

POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria per l'Ambiente e
il Territorio



TESI DI LAUREA MAGISTRALE

**Elaborazione di dati Sentinel-1 in Google
Earth Engine per la stima dell'umidità del
suolo e dei volumi di irrigazione in aree
agricole**

Relatori

Prof. Pierluigi Claps
Ing. Matteo Rolle
Prof.ssa Stefania Tamea

Candidato

Giuseppe Volpini
(Matricola 262444)

ANNO ACCADEMICO 2020/2021

RIASSUNTO

Circa il 70% dei prelievi idrici destinati al consumo umano è impiegato in agricoltura per scopi irrigui. I terreni irrigati rappresentano il 20% delle aree coltivate a livello mondiale e forniscono il 40% del cibo prodotto nel mondo. A causa dell'incremento demografico e dell'effetto dei cambiamenti climatici, si prevede che, nei prossimi anni, si accentuerà il problema della scarsità d'acqua, con impatti negativi sull'economia del settore agricolo e sulla resa dei raccolti. Questo scenario si considera ancora più critico dal momento che la richiesta globale di cibo crescerà assieme alla popolazione del pianeta. Si rende, dunque, necessario attuare delle misure di mitigazione e adattamento ai cambiamenti climatici in campo agricolo che prevedano il monitoraggio delle colture nei periodi di siccità e la pianificazione di un'efficace gestione delle risorse irrigue. Per fare ciò, è utile valutare l'umidità del suolo, che svolge un ruolo chiave all'interno del ciclo dell'acqua. Poiché le misurazioni in situ forniscono delle informazioni puntuali e con una copertura temporale limitata, il telerilevamento rappresenta una soluzione alternativa che permette di mappare il contenuto d'acqua nel suolo su vaste aree e con un'elevata frequenza di ripetizione. I satelliti consentono di ricavare dei dati così estesi in termini di volume, varietà e velocità da richiedere delle specifiche tecnologie per il loro trattamento, come le piattaforme di cloud computing. L'obiettivo principale di questo studio è quello di investigare la possibilità di stimare l'umidità del suolo da remoto, attraverso l'applicazione di metodologie basate sull'utilizzo di dati SAR Sentinel-1, sfruttando le potenzialità di archiviazione e di calcolo degli ambienti cloud. Tra le piattaforme di cloud computing attualmente disponibili, si è scelto di operare in Google Earth Engine (GEE), che è accessibile gratuitamente e ha una maggiore maturità di sviluppo rispetto a soluzioni più recenti. È, inoltre, di facile utilizzo ed è dotato di strumenti per la riproducibilità delle analisi. Per la valutazione dell'umidità del suolo, si è applicato il TU Wien Change Detection Method, che è particolarmente indicato in presenza di informazioni multitemporali ed è facilmente implementabile all'interno della piattaforma. I risultati del modello sviluppato in GEE sono, poi, stati convalidati con delle misurazioni in loco registrate a

Cabrières-d'Avignon, nel Sud della Francia, ottenendo un valore di RMSD di 6,6% vol. Quindi, nonostante le ipotesi semplificative del modello, l'algoritmo si è considerato abbastanza accurato da poter essere utilizzato in altre applicazioni. Il metodo è stato, infine, applicato su di un'area di 1 km² presso Rivarolo Canavese, in Piemonte, ricadente all'interno del territorio del Consorzio Irriguo Ovest Torrente Orco, producendo dei risultati incoraggianti. L'andamento dell'umidità del suolo si è dimostrato coerente con i dati di precipitazione, mentre, per rilevare il segnale di irrigazione, a causa dell'eccessivo frazionamento dei terreni, si è reso necessario svolgere indagini a una scala più dettagliata. Una volta individuati i picchi di umidità legati all'irrigazione, applicando l'equazione del bilancio idrologico del suolo, si sono valutati i volumi irrigui. Questi sono, poi, stati confrontati con i volumi idrici transitanti nel canale di Rivarolo, che serve l'area di studio, per verificarne il grado di attendibilità.

