

Università Politecnica delle Marche

Facoltà di Ingegneria

Dipartimento di Ingegneria dell'Informazione

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Informatica e dell'Automazione



Tesi di Laurea

**Estrazione di informazioni dai dati di parametri chimico-fisici
di un terreno e dalle corrispondenti immagini satellitari**

**Information extraction from the data of chemical and physical
parameters of a soil and the corresponding satellite imagery**

Relatore

Prof. Domenico Ursino

Candidato

Lorenzo Abbadini

Correlatore

Dott. Marco Ferrante

Anno Accademico 2020-2021

Indice

Introduzione	11
1 Analisi chimico-fisica in real-time del suolo: concetti preliminari	13
1.1 Il suolo in agricoltura	13
1.1.1 La fertilità del suolo	13
1.1.2 Le proprietà del suolo	14
1.2 Analisi delle proprietà del suolo	20
1.2.1 Analisi chimico-fisica	21
1.2.2 Sensoristica per l'agricoltura	25
1.3 La sensoristica di Trace Technologies	28
2 Earth observation attraverso l'uso di dati satellitari: concetti preliminari	31
2.1 Premessa	31
2.2 L'energia elettromagnetica	31
2.2.1 Lo spettro elettromagnetico	32
2.2.2 Le interazioni con l'atmosfera e la superficie terrestre	34
2.3 Remote sensing satellitare	36
2.3.1 Classificazione della sensoristica	36
2.3.2 Caratteristiche dei dati satellitari	38
2.3.3 Esempi di applicazione	39
2.4 Le risorse satellitari di Trace Technologies	41
3 Contesto di riferimento e organizzazione dei dati	43
3.1 Caso di studio	43
3.2 Costruzione del dataset	44
3.2.1 Acquisizione dei dati	44
3.2.2 Organizzazione dei dati in Python	46
4 Analisi spaziale	51
4.1 Considerazioni preliminari	51
4.2 Costellazione open (Sentinel-2)	52
4.3 Costellazione commerciale (PlanetScope)	58

4	Indice	
5	Analisi temporale	63
5.1	Considerazioni preliminari	63
5.2	Preprocessing dei dati	63
5.3	Analisi dei risultati	66
6	Conclusioni	71

Appendici

A	Gli indici spettrali	73
A.1	Considerazioni di carattere generale	73
A.2	Gli indici di vegetazione	73
A.3	Gli indici del suolo	76
	Riferimenti bibliografici	79

Elenco delle figure

1.1	Triangoli utilizzati per la definizione delle classi tessiturali	14
1.2	Antagonismi e sinergie dei principali elementi nutritivi	17
1.3	Schemi di funzionamento dei sensori resistivi e dielettrici.	27
1.4	Trace Technologies: stazione IoT e sensori componenti	28
1.5	Trace Technologies: strumento portatile	29
2.1	Vettori di campo elettrico (E) e magnetico (M) di un'onda EM	32
2.2	Relazione tra lunghezza d'onda e frequenza	32
2.3	Lo spettro elettromagnetico.	33
2.4	La trasmissione atmosferica.	34
2.5	Tipologie di riflessione	35
2.6	Curva di riflettanza ideale della vegetazione sana	35
2.7	Sensori passivi e sensori attivi	36
2.8	Schema di memorizzazione dei dati satellitari	38
2.9	Incendio del 01/08/2021 alla Pineta D'Annunziana di Pescara.	40
3.1	Punti di campionamento e relativo percorso di acquisizione	44
3.2	Organizzazione del dataset in Python: flusso di lavoro	46
4.1	Rappresentazione della matrice di correlazione media di Tabella 4.9	59
5.1	Azoto (N) e indice NDVI per il punto 3 (Sentinel-2)	66
5.2	Azoto (N) e indice NDVI per il punto 34 (Sentinel-2)	66
5.3	Indice NDVI e indice DSWI per il punto 14 (Sentinel-2)	67
5.4	Indice NDVI e indice DSWI per il punto 34 (Sentinel-2)	68
5.5	Indice NDVI e indice MSI per il punto 3 (Sentinel-2).	69
5.6	Indice NDVI e indice MSI per il punto 34 (Sentinel-2).	69
5.7	Azoto (N) e indice NDVI per il punto 8 (PlanetScope)	70
5.8	Azoto (N) e indice NDVI per il punto 35 (PlanetScope)	70

Elenco delle tabelle

1.1	Classi tessiturali principali e relative caratteristiche	15
1.2	Classificazione degli elementi essenziali	16
1.3	Classificazione del terreno in base al pH	22
1.4	Sensibilità delle colture alla salinità espressa come diminuzione della percentuale di crescita al variare della ECe	22
1.5	Coefficienti moltiplicativi per la conversione da EC ad ECe	23
1.6	Classificazione dell'azoto totale	23
1.7	Classificazione dell'azoto disponibile	23
1.8	Classificazione del fosforo assimilabile per i metodi Olsen e Bray-Kurtz	24
1.9	Classificazione del potassio scambiabile in base alla tessitura del suolo	25
1.10	Principali tipologie di sensori dielettrici	27
2.1	Classificazione della principale sensoristica satellitare	37
2.2	Trace Technologies: dati satellitari accessibili tramite Sentinel Hub	41
2.3	Sentinel-2: bande utilizzabili	42
2.4	PlanetScope: bande utilizzabili	42
4.1	Precipitazioni rilevate nel periodo di riferimento	52
4.2	Copertura vegetativa e manutenzione rilevate nel periodo di riferimento	52
4.3	Correlazione media (in grassetto) e deviazione standard: parametri del suolo e bande Sentinel-2 (prima parte)	54
4.4	Correlazione media (in grassetto) e deviazione standard: parametri del suolo e bande Sentinel-2 (seconda parte)	55
4.5	Correlazione media (in grassetto) e deviazione standard: parametri del suolo e indici elencati in Tabella A.1 (Sentinel-2)	56
4.6	Correlazione media (in grassetto) e deviazione standard: parametri del suolo e indici elencati in Tabella A.2 (Sentinel-2)	57
4.7	Correlazione media (in grassetto) e deviazione standard: parametri del suolo e indici elencati in Tabella A.3 (Sentinel-2)	57
4.8	Correlazione media (in grassetto) e deviazione standard: parametri del suolo e indici elencati in Tabella A.4 (Sentinel-2)	58

4.9	Correlazione media (in grassetto) e deviazione standard: parametri del suolo e indici elencati in Tabella A.1 (PlanetScope)	59
4.10	Correlazione media (in grassetto) e deviazione standard: parametri del suolo e indici elencati in Tabella A.1 (PlanetScope)	60
4.11	Correlazione media (in grassetto) e deviazione standard: parametri del suolo e indici elencati in Tabella A.2 (PlanetScope)	60
4.12	Correlazione media (in grassetto) e deviazione standard: parametri del suolo e indici elencati in Tabella A.3 (PlanetScope)	61
4.13	Correlazione media (in grassetto) e deviazione standard: parametri del suolo e indici elencati in Tabella A.4 (PlanetScope)	61
5.1	Punti di campionamento selezionati per l'analisi temporale	65
A.1	Indici di vegetazione: NDVI e principali varianti	74
A.2	Indici di vegetazione: miglioramento delle prestazioni del NDVI	75
A.3	Indici di vegetazione: monitoraggio di condizioni specifiche	76
A.4	Indici del suolo: salinità, mineralogia e altre condizioni specifiche	77

Elenco dei listati

3.1	Configurazione dell'account SH da linea di comando	44
3.2	Configurazione dell'account SH in Python	45
3.3	Definizione del bounding box per l'area di interesse	45
3.4	Codice <i>evalscript</i> utilizzato nelle richieste Sentinel-2	45
3.5	Esempio di richiesta Sentinel-2	46
3.6	Creazione di una lista di <code>pandas.DataFrame</code> a partire da file <code>.CSV</code>	47
3.7	Componente satellitare del dataset: operazioni preliminari	47
3.8	Creazione di una lista di <code>pandas.DataFrame</code> a partire da file <code>.TIFF</code>	48
3.9	Creazione di un <code>numpy.array</code> 3D da una lista di <code>pandas.DataFrame</code>	48
3.10	Creazione del <code>DataArray</code> satellitare Sentinel-2	49
3.11	<code>XArray</code> : esempio di selezione dati tramite etichette	49
4.1	Calcolo della matrice di correlazione relativa a un <code>pandas.DataFrame</code>	53
4.2	Media e deviazione standard delle diverse matrici di correlazione	53
4.3	<code>DataArray</code> di partenza nel caso della costellazione PlanetScope	58
5.1	Calcolo delle diverse medie di campo per ciascun giorno di misurazioni	64
5.2	Operazioni preliminari al calcolo delle differenze del Listato 5.3	64
5.3	Calcolo delle differenze rispetto alle diverse medie di campo	64
5.4	Calcolo della media delle differenze nel periodo di riferimento	64
5.5	Clustering dei punti di campionamento	65
5.6	Esempio di normalizzazione dei valori di un <code>pandas.DataFrame</code>	65

Introduzione

Con il termine *agricoltura di precisione* (*precision farming*) si fa riferimento a “una strategia di management che utilizza la tecnologia dell’informazione per acquisire dati provenienti da più fonti al fine di supportare il processo decisionale associato alla produzione delle colture” [1]. La tecnologia satellitare, ad esempio, consente di ricavare informazioni sullo stato di salute delle colture che possono essere utilizzate per efficientare le comuni pratiche agronomiche (concimazione, irrigamento, etc.).

In questa sede viene presentata un’analisi esplorativa eseguita su dati puntuali (*in situ*) relativi ai parametri chimico-fisici del suolo e su dati satellitari provenienti da costellazioni con risoluzioni differenti (Sentinel-2 e PlanetScope). L’acquisizione dei dati è stata eseguita lungo l’intero ciclo produttivo di un vigneto di Pecorino.

La dissertazione si compone di sette capitoli, suddivisi come di seguito indicato.

- Il Capitolo 1 descrive brevemente il concetto di suolo, le sue caratteristiche principali e gli *elementi essenziali* (macroelementi e microelementi) in esso contenuti, ponendo l’attenzione, anche, sugli strumenti e sulle metodologie di analisi comunemente utilizzate per rilevarli.
- Il Capitolo 2 introduce il concetto di *remote sensing satellitare*, presentando la sensoristica montata a bordo dei satelliti in orbita e le principali caratteristiche dei dati satellitari acquisiti tramite essa.
- Il Capitolo 3 presenta il caso di studio specifico, evidenziando l’aspetto di novità del presente elaborato rispetto ai casi di studio comunemente presentati nella letteratura di settore. Inoltre, esso descrive brevemente la fase di acquisizione dei dati (dati del suolo e dati satellitari), e la relativa fase di organizzazione dell’intero dataset in ambiente Python.
- Il Capitolo 4 è dedicato interamente all’*analisi spaziale* e ai relativi risultati.
- Il Capitolo 5 è dedicato interamente all’*analisi temporale* e ai relativi risultati.
- Il Capitolo 6 riporta le considerazioni finali e indica alcuni punti di partenza per possibili sviluppi futuri.
- L’Appendice A, invece, introduce il concetto di *indice satellitare* e descrive più in dettaglio gli indici utilizzati nell’analisi di cui ai Capitoli 4 e 5.

Analisi chimico-fisica in real-time del suolo: concetti preliminari

Il presente capitolo fornisce una breve panoramica sulle principali proprietà del suolo e sulle tecniche di analisi e la sensoristica comunemente utilizzate per rilevarle.

1.1 Il suolo in agricoltura

1.1.1 La fertilità del suolo

Secondo la definizione proposta dalla *Soil Science Society of America* [2], il suolo è “un corpo naturale tridimensionale localizzato sulla superficie terrestre, capace di sostenere la vita delle piante e caratterizzato da proprietà risultanti dagli effetti del clima e della materia in esso vivente”. Altre definizioni sottolineano come il suolo sia “uno strato costituito da materiale minerale e/o organico non consolidato” [3, 4] e presenti, tra le altre cose, “minerali, gas, acqua, microrganismi, radici, animali, rocce, artefatti, etc.” [5]. In generale, tralasciando la specifica prospettiva di analisi adottata, le numerose definizioni proposte nel corso degli anni [6] si trovano concordi sul fatto che una delle principali funzioni del suolo (forse **la** principale), sia quella di sostenere la crescita vegetale. In un certo senso, si può dire che suolo e vegetazione sono in *rapporto simbiotico*: da una parte lo stato di salute delle piante dipende direttamente dalla capacità del suolo di fornire acqua e nutrienti alle radici, dall'altra le piante preservano il suolo dall'erosione (idrica ed eolica), ne migliorano la struttura (per mezzo dei loro apparati radicali) e vi conferiscono materia organica ricca di nutrienti. Affinché tale relazione sia sostenibile, il suolo deve possedere alcune caratteristiche che permettano ad esso di svolgere determinate funzioni nel rapporto con la pianta: in questi casi si parla di *suolo fertile*.

Anche per il concetto di fertilità del suolo sono state avanzate diverse definizioni, dalla più tecnica “capacità del suolo di fornire i nutrienti essenziali alla crescita della pianta” [3] alla più economica “attitudine del suolo (usato per fini agronomici) a consentire abbondante produzione vegetale” [7].

La fertilità del suolo rimane tale quando il rilascio dei nutrienti viene compensato in maniera adeguata dall'apporto degli stessi (tramite materiali organici o fertilizzanti chimici); inutile dire che qualora il rilascio dovesse essere superiore all'apporto, la fertilità stessa del suolo diminuirebbe nel tempo.

Come rilevato anche da AGQ Labs, importante laboratorio a livello mondiale, la fertilità del suolo è influenzata da fattori biologici, chimici e fisici [8]. In particolare:

- *Fattori biologici*: la materia organica è la principale fonte di energia della microflora del terreno e interviene nella produzione di enzimi, nel ciclo del carbonio, nel ciclo dell'azoto, nella trasformazione biologica dei nutrienti, così come nei processi di umificazione¹ e nitrificazione².
- *Fattori chimici*: il fattore principale è la disponibilità dei nutrienti presenti nel suolo; in particolare, si deve sempre tenere conto della totalità degli elementi essenziali (sia macroelementi sia microelementi) considerando, per ciascuno di essi, la forma e la disponibilità di assimilazione.
- *Fattori fisici*: tra questi possiamo annoverare la tessitura (che influenza direttamente la disponibilità di acqua e nutrienti), la struttura (che viene mantenuta e migliorata con l'apporto di materia organica) e la porosità (che determina il rapporto tra aria e acqua contenute nel suolo).

1.1.2 Le proprietà del suolo

La *tessitura* è “la caratteristica fisica che identifica il suolo in base alle proporzioni relative delle particelle solide che lo compongono” [3]. La conoscenza della tessitura fornisce indicazioni sulle caratteristiche chimico-fisiche e meccaniche del suolo, come, ad esempio, la capacità di aereazione e di ritenzione idrica (legate, rispettivamente, alla macro e microporosità del suolo). In particolare, conoscendo la composizione percentuale di sabbia, limo e argilla, è possibile associare il suolo ad una classe di tessitura utilizzando triangoli diversi a seconda del metodo di classificazione adottato: due possibili metodi sono quello della *Italian Society for Soil Science* (SISS), con limite tra limo e sabbia pari a 20 micron, e quello della *U.S. Department of Agriculture* (USDA), con limite tra limo e sabbia pari a 50 micron (Figura 1.1) [9].

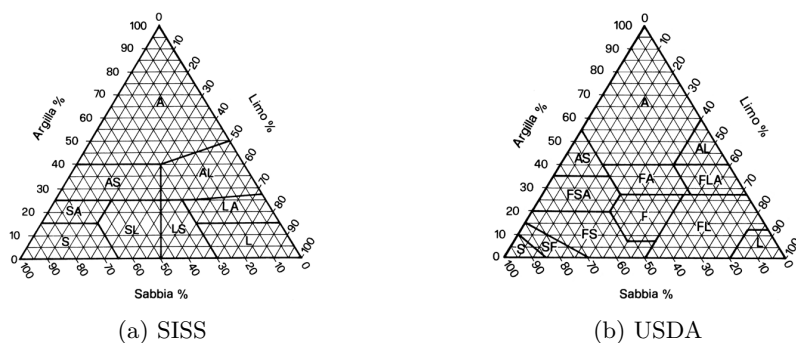


Figura 1.1: Triangoli utilizzati per la definizione delle classi tessiturali

¹ *Umificazione*: insieme dei processi chimici svolti da organismi saprobi (in particolare batteri e funghi) per i quali le sostanze organiche provenienti dagli organismi sono trasformate in altre sostanze organiche o inorganiche costituenti l'humus.

² *Nitrificazione*: processo biologico per il quale i composti ammoniacali del terreno e delle acque, derivanti dalla decomposizione di organismi e dalle loro secrezioni, sono ossidati in acido nitroso (nitrosazione) e, poi, in acido nitrico (nitrosazione).

La Tabella 1.1 riassume le caratteristiche salienti dei suoli appartenenti alle principali classi di tessitura [9].

Terreni argillosi	Sono caratterizzati da una elevata capacità di ritenzione idrica e da una scarsa mobilità (indotta dall'argilla) che, se da un lato limita le perdite di elementi nutritivi, dall'altro riduce la presenza di nutrienti nella soluzione circolante del terreno a disposizione delle colture.
Terreni limosi	Sono spesso mal strutturati e facili al ristagno (si traduce in notevole zollosità e facilità alla formazione di una crosta in superficie), e presentano una scarsa mobilità degli elementi.
Terreni sabbiosi	Sono caratterizzati da notevoli capacità di aereazione e permeabilità e da una elevata mobilità dei nutrienti (con consistenti rilasci di nutrienti in tempi brevi e non coincidenti con le esigenze colturali delle piante).
Terreni di medio impasto (o terreni franchi)	Presentano caratteristiche intermedie che danno luogo alle migliori condizioni per lo sviluppo delle colture

Tabella 1.1: Classi tessiturali principali e relative caratteristiche

Gli elementi nutritivi possono essere classificati sulla base dell'essenzialità, dei quantitativi assorbiti e delle funzioni svolte. Secondo il primo criterio i nutrienti vengono distinti in *elementi essenziali* ed *elementi non essenziali*. Come indicato nel *Glossary of Soil Science Terms* [3], si dicono essenziali “gli elementi richiesti da una pianta per completare il proprio normale ciclo di vita; esse includono carbonio (C), idrogeno (H), ossigeno (O), azoto (N), fosforo (P), potassio (K), zolfo (S), calcio (Ca), ferro (Fe), magnesio (Mg), manganese (Mn), rame (Cu), boro (B), zinco (Zn), cloro (Cl), cobalto (Co), molibdeno (Mo) e sodio (Na)”. Spesso carbonio, idrogeno e ossigeno non vengono considerati veri e propri elementi nutritivi, per via dei diversi processi di assunzione in cui sono coinvolti. Infatti, come evidenziato anche in *Chimica del Suolo* [10], la nutrizione delle piante può essere distinta come segue.

- *Nutrizione carbonica*: consiste nell'approvvigionamento di anidride carbonica e ossigeno attraverso gli scambi gassosi che avvengono per via stomatica.
- *Nutrizione idrica*: consiste nell'approvvigionamento di idrogeno e ossigeno attraverso le radici e, in maniera minore, attraverso gli stomi e le lenticelle (apparato presente sulla superficie di fusti, rami, radici e piccioli, che conferisce discontinuità rispetto al sughero impermeabile).
- *Nutrizione minerale*: consiste nell'approvvigionamento dei restanti nutrienti (disponibili sotto forma di sali minerali disciolti nell'acqua) attraverso l'assorbimento radicale.

Generalmente, quando si parla di nutrizione delle piante, si tende a considerare la sola nutrizione minerale, senza perciò tenere conto dell'assunzione di carbonio, idrogeno e ossigeno. Questo viene in parte giustificato dal fatto che tali elementi costituiscono la quasi totalità dell'organismo vegetale (94-99.5%), motivo per il quale vengono, spesso, chiamati *elementi strutturali*.

Gli elementi essenziali vengono distinti in *macroelementi* e *microelementi*, a seconda dei quantitativi riscontrati all'interno della pianta: i macroelementi sono presenti in misura superiore allo 0.1% sulla sostanza secca; viceversa, i microelementi sono presenti in misura inferiore allo 0.1% sulla sostanza secca [3]. Ciò non vuol dire che i microelementi sono meno importanti dei macroelementi, in quanto la loro assenza o scarsità può portare ad affezioni più o meno gravi della pianta.

I macroelementi sono ulteriormente distinti in *elementi primari* (o, semplicemente, macroelementi) ed *elementi secondari* (o mesoelementi), a seconda della risposta della pianta all'apporto specifico degli stessi attraverso la concimazione. In generale, le piante rispondono molto bene alla somministrazione degli elementi principali, poiché sono richiesti in grandi quantità, ma sono presenti nel suolo soltanto in quantità limitate. Viceversa, la risposta alla somministrazione di elementi secondari è, solitamente, assente poiché, seppur indispensabili e richiesti in grande quantità, sono presenti nel suolo in quantità sufficienti. Come indicato esplicitamente nel *Glossary of Soil Science Terms* [3], gli elementi primari sono azoto (N), fosforo (P) e potassio (K), mentre gli elementi secondari sono calcio (Ca), magnesio (Mg) e zolfo (S). La Tabella 1.2 sintetizza le classificazioni appena descritte.

MACROELEMENTI (>0.1%)		MICROELEMENTI (<0.1%)
STRUTTURALI	C	Fe
	H	Mn
	O	Cu
PRIMARI	N	B
	P	Zn
	K	Cl
SECONDARI	Ca	Co
	Mg	Mo
	S	Na

Tabella 1.2: Classificazione degli elementi essenziali

Si deve assolutamente tenere presente che solo una piccola percentuale dei nutrienti presenti nel suolo si trova nello stato in cui possono essere assimilati da una pianta (si parla di *elementi solubili*); il resto degli elementi si trova sotto forma di materiale organico, composti inorganici e minerali, e costituisce una “riserva nutritiva” che verrà lentamente resa disponibile per mineralizzazione³ o meteorizzazione⁴.

³ *Mineralizzazione*: il processo di biodegradazione completa di una sostanza organica, cioè la sua demolizione molecolare ad opera di microrganismi fino alla totale trasformazione in composti inorganici semplici (anidride carbonica, acqua, solfati, etc.).

⁴ *Meteorizzazione*: il processo di alterazione delle rocce e dei minerali che affiorano sulla superficie terrestre, attraverso il contatto diretto o indiretto con gli agenti atmosferici.

L'assorbimento degli elementi nutritivi può essere influenzato da fattori relazionati con il terreno, con la pianta e con le condizioni climatiche [8].

Alcuni dei fattori relazionati con il terreno sono i seguenti:

- *Tessitura del suolo*: una tessitura fine favorisce la possibilità di contatto con l'apparato radicale e facilita la liberazione degli elementi nutritivi presenti nel terreno.
- *Percentuale di ossigeno del suolo*: l'assenza di ossigeno impedisce l'assorbimento.
- *pH del suolo*: il pH condiziona la solubilità dei diversi elementi nutritivi determinando il loro accumulo in forme più o meno disponibili per le piante o la loro lisciviazione⁵ verso gli strati più profondi del terreno stesso.
- *Antagonismi e sinergie tra gli elementi nutritivi del suolo*: gli elementi nutritivi possono ostacolarsi a vicenda se le proporzioni tra le varie sostanze non sono corrette e, al contrario, possono stimolarsi a vicenda nell'assorbimento se le proporzioni sono corrette.

