dei più importanti alimenti per l'uomo: il miele. Partendo da cenni storici riguardanti l'apicoltura e una descrizione delle api, si arriverà alla definizione dei principali caratteri di qualità di questo straordinario alimento.

1.1 Cenni storici sull'apicoltura e sul miele

La storia dell'apicoltura inizia con le prime attività umane per arrivare fino ai giorni nostri, l'uomo infatti utilizza il miele da circa 12.000 anni. A Valencia, nella "grotta del ragno", sono state trovate pitture rupestri di epoca preistorica che raffigurano uomini nell'atto di raccogliere il miele risalenti al 5000 a.C. Non sappiamo tuttavia a quando risalgia la vera e propria apicoltura, ossia l'addomesticazione e allevamento delle api, ma sappiamo che veniva praticata in Egitto già nell'età dell'Antico Regno (2700-2500 a.C.). All'epoca venivano utilizzate arnie cilindriche in terracotta, da cui si estraevano i favi ricchi di miele. Nell'Antico Egitto il miele era un alimento destinato solo alle caste più elevate ma veniva impiegato anche nei rituali ed in medicina e l'importanza dell'apicoltura nella cultura egiziana è visibile anche nel simbolo del Basso Egitto, che era appunto l'ape.

È dal Medioevo invece che si vede prosperare l'apicoltura in Europa: abbazie e monasteri erano spesso veri e propri centri di produzione del miele, utilizzato sia come alimento che come ingrediente nella produzione di idromele, una bevanda alcolica ottenuta dalla sua fermentazione. In questo periodo il miele iniziò ad essere utilizzato anche come conservante e comparvero gli alveari in vimini chiamati "skeps". Secoli più tardi, nel Settecento, si diffuse largamente l'uso dello zucchero la cui produzione aumentò al punto tale da renderlo più economico e accessibile del miele, per cui si verificò una sostanziale diminuzione del consumo di quest'ultimo. Nel 1800 poi, il settore apistico registra un fermento nuovo. Viene inventato il favo mobile da Langstroth che apre la strada ad una serie di invenzioni successive

determinando una vera rivoluzione. Rispetto all'arnia utilizzata in precedenza la nuova struttura è costituita da un modulo contenente favi mobili e un sistema modulare contenente favetti, sempre mobili, per la raccolta e viene implementato l'uso dei fogli cerei e dello smielatore centrifugo che di fatto sanciscono la nascita della moderna apicoltura.

1.2 L'ape

L'ape da miele è il più laborioso tra gli insetti e simboleggia in modo significativo l'attività, la diligenza e l'ordine. La venerazione per questo insetto e i suoi prodotti ha origine già nell'antichità ed è riscontrabile lungo tutto il corso della storia dell'uomo.

1.2.1 Cenni di sistematica

Fra le api da miele abbiamo un solo genere: il gen. *Apis* L. L'ape appartiene alla classe degli Insetti, all'ordine degli Imenotteri, sottordine Aculeati, superfamiglia Apoidea, famiglia Apide, sottofamiglia Apinae, tribù Apini e genere *Apis*.

Nel mondo il genere *Apis* L comprende quattro specie: *Apis florea* F., *Apis dorsata* F., *Apis cerana* F., *Apis mellifera* L. (Ruttner, 1988):

- L' *Apis florea* F. è anche conosciuta come ape nana e costruisce un nido libero composto da un solo favo, posto dentro cespugli radi o rami per lo più orizzontali.
- L' *Apis dorsata* F. è chiamata anche ape gigante per le sue notevoli dimensioni. Come l'ape nana, costruisce il suo nido all'aperto e con un unico favo. Considerata molto pericolosa e aggressiva per le sue punture.
- L' *Apis cerana* F. è molto simile all' *Apis mellifera*, tanto da essere stata considerata sottospecie di questa, costruisce i suoi nidi con favi verticali in luoghi riparati, per lo più dentro cavità naturali ed è molto diffusa in India.
- L' *Apis mellifera* L. è la specie del genere *Apis* più diffusa nel mondo nonché la specie di riferimento che riguarda l'apicoltura.

1.2.2 *Apis mellifera* L.

Conosciuta anche come ape europea o ape occidentale, si ritiene che *Apis mellifera* L. abbia avuto origine in Africa o in Asia e poi si diffuse in Africa, Medio Oriente e in Europa. In seguito agli spostamenti dell'essere umano e la colonizzazione del pianeta è stata importata in tutto il mondo dove si trova tutt'oggi, fatta eccezione per l'Antartide. Dopo averle dato il nome, Linneo (1761) propose quello tecnicamente più corretto *Apis mellifica* del quale si servono ancora alcuni autori, in seguito ad aver rivisto attentamente il comportamento delle api. Questa seconda attribuzione è più esatta dal punto di vista etimologico poiché il miele viene "fabbricato" dalle api e non "trasportato"¹, anche se più opportuno usare la prima nominazione per una questione di priorità (Pinzauti e Frediani, 1998).

Questa specie comprende numerose sottospecie, l'*Apis mellifica linguistica* detta anche ape italiana è la più diffusa in tutta la penisola. Le principali caratteristiche di questa ape sono la ligula ben sviluppata (6-7 mm), un'inconsistente tendenza alla sciamatura, precoce ripresa primaverile e resistenza alle malattie della covata (Pinzauti e Frediani, 1988).

1.2.3 Il ciclo biologico delle api

Il ciclo biologico dell'*Apis mellifera* consta di quattro fasi distinte, tipiche degli esseri viventi appartenenti alla classe degli Insetti: uovo, larva, pupa e adulto.

Fase	Regina	Operaia	Fuoco
Uovo	3 giorni	3 giorni	3 giorni
Larva	5 giorni	6 giorni	6,5 giorni
Pupa	7 giorni	12 giorni	14,5 giorni
Adulto	15 giorni	21 giorni	24 giorni

Tabella 1.1 – Fasi del ciclo biologico di *Apis mellifera* per casta di ape.

¹ Dal latino, dove il termine *mellifera* deriva da *mel*, *mellis* che significa "miele" e *fero*, *fers*, *tuli*, *latum*, *ferre* verbo che significa "portare, trasportare qualcosa". Invece *mellifica* deriva dal verbo *mellifico*, *mellificas*, *mellificare* che indica proprio il "fare il miele".

La prima fase evolutiva del ciclo vitale delle api è l'uovo, che presenta un'apertura sul lato per lasciare allo sperma la possibilità di penetrare e far avvenire la fecondazione; il tempo di sviluppo per ciascuna casta riportato nella Tabella 1.1 è standardizzato grazie alla termoregolazione dell'alveare, fenomeno dovuto al comportamento delle stesse api: esse mirano a mantenere la temperatura della covata opercolata tra 33 e i 36 °C (Fig. 1.1) operando diverse azioni a seconda delle necessità e della temperatura dell'ambiente esterno, possono infatti agitare velocemente le ali per creare una corrente raffreddante o far vibrare la muscolatura delle ali per produrre calore (Tautz J. *et al.*, 2004).

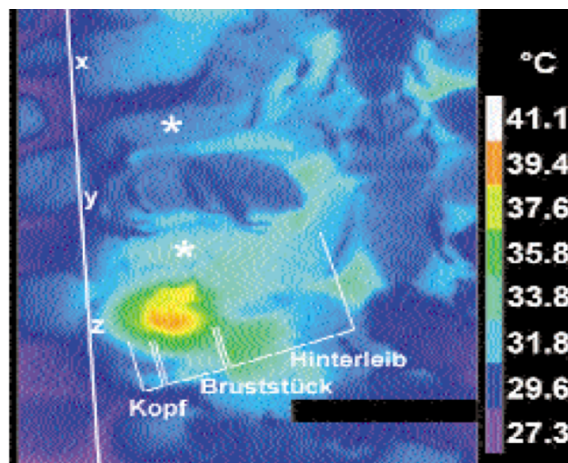


Figura 1.1 - Immagine termografica di un'ape a riposo (sopra) e di un'ape che sta riscaldando la covata all'interno di una celletta vuota nel nido. Le pareti delle cellette opercolate sono contrassegnate con un asterisco (). (Fonte foto: Tautz et al., 2004).*

Il volume di uova deposto può variare in funzione della stagione, da poche uova nel periodo primaverile fino a raggiungere il massimo di 2000-3000 uova/giorno nel periodo estivo, diminuisce durante l'autunno e si arresta completamente nel periodo invernale (Pinzauti e Frediani, 1998). Alla schiusa dell'uovo le larve attraversano 5 stadi arrivando ad assumere una progressiva forma a "C". La larva è apoda e di colore biancastro, con una mascella ridotta e sensilli antennali assenti rispetto alle altre forme larvali di Imenotteri sociali (Pinzauti e Frediani, 1998).

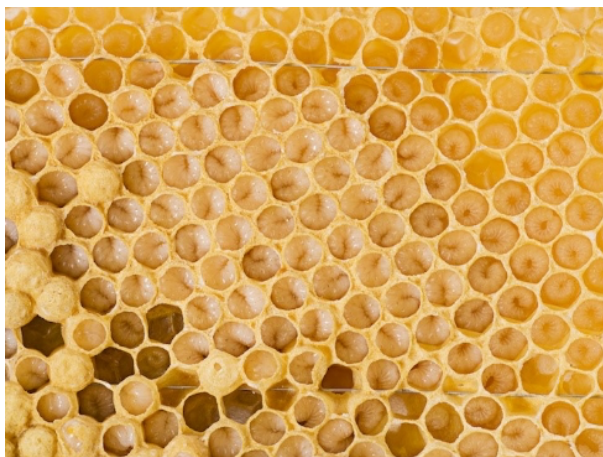


Figura 1.2 – Larve di fuchi di Apis mellifera in fase di opercolatura (Fonte foto: Vera-Kuttelvaserova - Adobe stock).

Dopo la schiusa dell'uovo, passati 8 giorni le larve cominciano a secernere un filo di seta che usano per creare un piccolo bozzolo: questa fase coincide con l'opercolatura della cella svolta dalle api operaie da cui poi ha inizio la fase dell'impupamento. Le operaie, femmine sterili, escono dalla cella opercolata dopo 21 giorni, mentre le regine dopo 16 giorni dalla deposizione dell'uovo e i maschi, detti fuchi, che hanno origine da uova non fecondate a seguito del processo di partenogenesi aploide arrenotoca, dopo 24 giorni (Tab. 1.1) (Zappi Recordati, 1976; Frediani, 1991; Pinzauti e Frediani, 1998).



Figura 1.3 – Regina di Apis mellifera circondata da api operaie (Fonte foto: Faggi M. – Regione Lazio).

1.2.4 La società apistica

Tra gli Insetti esistono due principali forme di aggregazione: quella sociale e quella non sociale in base alla presenza o assenza di interazione tra i componenti. Le forme di aggregazione non sociale, chiamate folle, sono costituite da individui estranei fra di loro ma che risultano uniti per condizioni ambientali. Al contrario le aggregazioni sociali o società sono gruppi nei quali gli individui interagiscono fra di loro secondo varie forme e per stimoli di varia natura, spesso attraverso feromoni o stimoli sensoriali (Frediani, 1991, 1994a, 1994b). I requisiti necessari per considerare un'aggregazione sociale sono:

- Collaborazione tra gli individui nella cura della prole
- Divisione del lavoro tra gli individui
- Sovrapposizione di almeno due generazioni nella stessa colonia (Frediani, 1994a)

Ecco che le api risultano essere un insetto sociale.

La società delle api è definita come suddivisa in tre caste: regine, operaie e fuchi (Ruttner, 1968; Ashley et al., 2013):

Ape regina: unico individuo della colonia deputato alla riproduzione, madre di tutte le api dell'alveare, passa l'intera vita all'interno dello stesso uscendo solo per il volo nuziale (Pistoia, 2010). Attorno a sé ha sempre delle operaie coinvolte nel darle nutrimento (pappa reale) e pulirla.

Api operaie: si occupano di tutte le altre operazioni necessarie al mantenimento ed espansione della colonia, sia all'interno che all'esterno dell'alveare. I primi giorni di vita sono dedicati alla pulizia delle celle, per poi svolgere il ruolo di api nutrici e della costruzione e opercolatura dei favi. Successivamente si occupano di ricevimento del polline e della difesa dell'alveare per poi diventare bottinatrici² sino alla loro morte (Contessi, 2016).

² Ape bottinatrice: esce dall'alveare per occuparsi della raccolta del polline, nettare, propoli e acqua.