ABSTRACT

About 70% of the water taken for human consumption is used in agriculture for irrigation purposes. Irrigated land represents 20% of the world's cultivated areas and provides 40% of the food produced in the world. Due to population growth and the effect of climate change, it is expected that the problem of water scarcity will increase in the coming years, with negative impacts on the economy of the agricultural sector and on crop yields. This scenario is considered even more critical as the global demand for food will grow together with the planet's population. It is therefore necessary to implement mitigation and adaptation measures to climate change in agriculture that include monitoring crops in periods of drought and planning an effective management of irrigation resources. To do this, it is useful to evaluate the soil moisture, which plays a key role within the water cycle. Since in situ measurements provide localized information and with a limited time coverage, remote sensing represents an alternative solution that enables to map the water content in the soil over large areas and with a high repetition frequency. Satellites make it possible to obtain data so extensive in terms of volume, variety and velocity that specific technologies are required for their processing, such as cloud computing platforms. The main objective of this study is to investigate the possibility of remotely estimating soil moisture, through the application of methodologies based on the use of Sentinel-1 SAR data, exploiting the storage and computing potential of the cloud environments. Among the cloud computing platforms currently available, we have chosen to operate in Google Earth Engine (GEE), which is accessible for free and has a greater development maturity with respect to more recent solutions. It is also easy to use and it is equipped with tools for reproducibility of the analysis. For the evaluation of soil moisture, the TU Wien Change Detection Method was applied, which is particularly suitable in the presence of multitemporal information and is easily implemented within the platform. The results of the model developed in GEE were then validated with in situ measurements recorded in Cabrières-d'Avignon, in the Southern France, obtaining an RMSD value of 6.6% vol. Therefore, despite the simplifying assumptions of the model, the algorithm was considered accurate enough to be used in other applications. Finally, the method

was applied to an area of 1 km² near Rivarolo Canavese, in Piedmont, within the territory of the Consorzio Irriguo Ovest Torrente Orco, producing encouraging results. The soil moisture trend proved to be consistent with rainfall data, while, to detect the irrigation signal, due to the excessive subdivision of the land, it was necessary to carry out investigations on a more detailed scale. Once the humidity peaks related to irrigation were identified, the irrigation volumes were evaluated by applying the soil water balance equation. These volumes were compared with the water volumes passing through the Rivarolo Channel, which serves the study area, to verify the degree of reliability.

SOMMARIO

Riassunto	III
Abstract.....	V
Indice delle figure.....	XI
Indice delle tabelle.....	XV
Lista delle abbreviazioni	XVII
1. Introduzione.....	1
1.1 Il ruolo dell'umidità del suolo nell'agricoltura	1
1.2 L'impatto del cambiamento climatico e dell'incremento demografico sull'agricoltura.....	1
1.3 Remote sensing, big data e cloud computing in ambito agricolo.....	3
1.4 Obiettivi e struttura della tesi	4
2. Panoramica dei prodotti satellitari di umidità del suolo esistenti	7
2.1 L'umidità del suolo e i metodi di misurazione	7
2.2 Elementi di telerilevamento.....	9
2.3 I prodotti satellitari di umidità del suolo.....	11
2.3.1 Risoluzione spaziale bassa	12
2.3.1.1 ASCAT Soil Moisture Products.....	12
2.3.1.2 SMOS – Soil Moisture and Ocean Salinity	13
2.3.1.3 ESA CCI Soil Moisture.....	14
2.3.1.4 AMSR2/GCOM-W1.....	16
2.3.1.5 SMAP – Soil Moisture Active Passive	16
2.3.1.6 NASA USDA Global Soil Moisture Data	18
2.3.2 Risoluzione spaziale elevata	18
2.3.2.1 Copernicus Global Land Service SSM.....	18
2.3.3 Risoluzione spaziale molto elevata.....	19
2.3.3.1 VanderSat Soil Moisture.....	19
2.3.3.2 Theia VHSR Soil Moisture product	20
2.4 Osservazioni.....	22