La Figura 1.2 riporta gli antagonismi e le sinergie esistenti tra i principali elementi nutritivi.

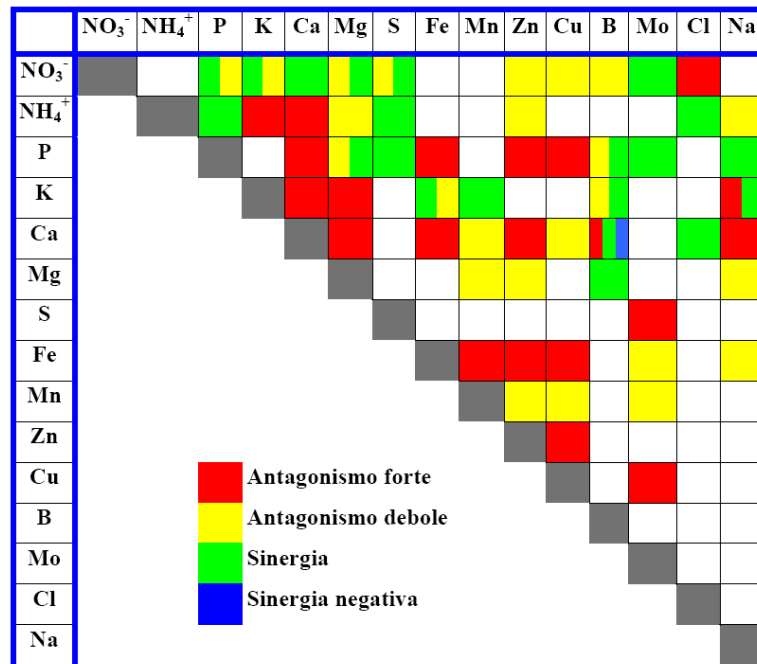


Figura 1.2: Antagonismi e sinergie dei principali elementi nutritivi

⁵ *Lisciviazione*: nel senso più ampio del termine, il processo attraverso il quale gli elementi solubili del suolo, per effetto della percolazione delle acque, vengono trasportati negli strati più profondi.

Alcuni dei fattori relazionati con la pianta sono i seguenti:

- *Natura della pianta*: ciascuna pianta presenta una nutrizione minerale caratteristica, che si traduce in un diverso assorbimento degli elementi nutritivi presenti nel suolo.
- *Stato fenologico*⁶: le piante giovani presentano un assorbimento più veloce rispetto a quelle con uno sviluppo vegetativo più ampio.

Alcuni dei fattori relazionati con le condizioni climatiche sono i seguenti:

- *Temperatura*: all'interno dei limiti fisiologici (0-35 °C), un aumento della temperatura si traduce in un maggior assorbimento degli elementi nutritivi.
- *Umidità*: generalmente, un aumento dell'umidità comporta un aumento dell'assorbimento degli elementi nutritivi.
- *Luce*: determinando una maggiore riserva di carbonio e, quindi, aumentando la traspirazione, un aumento della luce comporta un effetto indiretto sull'assorbimento degli elementi nutritivi.

A questo punto, prima di trattare in dettaglio i macroelementi principali (azoto, fosforo e potassio), viene fornita una definizione formale per i concetti di *pH* e di *conducibilità elettrica*.

Il *pH* del suolo è una misura della concentrazione di idrogenioni (H⁺) nella soluzione circolante (fase liquida che si trova negli spazi liberi lasciati dalle parti solide); poiché questa soluzione interagisce continuamente con le superfici solide del terreno (dette *superfici di scambio* proprio per la presenza di queste interazioni), il pH del terreno dipende soprattutto dalla natura chimica di queste superfici, e in particolare dal numero di siti di scambio (cariche superficiali positive o negative) presenti nel terreno e dal loro grado di saturazione [9]. Come detto, la conoscenza del pH fornisce importanti indicazioni sulla solubilità degli elementi nutritivi, ma l'importanza di questa proprietà è legata anche alla notevole influenza che esso ha sull'attività microbiologica e sull'adattabilità delle diverse specie vegetali [9].

La *conducibilità elettrica* del suolo è una misura del suo contenuto in sali solubili (*salinità*); questi sono indispensabili per la corretta nutrizione delle piante, ma la loro concentrazione deve rimanere entro certi limiti di sicurezza: infatti, una salinità eccessiva può provocare squilibri nutrizionali, effetti di tossicità per le piante, danni alla struttura del terreno e, in casi estremi, modifiche del pH [9]. Una elevata concentrazione salina può essere dovuta alla presenza di falde o acque di irrigazione ricche di sali, ad una naturale dotazione del terreno o all'abuso di fertilizzanti (soprattutto in colture protette in cui viene a mancare l'azione dilavante delle piogge). Le tecniche agronomiche più idonee per ridurre un'eccessiva salinità vanno dalla corretta concimazione (soprattutto in terreni poco lisciviati), alle irrigazioni, all'apporto di sostanza organica e, in casi particolari, alla distribuzione di gesso [9].

⁶ *Stato fenologico*: stadio specifico del ciclo vitale di un organismo vivente identificato da uno status morfologico, fisiologico, funzionale e comportamentale indotto dalla mutazione stagionale delle condizioni climatiche.

Come anticipato, di seguito vengono analizzati in maniera approfondita i macroelementi principali e, per ciascuno di essi, viene fornita una descrizione dettagliata (comprensiva delle conseguenze causate da una carenza/eccesso del suddetto elemento nutritivo). La seguente trattazione costituisce la sintesi (non esaustiva) delle informazioni contenute in “Chimica e fertilità del suolo” di Pietro Violante [7] e delle indicazioni fornite in “L’interpretazione delle analisi del terreno” dall’*Agenzia Regionale per la Prevenzione e Protezione Ambientale del Veneto* (ARPAV) [9].

L’**azoto** (N) è un elemento essenziale per tutti gli esseri viventi, non solo per le piante (basti pensare che i composti di cui fa parte, come le proteine, hanno un’importanza fondamentale per la vita). L’azoto costituisce circa il 2% di una pianta (in peso secco) e le sue maggiori concentrazioni vengono riscontrate nei tessuti giovani della stessa. All’interno della pianta può essere trovato sia in forma organica (principalmente proteine) sia in forma inorganica (composti ammoniacali, nitrati e nitriti), anche se in quantità basse. Viceversa, la quasi totalità dell’azoto presente nel terreno si trova in forma organica, mentre il rimanente si trova in *forma ammoniacale* e in *forma nitrica*. In condizioni normali le piante utilizzano prevalentemente l’azoto inorganico, soprattutto quello in forma nitrica. Tuttavia, nei terreni acidi (in cui il processo di nitrificazione risulta inibito), le piante si adattano ad assimilare anche l’azoto in forma ammoniacale (NH_4^+). Si noti che la forma ammoniacale riduce l’assorbimento di calcio, potassio e magnesio (in effetti, la Figura 1.2 evidenzia un antagonismo tra questi elementi). Continuando il confronto tra le due forme di azoto inorganico, la forma nitrica viene assorbita molto velocemente dalle piante, ma presenta il grave difetto di essere facilmente dilavabile (viene portato negli strati più profondi del terreno, diventando inutilizzabile e inquinando la falda acquifera); invece, la forma ammoniacale presenta un rilascio più graduale del nutriente (dato che per essere trasformato nella forma nitrica richiede un processo di nitrificazione), il che si traduce in un migliore utilizzo, con minori perdite. Conseguentemente, i fertilizzanti nitrici sono indicati per bisogni immediati, mentre quelli ammoniacali sono consigliati per bisogni diluiti nel tempo (ad esempio, la semina). La *carezza* di azoto provoca crescita vegetativa lenta e stentata, clorosi fogliare (foglie di colore verde-giallastro) e scarsa produzione; essendo un elemento molto mobile all’interno della pianta, la carezza di azoto si manifesta prima nelle foglie più vecchie, in quanto avviene un richiamo da parte delle componenti più giovani della pianta (che presentano una maggiore richiesta di materia azotata). Al contrario, un *eccesso* di azoto induce uno squilibrio nel ciclo biologico della pianta, con una conseguente scarsa lignificazione dei tessuti, un eccessivo rigoglio vegetativo (con maggiori consumi idrici) e una complessiva predisposizione alle avversità (soprattutto di tipo parassitario).

Seppur contenuto nelle piante in quantità molto minori rispetto all’azoto, al potassio e al calcio, da sempre il **fosforo** (P) viene considerato un elemento fondamentale per il mantenimento di un buon livello di fertilità; questo può essere spiegato per via della sua scarsa mobilità nel terreno e dei fenomeni di insolubilizzazione cui è facilmente soggetto nei terreni non neutri. Infatti, il fosforo viene fortemente influenzato dal pH del terreno: a pH inferiori a 6 prevale la formazione di fosfati di ferro ed alluminio, insolubili e stabili; a pH superiori a 7 prevalgono i

fosfati di calcio, altrettanto insolubili e stabili. La funzione principale del fosforo è quella di favorire lo sviluppo dell'apparato radicale, così come la sua ramificazione orizzontale (branching) e, in generale, il processo di maturazione; infatti, non a caso, il fabbisogno di fosforo è massimo nelle piante più giovani, soprattutto al momento della costituzione del seme o degli organi di riserva (radici, tuberi, etc.). Inoltre, il fosforo interviene in tutti i processi fondamentali del metabolismo e costituisce una parte essenziale di numerosi composti indispensabili per la pianta. La *carenza* di fosforo si manifesta principalmente con una crescita stentata della parte vegetativa, sia nella parte aerea sia nella parte radicale. L'*eccesso* di fosforo, solitamente molto raro da riscontrare, induce la pianta a una clorosi ferrica e a una carenza di zinco.

Il **potassio** (K) è un elemento che viene assorbito con facilità e in grande quantità dalla pianta; tuttavia, il suo assorbimento può essere limitato dalla presenza di altri cationi⁷, come, ad esempio, il calcio. Anche se le maggiori concentrazioni vengono riscontrate nei tessuti più giovani, il potassio si trova sotto forma di ione in tutti gli organi della pianta; questo testimonia una buona mobilità dell'elemento all'interno della pianta stessa, anche conseguenza del fatto che rimane libero nei succhi cellulari sotto forma di sale organico (ossalato, tartrato), sale minerale (fosfato, nitrato) e altre forme più complesse. Viceversa, il potassio presenta una scarsa mobilità nel terreno, all'interno del quale è presente sotto forma di ione K^+ incorporato nella sostanza organica e, soprattutto, nella frazione minerale. Il potassio minerale è presente in varie forme, non tutte disponibili per le piante: potassio reticolare (non utilizzabile), potassio fissato (generalmente non utilizzabile), potassio scambiabile (alcune piante riescono ad utilizzarlo) e potassio solubile (utilizzabile). Ogni suolo è dotato di un "*potere tampone*" rispetto al potassio, ovvero la capacità di ricostituire la forma solubile a partire da quella scambiabile e, parallelamente, la capacità di trasformare la forma solubile in scambiabile in seguito all'apporto di concime potassico. Adeguate dosi di potassio facilitano l'assorbimento dell'acqua, aumentano la resistenza alle basse temperature e alle avversità di tipo parassitario, e favoriscono la sintesi proteica. La *carenza* di potassio si manifesta con un ritardo nella crescita della pianta, soprattutto per quanto riguarda organi di riserva che richiedono zuccheri per la loro formazione (semi, frutti, tuberi, etc.), e con una minore resistenza alle basse temperature e agli attacchi parassitari. Un *eccesso* di potassio è solitamente molto raro da riscontrare ma, se presente, è sinonimo di una importante carenza dei suoi elementi antagonisti, tra i quali compaiono azoto (N), magnesio (Mg), calcio (Ca) e ferro (Fe).

1.2 Analisi delle proprietà del suolo

L'analisi del terreno rappresenta il principale strumento per conoscere le caratteristiche fondamentali del suolo e per promuovere un conseguente impiego razionale dei fertilizzanti. In questa sezione viene fornita una panoramica delle tecniche utilizzate nelle classiche analisi chimico-fisiche di laboratorio e delle tecniche innovative messe a disposizione dall'utilizzo della sensoristica di ultima generazione.

⁷ *Catione*: ione dotato di carica positiva.

1.2.1 Analisi chimico-fisica

Quanto riportato di seguito costituisce la sintesi (non esaustiva) delle informazioni presentate in “L’interpretazione delle analisi del terreno” edito da ARPAV [9] e nell’omonima conferenza del Dottore Agronomo Fiorenzo Pandini del 2018 [11].

L’analisi chimico-fisica può essere eseguita in maniera accurata soltanto se il campione consegnato in laboratorio è rappresentativo di tutto il terreno di cui si vogliono conoscere le caratteristiche: questo significa che il campionamento è la fase più delicata di tutto il processo analitico.

La rappresentatività del campione è fortemente influenzata dai seguenti fattori.

- *Scelta dell’area da campionare*: l’area da cui prelevare il campione deve avere una superficie limitata (meno di 2 ettari) e deve essere soggetta alle medesime pratiche agronomiche del terreno che si vuole analizzare (successioni colturali, tipo e profondità delle lavorazioni, irrigazione, fertilizzazione, etc.); inoltre, zone che presentano caratteristiche diverse (tessitura, drenaggio, pendenza, esposizione, etc.) vanno eliminate ed eventualmente campionate a parte.
- *Numero di campioni elementari per ciascun campione composto*: il numero di campioni elementari deve essere sufficiente a rappresentare la variabilità intrinseca del terreno; tuttavia, questa variabilità naturale cambia a seconda delle caratteristiche considerate, e cioè risulta molto bassa per il pH (<1%), maggiore per l’azoto totale (20% circa) e il potassio scambiabile (30% circa), e massima per il fosforo assimilabile (40% circa).
- *Profondità del prelievo*: anche se la profondità migliore a cui eseguire i prelievi dipende molto dal tipo di coltura in atto e dalle lavorazioni che vengono eseguite, è sempre consigliabile scartare i primi 5cm superficiali del terreno.
- *Epoca del prelievo*: per evitare che i risultati dell’analisi siano influenzati dalla fertilizzazione, è consigliabile far trascorrere almeno tre mesi dall’ultima concimazione.

Acquisito il campione, si procede all’analisi dello stesso per ricavare informazioni sulle principali proprietà del suolo. Di seguito vengono riportate le tecniche comunemente utilizzate per misurare le caratteristiche del terreno, già descritte nella precedente sezione (pH, conducibilità elettrica, NPK).

Il *pH* del terreno viene determinato per via potenziometrica in una dispersione di terreno in acqua distillata preparata in condizioni standard con rapporto terreno/acqua parti a 1:2.5 in peso. Rispettare queste proporzioni è fondamentale perché il pH risulta tanto più basso quanto minore è il rapporto terreno/acqua. La Tabella 1.3 riporta la classificazione dei terreni in base al pH.

La *conducibilità elettrica* della soluzione del terreno viene misurata con un conduttimetro su estratti saturi (ECe), oppure su sospensioni di terreno in acqua in rapporto (peso/volume) 1:2 (EC_{1:2}) o 1:5 (EC_{1:5}), e viene misurata in microSiemens per centimetro (mS/cm). L’estrazione in pasta satura fornisce risultati ben correlati con la risposta delle piante; tuttavia presenta lo svantaggio di essere di esecuzione poco pratica e, anche per questo, non viene sempre utilizzata.

Classificazione	pH
molto acido	<5.4
acido	5.4 - 5.9
subacido	6.0 - 6.6
neutro	6.7 - 7.2
subalcalino	7.3 - 8.0
alcalino	8.1 - 8.6
molto alcalino	>8.6

Tabella 1.3: Classificazione del terreno in base al pH

La Tabella 1.4 riporta la sensibilità delle colture alla salinità espressa come diminuzione della percentuale di crescita al variare della ECe.

Tipo di piante	Riduzione di crescita (%)			
	/	0	10	25
molto sensibili		1.0	1.4	1.8
sensibili		1.4	2.0	3.0
moderatamente tolleranti		2.5	3.4	4.8
tolleranti		4.5	5.8	8.0
molto tolleranti		8.0	10.0	13.0

Tabella 1.4: Sensibilità delle colture alla salinità espressa come diminuzione della percentuale di crescita al variare della ECe

Le sospensioni 1:2 e 1:5 sono, invece, piuttosto veloci e frequentemente utilizzate, sebbene i risultati ottenuti siano meno significativi. Affinché la loro valutazione sia la più corretta possibile, è opportuno “convertirle” (anche se in modo approssimativo) nel corrispondente estratto in pasta satura, come indicato in Tabella 1.5.

L’*azoto* totale del terreno viene determinato attraverso mineralizzazione (con acido solforico) di tutte le sostanze contenenti azoto e conseguente dosaggio dello ione ammoniacale che si forma in seguito alle reazioni di degradazione; tuttavia, a tale determinazione sfugge l’azoto nitrico, ovvero la forma di azoto comunemente assorbita dalle piante. Proprio per questo motivo, l’azoto totale è un indice che non dice molto sulla reale disponibilità di azoto per le piante; inoltre, il risultato della determinazione di questo indice è fortemente influenzato dalla variabilità insita del terreno che si vuole analizzare.

Tipo di suolo	Estrazione 1:2	Estrazione 1:5
/	moltiplicare EC dell'estratto per	
sabbia	6	15
franco-sabbioso	5	12
medio impasto	4	10
franco-argilloso	3.6	9
argilloso	3.2	8

Tabella 1.5: Coefficienti moltiplicativi per la conversione da EC ad ECe

La Tabella 1.6 riporta la classificazione del risultato dell'azoto totale: per dare maggiore significato al risultato, questo viene corretto in modo da tenere conto di come la natura del terreno influenza la quota di azoto organico che viene resa disponibile alle piante.

Classificazione	Azoto totale (g/Kg)
molto basso	<0.5
basso	0.5 - 1.0
medio	1.0 - 2.0
elevato	2.0 - 3.0
molto elevato	>3.0

Tabella 1.6: Classificazione dell'azoto totale

Altri metodi più sofisticati permettono di determinare l'*azoto disponibile* (azoto nitrico + azoto ammoniacale) o facilmente mineralizzabile, ma l'eccessiva laboriosità di tali tecniche non consente un'applicazione delle stesse nelle analisi di routine. La Tabella 1.7 riporta la classificazione del risultato dell'azoto disponibile.

Classificazione	Azoto disponibile (mg/Kg)
basso	<10
medio	10-20
elevato	>20

Tabella 1.7: Classificazione dell'azoto disponibile

Il fosforo (*assimilabile*) viene determinato con metodi diversi nel caso di terreni acidi ed alcalini. In particolare, viene suggerito di utilizzare il *metodo Bray-Kurtz* per terreni con $\text{pH} < 7$ e il *metodo Olsen* per terreni con $\text{pH} > 7$; i due metodi differiscono per il diverso estraente utilizzato, fluoruro d'ammonio nel primo e bicarbonato sodico nel secondo. In realtà, più recentemente, è stato dimostrato che il metodo Olsen può essere utilizzato per tutte le situazioni di pH, in quanto presenta linearità di risposta in tutte le condizioni; infatti, è stato evidenziato che tale metodo presenta una maggiore correlazione tra i risultati analitici e la crescita delle piante ($r = 0.82$) rispetto al metodo Bray-Kurtz; ciò è dovuto alla maggiore capacità del bicarbonato sodico di estrarre i fosfati di alluminio che costituiscono più del 60% dei fosfati solubili del terreno. La Tabella 1.8 riporta la classificazione del risultato del fosforo assimilabile per entrambi i metodi sopracitati.

Classificazione	Metodo Olsen (mg/Kg)	Metodo Bray-Kurtz (mg/Kg)
molto basso	<11	<28
basso	12 - 23	29 - 57
medio	24 - 34	58 - 85
elevato	35 - 69	86 - 172
molto elevato	>69	>172

Tabella 1.8: Classificazione del fosforo assimilabile per i metodi Olsen e Bray-Kurtz

Gli *elementi scambiabili*⁸ (*potassio*, magnesio e calcio) vengono determinati in due fasi: una fase di estrazione degli elementi (cioè di contatto del terreno con una soluzione contenente un catione in eccesso che si scambia con quelli assorbiti sulla superficie del suolo e li porta in soluzione) seguita da una fase di determinazione degli elementi presenti in soluzione per via spettrometrica. La natura multiforme dei cationi e le interazioni esistenti in fase di assorbimento da parte delle colture rendono piuttosto controversa l'interpretazione dei risultati analitici relativi agli elementi scambiabili. Proprio per questo, si tende ad elevare il limite di sufficienza all'aumentare delle frazioni argillose e della *capacità di scambio cationico* (CSC) del suolo, oltre che, per potassio e magnesio, all'aumentare dello squilibrio in favore dell'elemento antagonista. La Tabella 1.9 riporta la sola classificazione del risultato del potassio scambiabile (K^+) al variare della tessitura del terreno.

Questa trattazione, seppur parziale, fornisce un quadro soddisfacente sulle tecniche comunemente utilizzate nell'analisi chimico-fisica delle proprietà del terreno.

⁸ *Elementi scambiabili*: elementi chimici che interagiscono (tramite legame di tipo ionico) con le superfici delle particelle organiche e minerali del suolo: poiché le cariche presenti su queste superfici sono negative per i pH più comuni del suolo (valori compresi tra 5 e 8.5), gli elementi scambiabili sono comunemente dei cationi, cioè ioni con carica positiva.

Classificazione	Tessitura del terreno			
	/	sabbiosa	medio impasto	argillosa
molto basso	<48	<72	<96	
basso	49 - 96	73 - 120	97 - 144	
medio	97 - 144	121 - 1280	145 - 216	
elevato	>144	>180	>216	

Tabella 1.9: Classificazione del potassio scambiabile in base alla tessitura del suolo

La descrizione delle principali tecniche di analisi ha, inoltre, evidenziato, in maniera indiretta, alcune delle limitazioni di questo tipo di analisi; tali limitazioni contribuiscono ad indebolire la validità dei risultati analitici ottenuti, oltre a ridurre notevolmente l'applicabilità dell'analisi stessa.

Un primo limite riguarda l'attendibilità dell'analisi; infatti, i tecnici del settore agricolo ritengono che l'errore commesso in laboratorio nell'esecuzione delle analisi sia relativamente alto. In realtà, questo errore dipende per l'80-85% dagli errori commessi in fase di campionamento e solo per il 15-20% dagli errori compiuti in laboratorio; questo significa che la precisione non viene raggiunta ripetendo l'analisi ma prestando particolare attenzione alle modalità di prelievo dei campioni [9].

Un secondo limite di carattere informativo viene introdotto dallo stesso processo di campionamento che, considerando un numero finito di campioni elementari, consente di svolgere soltanto un'analisi di carattere statistico, e non un'analisi puntuale; in altre parole, i risultati analitici ottenuti forniscono informazioni sull'intero terreno campionato, e non su specifiche porzioni dello stesso (che potrebbero presentare caratteristiche peculiari e, quindi, necessitare di specifiche pratiche agronomiche).

Ultimo, ma non per importanza, vi è un notevole limite di carattere economico: se ripetuto nel tempo (per monitorare l'evoluzione delle proprietà del terreno) questo tipo di analisi può risultare particolarmente costoso.