Fuchi: di solito compaiono nell'alveare in inverno e vengono poi cacciati o uccisi dalle operaie dopo il periodo della sciamatura ad inizio autunno, ma questo aspetto cambia in relazione a zona e clima (Contessi, 2016). I fuchi non sono solo responsabili della fecondazione delle uova ma intervengono anche nella circolazione del cibo e sono utili nella produzione di calore (Tautz et al., 2004) ma non intervengono nella produzione del miele (Contessi, 2016).

1.2.4.1 Nuovi approcci nella definizione della società delle api

La suddivisione in caste della società apistica sopra riportata è la più riconosciuta anche se un approccio più recente considera l'esistenza della divisione in caste solo per il sesso femminile (regine e operaie) non comprendendo quindi gli individui maschi nella classificazione (Evans e Wheeler, 1999; Evans e Wheeler, 2000; Evans e Wheeler, 2001). Per tutte le precedenti considerazioni e altri aspetti riguardanti la vita delle api e la loro minuziosa gestione delle risorse e della colonia, una famiglia formante la colonia di api si è iniziata a considerare come un unico organismo superiore dotato di vita autonoma (Moritz e Southwick, 1992).

1.3 La flora apistica

Per flora apistica si intende l'insieme delle piante spontanee e coltivate ricercate dalle api per raccogliere il nettare ed il polline (Contessi, 2016; Pinzauti e Frediani, 1998). È fondamentale per gli apicoltori conoscere la flora apistica se desiderano ottenere, come si può presupporre, raccolte abbondanti e di alta qualità di miele. Conoscere la flora apistica è poi utile per definire quali sono le richieste della colonia dal punto di vista nutrizionale e si può conoscere il comportamento delle api in relazione alla flora disponibile. L'informazione diventa poi cruciale in ambito ecologico, rappresenta infatti uno strumento utile nelle strategie di rimboschimento e di recupero di terreni marginali (Persano Oddo, 2007).

1.3.1 La flora apistica italiana

In Italia grazie alla particolare configurazione geografica sono presenti diversi ambienti fitogeografici che consentono alle api di raccogliere il nettare e il polline da più fonti vegetali (Persano Oddo, 2007). La flora apistica viene divisa in tre categorie: (Ricciardelli d'Albore, 1994)

- Specie che consentono la produzione di miele unifloreale. Es.: *Robinia* (robinia), *Castanea* (castagno), *Heliantus* (girasole), *Medicago* (erba medica) ecc...
- Specie di supporto alla produzione del miele. Es.: *Salix* (salice), *Hedera* (edera), *Acer* (acero) ecc...
- Specie che contribuiscono in piccola percentuale, più di 170 generi diversi.

È bene sottolineare che quando si parla di produzione del miele si fa particolare riferimento alla flora apistica in quanto flora nettariifera essendo il nettare che permette la produzione del miele. Anche il polline non è meno importante poiché rappresenta l'alimento necessario alle api per svolgere il loro ciclo biologico. Alcuni generi polliniferi importanti sono: *Castanea* (castagno), *Hedysarum* (sulla), *Heliantus* (girasole) ecc...



Figure 1.4, 1.5 – Fig. 1.5 (sinistra) *Robinia pseudoacacia* (Fonte foto: Online Garden); Fig. 1.6 (a destra) *Castanea sativa* (Fonte foto: Wikipedia).

La flora apistica risulta di grande importanza in quanto consente di ottenere il giusto rifornimento glucidico e proteico e deve essere adeguatamente sfruttato dagli apicoltori anche in senso di sostenibilità ambientale.

1.4 Prodotti dell'apicoltura

Il principale e più noto prodotto derivante dall'apicoltura è il miele, di cui si parlerà nel prossimo paragrafo. Comunque dalla laboriosità delle api si ricavano anche altri prodotti altrettanto importanti: pappa reale, propoli, cera d'api e veleno d'api.

1.4.1 Pappa reale

La pappa reale è una sospensione colloidale prodotta dalle ghiandole ipofaringee e mascellari delle api operaie e viene utilizzata dalle api come nutrimento per la regina, unica femmina fertile della comunità e per le larve fino a tre giorni d'età (Bailo, 1981). Il nome deriva proprio dal fatto che essa costituisce l'unico nutrimento per quelle larve che diventeranno le regine ed è considerata un alimento nobile, costituendo uno dei prodotti più pregiati dell'arnia. La pappa reale è un alimento che migliora lo stato generale dell'organismo umano facilitandone il metabolismo, il che lo rende, oltre al fatto di apportare energia, un ottimo alimento per bambini, anziani e persone convalescenti.



Figura 1.6- Due celle con larve nutrite con pappa reale (Fonte foto: Wikipedia).

1.4.2 Propoli

La propoli è una sostanza resinosa che le api raccolgono dalle gemme e corteccia delle piante di composizione varia. È quindi un prodotto di origine prevalentemente vegetale anche se le api dopo la raccolta la lavorano con cera,

polline ed enzimi specifici (Contessi, 2016). Il colore e l'odore possono cambiare profondamente a seconda della pianta da cui è ottenuta (Burdock, 1998) e viene utilizzata per chiudere fessure e ingressi dell'alveare o mummificare insetti morti (Bailo, 1981).

Essa possiede molteplici proprietà salutistiche per l'organismo umano: batteriostatiche, battericide, antivirali, anestetizzanti, cicatrizzanti, immunostimolanti e vasoprotettive (Contessi, 2016).

1.4.3 Cera d'api

La cera d'api è una sostanza naturale prodotta dalle ghiandole sericere delle operaie tra i 10 e i 16 giorni di vita (Contessi, 2016) ed è usata dalle api per la costruzione delle celle esagonali del loro favo, dove vengono cresciute le larve e riposti miele e polline.

La cera d'api è usata in commercio per la produzione di fogli cerei per l'apicoltura, per candele, cosmetici e prodotti farmaceutici anche se viene sempre più sostituita da sostanze industriali più economiche (Contessi, 2016).

1.4.3 Veleno d'api

Il veleno d'ape, o apitossina, è un liquido di sapore prima dolciastro poi amaro, incolore e limpido, solubile in acqua ma non in alcol. Esso viene prodotto dalle api già pochi giorni dopo la nascita ed è composto da una complessa miscela di proteine, peptidi e componenti a basso peso molecolare.

Possiede proprietà anticoagulanti e antiinfiammatorie ed è utilizzato nei trattamenti di artrite, artrite reumatoide, borsite e sclerosi multipla per la sua efficacia nelle affezioni reumatiche, osteo-articolari e neurologiche periferiche (Contessi, 2016; Bovera, 2019). La somministrazione per agopuntura risulta più efficace di quella per iniezione (Pigozzi, 1996; Pistoia, 2010; Bovera, 2019) e nell'Est Europa ed Asia è addirittura citato in protocolli terapeutici ufficiali da diverso tempo.

1.5 Il miele

Con il Decreto Legislativo 21 maggio 2004, n. 179 “Attuazione della Direttiva 2001/110/CE concernente la produzione e la commercializzazione del miele” si definisce il miele all’art. 1 come “la sostanza dolce naturale che le api (*Apis mellifera*) producono dal nettare di piante o dalle sostanze secrete da insetti succhiatori che si trovano su parti vive di piante che esse bottinano, trasformano, combinandole con sostanze specifiche proprie, depositano, disidratano, immagazzinano e lasciano maturare nei favi dell’alveare”.

Oltre a dare l’importante definizione, l’art. 1 definisce le varietà di miele (D.lgs. 179/2004):

- secondo l’origine:
 1. miele di fiori o miele di nettare: miele ottenuto dal nettare di piante;
 2. miele di melata: miele ottenuto principalmente dalle sostanze secrete da insetti succhiatori (Hemiptera), che si trovano su parti vive di piante o dalle secrezioni provenienti da parti vive di piante;
- secondo il metodo di produzione o di estrazione:
 1. miele in favo: miele immagazzinato dalle api negli alveoli, successivamente opercolati, di favi da esse appena costruiti o costruiti a partire da sottili fogli cerei realizzati unicamente con cera d’api, non contenenti covata e venduto in favi anche interi;
 2. miele con pezzi di favo o sezioni di favo nel miele: miele che contiene uno o più pezzi di miele in favo;
 3. miele scolato: miele ottenuto mediante scoltatura dei favi disopercolati non contenenti covata;
 4. miele centrifugato: miele ottenuto mediante centrifugazione dei favi disopercolati non contenenti covata;
 5. miele torchiato: miele ottenuto mediante pressione dei favi non contenenti covata, senza riscaldamento o con riscaldamento moderato a un massimo di 45°C;

6. miele filtrato: miele ottenuto eliminando sostanze organiche o inorganiche estranee in modo da avere come risultato un'eliminazione significativa dei pollini.

Quindi il miele è un alimento del tutto naturale prodotto esclusivamente dal nettare dei fiori o dalla melata che si trova su piante e non da altri prodotti zuccherini, ed è una soluzione soprassatura di zuccheri, principalmente fruttosio e glucosio, con piccole quantità di zuccheri superiori, enzimi, acidi, sali minerali, sostanze aromatiche ecc... (Sabatini, 1995a, 2002, 2007a). Da quanto riportato sopra (Sabatini, 1995a, 2002, 2007a) si può comprendere che le differenze tra un miele e l'altro, sia quelle di carattere organolettico (aspetto, profumo, sapore ecc...) che quelle rilevabili da analisi di laboratorio, sono una conseguenza esclusiva dell'origine botanica e non del lavoro delle api.

1.5.1 Il nettare

Il nettare, in botanica, è una secrezione liquida zuccherina derivata dalla linfa elaborata³ dei vegetali superiori, prodotto da tessuti che stanno solitamente alla base dei fiori chiamati "nettari", particolari organi ghiandolari (Sabatini, 2000; Contessi, 2016). È costituito principalmente da acqua e zuccheri semplici (saccarosio, glucosio e fruttosio), oltre a sostanze aromatiche, Sali, amminoacidi e acidi organici in minor misura (Sabatini, 2000). Secreto per attirare gli insetti impollinatori risulta quindi economicamente importante per questo motivo, e le piante che lo producono prendono il nome di nettarifere o più in generale piante mellifere.

³ La linfa elaborata è un liquido proprio dei vegetali, una soluzione acquosa formata per lo più da saccarosio, amminoacidi e ormoni.



Figura 1.7 – Ape operaia nell’atto di raccolta del nettare da un fiore (Fonte foto: Apisumm).

1.5.1.1 Il potenziale nettariofero

Il volume di produzione di nettare varia in relazione a numerosi fattori ed ha innanzi tutto un costo energetico non indifferente per la pianta. I fattori che influiscono nella sua produzione sono: caratteri della pianta quali anatomia, fattori genetici e fisiologia; fattori esterni limitanti quali temperatura, umidità, vento, latitudine, altitudine, irraggiamento solare ecc... (Sabatini, 1995a, 2007a). Si può perciò dire che esistono piante poco nettariofere e piante molto nettariofere a seconda dell’incidenza e combinazione dei vari fattori sulla pianta e ci sono poi piante che producono nettare solo in certi momenti della giornata, altre invece che lo producono tutto il giorno. Di norma, più un fiore viene visitato più nettare produce. Sono stati raccolti dati che hanno permesso di classificare sei classi di piante in funzione del loro potenziale nettariofero (o mellifero), ovvero la quantità di miele che si può ricavare da un ettaro della pianta nelle condizioni più favorevoli (Tab. 1.3) (Sabatini, 2007a; Contessi, 2016).

Classe	P.M. (Kg/ha)
1	0-25
2	26-50
3	51-100
4	101-200
5	201-500
6	> 500

Tabella 1.3 – Classificazione piante per Potenziale mellifero (P. M.) (Sabatini, 2007a; Contessi, 2016).

Le piante del nostro territorio che possono fornire le produzioni più rilevanti sulla base di questa classificazione sono: timo, tiglio, robinia, trifoglio violetto, erba medica e salvia (Sabatini, 2002, 2007a).

1.5.2 La melata

Anche la melata, come il nettare, è ricavata dalla linfa delle piante ma mentre il nettare è secreto attraverso un processo attivo la melata è prodotta per intervento di insetti parassiti che succhiano la linfa delle piante e ne trattengono le sostanze azotate utili per la loro alimentazione rilasciando questo liquido zuccherino (glucosio, fruttosio, trialosio e trisaccaridi) dal tratto posteriore del loro intestino (Pinzauti e Frediani, 1998; Sabatini, 2000, 2002, 2007a; Contessi, 2016). Sabatini (2007a) fa notare come nel D.lgs. 179/2004 (Direttiva 110/2001/CE) si definisca il miele come prodotto “[...] dalle sostanze secrete da insetti succhiatori [...]” ma il termine più appropriato risulterebbe essere “*escrete*”.