3.	Le piattaforme per la gestione e l'analisi dei big data derivanti dal telerilevamento	25
3.1	Contesto	25
3.2	Google Earth Engine	28
3.2.1	Descrizione	28
3.2.2	Applicazioni	32
3.2.2.1	Global Forest Watch.....	32
3.2.2.2	Collect Earth.....	33
3.2.2.3	Global Surface Water	33
3.3	Sentinel Hub.....	34
3.3.1	Descrizione	34
3.3.2	Soil Moisture Estimation Script.....	37
3.4	Open Data Cube	38
3.5	SEPAL	40
3.6	JEODPP.....	42
3.7	openEO	43
3.8	Confronto e scelta della piattaforma	45
4.	I modelli matematici per la stima dell'umidità del suolo attraverso il telerilevamento	49
4.1	Presentazione	49
4.2	La missione Sentinel-1	50
4.2.1	Caratteristiche generali.....	50
4.2.2	Strumento Radar ad Apertura Sintetica (SAR)	51
4.3	Misurazioni geofisiche con Sentinel-1: alcuni concetti teorici	55
4.4	Gli algoritmi di recupero dell'umidità del suolo	56
4.4.1	Reti Neurali (Neural Networks – NN)	57
4.4.2	Water Cloud Model (WCM)	59
4.4.3	Modelli di Change Detection (CD)	60
4.4.3.1	TU Wien Change Detection Method	61
4.4.3.2	Metodo 1 con NDVI	62
4.4.3.3	Metodo 2 con NDVI	63
4.5	Confronto e scelta del modello.....	64

5.	Implementazione del Change Detection Method in Google Earth Engine.....	67
5.1	Introduzione.....	67
5.2	Dataset COPERNICUS/S1_GRD	67
5.3	Il codice di calcolo	68
5.4	Limitazioni del modello matematico.....	73
5.5	Limitazioni della piattaforma utilizzata.....	74
6.	Validazione del modello: caso studio di Cabrières-D'Avignon	75
6.1	Presentazione	75
6.2	Descrizione dell'area di interesse.....	75
6.3	Materiali e metodi	77
6.3.1	Misurazioni in situ	77
6.3.2	Immagini Sentinel-1	78
6.3.3	Metodo di validazione.....	78
6.4	Risultati.....	79
7.	Caso studio del Canavese.....	81
7.1	Introduzione.....	81
7.2	Descrizione dell'area di interesse.....	81
7.3	Dati Sentinel-1.....	87
7.4	L'evoluzione temporale dell'umidità del suolo rispetto alle precipitazioni....	88
7.4.1	Output del modello.....	88
7.4.2	Relazione tra umidità del suolo e precipitazioni	90
7.4.3	Limiti dell'algoritmo di recupero dell'umidità del suolo nell'area di interesse ⁹²	
7.4.3.1	Mancata segnalazione dell'evento pluviometrico del 12 giugno 2018 .	92
7.4.3.2	Presenza di ghiaccio/brina	94
7.5	Analisi dell'irrigazione	95
7.5.1	Il rilevamento dell'irrigazione.....	95
7.5.2	Valutazione dei volumi di irrigazione.....	102
8.	Conclusioni e sviluppi futuri.....	111
	Bibliografia.....	115
	Ringraziamenti	123