1.2.2 Sensoristica per l'agricoltura

L'avvento dell'agricoltura di precisione⁹ ha determinato la diffusione capillare di sensori capaci di rilevare in tempo reale lo stato delle colture, le caratteristiche chimico-fisiche del terreno e le condizioni climatiche. Volendo fornire un quadro introduttivo su tale sensoristica, di seguito vengono descritti i principi di funzionamento alla base della quasi totalità dei sensori presenti sul mercato. In particolare, per garantire una trattazione snella, viene fatto riferimento ai soli sensori di umidità del suolo (i sensori per le altre proprietà del terreno seguono gli stessi principi di funzionamento).

⁹ *Agricoltura di precisione*: uso delle nuove tecnologie dell'informazione combinato con l'esperienza agronomica per *i*) massimizzare l'efficienza produttiva, *ii*) massimizzare la qualità, *iii*) minimizzare l'impatto ambientale e *iv*) minimizzare il rischio, il tutto a un livello puntuale (*site-specifically*) e non a livello dell'intero terreno coltivato [12].

L'*umidità* del suolo (*soil moisture*) è la “quantità (percentuale) di acqua contenuta nel suolo” [13], e viene anche riferita come “contenuto volumetrico di acqua” (*Volumetric Water Content*, WVC) in quanto tutti gli strumenti di misura puntuali restituiscono misure basate sul volume. Le principali tecniche di misura *in situ* si basano su grandezze fisiche come resistenza e permittività dielettrica¹⁰. Di seguito vengono presentati i principi di funzionamento, i vantaggi e gli svantaggi di due importanti tipologie di sensori, ovvero i *sensori resistivi* e i *sensori dielettrici* [14].

I *sensori resistivi* determinano il contenuto (percentuale) di acqua del suolo creando una differenza di potenziale tra due elettrodi; ciò consente a una piccola quantità di corrente di scorrere tra i due elettrodi, permettendo al sensore di misurare un valore di *resistenza* o di *conducibilità elettrica*. Poiché l'acqua non è un buon conduttore, la corrente (carica elettrica) viene trasportata da un elettrodo all'altro dagli ioni presenti nell'acqua; quindi, almeno in teoria, la resistenza dovrebbe diminuire all'aumentare della quantità d'acqua presente nel suolo. Tuttavia, affinché questa tecnica di misura funzioni, deve essere rispettata l'ipotesi stringente per cui il numero degli ioni nel suolo deve rimanere relativamente costante. Se il numero degli ioni non è costante, o il sensore viene utilizzato su suoli differenti, diventa impossibile garantire che il sensore sia accurato; infatti, un numero diverso di ioni altera la capacità della corrente di scorrere tra i due elettrodi, anche quando la quantità d'acqua rimane la stessa. Questo significa che, per essere usato, un sensore resistivo necessita di una calibrazione che relazioni l'output del sensore (resistenza o conducibilità elettrica) al contenuto volumetrico di acqua (WVC). In conclusione, sebbene i sensori resistivi siano incredibilmente economici e reagiscano ai cambiamenti di contenuto d'acqua del suolo, non vengono utilizzati in ambito scientifico in quanto non sono in grado di produrre misure affidabili del WVC.

I *sensori dielettrici* (capacitivi, TDR, FDR) sono una categoria di sensori che misurano la capacità del suolo di conservare la carica elettrica (*costante dielettrica*). Ogni materiale di cui è composto il suolo (minerali, liquidi e gas) ha una propria costante dielettrica ma, in generale, queste sono molto più basse della costante dielettrica dell'acqua: poiché le uniche componenti del suolo che possono cambiare significativamente in volume sono aria e acqua, questo significa che la costante dielettrica del suolo può essere correlata al contenuto volumetrico di acqua del suolo stesso. La Figura 1.3 mostra cosa accade agli ioni con un sensore dielettrico (a destra) paragonato con ciò che accade agli ioni con un sensore resistivo (a sinistra).

Un sensore dielettrico ideale polarizza le molecole di acqua che si trovano tra i due elettrodi così che queste si allineino molto rapidamente in quel campo: questo fa sì che il campo conservi una piccola quantità di carica senza che gli ioni di sale vengano polarizzati. Questo sensore ideale è sensibile ai cambiamenti nella quantità d'acqua del suolo ma non ai cambiamenti nella quantità di sale.

Alcuni sensori dielettrici agiscono come il secondo schema elettrico di Figura 1.3, e cioè incorporano una componente resistiva e sono, in qualche modo, sensibili ai cambiamenti nella concentrazione di sale: questo comportamento intermedio dipende principalmente dalla frequenza di misura e dal progetto circuitale.

¹⁰ *Permittività dielettrica*: grandezza fisica che quantifica la tendenza di un materiale a contrastare l'intensità del campo elettrico presente al suo interno.

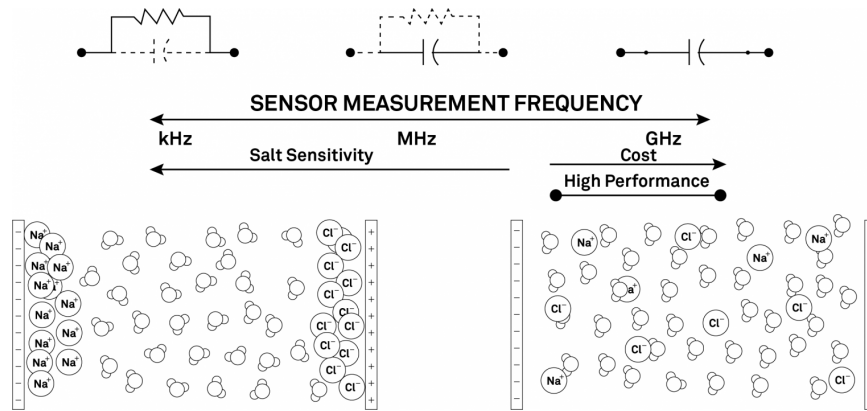


Figura 1.3: Effetto dei sensori resistivi (a sinistra) e dielettrici (a destra) sugli ioni, con l’aggiunta degli schemi circuitali di resistore (a sinistra) e capacitore (a destra)

Si noti che polarizzare correttamente le molecole d’acqua, evitando di polarizzare gli ioni disciolti, dipende da quanto velocemente avviene la polarizzazione, ovvero dalla *frequenza di misura*. Alle frequenze più basse i sensori dielettrici polarizzano l’acqua e i sali, e questo li rende incredibilmente sensibili alla salinità del suolo; al contrario, questa influenza viene ridotta notevolmente alle frequenze più alte.

La Tabella 1.10 descrive brevemente le principali tipologie di sensori dielettrici.

Capacitivo	Un sensore capacitivo utilizza il suolo come un condensatore, usando la capacità del terreno di conservare la carica elettrica (costante dielettrica) per calibrarsi rispetto al suo VWC.
Time Domain Reflectometry (TDR)	Un sensore TDR misura il tempo di propagazione di un’onda elettromagnetica lungo una linea di trasmissione (tempo correlato alla costante dielettrica del suolo e, quindi, al VWC).
Frequency Domain Reflectometry (FDR)	Un sensore FDR usa il suolo come un condensatore per misurare la massima frequenza di risonanza nel circuito e correlare tale grandezza al VWC del suolo.

Tabella 1.10: Principali tipologie di sensori dielettrici

Sebbene i sensori TDR siano generalmente ritenuti migliori dei sensori FDR, questi ultimi sono molto utilizzati per via del loro costo ridotto e della praticità di utilizzo (ad esempio, il consumo ridotto di energia li rende facilmente integrabili in dispositivi portatili). Inoltre, come anticipato, le prestazioni del sensore (accuratezza e insensibilità alla salinità del suolo) dipendono fortemente dalla frequenza di misura e, soprattutto, dall’esecuzione di una corretta calibrazione: non a caso, un sensore FDR di buona qualità, correttamente calibrato, presenta prestazioni paragonabili alla maggior parte dei sensori TDR disponibili sul mercato.

1.3 La sensoristica di Trace Technologies

Trace Technologies crede fortemente nella capacità dei dati di fornire un supporto decisionale alle persone e, proprio per questo motivo, ha realizzato un prototipo di stazione IoT (Figura 1.4) che monitora costantemente le condizioni climatiche e alcune proprietà chimico-fisiche del terreno; nel dettaglio, la stazione IoT presenta un sensore di temperatura e umidità dell'aria, un pluviometro (entrambi ben visibili in Figura 1.4 (a)), un sensore di bagnabilità fogliare (Figura 1.4 (b)) e un sensore di umidità e temperatura del suolo (Figura 1.5 (b)). Al di là del carattere strettamente informativo, questi dati alimentano complessi algoritmi previsionali che calcolano il rischio di insorgenza delle malattie più comuni delle colture. Ad esempio, in campo vitivinicolo (principale settore di test del prototipo), questi dati consentono di “prevedere” l'insorgenza della peronospora e dell'oidio, due delle principali malattie della vite. Gli utenti possono avere accesso a tali informazioni (dati raccolti e indici di rischio) attraverso una dashboard personalizzata¹¹; in questo modo rimangono costantemente informati sulle condizioni del campo e possono decidere, con cognizione di causa, se procedere o meno con determinate pratiche agronomiche.



(a) pluviometro, temperatura e umidità

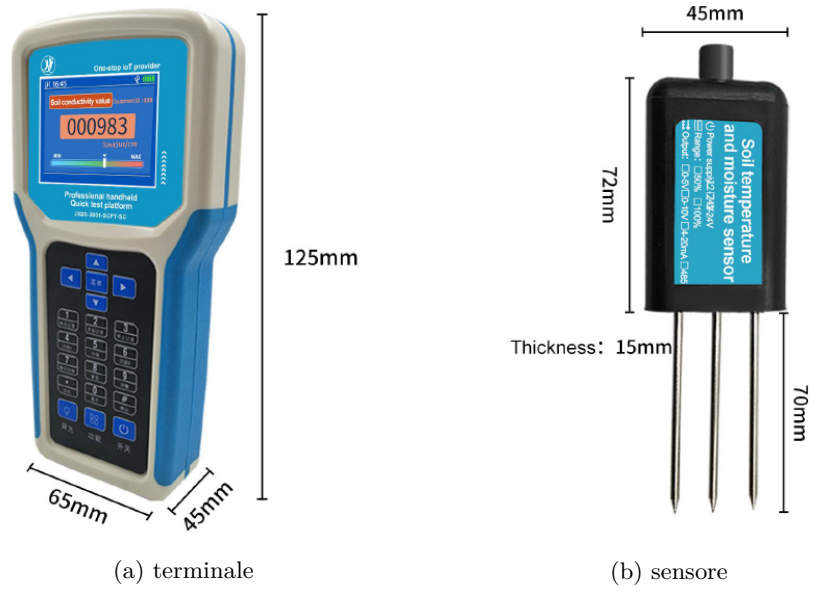


(b) bagnabilità fogliare

Figura 1.4: Trace Technologies: stazione IoT e sensori componenti

Oltre al prototipo di stazione IoT, Trace Technologies dispone di uno strumento di misura portatile con cui riesce a determinare *in situ* le principali caratteristiche del terreno, cioè temperatura, umidità, pH, conducibilità elettrica (EC) e macronutrienti (NPK). Questo strumento, sviluppato in collaborazione con l'azienda Wihai Jingxun Changtong Electronic Technology Co., presenta un terminale (Figura 1.5 (a)) al quale possono essere connessi diversi sensori (come quello in Figura 1.5 (b)), ciascuno dei quali consente di misurare una o più proprietà del suolo [15]. Per facilitare l'utilizzo dello strumento e velocizzare le operazioni di misurazione, Trace Technologies si è dotata di un particolare *sensore FDR* con cinque elettrodi capace di rilevare tutte le sopracitate proprietà in una sola misurazione.

¹¹ Si consiglia di visitare il sito aziendale per visualizzare un esempio reale di dashboard.



(a) terminale

(b) sensore

Figura 1.5: Trace Technologies: strumento portatile

Earth observation attraverso l'uso di dati satellitari: concetti preliminari

Il capitolo costituisce una breve introduzione sul remote sensing e, in particolare, sul concetto di earth observation. Nell'intento di rendere la trattazione autocontenuta, in primis viene presentato un breve richiamo sulle principali caratteristiche dell'energia elettromagnetica; la restante parte del capitolo, invece, si focalizza sul remote sensing satellitare e sulla sensoristica comunemente utilizzata per tale pratica.

2.1 Premessa

Come evidenziato dal geologo Floyd F. Sabins, il *remote sensing* è “la scienza dell’acquisire, processare e interpretare immagini che registrano l’interazione tra energia elettromagnetica e materia” [16]. L’aggettivo *remote* indica esplicitamente il fatto che tali informazioni “derivano da un dispositivo (sensore) che non si trova a contatto con l’oggetto, l’area o il fenomeno in esame” [17]; questo non esclude misurazioni locali (*validazione in situ*) che possano migliorare l’interpretazione complessiva e, in alcuni casi, perfezionare la qualità delle stesse informazioni ottenute tramite remote sensing. Un altro termine comunemente utilizzato per descrivere il concetto di remote sensing è quello di *earth observation* (EO); questo ha perfettamente senso se si considera che il remote sensing viene comunemente utilizzato per monitorare attentamente il nostro pianeta, la Terra. Si noti che, nel corso del capitolo, i termini *remote sensing* ed *earth observation* vengono utilizzati come sinonimi.

2.2 L’energia elettromagnetica

Come detto, il remote sensing si basa sulla misurazione dell’*energia elettromagnetica* (EM). Questa forma di energia può essere modellata sia come un’onda sia come un flusso di particelle di energia prive di massa (*quanti di energia*, comunemente detti *fotoni*). Nel modello ondulatorio, l’energia EM si propaga nello spazio sotto forma di onde sinusoidali. Queste onde sono caratterizzate da un campo elettrico (E) e da un campo magnetico (M) tra loro perpendicolari; la vibrazione di entrambi i campi è perpendicolare alla direzione di propagazione dell’onda (Figura 2.1) [18].

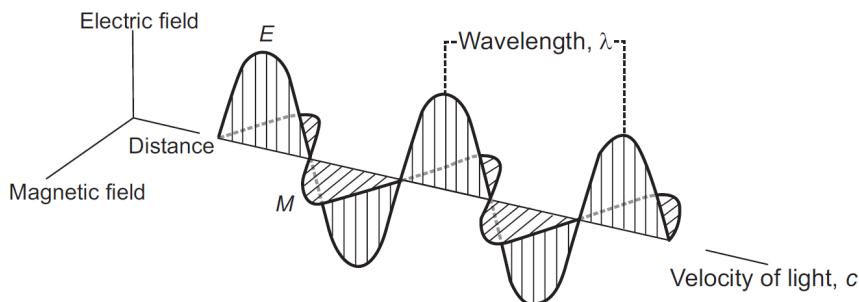


Figura 2.1: Vettori di campo elettrico (E) e magnetico (M) di un'onda EM

La distanza tra due massimi (creste) della forma d'onda¹ viene detta *lunghezza d'onda*, λ , e viene misurata in metri (m), micrometri ($\mu\text{m} = 10^{-6}\text{m}$) e nanometri ($\text{nm} = 10^{-9}\text{m}$). Invece, la *frequenza*, ν , corrisponde al numero di cicli della forma d'onda (successione di massimi e minimi) che passano per un punto nell'unità di tempo; essa viene misurata in Hertz (Hz), l'equivalente di un ciclo al secondo [18].

Poiché la velocità della luce, c , è costante, la lunghezza d'onda e la frequenza sono legate in maniera inversamente proporzionale dalla seguente relazione:

$$c = \lambda \cdot \nu$$

Questo significa che a lunghezze d'onda minori corrispondono frequenze maggiori e, invece, a lunghezze d'onda maggiori corrispondono frequenze minori (Figura 2.2).

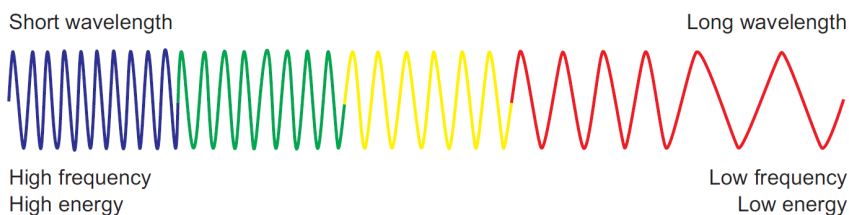


Figura 2.2: Relazione tra lunghezza d'onda e frequenza

2.2.1 Lo spettro elettromagnetico

Lo *spettro elettromagnetico* è l'insieme di tutte le lunghezze d'onda della radiazione EM (Figura 2.3) [18]. Le regioni dello spettro EM che possono essere utilizzate per il remote sensing vanno dalla radiazione ultravioletta (UV) fino alla microonde.

¹ *Forma d'onda*: per una grandezza variabile, funzione di un certo parametro, è la forma del grafico rappresentante tale funzione.

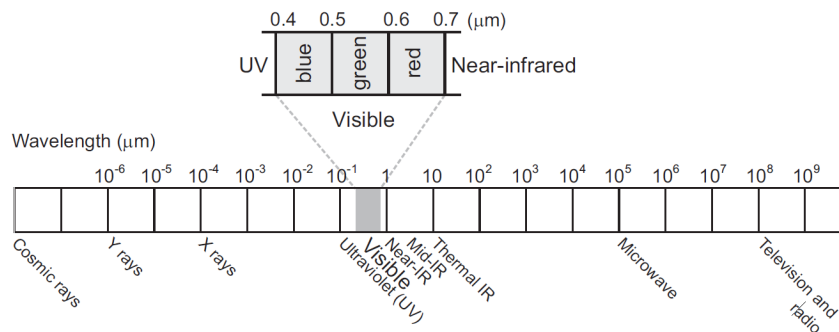


Figura 2.3: Lo spettro elettromagnetico

La radiazione ultravioletta presenta lunghezze d'onda comprese tra 10 nm e 400 nm; alcuni materiali della superficie terrestre, in particolare rocce e minerali, diventano fluorescenti² quando vengono illuminati con questo tipo di radiazione.

Lo spettro visibile, comunemente chiamato *luce*, è la sola regione dello spettro EM che può essere associata con il concetto di colore; le lunghezze d'onda della luce blu sono comprese tra 400 nm e 500 nm, quelle della luce verde tra 500 nm e 600 nm, mentre quelle della luce rossa tra 600 nm e 700 nm. Si noti come l'aggettivo *visibile* sottolinei il fatto che queste sono le uniche radiazioni visibili all'occhio umano.

La radiazione infrarossa (IR) presenta lunghezze d'onda che vanno da 0.7 μm a 14 μm ; in particolare, quelle comprese tra 0.7 μm e 0.9 μm corrispondono alla radiazione *near-infrared* (NIR), quelle comprese tra 0.9 μm e 1.7 μm corrispondono alla radiazione *shortwave-infrared* (SWIR), mentre quelle comprese tra 4 μm e 14 μm corrispondono alla radiazione *far-infrared* (FIR), nota anche come *thermal-infrared* (utilizzata per ottenere informazioni sulla temperatura della superficie terrestre, la quale può essere correlata, ad esempio, con la composizione minerale delle rocce).

La regione delle microonde, più comunemente descritta in termini di frequenze, si estende da 40 GHz fino 0.2 GHz. Le principali *bande* di frequenza utilizzate per il remote sensing sono: Ku (12-18 GHz), X (8-12 GHz), C (4-8 GHz), S (2-4 GHz), L (1-2 GHz) e P (0.25-0.5 GHz). Gli strumenti che utilizzano un certa banda includono la sigla della stessa all'interno del proprio nome; ad esempio, il Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar (PALSAR) è un sensore a microonde che utilizza la banda di frequenze L per raccogliere osservazioni dettagliate in tutte le condizioni climatiche ed eseguire interferometria³ differenziale. Più in generale, le microonde possono essere utilizzate per ottenere informazioni sulle proprietà della superficie terrestre, come, ad esempio, ruvidità o contenuto d'acqua della stessa [19].

² *Fluorescenza*: proprietà di alcune sostanze di riemettere (solitamente a lunghezza d'onda maggiore) le radiazioni elettromagnetiche ricevute: in particolare, spesso, la fluorescenza indica la capacità di assorbire radiazione ultravioletta ed emettere luce visibile.

³ *Interferometria*: metodo di misura che sfrutta le interferenze tra più onde coerenti fra loro per eseguire misurazioni molto accurate di distanze, lunghezze d'onda e spostamenti dello stesso ordine di grandezza della lunghezza d'onda utilizzata; con essa vengono misurate le velocità di propagazione della luce in vari mezzi e per vari indici di rifrazione.

2.2.2 Le interazioni con l'atmosfera e la superficie terrestre

L'interazione con l'atmosfera può modificare la radiazione EM, generando fenomeni di cui bisogna tener conto per una corretta interpretazione dei risultati derivanti dal processo di remote sensing. Le principali forme di interazione con l'atmosfera sono l'assorbimento, la trasmissione e lo *scattering* (diffusione).

La radiazione EM viene parzialmente assorbita dalle molecole presenti nell'atmosfera; quelle che presentano una maggiore capacità di assorbimento sono l'ozono (O_3), il vapore acqueo (H_2O) e il diossido di carbonio (CO_2), più comunemente noto come anidride carbonica. La Figura 2.4 fornisce una rappresentazione schematica della trasmissione atmosferica per lunghezze d'onda comprese in 0-22 μm .

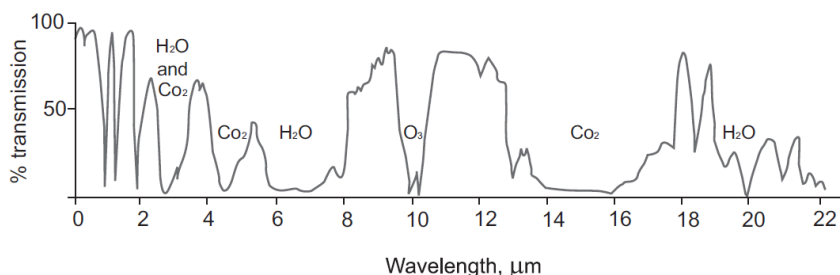


Figura 2.4: La trasmissione atmosferica (espressa in percentuale)

Chiaramente, soltanto le regioni di lunghezze d'onda al di fuori delle principali bande di assorbimento possono essere usate per il remote sensing; queste bande vengono anche dette “finestre di trasmissione atmosferica”; esse includono: una finestra in 0.4-2 μm , due finestre strette in 3-5 μm e una più ampia in 8-14 μm . A causa della presenza di umidità atmosferica, difficilmente si avrà trasmissione di energia nella regione di lunghezze d'onda che vanno da 22 μm a 1 mm [18].

Con il termine *scattering atmosferico* si indica il fenomeno per cui la radiazione EM viene deflessa (cambia traiettoria) quando entra in collisione con le particelle e/o le molecole di gas presenti nell'atmosfera. L'entità dello scattering dipende dalla lunghezza d'onda della radiazione, dalla quantità di particelle e molecole di gas e dalla distanza che la radiazione percorre nell'atmosfera.

La radiazione trasmessa attraverso l'atmosfera viene assorbita e/o riflessa dalla superficie terrestre. Le applicazioni di remote sensing misurano prevalentemente la radiazione riflessa, poiché essa permette di inferire importanti informazioni sulla superficie stessa. Esistono due modalità di riflessione: la riflessione speculare e la riflessione diffusa (diffusione). Solitamente, si riscontra una combinazione delle due.