1.5.3 La formazione del miele

Si stima che le api compiano giornalmente 50.000 voli e visitino milioni di fiori per raccogliere nettare e melata sufficiente per produrre 1 kg di miele. Il processo di formazione del miele ha inizio quando la bottinatrice trasporta la

materia prima nelle ingluvie⁴, la mescola con il secreto delle ghiandole salivari e continua quando la bottinatrice rimette ad un'ape dell'arnia il contenuto, la sostanza rigurgitata viene così disidratata e arricchita in secrezioni ghiandolari ed enzimi. Il contenuto d'acqua del nettare è importante arrivando fino al 90%, si ha la condensazione al fine di renderlo conservabile ponendo le gocce nelle celle: a questo punto il tenore di acqua è sceso al 40-50% e all'interno della cella subisce evaporazione per il lavoro delle api ventilatrici, al termine del quale il contenuto di acqua risulta essere 17-18%; la cella viene infine sigillata con un opercolo di cera ed il processo è concluso (fig) (Sabatini, 1995a, 2000, 2002, 2007a; Pinzauti e Frediani, 1998).



Figura 1.8 – Apicoltore estrae favo di miele opercolato dall'alveare (Fonte foto: Edagricole).

Il processo di trasformazione del nettare e della melata in miele comprende quindi una notevole perdita di acqua, un aumento del contenuto di enzimi e una modificazione degli zuccheri, in particolare il saccarosio (disaccaride) viene scisso nelle sue unità monomeriche glucosio e fruttosio anche se quando il miele viene estratto il processo non è ancora ultimato (Contessi, 2016).

1.5.3.1 Tecniche di produzione e lavorazione

Tra gli alimenti di origine naturale il miele è uno di quelli che meno necessita di operazioni tecnologiche e correzioni per la sua commercializzazione, al punto che

⁴ L'ingluvie è una sacca dell'apparato digerente negli insetti e negli uccelli ed ha funzione di deposito temporaneo di cibo

tanto meno è stato lavorato tanto più lo si considera un miele di qualità (Vangelisti e Piana, 1995). I processi tecnologici che un miele può subire prima della sua commercializzazione sono principalmente due: la purificazione e la pastorizzazione. La purificazione consiste nell'eliminazione delle bolle d'aria o particelle di cera; quindi, risulta utile per eliminare eventuali impurità e può avvenire per decantazione o filtrazione (Vangelisti e Piana, 1995; Pinzauti e Frediani, 1998). La pastorizzazione invece può essere eseguita per eliminare quei microrganismi (lieviti) che trovano nel miele gli zuccheri ideali per il loro sviluppo, facendo una fermentazione; la pastorizzazione avviene alla temperatura di 78 °C per 6-7 minuti e raffreddando rapidamente (Vangelisti e Piana, 1995; Pinzauti e Frediani, 1998).

Una volta formatosi il miele vengono depositati i melari nel laboratorio di smielatura la lavorazione procede con la prima operazione, la disopercolatura: si eliminano gli opercoli di cera che contengono il miele maturo. Si procede poi con la smielatura (estrazione) e poi filtrazione, decantazione e confezionamento (Catta, 2004). Durante le fasi della sua preparazione, occorre prestare particolare attenzione agli interventi termici dei singoli passaggi, che portano comunque ad una degradazione del prodotto con perdita di sostanze aromatiche termolabili. Altro aspetto critico risulta essere la gestione dell'umidità perché il prodotto sarà tanto più conservabile quanto minore sarà il suo tasso di umidità. Ad esempio, la temperatura generalmente non dannosa di 40 °C per più giorni risulta fare più danni di una temperatura intorno ai 70 °C applicata per qualche minuto (Sabatini, 2002; 2004). Invece per quanto riguarda l'umidità un miele può conservarsi e viene considerato di qualità se ha un contenuto di acqua inferiore al 18%.

1.5.4 La composizione del miele

La composizione del miele è molto complessa e risulta piuttosto variabile per l'intervento di numerosi fattori riconducibili essenzialmente all'origine botanica di nettare e melata, inoltre possiede probabilmente componenti in quantità minore ancora non note. Di certo i principali componenti sono presenti nelle percentuali che ci si aspetta mediamente, come quantità di acqua, zuccheri, enzimi, acidi

organici e sali minerali ma le loro proporzioni relative possono variare (Sabatini, 1995a, 2007a). Sono di seguito riportati (Tab. 1.4) i valori di riferimento medi della composizione del miele (Contessi, 2016).

Componente	%
Acqua	17,6%
Glucosio e Fruttosio	71,9%
Saccarosio	2,5%
Altri zuccheri	0,1%
Altre sostanze	7,9%

Tabella 1.4 – Composizione percentuale media del miele (Contessi, 2016)

1.5.4.1 Acqua

Il contenuto di acqua è una delle caratteristiche più importanti e che più influenza il miele nella sua qualità, infatti da questo dipende il suo peso specifico, cristallizzazione e conservabilità (Sabatini, 1995a, 2000, 2002; Contessi, 2016). Essa varia notevolmente in base al grado di maturazione del miele e dalla sua origine botanica, oltre che condizioni ambientali e atmosferiche; mieli con una quantità d'acqua elevata possono andare incontro a fermentazione ed è utile in questo senso conservare il miele in ambienti non troppo umidi data la sua igroscopicità (Sabatini, 1995a, 2007a). Per misurare il contenuto di acqua il metodo più attendibile e pratico risulta essere il rifrattometro e non deve essere di norma superiore al 20% ad esclusione del miele di brughiera o al 23% per uso industriale (D. lgs. 174/2004).

1.5.4.2 Zuccheri

Gli zuccheri (carboidrati) rappresentano la maggiore classe di composti contenuti nel miele, essi infatti possono arrivare ad essere il 90-95% della sua sostanza secca (Pinzauti e Frediani, 1998). Essi sono importanti per le proprietà fisiche del miele, di cui si parlerà in seguito, e i due zuccheri presenti in quantità più importante sono fruttosio e glucosio, i quali non devono essere inferiori a 60g/100g

e 45g/100g sommati per miele rispettivamente di nettare e melata o miscele di nettare e melata; invece il contenuto di saccarosio non deve essere generalmente superiore a 5g/100g ad esclusione di alcuni mieli particolari (D. lgs. 174/2004). Oltre ai due monosaccaridi caratterizzanti sono presenti altri di-, tri- e polisaccaridi in misura minore, tra i quali maltosio, isomaltosio ecc... (Contessi, 2016). L'analisi del profilo zuccherino del miele avviene mediante gascromatografia.

1.5.4.3 Acidi

Nel miele sono presenti diversi acidi sia organici che inorganici (Contessi, 2016):

- Acidi organici: gluconico, acetico, butirrico, citrico, formico, lattico, maleico, ossalico, piroglutammico e succinico;
- Acidi inorganici: cloridrico e fosforico.

Tra tutti il più importante è l'acido gluconico che si forma per lavoro enzimatico sul glucosio, in particolare per opera del glucosio ossidasi, che con liberazione di acqua ossigenata (Sabatini, 1995a, 2007a). L'acidità del miele è misurabile con il pHmetro e contribuisce a determinare la sua stabilità microbiologica e il profilo aromatico (Sabatini, 2002, 2007a).

1.5.4.4 Sali minerali

Il contenuto di sali minerali del miele può variare molto ed oscilla tra 0,03 e 1%, con i mieli scuri che generalmente ne contengono quantità maggiori ed i mieli di melata ne risultano più ricchi; tra i sali troviamo potassio, cloro, zolfo, calcio, sodio, fosforo, magnesio, silice, silicio, ferro, manganese e rame (Contessi, 2016). Essi derivano dalla mineralità del terreno della pianta e questo spiega la loro variabilità, ma il per la loro commercializzazione mieli di nettare non devono contenerne quantità superiori a 0,6% (D. lgs. 174/2004).

1.5.4.5 Sostanze azotate

Il contenuto di sostanze azotate come le proteine nel miele è abbastanza basso (0,2-0,3%) e sono rappresentate per lo più da amminoacidi libere e proteine

varie, tutti derivanti principalmente dal polline quindi associabili all'origine botanica (Sabatini, 2007a; Contessi, 2016).

1.5.4.6 Enzimi

Gli enzimi sono una classe di composti molto importanti per la valutazione della qualità del miele. In parte derivano dalle materie prime, nettare e melata, ed in parte dalla secrezione ghiandolare delle api e vengono studiati per capire come essi determinino la formazione del miele (Sabatini, 1995a, 2007a). I principali enzimi nel miele sono: l'invertasi (o saccarasi) che catalizza la scissione del saccarosio in glucosio e fruttosio; la diastasi (o amilasi) che scinde l'amido in glucosio; la glucosio ossidasi, la catalasi e la fosfatasi (Contessi, 2016).

1.5.4.7 Vitamine

Il contenuto di vitamine nel miele è basso, si parla di quantità nell'ordine dei microgrammi su 100g (Contessi, 2016). Derivano essenzialmente dal polline e da menzionare sono le vitamine del gruppo B, la vitamina C e la vitamina K.

1.5.4.8 Altre sostanze

Nel miele si trovano, oltre a quelli sopra citati, composti presenti in quantità molto minori importanti per l'aroma come le sostanze aromatiche (alcoli, terpeni, aldeidi, chetoni ed esteri) e per la valutazione tecnologica del prodotto. Quest'ultima è rapportabile ad un composto, l'idrossimetilfurfurale (HMF) presente in basse quantità nei mieli giovani e che tende ad aumentare con il passare del tempo o per riscaldamenti eccessivi (Contessi, 2016).

1.5.5 Qualità del miele

La qualità si definisce come l'insieme delle caratteristiche di un prodotto che ne determinano la capacità di soddisfare le esigenze del consumatore. Questo insieme di caratteristiche è ambiguo e legato al contesto culturale in cui si colloca infatti, nel definire gli standard internazionali di qualità, esistono approcci e contesti

culturali profondamente diversi. Comunque, in un alimento i criteri di qualità sono essenzialmente due:

- Autenticità: l'alimento non deve essere adulterato;
- Salubrità: l'alimento deve essere privo di sostanze dannose per la salute.

Il D. Lgs. 179/2004 vuole proprio assicurare il rispetto di questi due punti critici, come riportato nell'art. 4. Per la qualità del miele esistono due modelli di riferimento, quello europeo (e italiano) e quello americano. Il modello americano pone la sua attenzione esclusivamente sugli aspetti di sicurezza igienico-sanitaria: tanto più il miele è asettico meglio è, venendo così sottoposto a importanti trattamenti termici e di ultrafiltrazione così da renderlo sterile, limpido e trasparente. Il modello europeo al contrario vuole mettere enfasi sull'integrità del prodotto e sulla sua genuinità: il miele migliore è quindi quello che esce direttamente dai favi senza subire alcun trattamento e processo, poiché un qualsiasi intervento sul miele allontanerebbe il prodotto dalla sua condizione originaria. Questi modelli mostrano solo il differente approccio alla qualità ma non bastano a definirla perché devono essere poi considerati fattori climatici e ambientali oltre che i livelli tecnologici.

Come riportato nel paragrafo 1.5.4 riguardante la composizione del miele, le caratteristiche del prodotto possono cambiare notevolmente: mieli provenienti da paesi tropicali possiedono contenuti d'acqua maggiori, o possono variare colore e aroma da paese a paese. Il rispetto dei caratteri di autenticità e salubrità per essere verificato necessita di più analisi, in ogni caso dal punto di vista analitico il controllo della qualità si effettua mediante l'esame organolettico. L'esame organolettico del miele comprende il controllo dello stato fisico e della pulizia, e la determinazione dei caratteri chimico-fisici quali contenuto d'acqua (per la conservabilità) e contenuto di HMF (per la freschezza), con questi parametri che dovranno mostrare valori inferiori a quelli consentiti dalla legge (D. lgs. 179/2004) (Sabatini, 2004; Sabatini, 2007b).

Nel definire la qualità del miele assume poi importanza rilevante anche l'analisi sensoriale in quanto le caratteristiche sensoriali del miele sono ciò che lo rende così unico come alimento, ed in quanto essa permetta di rilevare frodi (Sabatini, 2004; Sabatini, 2007b).

Capitolo 2

Il telerilevamento

In questo capitolo si parlerà della caratterizzazione remota del suolo tramite il telerilevamento (Remote Sensing- RS). Questa tecnologia permette lo sviluppo di modelli predittivi per l'agricoltura che negli ultimi anni sta vedendo un notevole progresso tecnologico.