INDICE DELLE FIGURE

Figura 2.1 – Esempio di sensore di umidità del suolo che sfrutta la tecnologia Time-Domain Reflectometry (Fonte: Landscape Technologies).....	8
Figura 2.2 – Funzionamento dei satelliti passivi (a sinistra) e attivi (a destra) (Migliarese, 2018).	10
Figura 2.3 – Impianti di tennis di Wimbledon (Londra) raffigurati in immagini satellitari con diversa risoluzione spaziale (Migliarese, 2018).	11
Figura 2.4 – Classificazione dei prodotti di umidità del suolo più noti sulla base della risoluzione spaziale.....	12
Figura 2.5 - Schema dell’algoritmo di fusione del prodotto ESA CCI Soil Moisture (ESA, 2019).	15
Figura 2.6 – Umidità del suolo SMAP livello 2 tra il 1° e il 7 giugno 2015 (Chan et al., 2016).	17
Figura 2.7 – Siti per cui sono disponibili le mappe Theia di umidità del suolo (ottobre 2020) (THEIA-LAND, 2020).	21
Figura 3.1 – Volume annuale di dati liberamente accessibili prodotti da Landsat-7, Landsat-8, MODIS e le tre missioni Sentinel (Soille et al., 2018).	25
Figura 3.2 – I DIAS e gli indirizzi web di accesso (Fonte: Copernicus DIAS).	27
Figura 3.3 – Schema di accesso ai dati grezzi acquisiti da diversi satelliti. I DIAS sono rappresentati dagli Interface Services e consentono ad aziende, sviluppatori e istituzioni di accedere alle informazioni contenute in vari dataset e di realizzare degli specifici prodotti che sono resi accessibili al pubblico finale (aziende e cittadini privati) (Fonte: Copernicus DIAS).	27
Figura 3.4 – Schema semplificato dell’architettura del sistema di GEE (Gorelick et al., 2017).	29
Figura 3.5 – Componenti dell’Earth Engine Code Editor (Google Earth Engine, 2020a).	30
Figura 3.6 – Interfaccia web del Global Forest Watch (Fonte: Global Forest Watch).	32
Figura 3.7 – Open Foris Collect Earth (Fonte: Open Foris. Collect Earth).....	33
Figura 3.8 – Interfaccia del Global Surface Water Explorer (Fonte: Global Surface Water Explorer).	34
Figura 3.9 – Visualizzazione dei dati di indice di umidità in EO Browser (Fonte: Sentinel Hub EO Browser).	35
Figura 3.10 – Immagine a colori reali, scattata su Madrid (Spagna), in Sentinel Playground (Fonte: Sentinel Playground).	35
Figura 3.11 – Schema dell’architettura del sistema di Sentinel Hub (Gomes et al., 2020).	36

Figura 3.12 – Risultati del Soil Moisture Estimation Script su un’area nei pressi di Malinong in Australia (Fonte: Custom-scripts Sentinel Hub).	38
Figura 3.13 – Schema semplificato del funzionamento di ODC (Open Data Cube, 2020).	38
Figura 3.14 – Strumenti che utilizzano l’ODC Core (Open Data Cube, 2020).	39
Figura 3.15 – Schema semplificato dell’architettura del sistema di SEPAL (Fonte: Open Foris. SEPAL).	41
Figura 3.16 – Struttura semplificata della piattaforma JEODIPP (European Commission, 2020).	43
Figura 3.17 – Architettura di openEO (openEO, 2020).	44
Figura 4.1 - Satellite Sentinel-1 (Fonte: Sentinel Online).	51
Figura 4.2 – Bande di frequenza radar (Fonte: Lotus Arise).	51
Figura 4.3 - Antenna SAR in posizione (a sinistra) e riposta (a destra) (Fonte: Sentinel Online).	52
Figura 4.4 - Polarimetria radar (Fonte: Natural Resources Canada).	52
Figura 4.5 - Modalità di acquisizione Sentinel-1 (Fonte: Sentinel Online).	53
Figura 4.6 - Differenza tra orbita ascending e orbita descending (Tarikhi, 2012).	54
Figura 4.7 - Angolo di incidenza (Rizzoli e Braütigam, 2014).	55
Figura 4.8 – Rugosità superficiale (Janani, 2020).	56
Figura 4.9 – Schematizzazione di una rete neurale (Furioso, 2020).	57
Figura 4.10 – Diagramma di flusso del metodo proposto da Mirsoleimani et al. (2019).	59
Figura 4.11 – Segnale radar retrodiffuso in funzione dei valori SMOS di umidità del suolo (Gao et al., 2017).	63
Figura 5.1 – Schematizzazione del codice di calcolo realizzato in GEE.	69
Figura 5.2 – Definizione area di interesse.	69
Figura 5.3 – Una geometria geodetica (in rosso) e una planare (in nero) a confronto (Google Earth Engine, 2020a).	70
Figura 5.4 – Definizione dei dati satellitari in ingresso al codice.	70
Figura 5.5 – Calcolo del parametro β	71
Figura 5.6 – Normalizzazione dei coefficienti di backscattering.	71
Figura 5.7 – Calcolo dei valori massimo e minimo del coefficiente di backscattering in ogni pixel e della sensibilità.	72
Figura 5.8 – Calcolo dell’umidità superficiale del suolo.	72
Figura 5.9 – Esportazione dei dati di umidità del suolo in Google Drive.	73
Figura 6.1 – Localizzazione della stazione di misura di Cabrières-d’Avignon all’interno della Francia.	76
Figura 6.2 – Dettaglio dell’area di interesse ricavato mediante Google Earth.	76
Figura 6.3 – Confronto tra i valori misurati di umidità del suolo in situ e quelli stimati tramite l’osservazione satellitare.	79