La *riflessione speculare* (mirror-like) avviene quando la superficie è liscia e tutta (o quasi) la radiazione viene riflessa in un'unica direzione. Questo tipo di riflessione può essere causato, per esempio, da una superficie d'acqua o dal tetto di una serra. Al contrario, la *diffusione* avviene quando la superficie è ruvida e la radiazione viene riflessa in maniera uniforme (o quasi) in tutte le direzioni (Figura 2.5).

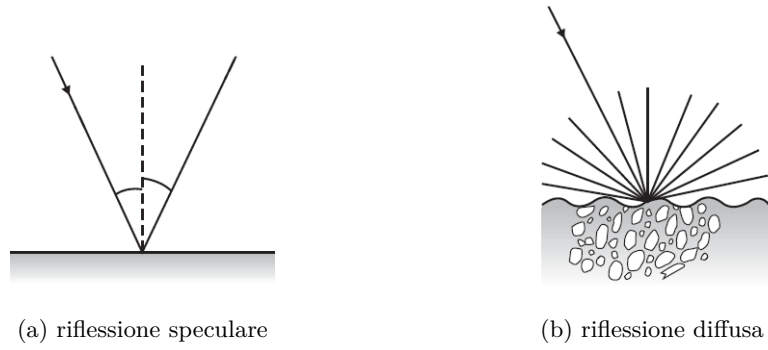


Figura 2.5: Tipologie di riflessione

La specifica modalità di riflessione di un oggetto dipende dalla relazione che esiste tra la sua ruvidità superficiale e la lunghezza d'onda della radiazione incidente.

Si definisce *riflettanza* il rapporto tra radiazione riflessa e radiazione incidente. Ogni materiale presenta una specifica *curva di riflettanza* che mostra il grado di riflessione per le diverse lunghezze d'onda. A titolo di esempio, si consideri la curva di riflettanza ideale della vegetazione sana riportata in Figura 2.6. La proporzione di radiazione riflessa nelle diverse parti dello spettro EM dipende dalle caratteristiche delle foglie, come, ad esempio, orientamento, pigmentazione, spessore, composizione (struttura cellulare) e contenuto d'acqua. La regione visibile dello spettro è caratterizzata da una riflessione della luce blu e di quella rossa piuttosto bassa; queste componenti, infatti, vengono assorbite dalla pianta durante la fotosintesi. Al contrario, in assenza di fotosintesi (pianta di colore giallo-arancio), la riflessione della luce rossa è molto maggiore; ciò lascia intuire come il remote sensing possa essere utilizzato per inferire informazioni sulla vegetazione e sul suo stato di salute [18].

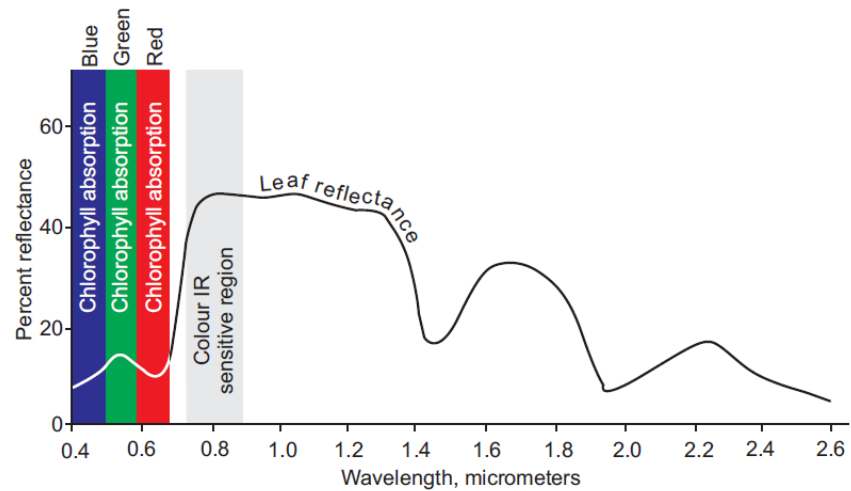


Figura 2.6: Curva di riflettanza ideale della vegetazione sana

2.3 Remote sensing satellitare

Come suggerisce il nome, il remote sensing satellitare viene effettuato principalmente tramite sensoristica montata a bordo di satelliti che orbitano attorno alla Terra. Due tipologie di orbite particolarmente rilevanti per il remote sensing sono:

- *Orbita geostazionaria*: orbita circolare ed equatoriale situata ad un'altezza di circa 36000 Km, tale per cui la velocità di un satellite che la percorre coincide con la velocità di rotazione della Terra (dando l'impressione che esso sia stazionario sopra un punto del pianeta); si tratta di un caso particolare di *orbita geosincrona*.
- *Orbita polare*: orbita con altezza molto ridotta (160-2000 Km) e con inclinazione rispetto all'equatore molto vicina ai 90°, tale per cui un satellite che la percorre riesce a sorvolare entrambi i poli terrestri; si tratta di un caso particolare di *orbita inclinata* rispetto al piano equatoriale.

2.3.1 Classificazione della sensoristica

La sensoristica satellitare può essere divisa in due macrogruppi (Figura 2.7) [18]:

- *Sensori passivi*: questi sensori dipendono da una sorgente di energia esterna, come il Sole e, più raramente, la Terra; infatti, essi rilevano la radiazione solare riflessa dalla superficie terrestre o la radiazione emessa dagli oggetti presenti sulla superficie terrestre.
- *Sensori attivi*: possedendo una sorgente di energia indipendente, questi sensori hanno un consumo energetico maggiore rispetto ai sensori passivi e, per questo, vengono attivati solo quando programmato; essi emettono un segnale verso la superficie terrestre e misurano l'intensità e il ritardo del segnale riflesso.

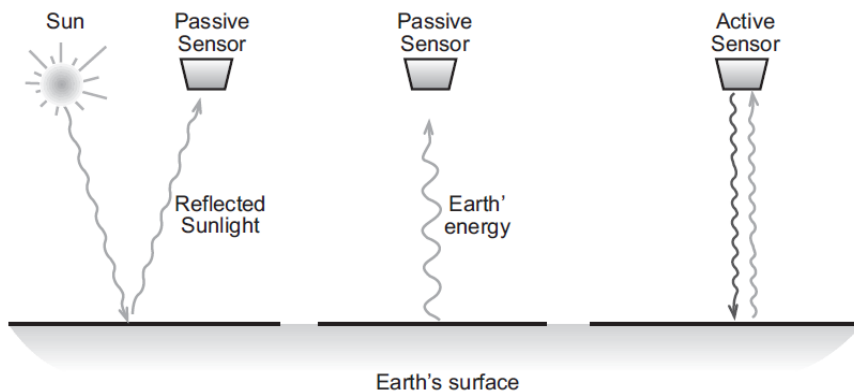


Figura 2.7: Sensori passivi e sensori attivi

A seconda delle diverse lunghezze d'onda rilevate, la sensoristica satellitare può essere ulteriormente suddivisa in due gruppi [19]:

- *Sensori ottici*: sono capaci di rilevare le lunghezze d'onda comprese nello spettro visibile (da 400 nm a 700 nm) e nella regione infrarossa (da 700 nm a 1 mm); questi sensori sono particolarmente affetti dalle condizioni climatiche e, perciò, non riescono ad acquisire dati in presenza di fumo, nuvole e precipitazioni.
- *Sensori a microonde*: come dice il nome, sono capaci di rilevare le lunghezze d'onda comprese nella regione delle microonde (da 1 mm a 10 cm); a differenza di quelli ottici, questi sensori non sono affetti dalle condizioni climatiche e il loro segnale riesce a penetrare il fumo, le nuvole e, più raramente, le precipitazioni.

La Tabella 2.1 suddivide la principale sensoristica satellitare in tali gruppi.

	PASSIVO	ATTIVO
OTTICO	Visibile, Infrarosso	LIDAR
MICROONDE	Radiometro	Scatterometro, Altimetro, SAR

Tabella 2.1: Classificazione della principale sensoristica satellitare

LIDAR (Laser Imaging Detection and Ranging) è una tecnica di remote sensing attivo che utilizza un impulso laser per determinare la distanza di una superficie; di fatto, ad essere misurato è il tempo trascorso tra l'emissione dell'impulso laser e la ricezione del segnale retrodiffuso. Esistono due tipologie di LIDAR: il LIDAR *topografico*, che utilizza una laser near-infrared (NIR) per mappare la superficie terrestre, e il LIDAR *batimetrico*, che utilizza luce verde capace di penetrare l'acqua per misurare la profondità dei fondali marini [19].

Un *radiometro* è un sensore capace di rilevare la naturale radiazione EM a microonde emessa dalla Terra; questa è una radiazione abbastanza debole, che risulta soggetta a interferenze da parte di sorgenti di rumore esterne, come, ad esempio, i trasmettitori a microonde. I radiometri vengono comunemente usati per misurare l'umidità del suolo, la salinità degli oceani, la concentrazione di ghiaccio marino e la temperatura superficiale di terra e oceani [19].

Uno *scatterometro* è un sensore che emette degli impulsi di microonde in diverse direzioni e misura l'entità dei segnali retrodiffusi verso di esso. Questi sensori vengono comunemente montati su satelliti meteorologici per determinare la direzione e la velocità del vento [19].

Un *altimetro* è un sensore che emette degli impulsi di microonde nella direzione di interesse e misura l'intensità e l'origine dei segnali retrodiffusi verso di esso. Questi sensori vengono comunemente utilizzati per calcolare l'altezza della superficie terrestre, degli oceani e dei bacini d'acqua [19].

SAR (Synthetic Aperture Radar) è un sensore che permette di creare immagini bidimensionali in cui la luminosità di ciascun pixel è correlata all'intensità del segnale ritornato. Si chiama SAR in quanto utilizza un'antenna piccola per imitare il comportamento di un'antenna molto più grande; ciò permette di rilevare microonde con frequenze elevate senza dover disporre di un'antenna lunga migliaia di metri. In pratica, quando il satellite si muove, tutte le riflessioni misurate vengono processate insieme, così come se fossero state rilevate da un'unica grande antenna. Questi sensori vengono comunemente utilizzati in topografia, oceanografia, glaciologia, geologia, nonché per monitorare crescita urbana, inondazioni e stabilità delle infrastrutture civili [19].

2.3.2 Caratteristiche dei dati satellitari

Solitamente, quando si parla di dati satellitari, la prima cosa che viene alla mente sono le immagini digitali della Terra e di altri corpi celesti. Così come avviene per le immagini digitali, anche i dati satellitari vengono memorizzati in matrici di pixel (contrazione di “*picture element*”); tuttavia, ogni pixel memorizza un valore (*Digital Number*, o DN-value) che rappresenta una misura di energia EM, e non un colore. Ogni “immagine” satellitare si compone di un certo numero di *bande* (dette anche *canali* o, più raramente, *layer*), ciascuna delle quali memorizza un certo range di lunghezze rilevato dalla sensoristica montata a bordo del satellite (Figura 2.8) [18].

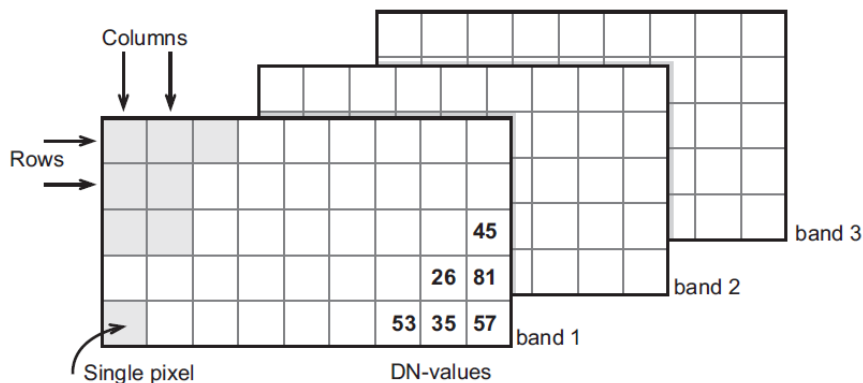


Figura 2.8: Schema di memorizzazione dei dati satellitari

La *risoluzione spaziale* indica la dimensione del più piccolo oggetto che può essere osservato sulla superficie terrestre; ad esempio, una “immagine” con una risoluzione spaziale di 1 Km non permette di distinguere oggetti che abbiano una dimensione inferiore a 1 Km. La sensoristica a bordo della missione Landsat viene classificata come avente una risoluzione spaziale *media*, e cioè i pixel delle “immagini” acquisite hanno una dimensione compresa tra 1 Km e 30 m; inoltre, si parla di risoluzione spaziale *alta* quando la dimensione dei pixel è inferiore ai 30 m, e di risoluzione spaziale *molto alta* quando essa è inferiore a 1 m [19].

La *risoluzione spettrale* indica il numero di bande spettrali rilevate da un sensore ottico. A seconda della specifica risoluzione spettrale si distinguono [19]:

- *Dati pancromatici*, acquisiti usando una sola ampia banda spettrale pensata per catturare l'intero spettro visibile; ad esempio, dati di questo tipo vengono acquisiti dal sensore ETM+ (Enhanced Thematic Mapper Plus) montato a bordo del satellite Landsat 7, capace di rilevare le lunghezze d'onda tra 520 e 900 nm.
- *Dati multispettrali*, acquisiti usando più bande spettrali; queste possono essere combinate per creare visualizzazioni più facilmente interpretabili dall'uomo.
- *Dati iperspettrali*, acquisiti usando centinaia di bande spettrali; dati di questo tipo vengono acquisiti, ad esempio, dal sensore Hyperion montato a bordo del satellite EO-1 (Earth Observing 1), capace di rilevare 220 bande spettrali, con una risoluzione compresa tra 0,10 e 0,11 μm per banda.

La *risoluzione temporale*, o *revisit time*, è il tempo che il satellite (e, quindi, il sensore) impiega per sorvolare nuovamente un certo punto della superficie terrestre; questa caratteristica dipende dall'orbita del satellite e dall'angolo di apertura del sensore. L'*angolo di apertura* di un sensore indica l'ampiezza della porzione di suolo che può essere rilevata a ogni orbita del satellite; ad un angolo di apertura maggiore corrisponde una maggiore copertura del suolo e, quindi, un *revisit time* minore [19].

Una ulteriore distinzione suddivide i dati satellitari in *dati open* (accessibili gratuitamente) e *dati commerciali*. Le agenzie spaziali consentono libero accesso alla maggior parte dei dati raccolti attraverso le numerosi missioni spaziali lanciate nel corso degli anni; poiché, solitamente, questi dati hanno risoluzioni medio-basse, le organizzazioni commerciali si sono concentrate nell'offrire servizi con risoluzioni alte e molto alte. Chiaramente, maggiore è la risoluzione spaziale richiesta, maggiore sarà il costo di acquisto; inoltre, di solito, i dati acquisiti tramite sensori a microonde tendono ad essere più costosi di quelli acquisiti tramite sensori ottici [19].

Infine, i dati satellitari possono essere suddivisi anche sulla base del loro diverso *livello di elaborazione*. Si distinguono cinque possibili livelli [19]:

- *Level 0 (L0)*: dati grezzi (raw data) ricevuti dal satellite che, di fatto, vengono semplicemente convertiti in un formato adatto per la memorizzazione.
- *Level 1 (L1)*: dati processati in formati più facilmente accessibili per gli utenti, come, ad esempio, le immagini digitali.
- *Level 2 (L2)*: dati che presentano alcuni parametri geofisici aggiuntivi, come, ad esempio, l'umidità del terreno o la concentrazione di ghiaccio marino.
- *Level 3 (L3)*: dati composti che sfruttano diverse orbite per creare un mosaico di acquisizioni relative ad aree particolarmente estese.
- *Level 4 (L4)*: dati che presentano elaborazioni aggiuntive, come, ad esempio, *gap filling* tramite interpolazione o combinazione di dati acquisiti da più sensori.

2.3.3 Esempi di applicazione

Il remote sensing satellitare viene utilizzato in moltissimi campi, come, ad esempio, agricoltura, silvicoltura, geologia, idrologia, urbanistica, etc. [20].

Le principali applicazioni nel campo dell'agricoltura includono, tra le altre, la classificazione delle colture, la valutazione dello stato di salute delle colture, la stima della resa delle colture, la mappatura delle caratteristiche del suolo e il monitoraggio della conformità delle pratiche agronomiche; avendo a disposizione tali informazioni, la figura dell'agronomo potrà decidere, con cognizione di causa, se e come intervenire per ripristinare le migliori condizioni per la crescita delle colture.

Nel campo della silvicoltura le principali applicazioni includono, tra le altre, il monitoraggio della deforestazione, la valutazione della rigenerazione forestale, la stima della biomassa, la classificazione delle diverse specie, la valutazione dello stato di salute e del vigore della foresta e il monitoraggio degli incendi boschivi (un problema particolarmente rilevante in questo periodo storico). La Figura 2.9 mostra un esempio dell'ultima applicazione citata, evidenziando i danni provocati dall'incendio del 1 agosto 2021 nella Pineta D'Annunziana di Pescara (Abruzzo).

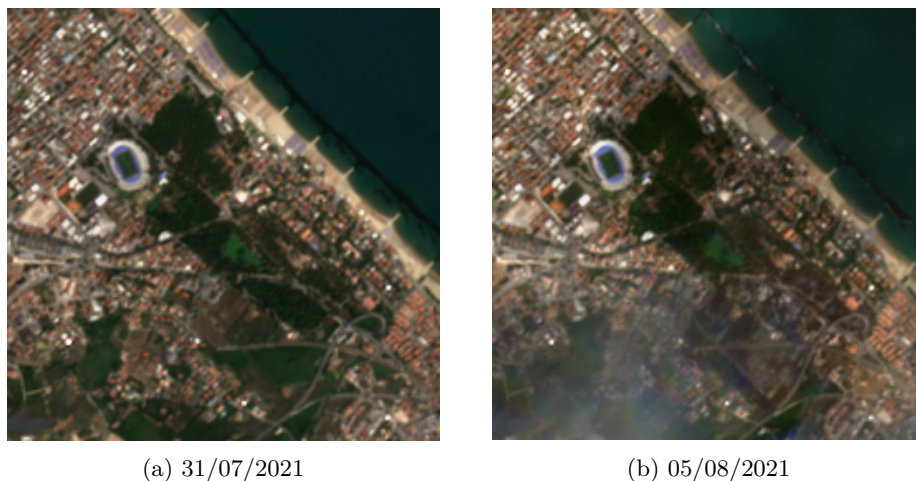


Figura 2.9: Incendio del 01/08/2021 alla Pineta D'Annunziana di Pescara

Le principali applicazioni in campo geologico includono, tra le altre, l'analisi delle rocce e dei depositi superficiali, la mappatura litologica e strutturale, l'esplorazione minerale e degli idrocarburi, la geobotanica e l'analisi dei rischi geologici.

In campo idrologico le principali applicazioni includono, tra le altre, la mappatura e il monitoraggio delle paludi, la stima dell'umidità del suolo, la misura dello spessore della neve, il monitoraggio delle foci dei fiumi, il rilevamento delle perdite lungo gli acquedotti e lo scheduling delle attività di irrigazione.

Nel campo dell'urbanistica le principali applicazioni includono, tra le altre, il monitoraggio dell'espansione urbana, la stima dei danni provocati da calamità naturali (tornado, alluvioni, sismi, incendi, etc.), la pianificazione della logistica, il controllo della viabilità e la valutazione dei confini per scopi legali.

2.4 Le risorse satellitari di Trace Technologies

Avendo preso parte all'iniziativa *Network of Resources* (NOR) promossa dall'agenzia spaziale europea (ESA), Trace Technologies si è guadagnata la possibilità di accedere a diverse tipologie di dati satellitari, sia open che commerciali; questi vengono erogati tramite *Sentinel Hub*, piattaforma della compagnia Sinergise che permette di accedere ai dati e a diversi strumenti per una loro facile elaborazione.

La Tabella 2.2 riporta le principali caratteristiche delle costellazioni accessibili da Trace Technologies attraverso la piattaforma Sentinel Hub.

Costellazione	Accessibilità	Tipologia	Risoluzione
Sentinel-1	Open	Radar	20 m
Sentinel-2	Open	Ottico	10 m, 20 m, 60 m
Sentinel-3	Open	R/O	300 m (OLCI), 500 m e 1 Km (SLSTR)
Sentinel-5P	Open	R/O	7 Km
PlanetScope	Commerciale	Ottico	3 m
Pleiades	Commerciale	Ottico	0.5 m (banda pancromatica), 2 m (tutte le altre bande)

Tabella 2.2: Trace Technologies: dati satellitari accessibili tramite Sentinel Hub

La costellazione Sentinel-1 comprende due satelliti con orbita polare che operano giorno e notte eseguendo acquisizione dati tramite un sensore C-SAR (C-band Synthetic Aperture Radar), il che permette loro di acquisire dati sotto qualunque condizione meteorologica. Il principale svantaggio di questi satelliti è la presenza di un rumore granulare (*speckle*) che degrada fortemente la qualità dei dati acquisiti.

La costellazione Sentinel-2 comprende due satelliti con orbita polare posizionati sulla stessa orbita eliocentrica con uno sfasamento di 180° . L'ampio angolo di apertura (290 Km) e l'elevata risoluzione temporale (10 giorni con un satellite all'equatore e 5 giorni con due satelliti in caso di cielo privo di nuvole) rendono possibile un monitoraggio completo dei cambiamenti della superficie terrestre.

La costellazione Sentinel-3, composta di due satelliti, rileva la topografia della superficie marina nonché temperatura e colore della superficie terrestre e degli oceani, con l'obiettivo di supportare il monitoraggio ambientale e climatico. A tal fine, ogni satellite trasporta quattro strumenti principali: *i) Ocean and Land Colour Instrument (OLCI)*, *ii) Sea and Land Surface Temperature Instrument (SLSTR)*, *iii) SAR Radar Altimeter (SRAL)* e *iv) Microwave Radiometer (MWR)*.

La costellazione Sentinel-5 Precursor, composta di due satelliti, monitora l'atmosfera alla ricerca di gas che influenzano il clima e la qualità dell'aria.

La costellazione PlanetScope consiste di oltre 130 piccoli satelliti (DOVEs) lanciati in gruppi, nel corso del tempo, per migliorare le caratteristiche della costellazione stessa, come, ad esempio, il revisit time e le risoluzioni spaziale e spettrale. I dati raccolti da PlanetScope si rivelano particolarmente utili per il monitoraggio della vegetazione e il rilevamento di cambiamenti della superficie terrestre.

La costellazione Pleiades consiste di due satelliti con uno sfasamento di 180° che permettono di acquisire dati con una risoluzione spaziale molto alta (0.5 m); tale caratteristica li rende perfetti per applicazioni di precisione, come il monitoraggio delle colture, la gestione dei disastri ambientali e l'ingegneria civile.

Al fine di semplificare la lettura del capitolo successivo, di seguito sono riportate le bande utilizzabili per le costellazioni Sentinel-2 e PlanetScope (Tabelle 2.3 e 2.4).

Altre informazioni sono reperibili sul sito dell'*European Spatial Agency* (ESA)⁴.