2.1 L'agricoltura di precisione

L'ambito agricolo sta sempre più assumendo un cambiamento importante dal punto di vista dell'innovazione, per rispondere alle sempre maggiori esigenze della popolazione in aumento. A partire dal secolo scorso infatti, il settore primario ha subito notevoli cambiamenti, i quali possono essere divisi e classificati in diverse "tappe evolutive" che identificano i seguenti sistemi agricoli:

- Agricoltura 1.0: con questo termine si fa riferimento all'agricoltura ad alto impiego di manodopera, iniziata nel XX secolo con un terzo della popolazione mondiale che lavorava nel settore primario anche se con scarsi risultati produttivi;
- Agricoltura 2.0: iniziata negli anni '50, vede l'introduzione e l'impiego di fertilizzanti chimici e fitofarmaci per il controllo dei terreni, con un aumento della produttività ma conseguenze sull'ambiente;
- Agricoltura 3.0: in questa fase, iniziata negli anni '90, si entra nel vivo dell'agricoltura di precisione, la quale viene applicata attualmente, con l'introduzione e l'impiego di sistemi di geolocalizzazione satellitare (GPS) per guidare il lavoro delle macchine agricole;
- Agricoltura 4.0: chiamata anche *smart* o *digital* per la fusione dei sistemi agricoli con le nuove tecnologie e internet, riguarda anche la condivisione dei dati tra operatori diversi nella filiera per l'ottimizzazione della produzione.

L'agricoltura di precisione (AP) chiamata in inglese come *precision farming* o *precision agriculture* è stata definita per la prima volta da Pierce e Nowak (1999) come “un sistema che fornisce gli strumenti per fare la cosa giusta, nel posto giusto, al momento giusto”, dove per “cosa giusta” si intende un intervento agronomico; la AP quindi riguarda l'applicazione di tecnologie e principi per gestire la variabilità spaziale e temporale associata a tutti gli aspetti della produzione agricola allo scopo di migliorare le prestazioni delle colture e la qualità dell'ambiente (Pierce e Nowak, 1990). Comunque, il concetto centrale è quello di attuare un sistema congiunto di raccolta di informazioni, elaborazione delle stesse e applicazione di operazioni volte al conseguimento di un obiettivo.

2.2 Lo studio del suolo

L'agricoltura di precisione prevede l'utilizzo di tecnologie per la gestione precisa della variabilità associata agli appezzamenti, occorre quindi introdurre i concetti di variabilità e caratterizzazione del suolo. La AP infatti richiede scelte gestionali basate sulla conoscenza della variabilità del suolo in termini di proprietà delle colture (Oliver, 2013), poiché la variabilità spaziale e temporale dei fattori agricoli influenza la produzione sia in termini quantitativi che qualitativi (Zhang et al., 2002; Diacono et al., 2012). Quindi la conoscenza delle caratteristiche del suolo risulta alquanto importante per applicare una gestione innovativa del campo agricolo.

2.2.1 La variabilità

Il suolo è un sottile strato di una matrice complessa composta di sostanze organiche ed inorganiche in miscela, e per sua natura rappresenta una sostanza non rinnovabile. Le sue caratteristiche sono influenzate dagli elementi che lo compongono e innumerevoli fattori, quali proprietà fisiche, chimiche e biologiche e la sua composizione, con macroelementi e microelementi, può variare sia spazialmente che temporalmente.

2.2.1.1 Variabilità spaziale

La variabilità spaziale di un appezzamento è l'attitudine della produttività a manifestarsi a livelli differenti al suo interno, ma discostandosi dai livelli produttivi medi (Cillis et al., 2015). Quando si studia un appezzamento bisogna tenere conto delle variabili intrinseche quali la tessitura⁵, la profondità degli orizzonti⁶ o la composizione chimica. Per esempio si può notare come azoto, fosforo, potassio e zinco variano più di calcio, magnesio e manganese; invece il pH o la sostanza organica dipendendo da più variabili mostrano una minore variabilità spaziale (Gupta et al., 1999). Lo studio della variabilità spaziale poi non si ferma alle condizioni di campo, ma riguarda anche le caratteristiche della coltura come la produzione, la qualità del prodotto, lo stato sviluppo e accrescimento della pianta. Comunque la variabilità spaziale delle caratteristiche della coltura deriva necessariamente dalla variabilità spaziale del suolo; esistono tuttavia situazioni che si discostano da questa situazione in cui la variabilità spaziale dell'ambiente non coincide con quella della coltura. Ecco quindi che lo studio della variabilità spaziale è importante per definire i fattori che determinano livelli di produttività diversi.

2.2.1.2 Variabilità temporale

Mentre la variabilità spaziale considera livelli produttivi differenti all'interno dello stesso perimetro in un dato istante, la variabilità temporale estende questa definizione allo studio dell'attitudine della produttività in periodi diversi, in corrispondenza dello stesso punto dentro l'appezzamento. Possono essere riscontrate caratteristiche differenti sia su scala annuale, sia stagionale o perfino giornaliera (solo per contenuto idrico del suolo). La variabilità temporale è calcolata in ciascun punto mediante la differenza tra la resa di quella annata e la produzione media di tutte le annate; calcolandola ogni anno è possibile per gli agricoltori ricavare una tendenza.

⁵ La tessitura è una proprietà fisica del terreno che lo identifica in base alla sua composizione percentuale di particelle solide divise in classi granulometriche (dimensionali);

⁶ Gli orizzonti (o livelli) del suolo sono i diversi strati in cui si divide, distinguibili anche ad occhio nudo per le diverse gradazioni di colore.

2.2.2 Cenni di caratterizzazione del suolo e della vegetazione

La variabilità descritta può essere studiata con più metodologie. Sicuramente prelevare campioni e analizzarli, usando quindi un metodo diretto, risulta un'operazione troppo laboriosa e lunga per studiare ampie superfici, pertanto si usano sensori che permettono in poco tempo di raccogliere una grande quantità di dati.

2.2.2.1 La caratterizzazione prossimale

Quei sensori che analizzano caratteristiche di suolo o vegetazione che si posizionano vicino al campione sono i cosiddetti sensori di prossimità e si definiscono tali se vengono usati a diretto contatto con l'oggetto da misurare, oppure ad una distanza inferiore ai 2 metri (Priori et al., 2016). I sensori di prossimità vengono pertanto utilizzati per indagare le caratteristiche del terreno e della vegetazione:

- Caratterizzazione del suolo: le ricerche più diffuse per il suolo riguardano la conduttività elettrica o il suo inverso (resistività elettrica) oppure l'uso della spettrofotometria per rilevare le firme spettrali;
- Caratterizzazione della vegetazione: si basa principalmente sull'analisi della radiazione elettromagnetica.

2.2.2.2 Gli indici di vegetazione

Le sostanze ed i pigmenti che compongono i tessuti vegetali hanno picchi di assorbimento spettrale nella luce blu (470 nm) e nella luce rossa (670 nm) mentre li vediamo verdi perché il picco di riflettanza sta nella luce verde (540 nm). Fuori dallo spettro visibile invece, i pigmenti hanno una riflettanza molto bassa, ma mostra un rapido incremento in una zona particolare dello spettro, tra 650 e 750 nm, chiamato *Red Edge* (Fig. 2.1) derivante dalle proprietà ottiche del tessuto fogliare in relazione al contenuto di acqua e aria (Horler et al., 1983). Con lo studio di queste proprietà ottiche sono stati proposti degli indici che potessero descrivere il vigore vegetativo chiamati indici di vegetazione (Barati et al., 2011). L'indice di vegetazione più semplice è il *Simple Ratio* (SR) che assume valori tra 0 e infinito, in particolare

tra 0 e 1 per i suoli e tra 6 e 10 per la vegetazione verde (Jordan, 1969). Tra gli indici il più conosciuto è il *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) proposto da Rouse et al. nel 1973, che rappresenta la differenza normalizzata tra la riflettanza nel rosso e nel vicino infrarosso (NIR) quindi prima e dopo il *Red Edge*. Questo indice in quanto normalizzato può variare da -1 a 1 con valori positivi che indicano un vigore maggiore ed è influenzato negativamente dalla riflettanza del suolo. Ciò ha fatto sì che venissero proposti indici successivi quali:

- *Perpendicular Vegetation Index* PVI: questo indice elimina l'influenza del suolo tramite la formula; infatti, vale 0 sulla linea dei suoli e cresce linearmente man mano che ci si sposta da essa (Richardson e Wiegand, 1977);
- *Soil Adjusted Vegetation Index* SAVI: utilizza gli stessi parametri del NDVI ma riduce l'influenza della luminosità del terreno utilizzando un fattore di correzione. Questo indice è un valore medio tra NDVI e PVI ed elimina i limiti di quest'ultimi (Huete, 1988).

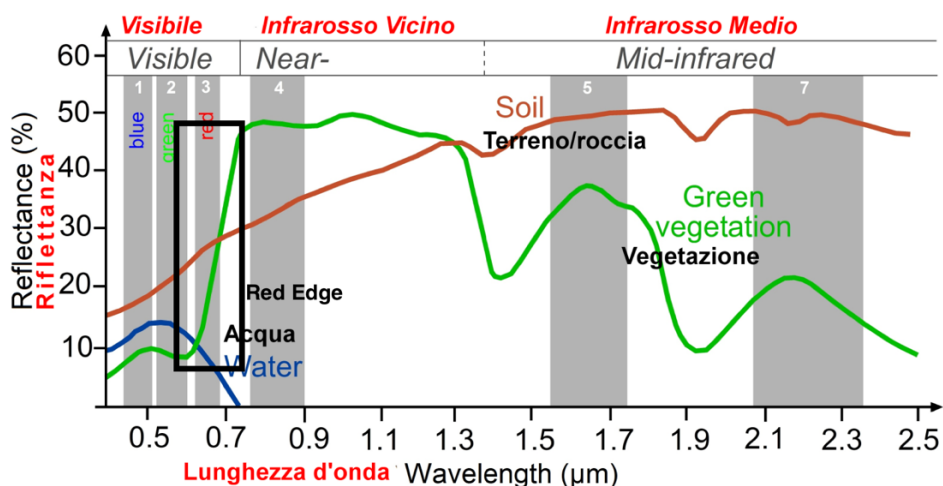


Figura 2.1 – Spettro elettromagnetico con firma spettrale di acqua, vegetazione e terreno con (in grigio) le zone di sensibilità del sensore ETM+ del Landsat 7 ed il Red Edge (in nero) (Foto modificata da Università degli Studi di Padova).

2.2.2.3 La caratterizzazione remota

Oltre ai sensori di prossimità esistono anche sensori che operano a distanze più elevate, da pochi metri fino a migliaia, e che quindi consentono di effettuare lo

studio delle caratteristiche del suolo o della vegetazione da remoto. L'utilizzo di questi sensori prende il nome di telerilevamento o *Remote Sensing* (RS) e verrà presentato nel prossimo paragrafo.

2.3 Il telerilevamento – *Remote Sensing*

Il telerilevamento (Remote Sensing-RS) può essere definito come la scienza dell'acquisizione, elaborazione e interpretazione dei dati ottenuti da distanze elevate tramite il rilevamento della radiazione elettromagnetica a diverse lunghezze d'onda (Nagendra, 2001; Turner et al., 2003; Kancheva, 2013; Galbraith et al., 2015). Questa tecnica permette lo studio delle caratteristiche di un oggetto attraverso l'osservazione dei campi di forza, di radiazione elettromagnetica o di energia acustica, per mezzo di dispositivi controllati a distanza. L'acquisizione dei dati nel telerilevamento infatti avviene grazie all'utilizzo di speciali sensori che misurano l'energia elettromagnetica emessa, riflessa o diffusa dei corpi osservati, facendo in modo che radiazioni invisibili per l'occhio umano diventino osservabili e quantificabili (Boschetti et al., 2001).

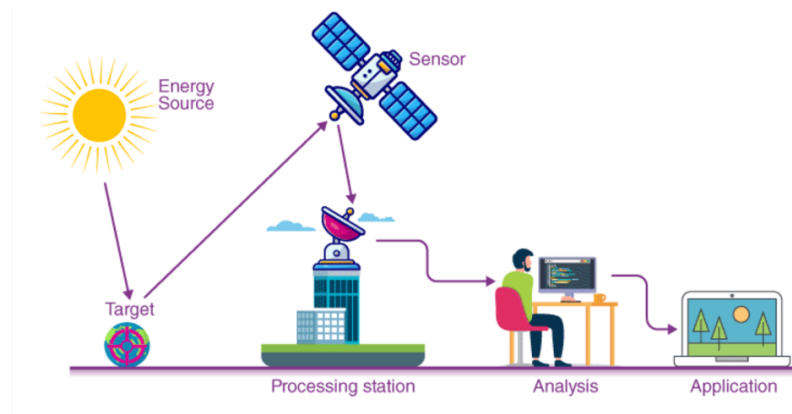


Figura 2.2 – Rappresentazione schematica del telerilevamento (Fonte foto: BYJU'S).