Figura 7.1 – Dettaglio dell’area di interesse, con indicate le coordinate geografiche dei vertici. In basso a sinistra, è presente la localizzazione dell’area all’interno del Piemonte.....	81
Figura 7.2 – Stralcio del Foglio n°56 – Torino della Carta Geologica d’Italia (1:100.000). In rosso è evidenziata la regione di interesse (Fonte: ISPRA - Dipartimento per il Servizio Geologico d'Italia).....	82
Figura 7.3 - Stralcio della carta della soggiacenza della pianura piemontese (scala 1:250.000). In nero è evidenziata la regione di interesse (Fonte: Webgis ARPA Piemonte).....	83
Figura 7.4 – Mappa della copertura del suolo nell’area di interesse realizzata con dati reperiti dal Geoportale del Piemonte.	84
Figura 7.5 – Mappa del Consorzio Ovest Torrente Orco realizzata con dati scaricati dal Sistema Informativo Bonifica e Irrigazione (SIBI) della Regione Piemonte (Regione Piemonte, 2020).....	85
Figura 7.6 – Dettaglio dei Distretti irrigui nell’area di interesse.	86
Figura 7.7 – Confronto tra il segnale di umidità media del suolo e i dati di precipitazione.	89
Figura 7.8 – Confronto tra il segnale di umidità del suolo e i dati di precipitazione. Per entrambe le grandezze si sono considerate le medie mobili su 3 giorni.	90
Figura 7.9 – Coefficienti di correlazione medi secondo i regimi di classificazione climatica di Köppen-Geiger (Sehler et al., 2019).	91
Figura 7.10 – Grafico a barre dei coefficienti di correlazione medi secondo i regimi di classificazione climatica di Köppen-Geiger (Sehler et al., 2019).....	91
Figura 7.11 – Confronto tra i dati di umidità del suolo e di pioggia registrati nei mesi di giugno e luglio 2018. Nel grafico, sono evidenziati tre eventi pluviometrici, che sono tra quelli più abbondanti registrati nel 2018.	92
Figura 7.12 – Confronto tra la precipitazione cumulata e l’orario dei passaggi satellitari per i tre eventi pluviometrici di grande entità registrati nei mesi di giugno e luglio 2018.....	93
Figura 7.13 – Confronto tra le precipitazioni e il segnale di umidità del suolo, che comprende il picco ricostruito in corrispondenza dell’evento pluviometrico del 12/06/2018.	94
Figura 7.14 – Raffronto tra il segnale di umidità superficiale del suolo e la temperatura dell’aria nel mese di gennaio 2019.	95
Figura 7.15 – Comparazione globale dei dati di precipitazione (in blu, sull’asse sx), di umidità del suolo (in rosso, sull’asse sx) e di portata del canale (in verde, sull’asse dx). Nei punti evidenziati da rettangoli viola, l’incremento di portata della roggia di Rivarolo, registrato in corrispondenza di un picco di umidità del suolo, è dovuto all’effetto delle piogge e non a una maggiore domanda di irrigazione.....	96
Figura 7.16 – Comparazione tra la curva di umidità del suolo e le precipitazioni nel periodo di autorizzazione all’irrigazione. Nel rettangolo rosso è evidenziato l’arco	

temporale a cui si è fatto riferimento per il rilevamento dell'irrigazione a scala di campo.....	97
Figura 7.17 – Campi agricoli selezionati per lo studio dell'irrigazione a scala più dettagliata.....	98
Figura 7.18 – Raffronto tra il segnale di umidità media del suolo per l'area di interesse e i valori di NDMI e NDVI misurati per ciascun campo.....	100
Figura 7.19 – Rilevamento dei picchi di umidità (in viola) esclusivamente legati all'irrigazione.....	101
Figura 7.20 – Schematizzazione delle componenti del bilancio idrico di un terreno ricoperto da vegetazione (Fonte: SardegnaArpa).....	102
Figura 7.21 – Rappresentazione grafica del calcolo del volume di pioggia (Fonte: Unipd).....	105
Figura 7.22 – Stime della quantità idrica di irrigazione, espresse in mm.....	106
Figura 7.23 – Confronto tra i volumi irrigui giornalieri registrati sui singoli campi e il volume idrico medio giornaliero transitato nella roggia di Rivarolo.....	107
Figura 7.24 – Schemi di irrigazione per scorrimento (Lombardo, 1999).	108