Banda	Descrizione	Risoluzione
B01	Coastal aerosol, 442.7 nm (S2A), 442.3 nm (S2B)	60 m
B02	Blue, 492.4 nm (S2A), 492.1 nm (S2B)	10 m
B03	Green, 559.8 nm (S2A), 559.0 nm (S2B)	10 m
B04	Red, 664.6 nm (S2A), 665.0 nm (S2B)	10 m
B05	Vegetation red edge, 704.1 nm (S2A), 703.8 nm (S2B)	20 m
B06	Vegetation red edge, 740.5 nm (S2A), 739.1 nm (S2B)	20 m
B07	Vegetation red edge, 782.8 nm (S2A), 779.7 nm (S2B)	20 m
B08	NIR, 832.8 nm (S2A), 833.0 nm (S2B)	10 m
B8A	Narrow NIR, 864.7 nm (S2A), 864.0 nm (S2B)	20 m
B09	Water vapour, 945.1 nm (S2A), 943.2 nm (S2B)	60 m
B11	SWIR, 1613.7 nm (S2A), 1610.4 nm (S2B)	20 m
B12	SWIR, 2202.4 nm (S2A), 2185.7 nm (S2B)	20 m

Tabella 2.3: Sentinel-2: bande utilizzabili

Banda	Descrizione	Risoluzione
B1	Blue, 455 - 515 nm	3 m
B2	Green, 500 - 590 nm	3 m
B3	Red, 590 - 670 nm	3 m
B4	Near Infrared, 780 - 860 nm	3 m

Tabella 2.4: PlanetScope: bande utilizzabili

⁴ <https://www.esa.int/>

Contesto di riferimento e organizzazione dei dati

Nel ribadire lo scopo dell'elaborato, questo capitolo illustra l'ambito di riferimento nel quale è stato condotto lo studio; in particolare, vengono descritte le modalità di acquisizione dei dati, la loro organizzazione e le elaborazioni necessarie a renderli utilizzabili per la successiva fase di analisi.

3.1 Caso di studio

Come evidenziato al termine del Capitolo 1, Trace Technologies dispone di numerosi strumenti da poter applicare nel campo della viticoltura (e non solo); non è un caso che il progetto *WineTech*, che si propone di aiutare i viticoltori a raggiungere una viticoltura sostenibile attraverso l'utilizzo dei dati, abbia riscosso un grande successo presso molti produttori di vino italiani. Anche per questo motivo, nel selezionare un'area geografica di interesse per lo studio in questione, si è scelto di consolidare la collaborazione venutasi a creare con la *Cantina Strappelli*, una realtà affermata del teramano che ha creduto sin da subito nel progetto *WineTech*.

La raccolta dei dati relativi ai parametri chimico-fisici del suolo è stata condotta su un piccolo vigneto di Pecorino (circa 1 ha) nel periodo trascorso tra aprile e settembre 2021; un periodo temporale di tale entità ha permesso di monitorare lo stato del suolo durante tutto il ciclo produttivo della vite, dai primi stadi di crescita della pianta fino alla vendemmia. Conoscendo in anticipo le date in cui sarebbero state acquisite le corrispondenti immagini satellitari, si è pianificato il calendario di acquisizione dei dati del suolo; complessivamente sono state eseguite misurazioni per un totale di 20 giorni e, per ciascun giorno, sono stati acquisiti dati per 35 punti di campionamento. La Figura 3.1 riporta la disposizione di tali punti e il percorso seguito per acquisire le relative misure sempre nello stesso ordine. Le ridotte dimensioni del vigneto hanno fatto propendere per l'utilizzo delle costellazioni satellitari con più elevata risoluzione spaziale: Sentinel-2 (open) e PlanetScope (commerciale)¹. Pur essendo la migliore, questa scelta presenta un grande svantaggio: dal momento che entrambe le costellazioni montano a bordo strumentazione ottica, soltanto le misurazioni eseguite in assenza di formazioni nuvolose e/o precipitazioni (16 su 20) possono essere utilizzate per l'analisi.

¹ Pleiades presenta una risoluzione temporale non soddisfacente (1-2 immagini/anno).

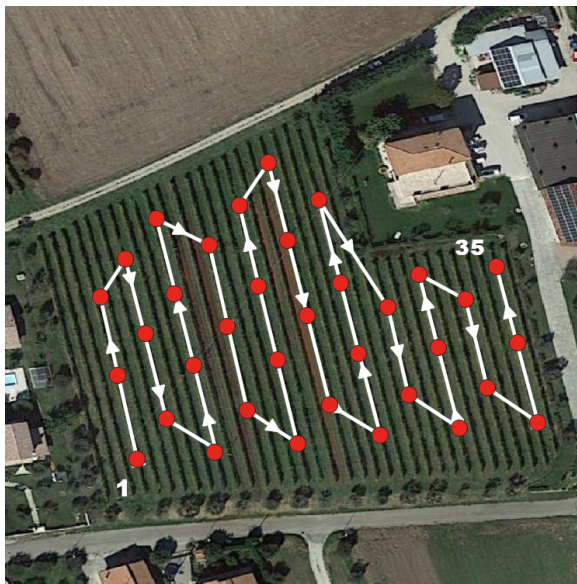


Figura 3.1: Punti di campionamento e relativo percorso di acquisizione

3.2 Costruzione del dataset

3.2.1 Acquisizione dei dati

L'acquisizione dei dati relativi ai parametri del suolo è stata da noi svolta utilizzando lo strumento di misura portatile mostrato in Figura 1.5; in questo modo, per ciascun giorno di misurazioni, è stato generato un file `.CSV` (Comma-Separated Values) contenente le misure dei parametri del suolo per tutti i 35 punti di campionamento.

Viceversa, i dati satellitari sono stati acquisiti tramite l'uso delle API fornite da *Sentinel Hub*. In particolare, le richieste RESTful sono state effettuate in linguaggio Python, sfruttando il package `sentinelhub` messo a disposizione dall'azienda stessa; ciascuna richiesta produce un file `.TIFF` (Tagged Image File Format) contenente i valori di riflettanza per le singole bande, corredati dei relativi riferimenti geografici.

Nella parte restante della sezione viene illustrato brevemente il codice utilizzato per acquisire i *raw data* satellitari corrispondenti a ciascun giorno di misurazioni.

La prima cosa da fare per effettuare richieste da codice è quella di configurare correttamente il proprio account *Sentinel Hub*, definendo gli opportuni valori per il file di configurazione `config.json` contenuto nel package `sentinelhub`; questo può essere fatto sia da linea di comando (Listato 3.1) sia direttamente in Python (Listato 3.2), nel qual caso occorre creare e “valorizzare” una istanza della classe `SHConfig`.

```
$ sentinelhub.config --instance_id <I-ID>
$ sentinelhub.config --sh_client_id <C-ID> --sh_client_secret <C-SECRET>
```

Listato 3.1: Configurazione dell'account SH da linea di comando

```

from sentinelhub import SHConfig

config = SHConfig()

config.instance_id = '<SH-INSTANCE-ID>'
config.sh_client_id = '<SH-CLIENT-ID>'
config.sh_client_secret = '<SH-CLIENT-SECRET>'

config.save()

```

Listato 3.2: Configurazione dell'account SH in Python

Si deve, poi, definire l'area di interesse per la quale acquisire i dati satellitari; per fare ciò si definisce un *bounding box* a partire dalle coordinate espresse nel sistema WGS84 (World Geodetic System 1984, noto anche come EPSG:4326). La funzione ausiliaria `bbox_to_dimensions` consente di specificare la risoluzione desiderata per ottenere le dimensioni dell'immagine di output; si noti che le bande con risoluzione inferiore a quella specificata sono sottoposte ad *upsampling* automatico (Figura 3.3).

```

from sentinelhub import CRS, BBox, bbox_to_dimensions

# longitude and latitude of lower left and upper right corners
strappelli_coords_wgs84 = [13.764835, 42.812177, 13.767109, 42.813841]

strappelli_bbox = BBox(bbox=strappelli_coords_wgs84, crs=CRS.WGS84)
strappelli_size = bbox_to_dimensions(strappelli_bbox, resolution=10)

```

Listato 3.3: Definizione del bounding box per l'area di interesse

Si deve, poi, fornire un blocco di codice Javascript che stabilisca come i dati satellitari debbano essere processati da *Sentinel Hub* e quali valori il servizio dovrebbe ritornare. Tale codice, noto come *evalscript* (o “custom script”), si compone di due funzioni: *i*) `setup`, nella quale specificare gli input e gli output ed *ii*) `evaluatePixel`, che calcola i valori di output per ciascun pixel dell'immagine. Il seguente codice `evalscript` consente di acquisire i valori di riflettanza di tutte le bande di Sentinel-2 (Listato 3.4).

```

function setup() {
  return {
    input: [{
      bands: ["B01", "B02", "B03", "B04", "B05", "B06",
              "B07", "B08", "B8A", "B09", "B11", "B12"],
      units: "DN"
    }],
    output: {
      bands: 12,
      sampleType: "INT16"
    }
  };
}

function evaluatePixel(sample) {
  return [sample.B01, sample.B02, sample.B03, sample.B04,
          sample.B05, sample.B06, sample.B07, sample.B08,
          sample.B8A, sample.B09, sample.B11, sample.B12];
}

```

Listato 3.4: Codice *evalscript* utilizzato nelle richieste Sentinel-2

A questo punto si può effettuare una richiesta creando un'istanza della classe `SentinelHubRequest` e “valorizzandola” con un codice *evalscript*, una lista di collezioni di dati (es. `SENTINEL2_L2A`), un intervallo temporale, la modalità con cui selezionare le immagini all'interno del suddetto intervallo (ad esempio, `mostRecent`), un *bounding box*, la dimensione e il formato dell'immagine di output (ad esempio, `MimeType.TIFF`) (Listato 3.5).

```

from sentinelhub import DataCollection, MimeType, SentinelHubRequest

request_all_bands = SentinelHubRequest(
    evalscript=evalscript_all_bands,
    input_data=[
        SentinelHubRequest.input_data(
            data_collection=DataCollection.SENTINEL2_L2A,
            time_interval=('2021-09-06', '2021-09-08'),
            mosaicking_order='mostRecent'
        )
    ],
    responses=[
        SentinelHubRequest.output_response('default', MimeType.TIFF)
    ],
    bbox=strappelli_bbox,
    size=strappelli_size,
    config=config
)

```

Listato 3.5: Esempio di richiesta Sentinel-2

Avendo l'accortezza di modificare opportunamente l'argomento `resolution` della funzione ausiliaria `bbox_to_dimensions`, l'*evalscript* e la collezione dati, è possibile effettuare una richiesta PlanetScope in maniera del tutto analoga a quanto visto per Sentinel-2. Si noti che, prima di poter essere acquisite tramite richieste RESTful, le immagini commerciali devono essere acquistate nell'applicazione web *EO Browser*² e, quindi, correttamente salvate in un'apposita collezione di dati.

3.2.2 Organizzazione dei dati in Python

Questa sezione descrive in dettaglio come sia possibile generare un dataset costituito in egual misura da dati relativi ai parametri del suolo e dati satellitari. La Figura 3.2 mostra il flusso di lavoro seguito per organizzare il dataset in ambiente Python.

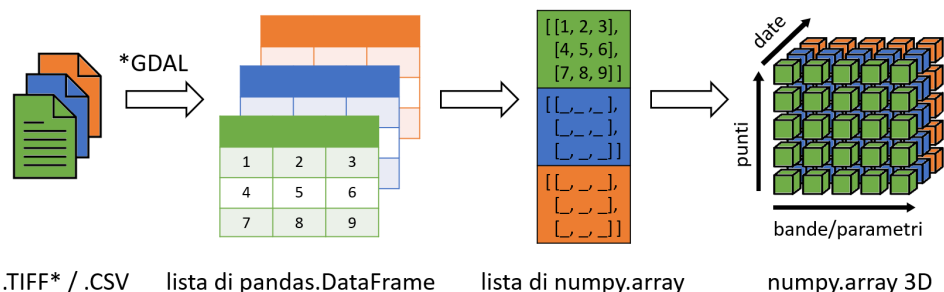


Figura 3.2: Organizzazione del dataset in Python: flusso di lavoro

² <https://apps.sentinel-hub.com/eo-browser/>

Utilizzando la funzione `read_csv` appartenente alla libreria `Pandas`, creare una lista di `pandas.DataFrame` è un'operazione molto semplice; infatti, essa permette di creare un `pandas.DataFrame` direttamente a partire dal contenuto di un file `.CSV`. La funzione ausiliaria `clean_soil_dataframe`, da noi definita, elimina dal dataframe `df` le colonne indesiderate e rinomina adeguatamente quelle rimaste.

```
# list of all .csv files' names contained in the specified directory
csvfiles = glob.glob(os.path.join("./soil_samples", '*.csv'))

# a list to hold multiple Pandas DataFrames
dataframes = []

# loop through the files and read them with Pandas
for file in csvfiles:
    df = pd.read_csv(file, sep = ",", header = None, encoding = "cp1252")
    clean_soil_dataframe(df)
    dataframes.append(df)
```

Listato 3.6: Creazione di una lista di `pandas.DataFrame` a partire da file `.CSV`

Questa operazione risulta leggermente più complicata quando viene eseguita a partire da un insieme di file `.TIFF`. Infatti, alla complessità introdotta dal diverso formato dei file di input, si aggiunge la necessità di individuare i pixel dell'immagine satellitare che corrispondono ai punti di campionamento di Figura 3.1; ciò comporta l'esigenza di eseguire alcune operazioni preliminari, come l'importazione delle coordinate dei punti di campionamento e la creazione di strutture dati ausiliarie che saranno valorizzate durante l'esecuzione dello script (Listato 3.7).

```
# read .csv file containing sample points' coordinates into a DataFrame
coords = pd.read_csv("./sample_points.csv")
coords.drop(columns=["point"], inplace=True)

# coordinates of satellite data and the ones corresponding to sample points
x, y, nearest_longs, nearest_lats = [np.empty(0), ..., ..., np.empty(0)]
```

Listato 3.7: Componente satellitare del dataset: operazioni preliminari

Utilizzando la libreria `GDAL`³, si costruisce un'istanza della classe `gdal.Dataset` per ciascun file `.TIFF`; tale oggetto contiene una lista di bande con la stessa risoluzione, un sistema di coordinate, le dimensioni dell'immagine e numerose altre informazioni. La funzione ausiliaria `calc_satellite_coords`, da noi definita, utilizza alcune delle informazioni del dataset `ds` per ricostruire le coordinate associate a ciascun pixel dell'immagine satellitare; si noti che, avendo utilizzato un unico *bounding box*, questo calcolo non deve essere ripetuto per ciascuna immagine satellitare. Con il metodo `GetRasterBand` si possono estrarre i valori di riflettanza della singola banda; questa operazione deve essere ripetuta per tutte le bande contenute nel dataset `ds`. Queste informazioni vengono utilizzate per creare un `pandas.DataFrame` in cui ogni riga rappresenta un pixel dell'immagine satellitare, con relative coordinate e valori di riflettanza delle singole bande. La funzione `calc_corresponding_coords`, da noi definita, restituisce le coordinate dei pixel corrispondenti ai punti di campionamento; tali coordinate permettono di filtrare le righe del precedente `pandas.DataFrame`.

³ <https://gdal.org/>

Queste operazioni (Listato 3.8), ripetute per ogni immagine satellitare in formato .TIFF, permettono di costruire una lista di `pandas.DataFrame` con cardinalità pari a quella costruita per i dati relativi ai parametri chimico-fisici del suolo.

```
# list of all .tiff files' names contained in the specified directory
tiff_files = glob.glob(os.path.join("./raw_data_S2", '*.tiff'))

# a list to hold multiple Pandas DataFrames
dataframes = []

# loop through the files and read them with GDAL
for file in tiff_files:
    ds = gdal.Open(file)

    # every .tiff has same dimensions, so coords are calculated once
    if (len(x) == 0) & (len(y) == 0):
        x, y = calc_satellite_coords(ds)

    bands = [ds.GetRasterBand(i) for i in range(1,13)]
    ar = [bands[i].ReadAsArray() for i in range(len(bands))]
    flat = [ar[i].flatten() for i in range(len(ar))]

    ds = None # close the dataset

    df = pd.DataFrame({"Longitude":x, "Latitude":y, "B01":flat[0],
                      "B02":flat[1], "B03":flat[2], "B04":flat[3],
                      "B05":flat[4], "B06":flat[5], "B07":flat[6],
                      "B08":flat[7], "B8a":flat[8], "B09":flat[9],
                      "B11":flat[10], "B12":flat[11]})

    # coords of satellite data are the same, so these can be calculated once
    if (len(nearest_longs) == 0) & (len(nearest_lats) == 0):
        nearest_longs, nearest_lats = calc_corresponding_coords(coords, x, y)

    new_df = pd.DataFrame()

    for nlon, nlat in zip(nearest_longs, nearest_lats):
        new_row = df.loc[(df["Longitude"] == nlon) & (df["Latitude"] == nlat)]
        new_df = new_df.append(new_row, ignore_index=True)

    new_df.drop(columns=["Longitude", "Latitude"], inplace=True)

    dataframes.append(new_df)
```

Listato 3.8: Creazione di una lista di `pandas.DataFrame` a partire da file .TIFF

A questo punto, si hanno due liste di `pandas.DataFrame`, una per i dati del suolo e una per i corrispondenti dati satellitari. Le operazioni per trasformare ciascuna lista in un `numpy.array` 3D sono esattamente le stesse (Listato 3.9). Innanzitutto, si crea una lista di `numpy.array` 2D, invocando il metodo `to_numpy()` per ogni dataframe `df`. Quindi, si passa tale lista come argomento del metodo `array()` della libreria `NumPy`.

```
# convert each DataFrame into a Numpy array
df_arrays = [df.to_numpy() for df in dataframes]

# create a 3D matrix from a list of NumPy arrays
data_matrix = np.array(df_arrays)
```

Listato 3.9: Creazione di un `numpy.array` 3D da una lista di `pandas.DataFrame`

Infine, si è fatto uso della libreria `XArray`⁴ per facilitare l'accesso a queste strutture dati. La struttura dati `xarray.DataArray` fornisce un'eccellente implementazione di un array multidimensionale con etichette; queste forniscono una modalità di accesso alternativa al classico accesso posizionale, particolarmente difficoltoso e soggetto ad errori al crescere del numero di dimensioni. Tale struttura dati si basa su due concetti fondamentali: dimensioni e coordinate. Con il termine *dimensioni* si indicano le etichette (nomi) assegnate agli assi, mentre con il termine *coordinate* si fa riferimento alle etichette (nomi, date, etc.) assegnate ai singoli punti di ciascun asse. Il codice seguente (Listato 3.10) mostra come costruire un `xarray.DataArray` a partire dal `numpy.array` 3D creato in precedenza per la costellazione Sentinel-2.

```
# define coordinates' values (i.e. the ticks of different axes)
dates = ["2021-04-20", "2021-04-30", "2021-05-05", "2021-05-10",
         "2021-05-25", "2021-06-04", "2021-06-09", "2021-06-14",
         "2021-07-09", "2021-07-29", "2021-08-03", "2021-08-08",
         "2021-08-18", "2021-08-23", "2021-09-02", "2021-09-07"]
bands = ["B01", "B02", "B03", "B04", "B05", "B06", "B07",
         "B08", "B8a", "B09", "B10", "B11", "B12"]
points = np.arange(0, 35, 1)

# create DataArray using coordinates' values and dimensions' names
sentinel3D = xr.DataArray(data_matrix, coords=[dates, points, bands],
                          dims=["date", "point", "band"])
```

Listato 3.10: Creazione del `DataArray` satellitare Sentinel-2

A titolo di esempio, si supponga di voler conoscere, per i soliti punti di campionamento, quali sono stati i corrispondenti valori di riflettanza delle bande B01 e B02 registrati in data "2021-07-29". Senza l'uso della libreria `XArray`, si deve ricorrere all'accesso posizionale, dovendo ricordare, quindi, a quale indici corrispondono gli assi relativi alle bande e alle date e, all'interno di quest'ultimo, a quale indice corrisponde la data "2021-07-29". Questo modalità di accesso è molto più complessa rispetto a quella resa disponibile dall'utilizzo della libreria `XArray`; avendo definito il precedente `DataArray`, infatti, è sufficiente indicare in maniera esplicita la data e le bande desiderate (Listato 3.11)

```
data = sentinel3D.sel(date="2021-07-29", band=["B01", "B02"])
```

Listato 3.11: `XArray`: esempio di selezione dati tramite etichette

⁴ <http://xarray.pydata.org/en/stable/>

Analisi spaziale

Nell'intento di contestualizzare l'intero processo di analisi, la prima parte del capitolo presenta alcune importanti informazioni, come, ad esempio, le date in cui sono state registrate precipitazioni piovose e pratiche agronomiche. La restante parte del capitolo, invece, si focalizza sull'analisi vera e propria, riportando i risultati ottenuti nella ricerca di una possibile correlazione tra i dati del suolo e i dati satellitari.

4.1 Considerazioni preliminari

Con il termine “analisi spaziale” si fa riferimento ad una tipologia di analisi che, a parità di giorno di misurazioni, ricerca una possibile correlazione tra i parametri chimico-fisici del suolo e i dati satellitari (intesi sia come valori di riflettanza delle singole bande sia come indici calcolati a partire da tali valori). Questa analisi è stata eseguita per entrambe le costellazioni a nostra disposizione, nell'intento dichiarato di rilevare eventuali differenze legate alle diverse risoluzioni spaziali. Inutile dire che, nell'arco temporale di riferimento, numerosi fattori esterni possono aver influito sui valori di riflettanza registrati dalle due costellazioni e, quindi, indirettamente, sulla correlazione ricercata. Le Tabella 4.1 elenca date e quantità dei rovesci piovosi registrati nel periodo di riferimento, mentre la Tabella 4.2 riporta l'andamento della copertura vegetativa e le pratiche agronomiche rilevate nello stesso periodo. Queste informazioni saranno altrettanto utili per l'analisi temporale di cui al Capitolo 5.

Più praticamente, si è scelto di utilizzare l'*indice* (o coefficiente) *di correlazione di Pearson* per valutare la relazione esistente tra dati del suolo e dati satellitari. Tale indice assume sempre valori nell'intervallo $[-1, +1]$ e si parla, rispettivamente, di *i) correlazione debole*, se $0 < |r| < 0.3$, *ii) correlazione moderata*, se $0.3 < |r| < 0.7$, e *iii) correlazione forte*, se $|r| > 0.7$; in particolare, si parla di *correlazione positiva* per valori di $r > 0$, mentre si parla di *correlazione negativa* per valori di $r < 0$ [21].

Infine, per brevità di trattazione, si è scelto di riportare i risultati dell'analisi spaziale in forma aggregata. In altre parole, per entrambe le costellazioni, viene presentata la *matrice di correlazione media*, comprensiva di deviazione standard, sia per le singole bande che per i relativi indici satellitari. Ciò dovrebbe consentire di valutare correttamente la reale natura della correlazione esistente, al netto delle possibili variazioni riscontrabili nell'intero periodo di riferimento.