I dispositivi che vengono utilizzati nel telerilevamento sono diversi, come fotocamere, laser, ricevitori a radiofrequenza e sistemi radar: queste tecnologie insieme consentono l'osservazione e lo studio della superficie terrestre, ponendo i sensori a quote tali da poter acquisire dati in vaste aree, operando non solo nello

spettro del visibile VIS, ma anche in altre bande dello spettro elettromagnetico, come infrarosso IR e ultravioletto UV (Chuvienco, 2020). È poi importante sottolineare il fatto che il telerilevamento comprende anche le fasi di elaborazione e analisi dei dati e che quindi non riguarda solo l'insieme delle tecniche usate per raccogliere quest'ultimi, proprio perché l'obiettivo che si intende perseguire non è raggiungibile se ci si limita al processo di acquisizione delle informazioni senza passare per la comprensione e l'interpretazione.

Il Remote Sensing ha subito notevoli sviluppi negli ultimi decenni tale da essere utilizzato per la raccolta di informazioni in ogni aspetto della Terra e in vari campi di studio, in particolare nell'agricoltura di precisione l'oggetto di studio è costituito dalle colture e dal suolo. È importante sottolineare come assumano grande importanza le proprietà ottiche dei sensori utilizzati, che devono essere prese in considerazione nello scegliere il sensore ottimale per il tipo di analisi in quanto si opera a distanze elevate e la misurazione è indiretta.

2.3.1 La radiazione elettromagnetica

I sensori che si usano nel RS sfruttano fenomeni fisico-chimici nei quali vi è interazione tra la radiazione elettromagnetica ed il materiale dal quale si vogliono estrapolare i dati che saranno poi oggetto di studio.

Secondo la teoria ondulatoria, la radiazione elettromagnetica si può considerare come un'onda che si propaga nello spazio ad una velocità costante. Le onde elettromagnetiche sono caratterizzate da (Casa et al., 2016) (Fig. 2.3):

- Ampiezza (A): corrisponde all'altezza delle onde il cui massimo è definito "cresta" con unità di misura sottomultipli di m;
- Lunghezza d'onda (λ): corrisponde alla distanza tra due creste misurata in sottomultipli di m;
- Frequenza (ν): numero di oscillazioni al secondo, misurata in Hertz (Hz).

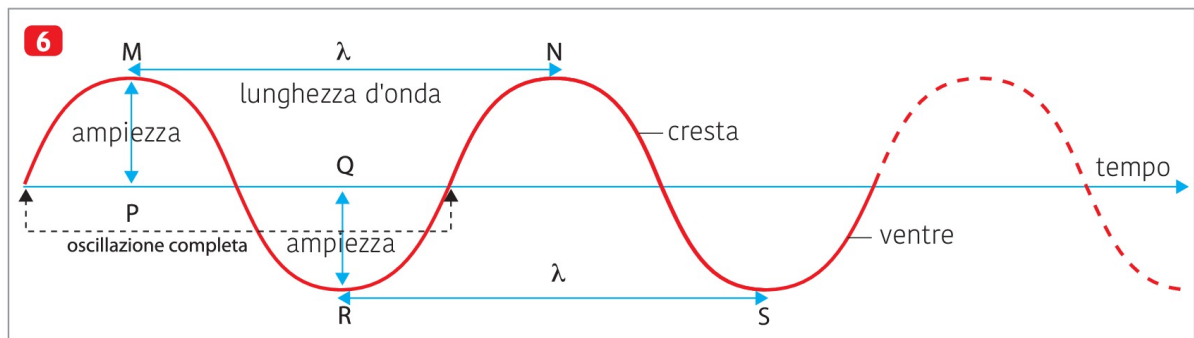


Figura 2.3 – Rappresentazione di onda elettromagnetica in cui è evidenziato: ampiezza, lunghezza d'onda, oscillazione e ventre dell'onda (Fonte foto: diginsegno, Unità 12- le onde e il suono).

2.3.2 Lo spettro elettromagnetico

Ogni corpo emette una propria lunghezza d'onda λ e l'insieme delle lunghezze d'onda prende il nome di spettro elettromagnetico e si divide in bande spettrali (Casa et al., 2016; Chuvieco, 2020) (Fig. 2.4):

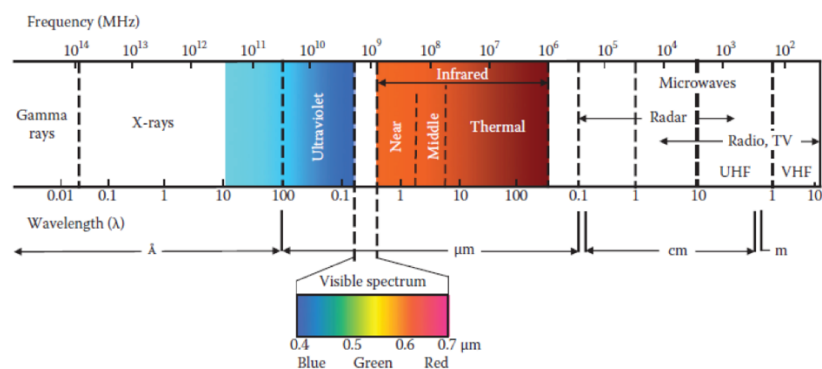


Figura 2.4 – Le bande dello spettro elettromagnetico (Chuvieco, 2020)

1. Ultravioletto (UV): caratterizzato da una λ corta compresa tra 0,015 e 0,4 μm , sono radiazioni principalmente emesse dalle stelle come il Sole che arrivano sulla superficie terrestre dopo essere state schermate dai gas atmosferici;
2. Visibile (VIS): banda spettrale compresa tra 0,4 e 0,7 μm , all'interno della quale troviamo tutte le λ osservabili dall'occhio umano sottoforma di tre colori: blu (0,4-0,5 μm), verde (0,5-0,6 μm) e rosso (0,6-0,7 μm);

3. Infrarosso (IR): caratterizzato da λ superiori a $0,7 \mu\text{m}$ suddiviso a sua volta in *Near Infra Red* (NIR, $0,7-1,3 \mu\text{m}$), *Short Wave Infra Red* (SWIR, $1,3-2,5 \mu\text{m}$), *Mid Wave Infra Red* (MWIR, $3-8 \mu\text{m}$) e *Thermal Infra Red* (TIR, $7-20 \mu\text{m}$).

2.3.3 I fenomeni di interazione

Il telerilevamento sembra nella teoria piuttosto semplice: si seleziona un oggetto di cui si vogliono sapere caratteristiche specifiche, si punta il sensore più adatto nella sua direzione e si procede all'analisi e l'elaborazione dei dati ottenuti. Nella pratica tuttavia, questi passaggi non risultano essere così semplici e immediati, in quanto nel mondo reale bisogna tenere conto di due "forze" influenti sulla radiazione elettromagnetica (Boschetti et al., 2001; Casa et al., 2016):

- Influenza atmosferica
- Interazione della radiazione con la superficie terrestre

2.3.3.1 L'influenza atmosferica

La radiazione elettromagnetica per poter arrivare ai sensori, in particolare quelli satellitari, deve necessariamente attraversare lo strato gassoso che circonda il nostro pianeta, ovvero l'atmosfera. L'atmosfera è costituita da gas ed aerosol i quali possono rappresentare un ostacolo per il segnale che deve giungere al sensore, in quanto possono alterarlo mediante due fenomeni:

- Assorbimento: fenomeno che riduce la quantità di energia incidente che arriva alla Terra, dovuto soprattutto a gas quali vapore acqueo, anidride carbonica CO_2 , ossigeno O_2 , e ozono O_3 . Comunque esistono bande dello spettro elettromagnetico meno suscettibili a questo fenomeno, come il VIS, NIR, MWIR e TIR;
- Diffusione: questo fenomeno riguarda la deviazione che le onde subiscono quando incontrano un mezzo (come l'atmosfera e le sue particelle) andando in diverse direzioni senza giungere sulla superficie terrestre. Questo effetto riguarda principalmente le bande del VIS e IR.

2.3.3.2 L'interazione della radiazione con la superficie terrestre

Quando la radiazione elettromagnetica colpisce una superficie si verificano 3 fenomeni fisici: riflessione, assorbimento e trasmissione. Questi tre fenomeni possono essere uniti in un'unica equazione basata sul principio di conservazione dell'energia:

$$E_i = E_r + E_a + E_t^7$$

Nel telerilevamento si usano tre coefficienti specifici dati dal rapporto tra la rispettiva energia e quella totale (per es.: coefficiente di riflessione $\rho = \frac{E_r}{E_i}$) (Boschetti et al., 2001). Il fenomeno più importante che influenza le misure nel RS è quello della riflessione, in quanto l'energia riflessa può aumentare quella che riceve il sensore alterando la misura.

2.4 Sensori e piattaforme

Nel Remote Sensing, come detto, assumono un ruolo fondamentale i sensori e le piattaforme utilizzati per l'acquisizione dei dati. La distanza alla quale si pone il sensore, rispetto all'oggetto da rilevare, può variare pertanto in base alla distanza abbiamo sensori aerotrasportati (o *Airborne*) se posti a bordo di aerei/droni o sensori satellitari (o *Spaceborne*) se installati in satelliti (Casa et al., 2016).

I sensori possono essere suddivisi in due gruppi: sensori passivi e sensori attivi (Imam, 2019):

- Sensori passivi: sono un gruppo di sensori che non emette energia propria, ma sfruttano la radiazione elettromagnetica proveniente da un'altra fonte (come il Sole), limitandosi quindi a misurare una fonte esterna. Questi operano nel VIS e IR (vicini, medio e termico) e includono fotocamere, scanner elettro-ottici e radiometri a microonde;
- Sensori attivi: questi sensori oltre a rilevare la radiazione elettromagnetica la producono loro stessi, quindi lo strumento stesso è una fonte di energia: possono inviare impulsi e catturare la riflessione per la misura. Ne sono

⁷ Dove E_i rappresenta l'energia totale, E_r quella riflessa, E_a quella assorbita e E_t quella trasmessa

esempi il radar, che opera nelle microonde e il lidar, il quale opera nel VIS e IR.

Attualmente la strumentazione più utilizzata è il lidar, in grado di determinare la concentrazione di specie chimiche nell'atmosfera (Imam et al., 2019).

2.4.1 Risoluzione dei sensori usati per il RS

I dati ottenuti grazie ai sensori ci permettono di ricavare immagini digitali le cui caratteristiche dipendono da vari fattori interconnessi. Queste caratteristiche insieme prendono il nome di risoluzione ed essa viene classificata in quattro tipologie: risoluzione spaziale⁸, radiometrica⁹, temporale¹⁰ e la risoluzione spettrale¹¹ (Gomasasca et al., 2001; Casa et al., 2016).

Sensore	Risoluzione spaziale	Risoluzione spettrale	Risoluzione temporale
Himawari8	500-2000 m	30-960 nm	10 minuti
MODIS	250-1000 m	10-500 nm	1 giorno
Sentinel 2A	10-60 m	15-175 nm	10 giorni

Tabella 2.1 – Confronto delle risoluzioni spaziali, spettrali e temporali dei principali tre sensori utilizzati in agricoltura di precisione (Campbell, 2020).

La prima caratteristica da considerare, per i sensori, è la loro risoluzione spaziale, maggiore è quest'ultima maggiore sarà il numero di pixel dell'immagine e conseguentemente il livello di qualità. La risoluzione spaziale dipende dal campo di

⁸ Risoluzione spaziale: minima distanza tra due elementi distinguibili;

⁹ La risoluzione radiometrica rappresenta il numero di intensità di radiazione che un sensore è in grado di catturare o la cosiddetta "gamma dinamica", minore è il suo valore inferiore è la capacità di rilevare piccoli cambiamenti nella riflettanza;

¹⁰ Rappresenta il tempo che intercorre tra un passaggio e l'altro del sensore sopra la stessa area;

¹¹ La risoluzione spettrale è una caratteristica importante del sensore, in quanto costituisce la larghezza delle bande spettrali in cui l'immagine è registrata.

vista istantaneo a terra (*Ground Instantaneous Field of View-GIFW*) e dal campo di vista del sensore (*Field of View-FOV*) (Casa et al., 2016).