INDICE DELLE TABELLE

Tabella 2.1 – Prodotti di umidità del suolo ASCAT (Brocca et al., 2017).	13
Tabella 2.2 – Prodotti SMOS di livello 2 (ESA, 2017).	14
Tabella 2.3 – Prodotti SMOS di livello 3 (ESA, 2017).	14
Tabella 2.4 – Prodotti SMOS di livello 4 (ESA, 2017).	14
Tabella 2.5 – Specifiche dei dataset ESA CCI Soil Moisture (ESA, 2019).....	15
Tabella 2.6 – Prodotti di umidità del suolo AMSR2 (Fonte: Goddard Earth Science Data and Information Services Center).	16
Tabella 2.7 – Prodotti SMAP di umidità del suolo (Fonte: NASA SMAP Soil Moisture Active Passive).....	17
Tabella 2.8 – Specifiche del NASA USDA Global Soil Moisture Data (Fonte: NASA Earth Sciences).	18
Tabella 2.9 – Principali caratteristiche del CGLS SSM (Fonte: Copernicus Global Land Service).....	19
Tabella 2.10 – Caratteristiche salienti del prodotto di umidità del suolo di VanderSat (Fonte: VanderSat).....	20
Tabella 2.11 – Siti per cui sono disponibili le mappe Theia di umidità del suolo (ottobre 2020) (THEIA-LAND, 2020).	21
Tabella 2.12 – Specifiche del prodotto Theia VHSR Soil Moisture (THEIA-LAND, 2020).	22
Tabella 3.1 – Valutazione delle piattaforme di cloud computing (Gomes et al., 2020). ..	47
Tabella 4.1 - Principali caratteristiche della missione Sentinel-1 (Fonte: Sentinel Online).	50
Tabella 6.1 – Caratteristiche della stazione di misura di Cabrières-d’Avignon (Fonte: International Soil Moisture Network).	77
Tabella 6.2 – Parametri statistici del confronto tra i valori misurati di umidità del suolo in situ e quelli stimati tramite l’osservazione satellitare.....	79
Tabella 6.3 – Valori di accuratezza di diversi metodi di stima dell’umidità del suolo ..	80
Tabella 7.1 – Coordinate dei vertici dell’area di interesse	82
Tabella 7.2 – Date di acquisizione dei dati Sentinel-1 nel mese di gennaio 2018 per la regione di interesse.	88
Tabella 7.3 – Valori di R_0 , espressi in mm/d in funzione della latitudine e dei mesi (Fonte: Unipd).....	104
Tabella 7.4 – Coefficienti di drenaggio per differenti tipi di tessitura del suolo (Jalilvand, et al., 2018).	105

LISTA DELLE ABBREVIAZIONI

- AMA Analytical Mechanics Associates
- AMSR2 Advanced Microwave Scanning Radiometer 2
- API Application Programming Interface
- ARD Analysis Ready Data
- ARPA Agenzia regionale per la protezione ambientale
- ASCAT Advanced Scatterometer
- ASTER Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer
- AWS Amazon Web Services
- BEC Barcelona Expert Center
- CATDS Centre Aval de Traitement des Donnés
- CCI Climate Change Initiative
- CD Change Detection
- CEOS Committee on Earth Observation Satellites
- CGLS Copernicus Global Land Service
- CIM Capacità idrica massima
- CLMS Copernicus Land Monitoring Service
- CSIRO Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization
- C3S Copernicus Climate Change Service
- DBMS Database Management Systems
- DEM Digital Elevation Model
- DIAS Data and Information Access Services
- ECMWF European Centre for Medium-Range Weather Forecasts
- EIP-AGRI European Innovation Partnership for Agricultural Productivity and Sustainability
- EnKF Ensemble Kalman Filter
- EO Earth Observation/Osservazione satellitare
- ESA European Space Agency/Agenzia Spaziale Europea
- EUMETSAT European Organization for the Exploitation of Meteorological Satellites
- EW Extra Wide Swath Mode
- FAO Food and Agriculture Organization of the United Nations
- GA Geoscience Australia
- GCOM-W1 Global Change Observation Mission 1st - Water