Data	Precipitazioni (mm)	Data	Precipitazioni (mm)
19/04/2021	0.50	18/06/2021	12.00
22/04/2021	3.50	16/07/2021	9.50
23/04/2021	2.50	17/07/2021	44.00
28/04/2021	9.00	18/07/2021	1.00
13/05/2021	0.50	05/08/2021	1.50
14/05/2021	2.00	25/08/2021	3.00
16/05/2021	11.00	26/08/2021	0.50
19/05/2021	4.00	27/08/2021	12.00
30/05/2021	5.00	28/08/2021	2.50
06/06/2021	13.00	31/08/2021	14.00
07/06/2021	11.50	01/09/2021	1.00

Tabella 4.1: Precipitazioni rilevate nel periodo di riferimento

Data	Evento rilevato
20/04/2021	Assenza di copertura vegetativa
25/05/2021	Copertura vegetativa folta
04/06/2021	Taglio della vegetazione spontanea dell'intero vigneto
09/06/2021	Copertura vegetativa folta
29/07/2021	Taglio della vegetazione spontanea della parte più giovane del vigneto (punti di campionamento interessati: 26-35)
18/08/2021	Taglio della vegetazione spontanea della parte più giovane del vigneto (punti di campionamento interessati: 26-35)
07/09/2021	Taglio della vegetazione spontanea della parte più giovane del vigneto (punti di campionamento interessati: 26-35)

Tabella 4.2: Copertura vegetativa e manutenzione rilevate nel periodo di riferimento

4.2 Costellazione open (Sentinel-2)

La classe `pandas.DataFrame` della libreria `Pandas` mette a disposizione il metodo `corr()` per calcolare la correlazione esistente tra le colonne di una propria istanza. Questo si traduce nella necessità di creare, per ciascun giorno di misurazioni, un `pandas.DataFrame` che abbia per colonne sia i parametri chimico-fisici del suolo sia i dati satellitari (siano essi valori di riflettanza delle singole bande o indici calcolati a partire dagli stessi). Il Listato 4.1 mostra come creare il `pandas.DataFrame` appena descritto e come calcolare la relativa matrice di correlazione. Si noti che, nel caso

in cui si scelga di calcolare la matrice di correlazione tra parametri del suolo e indici satellitari, le colonne relative alla bande vengono rimosse dal `pandas.DataFrame` per garantire una migliore leggibilità della matrice stessa. La funzione ausiliaria `calc_ndvis()`, da noi definita, consente di calcolare gli indici di Tabella A.1. Questa funzione fa parte del file `sentinel_indices.py` contenente tutte le dichiarazioni delle funzioni necessarie per il calcolo degli indici satellitari presentati nell'Appendice A.

```

from sentinel_building_matrix import sentinel3D
from soil_building_matrix import soil3D

temp_soil_ndarr = soil3D.sel(date=date)
df = pd.DataFrame(temp_soil_ndarr.data, columns=parameters)

temp_s2_ndarr = sentinel3D.sel(date=date)

for i, band in zip(range(0, len(bands)), bands):
    df.insert(len(df.axes[1]), band, pd.Series(temp_s2_ndarr.data[:, i]))

# example of calculus of satellite indices
#
# calc_ndvis(df)
# for band in bands:
# df.drop(columns=band, inplace=True)

df_corr = df.corr()

```

Listato 4.1: Calcolo della matrice di correlazione relativa a un `pandas.DataFrame`

Analogamente a quanto fatto nei Listati 3.6 e 3.8, rispettivamente, per file `.CSV` e file `.TIFF`, anche in questo caso si crea una lista di `pandas.DataFrame` (`corr_dfs`); in particolare, ciascun dataframe della lista rappresenta la matrice di correlazione corrispondente a ognuno dei 16 giorni di misurazioni. Creando un `numpy.array` 3D a partire dalla lista di `pandas.DataFrame`, si possono utilizzare i metodi `mean()` e `std()` della libreria `NumPy` per calcolare la media e la deviazione standard delle 16 diverse matrici di correlazione (Listato 4.2).

```

# convert each DataFrame into a Numpy array
df_arrays = [df.to_numpy() for df in corr_dfs]

# create a 3D matrix from a list of NumPy arrays
corr_matrix = np.array(df_arrays)

# axis = 0 specifies to calculate the following along the 'dates' axis
corr_mean = np.mean(corr_matrix, axis=0)
corr_std = np.std(corr_matrix, axis=0)

```

Listato 4.2: Media e deviazione standard delle diverse matrici di correlazione

La Tabella 4.3 presenta la media e la deviazione standard delle diverse matrici di correlazione, relativamente ai parametri chimico-fisici del suolo e alle bande della costellazione Sentinel-2. Le singole matrici di correlazione, corrispondenti a ciascuno dei 16 giorni di misurazioni, possono essere consultate nel repository GitHub relativo al presente elaborato¹. Questi risultati evidenziano una sostanziale assenza di correlazione tra parametri del suolo e bande satellitari, mentre sembrano suggerire una correlazione intra-parametri e intra-bande di moderata/forte entità.

¹ https://github.com/abba29/satellite_data_info_extraction

	HUM	PH	EC	N	P	K	B01	B02	B03	B04	B05	B06	B07	B08	B8a	B09	B11	B12
TEMP	0.09 0.22	-0.10 0.18	0.01 0.19	0.00 0.21	0.02 0.18	0.01 0.19	-0.11 0.30	-0.14 0.34	-0.15 0.38	-0.18 0.41	-0.16 0.32	-0.06 0.26	-0.01 0.26	0.06 0.20	-0.03 0.26	0.12 0.38	-0.12 0.36	-0.15 0.35
HUM		0.11 0.24	0.49 0.27	0.48 0.26	0.49 0.26	0.48 0.27	0.07 0.21	-0.12 0.18	-0.12 0.19	-0.14 0.21	-0.06 0.19	0.04 0.18	0.04 0.15	0.05 0.14	0.04 0.17	-0.05 0.23	-0.02 0.20	-0.06 0.21
PH			0.15 0.19	0.16 0.19	0.15 0.20	0.15 0.20	0.02 0.14	-0.01 0.13	0.00 0.12	-0.01 0.16	0.04 0.20	-0.02 0.18	-0.03 0.19	0.02 0.18	-0.01 0.19	-0.03 0.15	0.06 0.19	0.05 0.19
EC				0.99 0.03	0.99 0.02	0.99 0.01	0.01 0.10	-0.08 0.16	-0.06 0.17	-0.06 0.17	-0.07 0.18	0.00 0.21	-0.01 0.19	-0.05 0.21	0.00 0.20	0.02 0.15	-0.07 0.16	-0.07 0.18
N					0.98 0.03	0.99 0.02	0.02 0.10	-0.08 0.16	-0.07 0.17	-0.07 0.16	-0.08 0.18	0.01 0.22	0.00 0.19	-0.04 0.20	0.01 0.20	0.01 0.18	-0.07 0.17	-0.08 0.17
P						1.00 0.00	0.01 0.10	-0.09 0.15	-0.07 0.17	-0.08 0.16	-0.07 0.18	0.00 0.22	0.00 0.18	-0.05 0.20	0.00 0.20	0.02 0.14	-0.07 0.17	-0.07 0.19
K							0.01 0.10	-0.08 0.16	-0.06 0.18	-0.07 0.17	-0.07 0.19	0.00 0.22	-0.01 0.19	-0.05 0.20	0.00 0.21	0.02 0.15	-0.07 0.17	-0.07 0.19
B01								0.19 0.32	0.17 0.37	0.16 0.42	0.35 0.25	0.42 0.17	0.35 0.19	0.31 0.16	0.36 0.20	-0.49 0.40	0.48 0.24	0.39 0.30
B02									0.91 0.05	0.86 0.07	0.57 0.22	0.22 0.24	0.05 0.22	0.18 0.26	0.04 0.24	-0.18 0.30	0.54 0.23	0.53 0.23

Tabella 4.3: Correlazione media (in grassetto) e deviazione standard: parametri del suolo e bande Sentinel-2 (prima parte)

	HUM	PH	EC	N	P	K	B01	B02	B03	B04	B05	B06	B07	B08	B8a	B09	B11	B12
B03										0.91 0.07	0.63 0.22	0.26 0.22	0.09 0.24	0.19 0.27	0.07 0.24	-0.11 0.37	0.58 0.23	0.57 0.24
B04											0.61 0.23	0.12 0.30	-0.05 0.29	0.01 0.32	-0.06 0.29	-0.20 0.39	0.58 0.24	0.60 0.24
B05											0.34 0.26	0.18 0.36	0.36 0.31	0.33 0.31	0.12 0.36	-0.15 0.35	0.89 0.07	0.93 0.07
B06													0.90 0.06	0.77 0.04	0.90 0.08	0.11 0.30	0.38 0.23	0.28 0.28
B07														0.77 0.04	0.95 0.03	0.18 0.27	0.21 0.30	0.12 0.35
B08															0.74 0.06	0.16 0.26	0.33 0.30	0.26 0.31
B8a																0.16 0.26	0.19 0.32	0.07 0.36
B09																	-0.24 0.34	-0.24 0.38
B11																		0.93 0.04

Tabella 4.4: Correlazione media (in grassetto) e deviazione standard: parametri del suolo e bande Sentinel-2 (seconda parte)

Si noti che, escluse le correlazioni di forte entità, la deviazione standard rispetto alla correlazione media è considerevolmente diversa da zero. Questo suggerisce una notevole variabilità nella correlazione tra parametri del suolo e bande satellitari. In prima analisi, tale comportamento potrebbe essere dovuto al fatto che il taglio della vegetazione spontanea non ha interessato sempre l'intero vigneto, ma, nella maggioranza dei casi, soltanto la parte più giovane dello stesso. In effetti, la differenza di copertura vegetativa può, sicuramente, determinare una variazione nei valori di riflettanza delle singole bande. Inoltre, tale variabilità potrebbe essere dovuta anche alle precipitazioni piovose registrate nel periodo di riferimento; ad esempio, la differenza tra la matrice di correlazione del 09/06/2021 e quella del 04/06/2021 potrebbe essere dovuta ai rovesci piovosi registrati nei giorni 06/06 e 07/06. Tale supposizione trova fondamento anche negli studi di Stoner e Baumgardner, secondo i quali un aumento di umidità del suolo (*soil moisture*) induce una diminuzione della riflettanza dello stesso [22]. Tuttavia, rilevare questa influenza potrebbe non essere sempre banale, dal momento che le acquisizioni satellitari che presentano fenomeni atmosferici (nuvole, precipitazioni, etc.) non possono essere utilizzate per l'analisi.

Anche per gli indici satellitari presentati nell'Appendice A vale lo stesso discorso fatto per le singole bande della costellazione Sentinel-2. Infatti, anche in questo caso, si riscontra una sostanziale assenza di correlazione tra parametri del suolo e indici satellitari, ed una correlazione intra-parametri e intra-indici di moderata/forte entità. Nel caso degli indici di vegetazione, questa scarsa correlazione potrebbe essere dovuta al fatto che tali indici valutano proprietà della copertura vegetativa che non sono necessariamente legate alle caratteristiche del suolo (Tabelle 4.5, 4.6 e 4.7).

	NDVI	BNDVI	GNDVI	GBNDVI	GRNDVI	RBNDVI	PAN NDVI
TEMP	0.16	0.14	0.16	0.15	0.16	0.15	0.16
	0.41	0.39	0.39	0.39	0.40	0.40	0.40
HUM	0.15	0.12	0.12	0.12	0.14	0.14	0.14
	0.18	0.17	0.16	0.17	0.17	0.18	0.17
PH	0.04	0.02	0.02	0.02	0.03	0.03	0.03
	0.18	0.16	0.19	0.18	0.19	0.18	0.18
EC	0.04	0.05	0.03	0.04	0.03	0.04	0.04
	0.20	0.18	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19
N	0.05	0.05	0.04	0.05	0.05	0.05	0.05
	0.19	0.17	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18
P	0.05	0.06	0.04	0.05	0.05	0.06	0.05
	0.18	0.17	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18
K	0.04	0.05	0.03	0.04	0.04	0.05	0.04
	0.19	0.18	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19

Tabella 4.5: Correlazione media (in grassetto) e deviazione standard: parametri del suolo e indici elencati in Tabella A.1 (Sentinel-2)

	ARVI	GARI	EVI	EVI2	SAVI	MSAVI	WDRVI	BWDRVI
TEMP	0.16	0.15	0.14	0.16	0.16	0.16	0.16	0.15
	0.41	0.40	0.39	0.41	0.41	0.40	0.40	0.40
HUM	0.15	0.13	0.13	0.15	0.15	0.15	0.15	0.12
	0.18	0.16	0.15	0.18	0.18	0.18	0.17	0.17
PH	0.04	0.03	0.03	0.04	0.04	0.04	0.04	0.02
	0.18	0.20	0.20	0.18	0.18	0.18	0.19	0.17
EC	0.04	0.02	0.02	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04
	0.20	0.17	0.16	0.20	0.20	0.20	0.19	0.18
N	0.05	0.03	0.03	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
	0.19	0.17	0.16	0.19	0.19	0.19	0.18	0.17
P	0.05	0.03	0.03	0.05	0.05	0.05	0.05	0.06
	0.18	0.16	0.15	0.18	0.18	0.19	0.18	0.17
K	0.04	0.02	0.03	0.04	0.04	0.04	0.05	0.05
	0.19	0.17	0.16	0.19	0.19	0.19	0.19	0.18

Tabella 4.6: Correlazione media (in grassetto) e deviazione standard: parametri del suolo e indici elencati in Tabella A.2 (Sentinel-2)

	NDWI	DSWI	NDGI	Norm G	Norm NIR	Norm R
TEMP	0.12	0.13	0.14	-0.16	0.16	-0.16
	0.36	0.37	0.35	0.37	0.40	0.40
HUM	0.04	0.07	0.15	-0.09	0.14	-0.15
	0.19	0.18	0.17	0.16	0.17	0.18
PH	-0.04	-0.01	0.04	-0.02	0.03	-0.04
	0.16	0.17	0.16	0.18	0.19	0.18
EC	0.00	0.01	0.04	-0.02	0.03	-0.04
	0.20	0.21	0.17	0.19	0.19	0.20
N	0.01	0.02	0.05	-0.03	0.05	-0.05
	0.19	0.20	0.17	0.19	0.18	0.18
P	0.01	0.02	0.05	-0.03	0.05	-0.05
	0.21	0.21	0.17	0.18	0.18	0.18
K	0.01	0.02	0.05	-0.02	0.04	-0.04
	0.21	0.21	0.17	0.19	0.19	0.19

Tabella 4.7: Correlazione media (in grassetto) e deviazione standard: parametri del suolo e indici elencati in Tabella A.3 (Sentinel-2)

Viceversa, gli indici del suolo valutano caratteristiche del terreno e, quindi, almeno in teoria, dovrebbero essere legati ai parametri chimico-fisici del suolo stesso. Anche in questo caso, tuttavia, la scarsa correlazione sembra imputabile alla copertura vegetativa, che, con la sua presenza, impedisce di ottenere valori di riflettanza che siano effettivamente rappresentativi delle proprietà del terreno (Tabella 4.8).

	GDVI	NDSI	MSI	RI	IO	CI
TEMP	0.14 0.31	-0.16 0.41	-0.12 0.36	0.11 0.30	-0.06 0.22	-0.05 0.22
HUM	0.10 0.14	-0.15 0.18	-0.04 0.19	0.04 0.18	-0.04 0.13	-0.03 0.13
PH	0.03 0.19	-0.04 0.18	0.04 0.16	-0.02 0.15	0.00 0.20	0.00 0.20
EC	0.00 0.20	-0.04 0.20	0.00 0.20	0.04 0.19	0.02 0.12	0.02 0.12
N	0.01 0.19	-0.05 0.19	-0.01 0.19	0.04 0.19	0.02 0.12	0.02 0.12
P	0.01 0.18	-0.05 0.18	-0.01 0.21	0.05 0.18	0.03 0.11	0.04 0.11
K	0.00 0.19	-0.04 0.19	0.00 0.21	0.04 0.19	0.02 0.11	0.02 0.11

Tabella 4.8: Correlazione media (in grassetto) e deviazione standard: parametri del suolo e indici elencati in Tabella A.4 (Sentinel-2)

4.3 Costellazione commerciale (PlanetScope)

Avendo l'accortezza di sostituire il `xarray.DataArray` di partenza con quello relativo alla costellazione PlanetScope (Listato 4.3), si può procedere in maniera del tutto analoga a quanto già visto per la costellazione Sentinel-2 (Listati 4.1 e 4.2).

```
from planet_building_matrix import planet3D
```

Listato 4.3: `DataArray` di partenza nel caso della costellazione PlanetScope

La Tabella 4.9 presenta la media e la deviazione standard delle diverse matrici di correlazione, relativamente ai parametri chimico-fisici del suolo e alle bande della costellazione PlanetScope. Tali risultati evidenziano una sostanziale assenza di correlazione tra parametri del suolo e bande satellitari, mentre sembrano suggerire una correlazione intra-parametri e intra-bande, esattamente come visto per Sentinel-2.

Utilizzando `matplotlib` e `seaborn`, librerie per la visualizzazione di dati statistici, si può facilmente ottenere una rappresentazione grafica della stessa matrice, che dovrebbe evidenziare ulteriormente quanto appena detto (Figura 4.1).

	HUM	PH	EC	N	P	K	B1	B2	B2	B4
TEMP	0.09	-0.10	0.01	0.00	0.02	0.01	-0.15	-0.19	-0.18	-0.08
	0.22	0.18	0.19	0.21	0.18	0.19	0.43	0.45	0.46	0.29
HUM		0.11	0.49	0.48	0.49	0.48	-0.08	-0.04	-0.07	0.03
		0.24	0.27	0.26	0.26	0.27	0.23	0.23	0.22	0.14
PH			0.15	0.16	0.15	0.15	-0.01	-0.04	-0.02	-0.05
			0.19	0.19	0.20	0.20	0.16	0.19	0.21	0.21
EC				0.99	0.99	0.99	-0.04	-0.04	-0.04	-0.03
				0.03	0.02	0.01	0.19	0.18	0.18	0.17
N					0.98	0.99	-0.05	-0.04	-0.04	-0.02
					0.03	0.02	0.20	0.19	0.19	0.18
P						1.00	-0.05	-0.04	-0.04	-0.03
						0.00	0.19	0.19	0.19	0.17
K							-0.05	-0.04	-0.04	-0.03
							0.20	0.19	0.19	0.17
B1								0.87	0.86	0.26
								0.09	0.14	0.25
B2									0.87	0.36
									0.13	0.23
B3										0.18
										0.30

Tabella 4.9: Correlazione media (in grassetto) e deviazione standard: parametri del suolo e indici elencati in Tabella A.1 (PlanetScope)

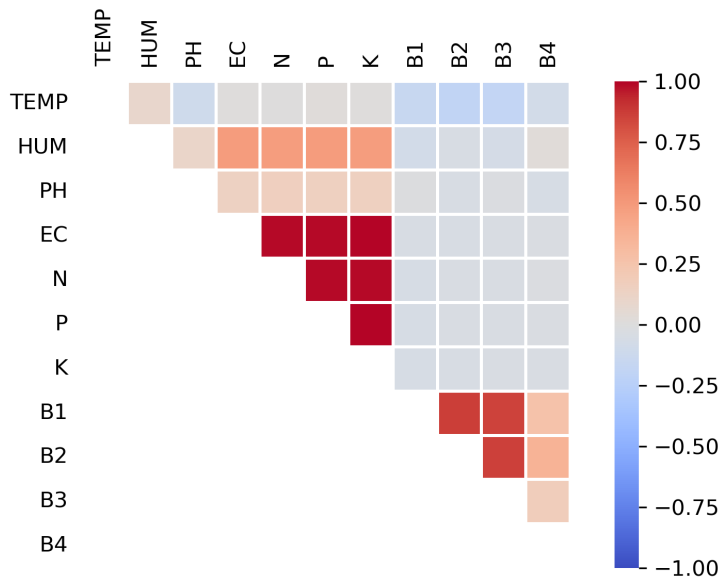


Figura 4.1: Rappresentazione della matrice di correlazione media di Tabella 4.9

Anche nel caso degli indici satellitari (Tabelle 4.10, 4.11, 4.12 e 4.13), i risultati ottenuti sono perfettamente comparabili con quelli della costellazione Sentinel-2.

	NDVI	BNDVI	GNDVI	GBNDVI	GRNDVI	RBNDVI	PAN NDVI
TEMP	0.13 0.45	0.11 0.43	0.14 0.43	0.12 0.43	0.14 0.44	0.12 0.45	0.13 0.44
HUM	0.09 0.20	0.10 0.21	0.06 0.23	0.08 0.22	0.08 0.22	0.09 0.21	0.08 0.21
PH	-0.01 0.19	-0.05 0.19	-0.01 0.20	-0.03 0.20	-0.01 0.20	-0.03 0.19	-0.02 0.20
EC	0.03 0.18	0.04 0.18	0.02 0.17	0.03 0.18	0.03 0.18	0.03 0.18	0.03 0.18
N	0.04 0.18	0.05 0.18	0.02 0.18	0.04 0.18	0.03 0.18	0.04 0.18	0.04 0.18
P	0.03 0.18	0.05 0.17	0.02 0.17	0.04 0.17	0.03 0.18	0.04 0.18	0.04 0.18
K	0.03 0.19	0.05 0.18	0.02 0.18	0.03 0.18	0.03 0.19	0.03 0.19	0.03 0.19

Tabella 4.10: Correlazione media (in grassetto) e deviazione standard: parametri del suolo e indici elencati in Tabella A.1 (PlanetScope)

	ARVI	GARI	EVI	EVI2	SAVI	MSAVI	WDRVI	BWDRVI
TEMP	0.13 0.45	0.20 0.43	0.19 0.42	0.13 0.45	0.13 0.45	0.13 0.45	0.13 0.45	0.11 0.43
HUM	0.09 0.20	0.08 0.21	0.08 0.20	0.09 0.20	0.09 0.20	0.08 0.21	0.09 0.20	0.10 0.21
PH	-0.01 0.19	0.04 0.22	0.04 0.22	-0.01 0.19	-0.01 0.19	-0.01 0.19	-0.01 0.19	-0.05 0.19
EC	0.03 0.18	0.05 0.20	0.06 0.20	0.03 0.18	0.03 0.18	0.03 0.18	0.03 0.18	0.04 0.18
N	0.04 0.18	0.05 0.21	0.06 0.22	0.04 0.18	0.04 0.18	0.04 0.18	0.04 0.19	0.05 0.18
P	0.03 0.18	0.05 0.21	0.05 0.21	0.03 0.18	0.03 0.18	0.03 0.18	0.04 0.18	0.05 0.17
K	0.03 0.19	0.05 0.21	0.05 0.21	0.03 0.19	0.03 0.19	0.03 0.19	0.03 0.19	0.05 0.18

Tabella 4.11: Correlazione media (in grassetto) e deviazione standard: parametri del suolo e indici elencati in Tabella A.2 (PlanetScope)

	NDGI	Norm G	Norm NIR	Norm R
TEMP	0.11	-0.14	0.14	-0.13
	0.39	0.39	0.44	0.45
HUM	0.12	-0.05	0.08	-0.09
	0.15	0.23	0.22	0.19
PH	0.01	0.01	-0.01	0.01
	0.15	0.20	0.20	0.19
EC	0.05	-0.01	0.03	-0.04
	0.19	0.17	0.18	0.18
N	0.05	-0.01	0.03	-0.04
	0.20	0.18	0.18	0.19
P	0.05	-0.02	0.03	-0.04
	0.20	0.17	0.18	0.18
K	0.05	-0.01	0.03	-0.03
	0.20	0.18	0.19	0.19

Tabella 4.12: Correlazione media (in grassetto) e deviazione standard: parametri del suolo e indici elencati in Tabella A.3 (PlanetScope)

	GDVI	NDSI	RI	IO	CI
TEMP	0.04	-0.13	0.15	-0.20	-0.20
	0.32	0.45	0.34	0.35	0.34
HUM	0.06	-0.09	0.01	-0.02	-0.02
	0.16	0.20	0.21	0.15	0.15
PH	-0.04	0.01	0.04	-0.06	-0.07
	0.22	0.19	0.18	0.22	0.23
EC	0.00	-0.03	0.02	-0.04	-0.04
	0.16	0.18	0.17	0.18	0.18
N	0.01	-0.04	0.02	-0.03	-0.03
	0.17	0.18	0.18	0.19	0.19
P	0.01	-0.03	0.03	-0.02	-0.02
	0.16	0.18	0.17	0.19	0.19
K	0.00	-0.03	0.03	-0.03	-0.03
	0.17	0.19	0.18	0.19	0.19

Tabella 4.13: Correlazione media (in grassetto) e deviazione standard: parametri del suolo e indici elencati in Tabella A.4 (PlanetScope)

Ad un aumento di risoluzione spaziale (3 m), quindi, sembra non corrispondere un miglioramento nei risultati ottenuti. Questo sembra coerente con il fatto che, sebbene migliore, tale risoluzione spaziale non è sufficiente a distinguere una coltura verticale come quella della vite dal resto della vegetazione spontanea presente.