I sensori usati nel Remote Sensing possiedono poi risoluzioni spettrali differenti: sono in grado di acquisire diverse bande, quindi definendosi multispettrali o iperspettrali. Sensori multispettrali possono acquisire da 3 a 10 bande, di solito nel VIS, rosso, verde, blu e NIR; sensori iperspettrali invece possono rilevare fino a 200 bande perché misurano l'energia in bande più strette (Casa et al., 2016).

La risoluzione temporale invece è ciò che permette di fare uno studio dinamico del territorio, permettendo di seguire la sua evoluzione e quindi di fare un confronto tra periodi diversi. Risoluzioni temporali maggiori implicano un minor tempo che intercorre tra l'acquisizione di un'immagine e la successiva.

Nella tabella Tab. 2.1 è riportato un confronto delle risoluzioni di sensori satellitari comunemente utilizzati nel telerilevamento per l'agricoltura di precisione (Campbell, 2020).

2.4.2 Satelliti – *Spaceborne platforms*

Le *Spaceborne platforms* sono quelle piattaforme che acquisiscono informazioni dallo spazio. Piattaforme di questo tipo riescono a coprire vaste aree di studio quindi permettono di acquisire dati per spazi molto grandi ed in breve tempo. L'uso dei satelliti richiede di porre particolare attenzione alla loro risoluzione temporale, cioè la frequenza con la quale il sensore ripete la misurazione, e alle condizioni atmosferiche, in quanto la più grande limitazione che presentano queste piattaforme è l'influenza atmosferica. La frequenza con la quale è acquisita l'immagine dipende dalle caratteristiche dell'orbita satellitare: essa rappresenta il percorso (circolare o ellittico) che il satellite compie attorno alla Terra e normalmente va da due volte al giorno a una ogni 16 giorni (Imam, 2019). I satelliti usati nel RS trasportano più sensori multi e iperspettrali così da poter

studiare un ampio intervallo di radiazione elettromagnetica; nell'agricoltura di precisione si usano sensori che acquisiscono dati utili al calcolo degli indici di vegetazione e per ricavare dati termici.

I satelliti usati in AP sono la costellazione americana Landsat e quella europea Copernicus. Sviluppato per fini bellici, il programma Landsat conta 9 satelliti lanciati tra il 1973 e il 2021 ma in servizio rimangono solo gli ultimi tre, Landsat-7, -8 e Landsat-9. Il programma Copernicus è invece di sviluppo più recente e comprende 6 coppie di satelliti Sentinel. Mentre Landsat-8 contiene due sensori per il visibile VIS e l'infrarosso IR, i satelliti Sentinel montano molteplici sensori: Sentinel-1 utilizza la tecnologia radar e Sentinel-2 usa sensori multispettrali UV-VIS-NIR-SWIR con quest'ultima coppia di satelliti che è la principale piattaforma utilizzata nel RS per l'agricoltura di precisione. Ci sono poi altre piattaforme satellitari commerciali che ampliano il ventaglio di opzioni, anche considerato che ogni satellite monta sensori con risoluzione spaziale propria: Landsat-8 ha una risoluzione spaziale di 30 m, Sentinel-2 di 10 m e il IKONOS (un sistema commerciale) di 4 m.



Figura 2.5 – Rappresentazione grafica di Sentinel-2 (Fonte foto: European Space Agency).

Tramite queste piattaforme si possono ottenere immagini del pianeta senza passare per particolari autorizzazioni ed il servizio è messo a disposizione gratuitamente da vari enti spaziali, previa registrazione nei loro siti web, come la NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) e l'ESA (*European Space Agency*) con un costo di pochi euro per km².

2.4.3 Aerei e UAV – Airborne platforms

Le *Airborne platforms* sono piattaforme aeree più tradizionali impiegate per il telerilevamento, quali aerei e elicotteri, anche se gli ultimi vengono poco utilizzati a causa del loro volo instabile. Più un aereo può volare alto più il suo volo si fa stabile e l'area coperta si fa maggiore, tuttavia anche il costo aumenta perciò l'utilizzo di aerei come piattaforme presenta lo svantaggio di un rapporto costo/superficie più alto delle piattaforme satellitari.

Negli ultimi anni lo sviluppo tecnologico ha permesso lo sfruttamento di macchine a pilotaggio remoto definiti *Unmanned Aerial Vehicle* (UAV) o anche chiamati impropriamente “droni”. Impropriamente perché il termine “drone” indica strumenti con caratteristiche limitate non adatti ad applicazioni complesse, e gli strumenti utilizzati nel telerilevamento hanno invece caratteristiche tecniche superiori a quelle dei comuni droni. Gli UAV possono essere classificati per dimensione, copertura spaziale, massima altitudine raggiungibile o ancora in base al loro sistema di volo che può essere ad elica o ala battente (Singhal et al., 2018). Quelli più utilizzati in AP sono gli UAV ad elica a loro volta divisi in sistemi ad ala fissa (struttura con ali più o meno rigide) e sistemi ad ala rotante multirotores (generano una spinta d'aria verso il basso) (Matese et al., 2015). Gli UAV ad ala fissa offrono il vantaggio di maggiori velocità, maggiori capacità di carico e autonomia ma di contro hanno un costo maggiore e il volo stazionario non è possibile, perciò il loro uso è meno diffuso a favore degli UAV multirotores. I sensori utilizzati sono multispettrali, iperspettrali e lidar.

Il primo vantaggio degli UAV è la versatilità e la manovrabilità nel volo rispetto ad aerei e satelliti, inoltre possono essere comandati manualmente o tramite sistemi di navigazione automatici. Rispetto a piattaforme come aerei o satelliti, operano a quote inferiori il che li rende più adatti a coprire superfici aziendali ma le principali problematiche risultano in ambito di autonomia, molto inferiore a quella di aerei e satelliti. Infine, queste piattaforme non sono adatte per rilievi regolari delle località, perciò le piattaforme più utilizzate per il RS in agricoltura di precisione sono i satelliti (Campbell, 2020).

Capitolo 3

Telerilevamento per la produzione di miele

In questo capitolo si parlerà del potenziale utilizzo del telerilevamento nel controllo della produzione di miele e del suo impiego in apicoltura, discutendo dei principali vantaggi e presentando esempi bibliografici.

3.1 Il RS applicato alla produzione di miele

Il Remote Sensing rappresenta un nuovo orizzonte nel campo agro-alimentare, in quanto fornisce nuove e pratiche capacità nell'acquisire informazioni per la gestione dei processi produttivi. Queste tecnologie sono strumenti efficaci per valutare la variabilità spaziale e temporale dei sistemi naturali (Willcox et al., 2018).

3.1.1 Uso del RS per la previsione dei raccolti di miele

Negli ultimi anni sono stati fatti sforzi per utilizzare i dati ricavati dal telerilevamento per mappare e prevedere la produzione di miele, con diversi studi che raccomandano di incorporare i dati meteorologici nei modelli applicati (Campbell, 2020). Nel suo lavoro, T. Campbell (2020) valuta la capacità dei dati satellitari e meteorologici di prevedere il volume di miele prodotto dalla *Corymbia calophylla*¹² (Marri) nel sud ovest australiano.

Anche se la resa annuale di miele proveniente dalle foreste australiane di Marri è tendenzialmente elevata (>70 kg/alveare), in alcune stagioni possono verificarsi eventi di fioritura insufficiente con conseguente fame delle api e perdita dell'alveare (Campbell e Fearn, 2018). Quindi la possibilità di prevedere gli eventi

¹² La *Corymbia calophylla* è una specie di pianta da fiore della famiglia delle Myrtaceae ed endemica del sud-ovest dell'Australia. Fiorisce tra dicembre e maggio producendo fiori dal bianco al rosa.

di fioritura delle specie produttrici di nettare presenta per gli apicoltori locali notevoli vantaggi commerciali.

Per questo studio sono stati raccolti dati sulla raccolta del miele in tutta l'Australia sud-occidentale (Fig. 3.1) provenienti da due apicoltori: un apicoltore "commerciale" con più di 700 alveari e un apicoltore "per hobby" con circa 50, ed entrambi allevano la sottospecie italiana di *Apis mellifera*.

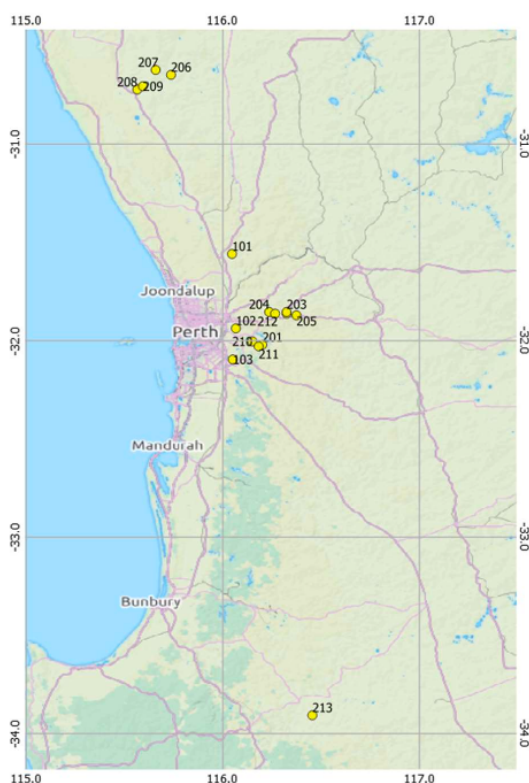


Figura 3.1 – Posizione dei siti apiari presi in esame per effettuare lo studio (Campbell, 2020).

I dati utilizzati hanno incluso il numero di alveari per sito apiario per la stagione, le date nelle quali gli alveari erano spostati dentro/fuori dal sito ed il peso totale del miele Marri raccolto nella stagione considerata. La struttura della vegetazione per ricavare gli indici vegetativi è stata valutata utilizzando dati AusCover (Scarth, 2009) derivati da dati Landsat telerilevati con sensore MODIS, calcolando l'indice vegetativo principale NDVI dal database della dimensione dei pixel. Sono stati poi considerati dati meteorologici per comprendere meglio le cause delle variazioni nella produzione di miele, ottenuti dal sito web dell'ufficio

meteorologico del governo australiano (Australian Government's Bureau of Meteorology-BOM).

Utilizzando i dati di 8 anni di raccolta del miele, si è scoperto che l'indice vegetativo NDVI di gennaio¹³ prevedeva un raccolto buono¹⁴ con una precisione del 79%. Incorporando poi le variabili meteo, in particolare i dati relativi alle precipitazioni di gennaio e la temperatura media massima giornaliera, si è rilevato che l'NDVI di gennaio ha migliorato la classificazione dei raccolti (nota 14) al 90%.

I risultati dello studio sono una prova a favore dell'utilità del telerilevamento applicato all'agricoltura di precisione e consentiranno agli apicoltori di prevedere con maggiore accuratezza la qualità del raccolto di miele prima dell'inizio della produzione, consentendogli di adattare di conseguenza la selezione e la preparazione dei siti produttivi (Campbell, 2020)

3.1.2 Uso del RS nella creazione di modelli Machine Learning per la previsione di raccolti di miele

La resa degli alveari nella produzione del miele può variare molto da un anno all'altro e questo influisce sulle capacità commerciali di un apicoltore. Oltre a questo, la variabilità delle rese ha importanti ripercussioni per l'ecosistema, come un'inferiore disponibilità di foraggio per le api che può portare alla perdita dell'alveare. Inoltre, particolari varietà di miele vengono prodotte da alberi che si trovano su vaste aree, per cui gli apicoltori si trovano a dover percorrere grandi distanze per ispezionare i propri siti produttivi. Uno studio recente ha studiato la possibilità di usare dati telerilevati per la creazione di modelli di apprendimento automatico (*Machine Learning*¹⁵) che riescano a prevedere la raccolta di miele (Campbell et al., 2020).

¹³ La *Corymbia calophylla* è una specie di pianta da fiore che fiorisce tra dicembre e maggio e in Australia le stagioni sono invertite con l'estate che va da dicembre a febbraio, per questo motivo è riportato l'indice vegetativo NDVI di gennaio;

¹⁴ La raccolta del miele è stata così classificata sulla base della quantità del miele raccolto: raccolto povero (<20 kg di miele), raccolto moderato (21-40 kg di miele) e raccolto buono (>40 kg di miele).