- GEE Google Earth Engine
- GRD Ground Range Detected
- IDE Interactive Development Environment
- IEM Integration Equation Model
- ISMN International Soil Moisture Network
- IW Interferometric Wide Swath Mode
- JAXA Japan Aerospace Exploration Agency
- JEODIPP JRC Big Data Analytics Platform
- JRC Joint Research Centre/Centro comune di ricerca
- LPRM Land Parameter Retrieval Model
- MDM Modello Dubois modificato
- MIRAS Microwave Imaging Radiometer using Aperture Synthesis
- MIT Massachusetts Institute of Technology
- MODIS Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer
- NASA National Aeronautics and Space Administration
- NDMI Normalized Difference Moisture Index
- NDVI Normalized Difference Vegetation Index
- NIR Infrarosso vicino
- NN Neural Networks/Reti neurali
- ODC Open Data Cube
- OGC Open Geospatial Consortium
- RasDaMan Raster data manager
- RMSD Root Mean Square Difference
- SAR Synthetic Aperture Radar
- SAS SAR Antenna Subsystem
- SciDB SciDB is a Chess Information Data Base
- SEPAL System for Earth Observation Data Access Processing and Analysis for Land Monitoring
- SES SAR Electronics Subsystem
- SH Sentinel Hub
- SLC Single Look Complex
- SM Strip Map Mode
- SMAP Soil Moisture Active Passive
- SMOS Soil Moisture Ocean Salinity
- SRTM Shuttle Radar Topography Mission
- SSM Surface soil moisture/Umidità del suolo superficiale
- SWIR Short-wave infrared
- TRMM Tropical Rainfall Measuring Mission
- TU Wien Università Tecnica di Vienna
- ubRMSD Unbiased Root Mean Square Difference

- UE Unione Europea
- USDA United States Department of Agriculture
- USGS United States Geological Survey
- VHSR Very High Spatial Resolution
- WCM Water Cloud Model
- WV Wave Mode

1. INTRODUZIONE

1.1 IL RUOLO DELL'UMIDITÀ DEL SUOLO NELL'AGRICOLTURA

Nonostante l'umidità del suolo rappresenti soltanto lo 0,005% delle risorse idriche globali, essa svolge un ruolo chiave all'interno del ciclo dell'acqua e dei processi di deflusso delle precipitazioni (*European Environmental Agency, 2017*). Proprio per tale rilevanza, questa variabile è largamente utilizzata in applicazioni meteorologiche, idrologiche e agricole (*Kornelsen e Coulibaly, 2013*). In ambito agricolo, è importante monitorare il contenuto di acqua nel suolo per pianificare in modo efficiente le attività nei campi e garantire elevate rese di raccolto. In particolare, l'umidità del suolo assume una funzione specifica nella definizione dei periodi ottimali di semina. Ad esempio, la colza, che è una coltura amante dell'umidità, non può essere seminata in condizioni di suolo secco o con un insufficiente contenuto di acqua. Per preservare la produttività delle coltivazioni, le misurazioni dell'umidità del suolo sono impiegate nella previsione e nel controllo dei periodi di siccità. Nel caso in cui, invece, il suolo sia in condizioni di saturazione, si rende necessario evitare l'utilizzo di macchinari all'interno dei campi per impedire la compattazione del terreno o altri danni strutturali. La mappatura dell'umidità del suolo è, inoltre, un utile strumento per pianificare un'efficace gestione delle risorse irrigue (*Earth Observing System, 2019*).