Analisi temporale

Con riferimento alle informazioni sulle precipitazioni e sulle pratiche agronomiche presentate nel Capitolo 4, il presente capitolo riporta le principali considerazioni derivanti dall'analisi temporale eseguita su parametri del suolo e dati satellitari.

5.1 Considerazioni preliminari

Con il termine “analisi temporale” si fa riferimento ad una tipologia di analisi che, a parità di punto di campionamento, analizza parametri chimico-fisici del suolo e dati satellitari (intesi sia come valori di riflettanza delle singole bande sia come indici calcolati a partire da tali valori) nell'intero periodo di riferimento. Avendo già riscontrato una sostanziale assenza di correlazione tra queste due tipologie di dati, l'analisi temporale si pone l'obiettivo di rilevare eventuali differenze di comportamento tra i diversi punti di campionamento, anche tenendo conto delle precipitazioni piovose, della copertura vegetativa e delle pratiche agronomiche, riportate, rispettivamente, nelle Tabelle 4.1 e 4.2. Inoltre, prima di procedere con l'analisi vera e propria, è stata eseguita un'attività di *preprocessing* dei dati composta da una fase di *clustering*, finalizzata alla riduzione del numero di punti di campionamento da analizzare, e da una fase di *normalizzazione*, necessaria per semplificare la successiva rappresentazione grafica dei dati stessi.

5.2 Preprocessing dei dati

La fase di clustering dei punti di campionamento è stata preceduta da un'ulteriore fase preparatoria, necessaria per eliminare la dimensione temporale e, quindi, poter lavorare con un unico `pandas.DataFrame`. A questo proposito, si è pensato che la media (temporale) delle differenze rispetto alla *media di campo*¹ delle diverse bande fosse una metrica adatta per caratterizzare il comportamento di ciascuno dei punti di campionamento. In primis, per ciascun giorno di misurazioni, è stata calcolata la media di campo delle diverse bande (Listato 5.1).

¹ Relativamente a una banda satellitare, la media di campo è data dalla media dei valori di riflettanza rilevati nei punti di campionamento.

```

mean_dfs = []
for i in range(0, len(s2_dfs)):
    df = pd.DataFrame()
    for band in bands: # one mean value for each band
        df.insert(len(df.axes[1]), band, pd.Series(s2_dfs[i][band].mean()))
    mean_dfs.append(df)

```

Listato 5.1: Calcolo delle diverse medie di campo per ciascun giorno di misurazioni

In seguito, per ciascun giorno di misurazioni, è stata calcolata la differenza di punto di campionamento dalla media di campo delle diverse bande (Listato 5.3). Si noti che, per calcolare tali differenze, è stato necessario ripetere, per ciascun `pandas.DataFrame` relativo ai giorni di misurazioni, la riga con le medie di campo delle diverse bande tante volte quanti sono i punti di campionamento (Listato 5.2).

```

mean_dfs_repeated = []
for df in mean_dfs:
    temp = pd.concat([df]*35, ignore_index=True)
    mean_dfs_repeated.append(temp)

```

Listato 5.2: Operazioni preliminari al calcolo delle differenze del Listato 5.3

```

diff_from_mean_dfs = []
for i in range(0, len(s2_dfs)):
    df = pd.DataFrame()
    for band in bands:
        diff = s2_dfs[i][band] - mean_dfs_repeated[i][band]
        df.insert(len(df.axes[1]), band, pd.Series(diff))
    diff_from_mean_dfs.append(df)

```

Listato 5.3: Calcolo delle differenze rispetto alle diverse medie di campo

Infine, utilizzando il metodo `mean()` della libreria `NumPy`, si è calcolata la media (temporale) delle differenze lungo l'intero periodo di riferimento (Listato 5.4).

```

# convert each DataFrame into a Numpy array
df_arrays = [df.to_numpy() for df in diff_from_mean_dfs]

# create a 3D matrix from a list of NumPy arrays
diff_matrix = np.array(df_arrays)

# axis = 0 specifies to calculate the following along the 'dates' axis
diff_mean = np.mean(diff_matrix, axis=0)

diff_mean_df = pd.DataFrame(diff_mean, columns=bands)
diff_mean_df = diff_mean_df. abs()

```

Listato 5.4: Calcolo della media delle differenze nel periodo di riferimento

A questo punto, istanziando opportunamente la classe `AgglomerativeClustering` della libreria `scikit-learn`, si è potuta eseguire la fase di clustering (Listato 5.5). Innanzitutto, si è adattato il *clustering gerarchico* (una tipologia di clustering non supervisionato) alle caratteristiche (*features*) del dataset con il metodo `fit()` e,

successivamente, si è determinato il cluster di appartenenza di ciascun punto di campionamento con il metodo `fit_predict()`. Il numero di cluster, indicato in fase di istanziazione della classe `AgglomerativeClustering`, è stato scelto empiricamente.

```

from sklearn.cluster import AgglomerativeClustering

# empirically found that there is no difference from 5 and 6 clusters
clt = AgglomerativeClustering(n_clusters=5, affinity='euclidean')

# train model
model = clt.fit(diff_mean_df.to_numpy())

# predict clusters
clusters = pd.DataFrame(model.fit_predict(diff_mean_df.to_numpy()))

diff_mean_df["Cluster"] = clusters

```

Listato 5.5: Clustering dei punti di campionamento

Scegliendo, per ciascuno dei cluster individuati, un punto rappresentativo dell'intero cluster, è stato possibile ridurre notevolmente il numero di punti di campionamento da analizzare. Nello specifico, tali scelte sono state prese sulla base della distanza relativa di ciascun punto del cluster dalla relativa *media di cluster*.

L'intero processo di clustering è stato ripetuto in maniera del tutto analoga anche per la costellazione PlanetScope, in modo da tenere conto delle eventuali differenze legate alla diversa risoluzione spaziale. La Tabella 5.1 riporta, per entrambe le costellazioni a nostra disposizione, i punti di campionamento da analizzare.

Costellazione	Punti di campionamento selezionati
Sentinel-2	3, 14, 16, 31, 34
PlanetScope	8, 18, 24, 27, 35

Tabella 5.1: Punti di campionamento selezionati per l'analisi temporale

Come detto, per facilitare la successiva rappresentazione grafica, i parametri del suolo e i dati satellitari devono essere normalizzati nell'intervallo $[0, 1]$. Il Listato 5.6 mostra come eseguire la normalizzazione di un `pandas.DataFrame` utilizzando un'istanza della classe `MinMaxScaler` della libreria `scikit-learn`.

```

from sklearn.preprocessing import MinMaxScaler

scaler = MinMaxScaler(feature_range=(0,1))

# select data from DataArray and store it in a pandas.DataFrame
temp_s2_ndarr = sentinel3D.sel(date=date)
temp_s2_df = pd.DataFrame(temp_s2_ndarr.data, columns=bands)

s2_col_names = temp_s2_df.columns
temp_s2_df = scaler.fit_transform(temp_s2_df) # normalization
temp_s2_df = pd.DataFrame(temp_s2_df, columns=s2_col_names)

```

Listato 5.6: Esempio di normalizzazione dei valori di un `pandas.DataFrame`

5.3 Analisi dei risultati

Come anticipato, il principale obiettivo dell'analisi temporale è quello di rilevare particolari fenomeni locali ai punti di campionamento selezionati per l'analisi stessa. A tale scopo, si è utilizzata la libreria `matplotlib` per graficare e, quindi, confrontare le serie temporali relative ai parametri del suolo e ai dati satellitari (intesi sia come valori di riflettanza delle singole bande sia come indici calcolati a partire da essi).

La prima cosa che si può notare è la notevole differenza nell'andamento del *Normalized Difference Vegetatio Index* (NDVI) del punto 34 (Figura 5.2) rispetto agli altri punti selezionati per l'analisi, come, ad esempio, il punto 3 (Figura 5.1).

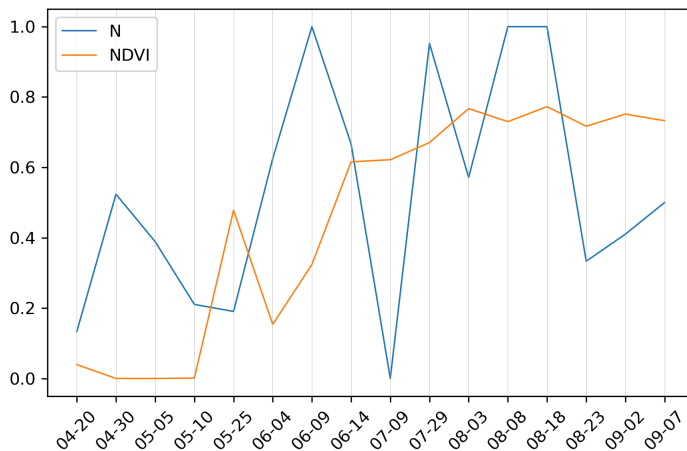


Figura 5.1: Azoto (N) e indice NDVI per il punto 3 (Sentinel-2)

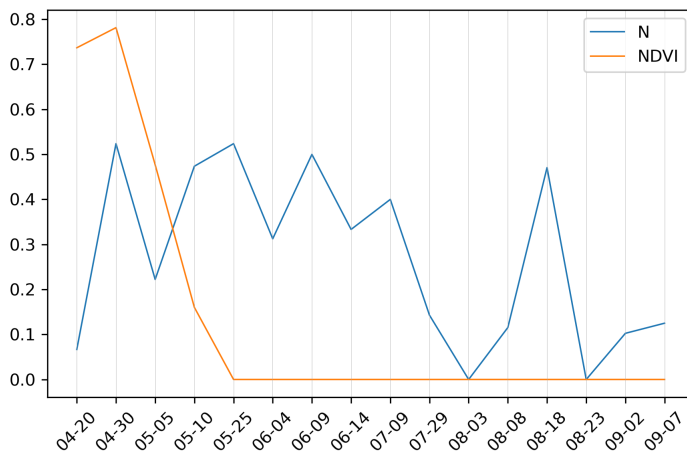


Figura 5.2: Azoto (N) e indice NDVI per il punto 34 (Sentinel-2)

Come sottolineato nell'Appendice A, l'NDVI fornisce una misura della crescita e dello stato di salute della vegetazione. A tal proposito, l'andamento del punto 34 potrebbe essere attribuito ai frequenti sfalci della vegetazione spontanea a cui è stata sottoposta la parte più giovane del vigneto. Una differenza di manutenzione di questo tipo potrebbe suggerire un diverso utilizzo della specifica porzione di vigneto, come, ad esempio, l'enoturismo, che richiede una periodica pulizia della vegetazione infestante. Si noti che l'iniziale picco dell'NDVI del punto 34 è dovuto alla pratica del *sovescio* (o *inerbimento*), ovvero “una tecnica agronomica, ampiamente diffusa in agricoltura biologica, che consiste nel rivestire il terreno occupato dalla coltura principale con una copertura erbacea, con l'obiettivo, tra gli altri, di aumentare la fertilità del terreno” [23]. Infine, anche la scelta di rappresentare l'azoto (N) non è stata casuale: infatti, come sottolineato nel Capitolo 1, l'azoto è un elemento essenziale per la crescita e la salute della vegetazione. Sebbene l'azoto presenti una naturale flessione dovuta all'assorbimento da parte della vegetazione, esso continua ad essere mediamente biodisponibile anche nel periodo successivo alla maturazione della vegetazione stessa. Si noti come la parte più giovane del vigneto (Figura 5.2) sembri essere caratterizzata da un assorbimento medio di azoto più elevato.

Anche l'andamento dell'indice DSWI del punto 34 (Figura 5.4) è particolarmente diverso rispetto a quello degli altri punti selezionati per l'analisi, come, ad esempio, il punto 14 (Figura 5.3). Come detto nell'Appendice A, il *Disease-Water Stress Index* misura lo stress idrico della vegetazione in termini di variazione del contenuto idrico. Si noti come, nel caso del punto 14, l'andamento dell'indice DSWI sia paragonabile a quello dell'indice NDVI nelle fasi di crescita iniziale, mentre si attesti al di sotto dello stesso indice in condizioni normali. Inoltre, facendo riferimento alle precipitazioni riportate nella Tabella 4.1, l'andamento dell'indice DSWI sembra essere influenzato positivamente (negativamente) dall'assenza (presenza) di rovesci.

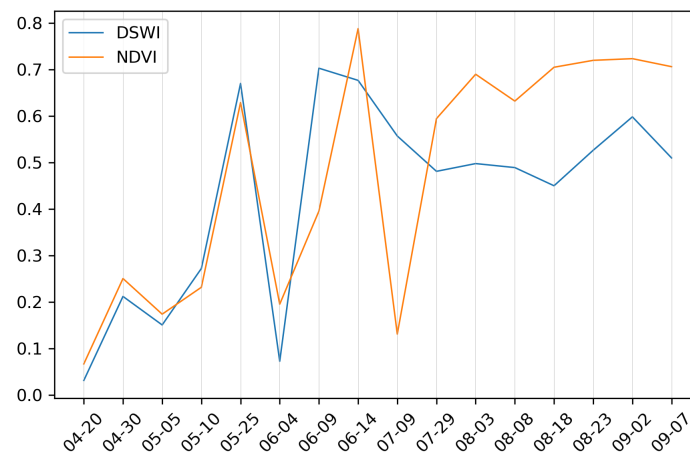


Figura 5.3: Indice NDVI e indice DSWI per il punto 14 (Sentinel-2)

Le frequenti operazioni di sfalcio della vegetazione spontanea a cui si è sottoposta la parte più giovane del vigneto sembrano aver influito notevolmente sull'andamento dell'indice DSWI, oltre che, naturalmente, su quello dell'indice NDVI (Figura 5.4). Con buona probabilità, in assenza di una folta copertura vegetativa, le prestazioni dell'indice DSWI non sono rappresentative dell'area sottoposta ad analisi. Inoltre, si noti come, nel caso del punto 34, anche la fase iniziale di crescita sia caratterizzata da un valore di DSWI superiore a quello dell'NDVI. Tale comportamento può essere attribuito alla stessa pratica del *sovescio*, che presenta, tra gli altri, lo svantaggio di “indurre una competizione idrica tra le specie usate per l'inerbimento e la vite” [23].

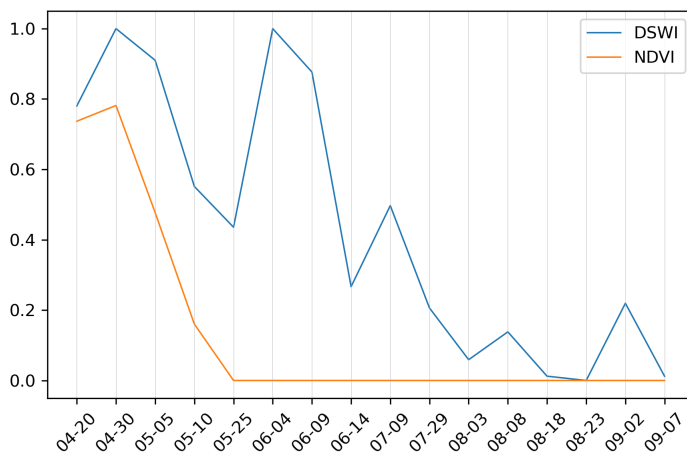


Figura 5.4: Indice NDVI e indice DSWI per il punto 34 (Sentinel-2)

Il punto 34 presenta un andamento differente da quello degli altri punti, come, ad esempio, il punto 3 (Figura 5.5), anche per l'indice MSI (Figura 5.6). Come indicato nell'Appendice A, il *Moisture Soil Index* (MSI) permette di rilevare la variazione di umidità del suolo (*soil moisture*) causata da elevati livelli di evotraspirazione. Tale indice assume valori nell'intervallo $[0, 1]$, dove 0 indica una condizione di siccità estrema, mentre 1 indica una condizione di umidità estrema [24]. A questo punto sembra abbastanza evidente che a valori crescenti dell'indice NDVI corrispondano valori decrescenti dell'indice MSI; infatti, una copertura vegetativa rigogliosa presenta un maggiore assorbimento di acqua e sostanze nutritive dal terreno, determinando una naturale flessione nell'umidità del suolo. Anche in questo caso, perciò, le frequenti operazioni di manutenzione vegetativa eseguite nella parte più giovane del vigneto hanno determinato un comportamento differente per l'indice in analisi.

A questo punto, non rimane altro da fare che eseguire l'analisi temporale sui punti di campionamento selezionati per la costellazione PlanetScope. Infatti, nota la correlazione esistente tra gli indici satellitari presentati nell'Appendice A, sarebbe alquanto ripetitivo riportare l'analisi temporale eseguita per i restanti indici della costellazione Sentinel-2.

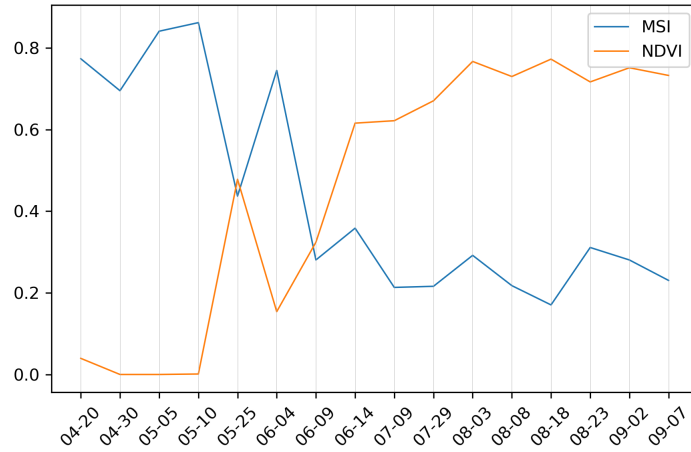


Figura 5.5: Indice NDVI e indice MSI per il punto 3 (Sentinel-2)

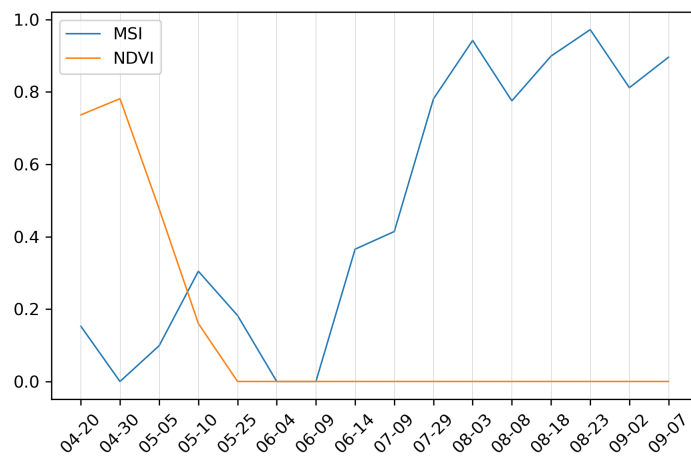


Figura 5.6: Indice NDVI e indice MSI per il punto 34 (Sentinel-2)

Anche nel caso della costellazione PlanetScope, la parte più giovane del vigneto (Figura 5.8) presenta un andamento differente rispetto al resto, come mostrato, ad esempio, nel caso del punto 8 (Figura 5.7). Si noti come ad un aumento di risoluzione spaziale corrisponda un miglioramento della “granularità” dell’indice NDVI, soprattutto nel caso della parte giovane del vigneto (Figura 5.8).

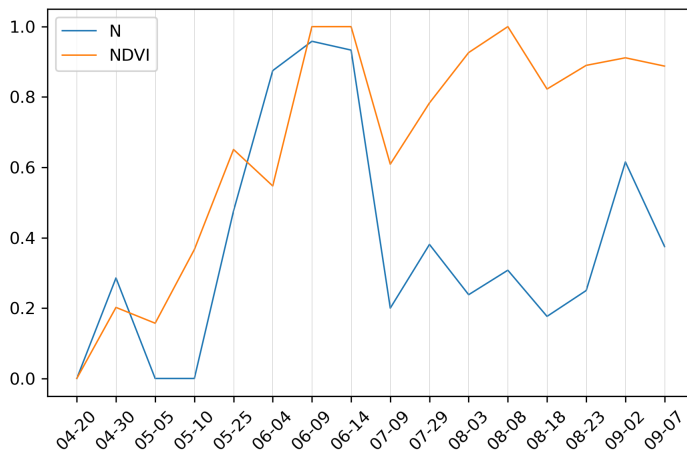


Figura 5.7: Azoto (N) e indice NDVI per il punto 8 (PlanetScope)

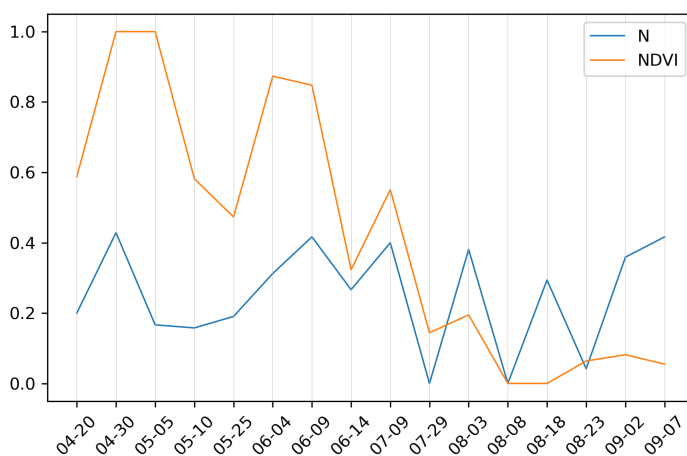


Figura 5.8: Azoto (N) e indice NDVI per il punto 35 (PlanetScope)

Sfortunatamente, a causa del minor numero di bande a disposizione per la costellazione PlanetScope, non è possibile eseguire lo stesso confronto anche per gli indici DSWI e MSI. Tuttavia, considerando quanto osservato per l'indice NDVI, ci sono ottime probabilità che l'aumento di risoluzione spaziale determini un netto miglioramento anche nella risoluzione dei restanti indici satellitari.