¹⁵ I metodi di apprendimento automatico come gli alberi di classificazione e regressione sono comunemente usati per costruire modelli predittivi da un set di dati input (Loh, 2011). Funzionano

I dati utilizzati in questo studio provenivano dallo stesso set di dati utilizzato da Campbell, 2020, in particolare sono stati telerilevati dal sensore MODIS, e sono stati utilizzati come input nella creazione del modello di regressione per valutare la capacità dei dati relativi alla vegetazione (calcolo degli indici di vegetazione) e sviluppare una previsione del raccolto del miele Marri nell’Australia sud-occidentale.

Anche questo studio ha concluso che il RS apre nuove possibilità in tema di produzione di miele, evidenziando come i dati ottenuti possono essere usati per creare modelli di apprendimento automatico anche molto complessi.

3.2 Il RS in apicoltura

Il progresso tecnologico degli ultimi decenni ha messo a disposizione una gamma senza precedenti di nuovi sistemi di osservazione, che abbinati ad una sempre più elevata capacità di calcolo ha reso questa un’epoca d’oro per gli ecologisti. Studi recenti utilizzano il telerilevamento per comprendere meglio i servizi ecosistemici, come l’impollinazione, o per gestire al meglio gli alveari per la produzione.

3.2.1 Geographical Information System per lo sviluppo dell’apicoltura

L’apicoltura presenta molti aspetti che possono essere influenzati da fattori ambientali e geografici; infatti, i luoghi in cui vengono installati gli apiari devono essere selezionati attentamente per garantire la sicurezza delle colonie ed un’alta produttività delle stesse (Estoque e Murayama, 2010; Abou-Shaara, 2019). In tempi recenti è stato utilizzato il *Geographical Information System* (GIS) per analizzare vari set di dati in relazione ad un riferimento geografico. Il sistema di informazione geografica GIS è un sistema computerizzato in grado di eseguire analisi di dati proprio in relazione a specifiche posizioni geografiche e viene ampiamente applicato in agricoltura di precisione.

suddividendo i dati di input in sottoinsiemi ed effettuando una previsione per ciascun sottoinsieme. Nello studio citato è stato utilizzato un modello di regressione.

L'uso più comune del GIS in apicoltura è quello di identificare i siti migliori per posizionare o creare nuovi apiari, all'interno di una determinata area geografica (Abou-Shaara, 2019). I dati utilizzati nella ricerca sono ottenuti dal telerilevamento e riguardano: disponibilità di piante da fiore, pendenza del terreno, distanza da risorse idriche, distanza tra gli apiari e fattori climatici¹⁶ (Abou-Shaara et al., 2013; Abou-Shaara, 2019). Un esempio dell'utilità del GIS è rappresentato poi dalla possibilità di utilizzare questo sistema per selezionare le aree più adatte per tenere gli alveari durante la stagione invernale, lontani da condizioni difficili e quindi ridurre al minimo il tasso di mortalità nelle colonie (Abou-Shaara, 2013).

Soprattutto, scegliere la posizione corretta degli apiari è importante per garantire la loro distribuzione ottimale in relazione all'area di fioritura ed evitare il sovraffollamento. Individuare il periodo di fioritura, la quantità di nettare, la concentrazione di zuccheri e numero medio di fiori per pianta può essere una svolta per un apicoltore: in questo modo si può conoscere il numero adeguato di alveari da posizionare nell'area e ottenere la massima produttività. Per fare ciò è stato sviluppato un nuovo approccio che consente di determinare la capacità di carico della colonia di api in relazione alla produttività delle colonie e alla potenziale secrezione di nettare (Al-Ghamdi et al., 2016). Nel loro studio, Al-Ghamdi et al. (2016) utilizzano immagini satellitari, analizzandole con il GIS, per identificare la distribuzione di una determinata specie di pianta e determinare il numero adeguato di alveari e la loro posizione.

Il GIS non aiuta solo in apicoltura per la gestione degli alveari ma permette un più ampio studio dell'ecosistema e dei servizi di impollinazione svolti dalle api. Alcuni comportamenti delle api che possono essere monitorati attraverso il GIS sono l'attività di foraggiamento, la sciamatura e la fuga (Abou-Shaara, 2019). Le attività di foraggiamento vengono svolte da quegli individui della colonia che hanno almeno 21 giorni di età e prevedono la raccolta di nettare, polline o resina dalle piante

¹⁶ I fattori climatici presi in considerazione sono: temperatura, umidità relativa e precipitazioni

(Contessi, 2016; Abou-Shaara, 2014). Il GIS è utile nell'identificazione di quelle risorse, e quindi rende possibile prevedere la produttività di miele e propoli delle colonie. Per quanto riguarda la sciamatura e la fuga, che rappresentano rispettivamente il modo in cui le api si riproducono (Contessi, 2016) e uno spostamento verso un altro luogo, il loro verificarsi è considerato un problema per gli apicoltori; il GIS aiuta a tracciare i movimenti degli sciami e prevedere se invaderanno aree protette (Abou-Shaara, 2019).

3.2.2 Uso del RS per valutare i servizi ecosistemici

I servizi ecosistemici sono, secondo la definizione data dalla *Millenium Ecosystem Assessment* (MEA), “i benefici multipli forniti dagli ecosistemi al genere umano”. Si tratta quindi di quei vantaggi che l'uomo trae dalla natura, e comprendono quei servizi di approvvigionamento, come la produzione di cibo; servizi di supporto quali lo stoccaggio di carbonio e il ciclo di nutrienti; servizi di regolamentazione, come l'impollinazione o il controllo dei parassiti. In particolare, l'impollinazione, ovvero il trasferimento di materiale genetico tramite polline, è il servizio ecosistemico più studiato che deriva dall'attività degli insetti (Galbraith et al., 2015). Di tutte le specie di piante da fiore, circa l'87% dipende dagli animali per trasferire il polline (Ollerton et al., 2011) e anche noi esseri umani dipendiamo direttamente da questo servizio, poiché il 35% delle specie coltivate dipendono dagli impollinatori (Klein et al., 2007).

Nell'ultimo decennio il telerilevamento è stato adottato come strumento per lo studio di questi servizi ecosistemici, in quanto può fornire osservazioni ed informazioni preziose ed efficienti per tempo e costi. I dati telerilevati che riguardano la composizione e la configurazione del paesaggio sono quelli più utilizzati. Per esempio, uno studio condotto sulle comunità mellifere della California (USA) ha evidenziato come la vicinanza di foreste ad altre aree naturali è correlata positivamente all'abbondanza delle api e alla loro fornitura di servizi di impollinazione (Kremen et al., 2004). Comunque, l'applicazione più comune del telerilevamento in ecologia resta la costruzione di modelli spaziali bidimensionali

del suolo, evidenziandone la copertura fogliare su scale che vanno dal campo, al paesaggio, a intere regioni: questi studi comportano la valutazione delle fotografie aeree su scale spaziali e temporali.

La caratterizzazione del suolo risulta molto importante negli studi sulle api e sul servizio di impollinazione; le immagini satellitari sono state utilizzate per confermare l'ipotesi di relazione tra habitat ecosistemico. Caratterizzare le aree di foraggiamento delle api o la loro possibilità di fuga risulta centrale per gli apicoltori nella gestione dei siti produttivi e della produzione di miele (Campbell et al., 2020; Campbell, 2020).

3.3 Potenzialità future del RS

Gli strumenti del telerilevamento hanno un grande potenziale per future ricerche sulle api e sui servizi di impollinazione, e per migliorare la nostra gestione produttiva del miele di conseguenza. Galbraith et al. (2015) analizzano lo stato corrente degli strumenti del telerilevamento e pongono l'attenzione sui possibili miglioramenti futuri.

L'uso di dati telerilevati ha il grande potenziale di espandere geograficamente la ricerca sulle api, in quanto la ricerca, fino a questo punto, si è concentrata su poche aree geografiche relativamente ristrette, e si è per lo più limitata a valutare gli usi del territorio alterato dall'uomo (Winfrey, 2013). Si dovrebbe compiere un passo in più, andando a studiare aree geografiche diverse, questo perché il telerilevamento è stato utilizzato finora solo nelle regioni più sviluppate poiché la ricerca era economicamente vantaggiosa. Questa situazione fa sì che la ricerca si concentri sempre sulle stesse ampie regioni e favorisca solo l'apicoltore più grande, a scapito di aziende più piccole: manca un approccio che studi la dipendenza della produzione di miele dai fattori su scala più piccola.

Per quanto riguarda i sensori utilizzati, una maggiore risoluzione spaziale, temporale e spettrale dei sensori utilizzati consentirebbe un altrettanto maggiore

caratterizzazione del suolo e della vegetazione. Mappe basate su immagini grossolane non sono in grado di valutare adeguatamente caratteristiche fondamentali per l'habitat delle api, come le risorse floreali e le aree di nidificazione (Galbraith et al., 2015). Una migliore distinzione dell'uso dei suoli può migliorare le previsioni sulle popolazioni di api e quindi gli apicoltori produttori di miele (Galbraith et al., 2015; Campbell, 2020). La scelta dello strumento o dei dati telerilevati è una delle sfide più grandi per chi si approccia a questa disciplina perché i dati variano ampiamente in termini di disponibilità (Galbraith et al., 2015). Per esempio, dati Landsat sono facilmente scaricabili a bassi costi o nulli, ma questi dati potrebbero avere una risoluzione troppo grossolana per ricavare indici di vegetazione accurati e altre variabili di valutazione (Galbraith et al., 2015). Si devono poi fare compromessi tra le risoluzioni spettrali, spaziali e temporali, in quanto risoluzioni più elevate comportano costi maggiori o una inferiore disponibilità di immagini per condurre la ricerca (Galbraith et al., 2015).

Conclusioni

La dipendenza della produzione di miele dai servizi di impollinazione svolti dalle api rende necessario comprendere la stabilità o la variabilità spaziale e temporale di questi servizi. L'obiettivo di questo elaborato è stato quello di analizzare le principali caratteristiche e vantaggi del Remote Sensing, una disciplina che sempre più sta venendo sfruttata nel nostro mondo soprattutto in ottica di eco-sostenibilità. Studi recenti hanno dimostrato l'utilità di queste tecnologie nel rilevare le relazioni tra fattori botanici generali e la classificazione della produzione di miele, riuscendo a sviluppare metodi per mappare e prevedere il peso del raccolto. La prima implicazione di ciò che questi studi hanno dimostrato è di significato economico: utilizzando i dati raccolti dai satelliti è possibile controllare, gestire e adattare la produzione di miele, in particolare nelle annate che mostrano una notevole variabilità spaziale. Per un apicoltore commerciale che gestisce molti alveari infatti, conoscere in anticipo la produzione prevista nei diversi siti è un notevole vantaggio. La successiva intuizione di incorporare i dati meteorologici ai modelli di predizione che utilizzano dati telerilevati ha mostrato un ulteriore miglioramento nell'accuratezza predittiva, ampliando le nostre capacità di gestire la produzione di miele. Tuttavia, anche se la caratterizzazione remota del suolo ha aperto la strada a nuove possibilità nel settore agro-alimentare, esistono ancora delle opportunità non percorse che ci consentirebbero di migliorare la nostra comprensione degli ecosistemi. Ciò che manca sono i dati ed un approccio che studi la dipendenza della produzione di miele dai vari fattori su scala più piccola, per favorire il lavoro non solo dell'apicoltore commerciale, ma pure di quello più piccolo.

Bibliografia

- Abou-Shaara, H. F. (2014). The foraging behaviour of honey bees, *Apis mellifera*: a review. *Veterinarni medicina*, 59(1).
- Abou-Shaara, H. F. (2019). Geographical information system for beekeeping development. *Journal of Apicultural Science*, 63(1), 5-16.
- Abou-Shaara, H. F., Al-Ghamdi, A. A., & Mohamed, A. A. (2013). A suitability map for keeping honey bees under harsh environmental conditions using Geographical Information System. *World Applied Sciences Journal*, 22(8), 1099-1105.
- Al-Ghamdi, A., Adgaba, N., Getachew, A., & Tadesse, Y. (2016). New approach for determination of an optimum honeybee colony's carrying capacity based on productivity and nectar secretion potential of bee forage species. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 23(1), 92-100.
- Ashley N. Mortensen, Daniel R. Schmehl e Jamie Ellis, European honey bee, in Entomology and Nematology Department, University of Florida, agosto 2013.
- Barati, S., Rayegani, B., Saati, M., Sharifi, A., & Nasri, M. (2011). Comparison the accuracies of different spectral indices for estimation of vegetation cover fraction in sparse vegetated areas. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 14(1), 49-56.
- Boschetti M., Bolzan L., Bresciani M., Giardino C., L'Astorina A., Lanari R., Manuta M., Mauri E., Zilioli E. (2001) – Telerilevamento. Ministero dell'istruzione, dell'università e della ricerca. Dipartimento per la programmazione il coordinamento e gli affari economici, servizio per lo sviluppo e il potenziamento delle attività di ricerca (SSPAR). Vol. 3
- Bovera, F. (2019). I prodotti dell'alveare. Gestione igienico sanitaria degli apiari a salvaguardia dell'ambiente e della biodiversità, 127-128.
- Burdock, G. A. (1998). Review of the biological properties and toxicity of bee propolis (propolis). *Food and Chemical toxicology*, 36(4), 347-363.
- Campbell, T. (2020). *Predicting And Mapping Of Honey Flow From Corymbia Calophylla Trees With Remote Sensing* (Doctoral dissertation, Curtin University).