Conclusioni

La presente dissertazione si è posta l'obiettivo di estrarre informazioni a partire dai parametri chimico-fisici del suolo e dai dati satellitari acquisiti per un'area soggetta a viticoltura. A tal proposito, il Capitolo 1 ha presentato una breve introduzione sul concetto di suolo, sulle sue caratteristiche principali e sugli *elementi essenziali* (macroelementi e microelementi) in esso contenuti, soffermandosi anche sugli strumenti e sulle metodologie di analisi comunemente utilizzate per rilevarli. Il Capitolo 2, invece, ha introdotto il lettore al concetto di *remote sensing satellitare*, presentando la sensoristica montata a bordo dei satelliti in orbita e le principali caratteristiche dei dati satellitari acquisiti tramite essa. Seppur, chiaramente, non esaustivo, tale preambolo si può rivelare particolarmente utile per coloro che, come chi sta scrivendo, non hanno avuto modo di confrontarsi precedentemente con questi argomenti.

Nel dettagliare lo specifico caso di studio, il Capitolo 3 ha evidenziato l'aspetto di novità del presente elaborato rispetto ai casi di studio presentati nella letteratura citata nel corso dello stesso. Infatti, anziché ricorrere alle classiche analisi chimico-fisiche di laboratorio (particolarmente costose e, quindi, non sempre ripetibili nel breve periodo), la fase di acquisizione dei dati del suolo è stata eseguita utilizzando il dispositivo di misura portatile mostrato in Figura 1.5, che ha consentito di eseguire misurazioni *in situ* lungo l'intero ciclo produttivo della vite. A questo, inoltre, si deve aggiungere la disponibilità, per nulla scontata, dei dati meteorologici puntuali rilevati dal prototipo di stazione IoT mostrato in Figura 1.4. Lo stesso Capitolo 3, infine, ha descritto brevemente la fase di acquisizione dei dati satellitari e quella relativa all'organizzazione dell'intero dataset in ambiente Python.

L'analisi spaziale riportata nel Capitolo 4 ha evidenziato una sostanziale assenza di correlazione tra parametri del suolo e bande satellitari, mentre ha suggerito una correlazione intra-parametri e intra-bande di moderata/forte entità. Risultati del tutto analoghi sono stati riscontrati per gli indici satellitari calcolati a partire dai valori di riflettanza delle singole bande. Come detto, tale comportamento potrebbe essere dovuto sia alle precipitazioni piovose registrate nel periodo di riferimento sia alla differente manutenzione vegetativa a cui sono state sottoposte alcune parti del vigneto. Infatti, l'aumento di umidità del suolo e la differenza di copertura vegetativa possono determinare una variazione nei valori di riflettanza delle singole bande; tali variazioni possono aver influito direttamente sulla correlazione ricercata.

Anche alla luce dei risultati dell'analisi spaziale, l'analisi temporale descritta nel Capitolo 5 si è posta l'obiettivo di rilevare le eventuali differenze di comportamento esistenti tra i diversi punti di campionamento. Analizzando gli andamenti temporali dei parametri del suolo e degli indici satellitari è stato possibile rilevare l'esecuzione di pratiche agronomiche come, ad esempio, la sopracitata difformità di manutenzione vegetativa tra parti diverse del vigneto o la più specifica tecnica del *sovescio*. Nel confronto tra costellazioni, inoltre, è stato riscontrato un netto miglioramento nella "granularità" degli andamenti temporali all'aumentare della risoluzione spaziale.

Alcuni dei limiti evidenziati in fase di analisi sono da ricondurre direttamente al particolare caso di studio selezionato. Infatti, se, da un lato, la collaborazione con l'azienda vitivinicola è risultata fondamentale per l'intera fase di acquisizione dei dati del suolo, dall'altra ha introdotto numerosi fattori di variabilità che hanno, almeno parzialmente, influenzato la fase di analisi. Inoltre, nella maggior parte dei casi, la vite si sviluppa principalmente come coltura verticale e, perciò, essa risulta difficilmente analizzabile attraverso l'uso di immagini satellitari (specialmente nel caso di risoluzione spaziale non elevata). Probabilmente, risultati migliori sarebbero stati ottenuti nel caso si fossero analizzate viticole *a pergola* (o "*a tendone*").

In conclusione, ove possibile, sarebbe preferibile condurre un'analisi come quella portata avanti in questa dissertazione in un ambiente più controllato, sottoposto a pratiche agronomiche omogenee e meno soggetto a fattori condizionanti esterni. In particolare, sarebbe interessante analizzare tipologie di colture diverse dalla vite. Si consiglia, infine, di approfondire le possibilità offerte dalla tecnologia satellitare, specialmente per ciò che concerne le operazioni di preprocessing dei dati satellitari volte a ridurre/eliminare l'influenza di numerosi fattori esterni come, ad esempio, la specifica composizione dell'atmosfera o la presenza di nuvole sottili.

A

Gli indici spettrali

Nel ribadire le potenzialità legate all'utilizzo dei dati satellitari, la presente appendice caratterizza gli indici spettrali utilizzati in fase di analisi (Capitolo 4 e Capitolo 5).

A.1 Considerazioni di carattere generale

Gli indici spettrali vengono comunemente utilizzati per evidenziare particolari caratteristiche della superficie terrestre, come, ad esempio, la presenza di vegetazione, la composizione del suolo e la profondità degli oceani. Questi indici sono calcolati tramite equazioni matematiche che coinvolgono due o più bande dello spettro elettromagnetico e, solitamente, si presentano sotto forma di rapporto (divisione) per riuscire a compensare alcuni effetti indesiderati, come, ad esempio, i fenomeni atmosferici. Gli indici spettrali vengono formulati sulla base delle proprietà spettrali degli oggetti di interesse e, per questo motivo, indici con finalità diverse fanno riferimento a differenti porzioni dello spettro EM. Ad esempio, gli indici dedicati all'analisi della vegetazione sono formulati sulla base del fatto che una vegetazione sana presenta: *i*) un grande assorbimento di luce blu e rossa nella regione visibile, *ii*) una buona riflettanza nella regione *near-infrared* (NIR) e, al contrario, *iii*) una scarsa riflettanza nella regione *shortwave-infrared* (SWIR) (Figura 2.6).

Sebbene l'elaborato riguardi più precisamente le proprietà chimico-fisiche del suolo, nella fase di analisi si è scelto di tenere in considerazione anche gli indici di vegetazione, in quanto la maggior parte degli indici disponibili per Sentinel-2 e PlanetScope sono dedicati proprio all'analisi di quest'ultima¹.

A.2 Gli indici di vegetazione

Il *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) è, sicuramente, l'indice vegetativo più utilizzato per monitorare la crescita e lo stato di salute della vegetazione [25]. L'NDVI viene calcolato a partire dalle misure di riflettanza acquisite nelle regioni

¹ <https://www.indexdatabase.de/>

visibile (rosso) e near-infrared (NIR), e assume valori nell'intervallo $[-1, +1]$. In particolare, valori positivi (0.3-0.8) indicano un'area contenente una fitta vegetazione, mentre valori negativi indicano la presenza di nuvole, acqua e neve. Sostituendo la banda RED con tutte le possibili combinazioni delle bande RED, GREEN e BLUE, si ottengono numerose varianti dell'NDVI, alcune delle quali (GNDVI e GBNDVI) si comportano anche meglio di esso nel predire l'indice di copertura fogliare (*Leaf Area Index*, LAI) di una determinata area [26]. La Tabella A.1 riporta la formulazione matematica dell'NDVI e delle sue principali varianti.

Indice	Formulazione	S-2	PS
NDVI	$\frac{NIR - RED}{NIR + RED}$	X	X
BNDVI	$\frac{NIR - BLUE}{NIR + BLUE}$	X	X
GNDVI	$\frac{NIR - GREEN}{NIR + GREEN}$	X	X
GBNDVI	$\frac{NIR - (GREEN + BLUE)}{NIR + (GREEN + BLUE)}$	X	X
GRNDVI	$\frac{NIR - (GREEN + RED)}{NIR + (GREEN + RED)}$	X	X
RBNDVI	$\frac{NIR - (RED + BLUE)}{NIR + (RED + BLUE)}$	X	X
PAN NDVI	$\frac{NIR - (GREEN + RED + BLUE)}{NIR + (GREEN + RED + BLUE)}$	X	X

Tabella A.1: Indici di vegetazione: NDVI e principali varianti

Si tenga presente che il calcolo dell'NDVI risente di una serie di fattori esterni, come, ad esempio, la specifica composizione dell'atmosfera, la presenza di nuvole sottili e la variazione di umidità del suolo in seguito a fenomeni meteorologici [27]. Per affrontare queste limitazioni sono stati formulati numerosi indici alternativi, tra cui l'*Atmospherically Resistant Vegetation Index* (ARVI), l'*Enhanced Vegetation Index* (EVI) e il *Soil-Adjusted Vegetation Index* (SAVI).

L'indice ARVI compensa gli effetti atmosferici utilizzando la differenza di riflettanza tra le bande RED e BLUE per correggere il valore di riflettanza della banda RED; in questo modo, a parità di gamma dinamica, esso risulta quattro volte meno sensibile agli effetti atmosferici rispetto all'NDVI [27]. Il *Green Atmospherically Resistant Vegetation Index* (GARI) compensa gli effetti atmosferici come l'ARVI ma, a differenza di quest'ultimo, risulta maggiormente sensibile alla concentrazione di clorofilla, permettendo di monitorare il tasso di fotosintesi e lo stress vegetale [28].

L'indice EVI risulta meno sensibile al rumore atmosferico (distorsioni della luce causate dalle particelle presenti nell'aria) e alla copertura del suolo presente al di sotto della vegetazione; inoltre, esso non satura come l'NDVI nel caso di aree con una vegetazione particolarmente densa [29]. Si noti che esiste una formulazione dell'indice EVI, nota come EVI2, che può essere utilizzata per sensori privi della banda BLUE, come, ad esempio, l'*Advanced Very High Resolution Radiometer* (AVHRR).

L'indice SAVI minimizza l'influenza della luminosità del suolo causata da una scarsa copertura vegetativa, introducendo un fattore di correzione L che dovrebbe variare inversamente con l'aumentare della vegetazione presente; in particolare, si ha $L = 1$ nel caso di scarsa copertura vegetativa, $L = 0$ nel caso di elevata copertura vegetativa, e $L = 0.5$ nel caso di copertura vegetativa intermedia [30]. Una versione modificata del SAVI, nota come *Modified Soil-Adjusted Vegetation Index* (MSAVI), consente di aumentare la gamma dinamica del segnale di vegetazione e di ridurre ulteriormente l'influenza del segnale proveniente dal suolo sottostante [31].

Il *Wide Dynamic Range Vegetation Index* (WDRVI) introduce un coefficiente di correzione a , con un valore di 0.1-0.2, che incrementa la correlazione con la componente vegetativa; inoltre, utilizzando le stesse bande dell'NDVI, consente di aumentare il range dinamico del segnale di vegetazione, permettendo una migliore caratterizzazione delle proprietà fisiologiche e fenologiche della vegetazione [32]. Si noti che esiste anche una formulazione alternativa, nota come BWDRVI, che utilizza la banda BLUE al posto della RED (utile per sensori privi della banda RED). La Tabella A.2 riporta la formulazione matematica dei principali indici che migliorano le prestazioni dell'NDVI.

Indice	Formulazione	S-2	PS
ARVI	$-0.18 + 1.17 \left(\frac{NIR - RED}{NIR + RED} \right)$	X	X
GARI	$\frac{NIR - (GREEN - (BLUE - RED))}{NIR - (GREEN + (BLUE - RED))}$	X	X
EVI	$2.5 \left(\frac{NIR - RED}{NIR + 6RED - 7.5BLUE + 1} \right)$	X	X
EVI2	$2.4 \left(\frac{NIR - RED}{NIR + RED + 1} \right)$	X	X
SAVI	$(1 + L) \left(\frac{NIR - RED}{NIR + RED + L} \right)$	X	X
MSAVI	$0.5 \left(2NIR + 1 - \sqrt{(2NIR + 1)^2 - 8(NIR - RED)} \right)$	X	X
WDRVI	$\frac{aNIR - RED}{aNIR + RED}$	X	X
BWDRVI	$\frac{aNIR - BLUE}{aNIR + BLUE}$	X	X

Tabella A.2: Indici di vegetazione: miglioramento delle prestazioni del NDVI

Il *Normalized Difference Water Index* (NDWI) misura il contenuto idrico della vegetazione. Sebbene venga calcolato in maniera simile all'indice NDVI, esso risulta meno sensibile agli effetti atmosferici e all'influenza della luminosità del suolo [33].

Il *Disease-Water Stress Index* (DSWI) misura lo stress idrico della vegetazione (in termini di variazione del contenuto idrico) [34], mentre il *Normalized Difference Green Red Index* (NDGI) misura il *potenziale idrico*² a livello delle foglie [35].

² *Potenziale idrico*: energia che determina il movimento e la direzione del flusso idrico attraverso tutte le membrane cellulari, i tessuti e gli organi della pianta.

Altri indici, formulati a partire dalla combinazione delle bande GREEN, RED e NIR, evidenziano diverse proprietà della vegetazione. Ad esempio, il *Normalized NIR* (Norm NIR) può essere utilizzato per predire il fabbisogno di azoto (N) di certe tipologie di vegetazione, come, ad esempio, il mais [36].

La Tabella A.3 riporta la formulazione matematica degli indici sopra citati.

Indice	Formulazione	S-2	PS
NDWI	$\frac{NIR - SWIR1}{NIR + SWIR1}$	X	-
DSWI	$\frac{NIR + GREEN}{SWIR1 + RED}$	X	-
NDGI	$\frac{GREEN - RED}{GREEN + RED}$	X	X
Norm G	$\frac{GREEN}{NIR + RED + GREEN}$	X	X
Norm NIR	$\frac{NIR}{NIR + RED + GREEN}$	X	X
Norm R	$\frac{RED}{NIR + RED + GREEN}$	X	X

Tabella A.3: Indici di vegetazione: monitoraggio di condizioni specifiche

A.3 Gli indici del suolo

L'analisi delle immagini iperspettrali risulta particolarmente utile nel determinare le proprietà del suolo; tuttavia, i risultati ottenuti sono spesso influenzati dalle caratteristiche del suolo stesso, come, ad esempio, il colore, la tessitura e la presenza di materiale organico [37, 22]. Si tenga presente che non sono ancora stati raggiunti risultati definitivi nella formulazione teorica degli indici del suolo; infatti, la maggior parte degli studi sul suolo avviene su scala regionale e, quindi, i relativi risultati sono rappresentativi soltanto a questo livello [38].

Fatte queste precisazioni, di seguito vengono descritti brevemente gli indici del suolo selezionati per l'analisi di cui ai Capitoli 4 e 5.

Il *Generalized Difference Vegetation Index* (GDVI) risulta molto valido nella caratterizzazione del suolo e nella valutazione del suo stato di *degradazione*³. In particolare, il GDVI consente anche di determinare la salinità dei suoli contaminati dal sale (*salt-affected land*), cioè quei suoli in cui la presenza di sali interferisce con la normale crescita vegetativa [39]. Anche il *Normalized Difference Salinity Index* (NDSI) può essere utilizzato per identificare suoli affetti da elevata salinità e valutare il relativo stato di degradazione salina [40].

Il *Moisture Stress Index* (MSI), invece, permette di rilevare la variazione di umidità del suolo (*soil moisture*) causata da elevati livelli di evotraspirazione [41].

³ *Degradazione* (del suolo): processo degenerativo e irreversibile, spesso causato dall'uomo, che si risolve nella totale scomparsa del suolo o nella perdita della sua fertilità

Il *Soil Redness Index* (RI) viene utilizzato per valutare la mineralogia del suolo, compresa l'eventuale presenza di ferro [40]. Analogamente, l'indice *Iron Oxide* (IO) consente di valutare il contenuto di ferro del suolo [42].

Il Soil Crusting Index (CI), infine, permette di rilevare l'eventuale presenza di una scarsa infiltrazione e di un ridotto scambio di aria tra il suolo e l'atmosfera [43].

La Tabella A.4 riporta la formulazione matematica degli indici sopracitati.

Indice	Formulazione	S-2	PS
GDVI	$NIR - GREEN$	X	X
NDSI	$\frac{RED - NIR}{RED + NIR}$	X	X
MSI	$\frac{SWIR1}{NIR}$	X	-
RI	$\frac{R^2}{B * G^3}$	X	X
IO	$\frac{RED}{BLUE}$	X	X
CI	$\frac{RED - BLUE}{RED + BLUE}$	X	X

Tabella A.4: Indici del suolo: salinità, mineralogia e altre condizioni specifiche

Riferimenti bibliografici

- [1] National Research Council. *Precision Agriculture in the 21st Century: Geospatial and Information Technologies in Crop Management*. The National Academies Press, Washington, DC, 1997.
- [2] Lindbo D, Robinson C, and Kozlowski D. *Know Soil, Know Life*. SSSA, Madison, WI, 2012.
- [3] Soil Science Glossary Terms Committee and Soil Science Society of America. *Glossary of Soil Science Terms 2008*. ASA, CSSA, SSSA, Madison, WI, 2008.
- [4] Certini G and Ugolini F. *Basi di pedologia*. Edagricole, 2nd edition, 2021.
- [5] Brady N and Weil R. *The Nature and Properties of Soils*. Pearson, 14th edition, 2007.
- [6] Hartemink A. *Advances in Agronomy. Volume 137*, chapter “The definition of soil since the early 1800s”, pages 73–126. Academic Press, 2016.
- [7] Violante P. *Chimica e fertilità del suolo*. Edagricole, Bologna, 1st edition, 2013.
- [8] AGQ Labs. Ciclo degli elementi nutritivi e fertilità del suolo. *AGQ Labs Italia*, 2020.
- [9] Giandon P and Bortolami P. *L'interpretazione delle analisi del terreno*. ARPAV, 2007.
- [10] Sequi P et al. *Chimica del suolo*. Pàtron, 1989.
- [11] Pandini F. *L'interpretazione delle analisi del terreno*. Studio AGRON, 2018.
- [12] McBratney A and Taylor J. PV or not PV? In *5th International Symposium on Cool Climate Viticulture and Oenology: Workshop on Precision Management*, Melbourne, Australia, January 2020.
- [13] Glickman T, editor. *Glossary of Meteorology*. American Meteorological Society, 2nd edition, 2000.
- [14] Campbell G. *The researcher's complete guide to soil moisture*. MeterGroup, 2018.
- [15] *Soil Parameter Rapid Measurement Platform*. Ltd., Wihai Jingxun Changtong Electronic Technology Co.
- [16] Sabins F. *Remote Sensing: Principles and Interpretation*. Freeman & Co., New York, NY, 3rd edition, 1996.
- [17] Lillesand M, Kiefer W, and Chipman W. *Remote Sensing and Image Interpretation*. John Wiley & Sons, New York, NY, 5th edition, 2004.

- [18] Kerle N, Janssen L. F. L, and Huurneman C. G, editors. *Principles of Remote Sensing*. ITC Educational Textbook Series. The International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation (ITC), 3rd edition, 2004.
- [19] Lavender S and Lavender A. *Practical Handbook of Remote Sensing*. CRC Press, 2016.
- [20] Canada Centre for Remote Sensing. *Fundamentals of Remote Sensing*. 2008.
- [21] Ross S. M. *Introduzione alla statistica*. Apogeo Education, 2014.
- [22] Baumgardner M. F, Silva L. F, Biehl L. L, and Stoner E. R. Reflectance Properties of Soils. volume 38 of *Advances in Agronomy*, pages 1–44. Academic Press, 1986.
- [23] Sorice C. Come migliorare la qualità dei terreni in viticoltura biologica. *Tracce Technologies*, 2020. URL <https://www.tracetech.it/wine-risorse>.
- [24] Saha A, Patil M, Goyal V, and Rathore D. Assessment and Impact of Soil Moisture Index in Agricultural Drought Estimation Using Remote Sensing and GIS Techniques. volume 7, 2018.
- [25] Rouse J, Haas R. H, Deering D, Schell J. A, and Harlan J. Monitoring the Vernal Advancement and Retrogradation of Natural Vegetation. 1973.
- [26] Wang F, Huang J, Tang Y, and Wang X. New Vegetation Index and Its Application in Estimating Leaf Area Index of Rice. *Rice Science*, 14(3):195–203, 2007.
- [27] Kaufman Y. J and Tanre D. Atmospherically resistant vegetation index (ARVI) for EOS-MODIS. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 30(2):261–270, 1992.
- [28] Gitelson A. A, Kaufman Y. J, and Merzlyak M. N. Use of a green channel in remote sensing of global vegetation from EOS-MODIS. *Remote Sensing of Environment*, 58(3):289–298, 1996.
- [29] Huete A. R, Didan K, Miura T, Rodriguez E. P, Gao X, and Ferreira L. G. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*, 83(1):195–213, 2002.
- [30] Huete A. R. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing of Environment*, 25(3):295–309, 1988.
- [31] Qi J, Chehbouni A, Huete A. R, Kerr Y. H, and Sorooshian S. A modified soil adjusted vegetation index. *Remote Sensing of Environment*, 48(2):119–126, 1994.
- [32] Gitelson A. A. Wide Dynamic Range Vegetation Index for Remote Quantification of Biophysical Characteristics of Vegetation. *Journal of Plant Physiology*, 161(2):165–173, 2004.
- [33] Gao B. NDWI — A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sensing of Environment*, 58(3): 257–266, 1996.
- [34] Apan A, Held A, Phinn S, and Markley J. Formulation and assessment of narrow-band vegetation indices from EO1 Hyperion imagery for discriminating sugarcane disease. *Proceedings of the Spatial Sciences Conference*, 2003.
- [35] Chamard Ph. C, Guenegou M. C, Lerhun J, Levasseur J., and Togola M. Utilisation des bandes spectrales du vert et du rouge pour une meilleure évaluation des formations végétales actives. In *Congrès AUPELF-UREF*, 1991.

- [36] Sripada R, Heiniger R, White J, and Meijer A. Aerial Color Infrared Photography for Determining Early In-Season Nitrogen Requirements in Corn. *Agronomy Journal - AGRON J*, 98, 2006.
- [37] Ben-Dor E and Banin A. Visible and near-infrared (0.4–1.1 μm) analysis of arid and semiarid soils. *Remote Sensing of Environment*, 48(3):261–274, 1994.
- [38] Fang Q, Hanlie H, Zhao L, Kukolich S, Yin K, and Wang C. Visible and near-infrared reflectance spectroscopy for investigating soil mineralogy. *Journal of Spectroscopy*, 2018, 2018.
- [39] Wei Y, Ding J, Yang S, Wang F, and Wang C. Soil salinity prediction based on scale-dependent relationships with environmental variables by discrete wavelet transform in the Tarim Basin. *CATENA*, 196, 2021.
- [40] Khan N. M, Rastoskuev V. V, Sato Y, and Shiozawa S. Assessment of hydrosaline land degradation by using a simple approach of remote sensing indicators. *Agricultural Water Management*, 77(1):96–109, 2005.
- [41] Zeng Y, Feng $\dot{\iota}$, and Xiang N. Assessment of soil moisture using Landsat ETM+ Temperature/Vegetation index in semiarid environment. 2004.
- [42] Dogan H. Applications of remote sensing and Geographic Information Systems to assess ferrous minerals and iron oxide of Tokat province in Turkey. *International Journal of Remote Sensing - INT J REMOTE SENS*, 29:221–233, 2008.
- [43] Karnieli A. Development and implementation of spectral crust index over dune sands. *International Journal of Remote Sensing - INT J REMOTE SENS*, 18: 1207–1220, 1997.