- Campbell, T., & Fearn, P. (2018). Honey crop estimation from space: detection of large flowering events in Western Australian forests. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 42, 79-86.
- Campbell, T., Dixon, K. W., Dods, K., Fearn, P., & Handcock, R. (2020). Machine learning regression model for predicting honey harvests. *Agriculture*, 10(4), 118.
- Casa R., Pignatti S., Pascucci S., Castaldi F., Vincini M. (2016) – Il telerilevamento in agricoltura di precisione. Agricoltura di precisione, metodi e tecnologie per migliorare l'efficienza e la sostenibilità dei sistemi colturali, *Edagricole*.
- Catta M. (2004) Il miele e gli altri prodotti: caratteristiche e proprietà - in ATTI: verifiche igienico-sanitarie in apiario. *Istituto zooprofilattico sperimentale Regioni Lazio e Toscana*, pp. 41-45.
- Chuvieco, E. (2020). *Fundamentals of satellite remote sensing: An environmental approach*. CRC press. Cap. 1, 2, 3.
- Cillis D., Pezzuolo A., Sartori L. (2015), "La gestione precisa parte dallo studio della variabilità". *L'Informatore Agrario*, n. 27/2015, pp. 38-41.
- Contessi A. (2016): *Le api biologia, allevamento, prodotti*. Quarta edizione, 3-504, *Edagricole* - Edizioni Agricole di New Business Media srl.
- Decreto Legislativo 21 maggio 2004, n. 179 "Attuazione della direttiva 2001/110/CE concernente la produzione e la commercializzazione del miele" - *Gazzetta Ufficiale* del 20 luglio 2004, n. 168.
- Diacono M., Castrignano' A., Troccoli A., De Benedetto D., Basso B., Rubino P. (2012) – Spatial and temporal variability of wheat grain yield and quality in Mediterranean environment: a multivariate geostatistical approach. *Field Crops Research* 131, 49-62.
- Direttiva del Consiglio del 20 dicembre 2001, (2001/110/CE) concernente il miele, pubblicata sulla G.U.C.E. del 12 gennaio 2002.
- Estoque, R. C., & Murayama, Y. (2010). Suitability analysis for beekeeping sites in La Union, Philippines, using GIS and multi-criteria evaluation techniques. *Research Journal of Applied Sciences*, 5(3), 242-253.
- Evans, J. D., Wheeler, D. E. (1999) Differential gene expression between developing queens and workers in the honey bee, *Apis mellifera*. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 96, pp. 5575-5580.

- Evans, J. D., Wheeler, D. E. (2000) Expression profiles during the honeybee caste program. *Genome Biol.* 2, pp. 1-6.
- Evans, J. D., Wheeler, D. E. (2001) Gene expression and the evolution of insect polyphenisms. *BioEssays*, 23, pp. 63-68.
- Frediani D. (1991) Biologia e comportamenti sociali - in Corso di formazione in apicoltura destinato a tecnici regionali, U.T.A. e S.I.P.A. - Regione Abruzzo, pp. 61-76.
- Frediani D. (1994a) Gli insetti: generalità - in Temi di apicoltura moderna, Lucca 1994 - Corso di formazione professionale in apicoltura. Regione Toscana, pp. 23-25.
- Frediani D. (1994b) La società delle api - in Temi di apicoltura moderna, Lucca 1994 - Corso di formazione professionale in apicoltura. Regione Toscana, pp. 56-58.
- Galbraith, S. M., Vierling, L. A., & Bosque-Pérez, N. A. (2015). Remote sensing and ecosystem services: Current status and future opportunities for the study of bees and pollination-related services. *Current Forestry Reports*, 1, 261-274.
- Gomasasca M., Boschetti M., Brunori C.A., Colombo A., Colombo R., Meroni M. (2001). Telerilevamento (Remote-Sensing in Italian). *Fondazione Lombardia per l'Ambiente*, 12, 379-404.
- Gupta RK, Mostaghimi S, McClellan P., et al (1999) Modeling spatial variability of soil chemical parameters for site-specific farming using stochastic methods r. k. gupta. *Water, Air, Soil Pollut* 110 17–34.
- Huete A. (1988). A soil adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sens Environ*, 25, 295-300.
- Imam, E. (2019) Remote Sensing Platforms and Sensors. *University Grand Commission (UGC), MHRD, Govt of India*.
- Imam, R., Pini, M., Marucco, G., Dominici, F., & DAVIS, F. (2019). UAV-based GNSS-R for water detection as a support to flood monitoring operations: A feasibility study. *Applied Sciences*, 10(1), 210.
- Jordan, C. F. (1969). Derivation of leaf-area index from quality of light on the forest floor. *Ecology*, 50(4), 663-666.
- Kancheva, R. (2013). Remote sensing terminology: past experience and recent needs. In *Remote Sensing for Agriculture, Ecosystems, and Hydrology XV* (Vol. 8887, pp. 493-502). SPIE.

- Klein, A. M., Vaissière, B. E., Cane, J. H., Steffan-Dewenter, I., Cunningham, S. A., Kremen, C., & Tscharntke, T. (2007). Importance of pollinators in changing landscapes for world crops. *Proceedings of the royal society B: biological sciences*, 274(1608), 303-313.
- Kremen, C., Williams, N. M., Bugg, R. L., Fay, J. P., & Thorp, R. W. (2004). The area requirements of an ecosystem service: crop pollination by native bee communities in California. *Ecology letters*, 7(11), 1109-1119.
- Loh, W. Y. (2011). Classification and regression trees. *Wiley interdisciplinary reviews: data mining and knowledge discovery*, 1(1), 14-23.
- Matese, A., Toscano, P., Di Gennaro, S. F., Genesio, L., Vaccari, F. P., Primicerio, J., ... & Gioli, B. (2015). Intercomparison of UAV, aircraft and satellite remote sensing platforms for precision viticulture. *Remote Sensing*, 7(3), 2971-2990.
- Moritz, F.A.R., Southwick, E.E. (1992) Bees As Superorganisms. An Evolutionary Reality. *Sprinter Eds*, Berlin.
- Nagendra, H. (2001). Using remote sensing to assess biodiversity. *International journal of remote sensing*, 22(12), 2377-2400.
- Oliver M.A. (2013) – “An overview of precision agriculture”. In M.A. Oliver, T.F.A. Bishop, B.P. Marchant. Precision agriculture for sustainability and environmental protection, Routledge.
- Ollerton, J., Winfree, R., & Tarrant, S. (2011). How many flowering plants are pollinated by animals?. *Oikos*, 120(3), 321-326.
- Persano Oddo L. (2007) La flora apistica - in Conoscere il miele. Edizioni Avenue media. CRA Istituto Nazionale di Apicoltura, Bologna, pp. 39- 66.
- Pierce, F. J., & Nowak, P. (1999). Aspects of precision agriculture. *Advances in agronomy*, 67, 1-85.
- Pigozzi P., Apipuntura e apiterapia. La casa verde, Custoza (VR), 1996.
- Pinzauti M., Frediani D. (1998): Appunti di apicoltura. *Servizio Editoriale Universitario di Pisa*.
- Pistoia A. (2010): Apicoltura tecnica e pratica. *Edizioni L'Informatore Agrario*, 318.
- Priori S., De Benedetto D., Stellacci A.M., et al (2016). 6. Sensori e metodi per rilievi prossimali delle proprietà del suolo e della coltura. In *AGRICOLTURA DI PRECISIONE-Metodi e tecnologie per migliorare l'efficienza e la sostenibilità dei sistemi colturali* (pp. 129-153). Il Sole 24 Ore Edagricole srl.

- Ramos, J. M., & Carvalho, N. D. (2007). Estudo morfológico e biológico das fases de desenvolvimento de *Apis mellifera*. *Revista científica eletrônica de Engenharia Florestal*, 6(10), 1-21.
- Ricciardelli d'Albore G. (1994) La flora apistica italiana: attualità e prospettive - in Temi di apicoltura moderna, Lucca 1994 - Corso di formazione professionale in apicoltura. *Regione Toscana*, 105-11.
- Richardson, A. J., & Wiegand, C. L. (1977). Distinguishing vegetation from soil background information. *Photogrammetric engineering and remote sensing*, 43(12), 1541-1552.
- Rouse, J. W., Haas, R. H., Schell, J. A., & Deering, D. W. (1974). Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. *NASA Spec. Publ*, 351(1), 309.
- Rouse, J. W., Haas, R. H., Schell, J. A., & Deering, D. W. (1974). Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. *NASA Spec. Publ*, 351(1), 309.
- Ruttner F., (1988): Biogeography and taxonomy of honeybees. *Springer-Verlag*, Berlin.
- Sabatini A.G. (1995a) Il miele: origine, composizione e proprietà - in Conoscere il miele. Guida all'analisi sensoriale. Edizioni Avenue Media. *Istituto Nazionale di Apicoltura*, Bologna, 3-30.
- Sabatini A.G. (1995b) Valutazione del miele: a. Analisi - in Conoscere il miele. Guida all'analisi sensoriale. Edizioni Avenue Media. *Istituto Nazionale di Apicoltura*, Bologna, 117-131.
- Sabatini A.G. (2000) Il miele: origine, composizione e proprietà - in I mieli uniflorali italiani. Nuove schede di caratterizzazione. *Istituto Sperimentale per la Zoologia Agraria, Sezione di Apicoltura*. Roma, 3-9.
- Sabatini A.G. (2002) Il miele - in Apicoltura, il sapore di una storia. I prodotti dell'apicoltura, 9-30.
- Sabatini A.G. (2004) Criteri di qualità e valorizzazione del miele - in Concorso per la selezione dei migliori mieli di produzione mediterranea 2000/2003. *Regione Sicilia, Sortino*, 12-19.
- Sabatini A.G. (2007a) Il miele - in Conoscere il miele. Edizioni Avenue media. *CRA Istituto Nazionale di Apicoltura*, Bologna, 3-37.
- Sabatini A.G. (2007b) - Analisi del miele - in Conoscere il miele. Edizioni Avenue media. *CRA Istituto Nazionale di Apicoltura*, Bologna, 125- 172.

- Scarth P. (2009) Vegetation height and structure - derived from ALOS-1 PALSAR, Landsat and ICESat/GLAS, Australia coverage. Brisbane, Australia.
- Singhal, G., Bansod, B., & Mathew, L. (2018). Unmanned aerial vehicle classification, applications and challenges: A review.
- Tautz, J., Kleinhenz, M., Bujok, B., Bock, F., & Fuchs, S. (2004). La climatizzazione dell'ambiente: un capolavoro dell'ape. *APOidea*, 1, 55-59.
- Turner, W., Spector, S., Gardiner, N., Fladeland, M., Sterling, E., & Steininger, M. (2003). Remote sensing for biodiversity science and conservation. *Trends in ecology & evolution*, 18(6), 306-314.
- Vangelisti M., Piana L. (1995) Miele di qualità: tecniche di produzione e di lavorazione - in Conoscere il miele. Guida all'analisi sensoriale. Edizioni Avenue Media. *Istituto Nazionale di Apicoltura, Bologna*, 65-105.
- Viña, A., Gitelson, A. A., Nguy-Robertson, A. L., & Peng, Y. (2011). Comparison of different vegetation indices for the remote assessment of green leaf area index of crops. *Remote sensing of environment*, 115(12), 3468-3478.
- Willcox, B. K., Robson, A. J., Howlett, B. G., & Rader, R. (2018). Toward an integrated approach to crop production and pollination ecology through the application of remote sensing. *PeerJ*, 6, e5806.
- Winfrey, R. (2013). Global change, biodiversity, and ecosystem services: What can we learn from studies of pollination?. *Basic and applied ecology*, 14(6), 453-460.
- Zappi Recordati A. (1976) Apicoltura. *Ramo editoriale degli agricoltori*. Roma.
- Zhang N., Wang M., Wang N. (2002) - "Precision agriculture- a worldwide overview". *Computers and Electronics in Agriculture*, 36(2-3), 113-132.