1.2 L'IMPATTO DEL CAMBIAMENTO CLIMATICO E DELL'INCREMENTO DEMOGRAFICO SULL'AGRICOLTURA

Solo una piccolissima percentuale di acqua presente sulla Terra è potenzialmente utilizzabile per il consumo umano e circa il 70% dei prelievi di questa risorsa sono impiegati in agricoltura per scopi irrigui (*Brocca et al., 2018*). I terreni irrigati

costituiscono 1/5 delle aree coltivate nel mondo e forniscono i 2/5 del cibo prodotto a livello mondiale. Una delle sfide principali del ventunesimo secolo è la mancanza di risorse idriche disponibili sufficienti per soddisfare il crescente fabbisogno irriguo, sul quale incidono l'incremento demografico e il cambiamento climatico. Si prevede che l'aumento delle temperature e dei periodi di siccità, unitamente all'intensificazione degli eventi meteorologici estremi, abbia un impatto negativo sull'economia del settore agricolo e sulla resa dei raccolti (FAO, 2016). Questo scenario è ancora più critico se si considera che la richiesta globale di cibo crescerà unitamente alla popolazione del pianeta, stimata intorno ai 10 miliardi di abitanti nel 2057 (Worldometer, 2019). Secondo la FAO, a partire dal 2025, 1,8 miliardi di persone vivranno in stati o regioni caratterizzati da un'assoluta scarsità d'acqua, mentre i 2/3 della popolazione mondiale potrebbe vivere in condizioni di stress idrico (FAO, 2016). Per incrementare la sicurezza idrica e contribuire direttamente allo sviluppo sostenibile, è necessario attuare delle misure di adattamento e mitigazione dei cambiamenti climatici basate sull'adozione di tecnologie innovative, politiche e strategie appropriate. A livello globale, tra il 2011 e il 2016, la FAO ha elaborato il programma quadro FAO-Adapt come risposta alla richiesta globale di misure di adattamento al cambiamento climatico. Tale progetto si occupa di promuovere la sostenibilità e la resilienza negli ambiti dell'agricoltura, della silvicoltura e della pesca attraverso le seguenti misure:

- creazione di un sistema di scambio e gestione dei dati per la valutazione degli impatti dei cambiamenti in atto;
- rafforzamento del coordinamento e delle capacità istituzionali nei processi decisionali e nell'accesso alle risorse finanziarie;
- coinvolgimento dei Ministeri dell'Agricoltura nell'individuazione delle misure di adattamento e mitigazione;
- diffusione di buone pratiche agricole, poggianti su solide basi scientifiche.

A livello europeo, l'Unione Europea ha introdotto diverse iniziative volte ad affrontare i mutamenti climatici e la modernizzazione del settore agricolo. Tra i principali progetti vi è LIFE Climate Action, un programma dedicato allo sviluppo di risposte innovative alle sfide del cambiamento climatico. Horizon 2020, invece, è un programma di ricerca europeo, di cui almeno il 60% degli stanziamenti è finalizzato al

raggiungimento degli obiettivi ambientali definiti dall'Unione Europea. Un esempio di progetto di ricerca rientrante all'interno di questo piano è MOSES, il cui scopo è realizzare una piattaforma informativa, dedicata ai consorzi irrigui, per migliorare la pianificazione e la gestione delle risorse idriche destinate all'irrigazione. La UE ha, inoltre, promosso una forma di partenariato, l'European Innovation Partnership for Agricultural Productivity and Sustainability (EIP-AGRI), che si occupa di incentivare un'agricoltura e una silvicoltura competitive e sostenibili, con dei gruppi professionali al suo interno che si dedicano all'adattamento e alla mitigazione dei mutamenti climatici. Oltre a queste iniziative, un ruolo fondamentale nel raggiungimento di tali obiettivi è svolto da Copernicus, il programma coordinato e gestito dalla Commissione Europea, in partnership con l'Agenzia Spaziale Europea, che offre servizi di informazione basati sull'osservazione satellitare della Terra. Tra di essi vi sono il Climate Change Service (C3S), che fornisce dati sulla comprensione dell'evoluzione del clima nel tempo per coadiuvare gli organismi politici e le imprese nella risposta al cambiamento climatico, e diverse applicazioni rilevanti in ambito agricolo (*European Environmental Agency, 2019*).

1.3 REMOTE SENSING, BIG DATA E CLOUD COMPUTING IN AMBITO AGRICOLO

La moderna agricoltura sta subendo una profonda trasformazione digitale che si avvale del remote sensing, del cloud computing e dell'Internet of Things e che ha portato a coniare l'espressione "smart farming". Questo nuovo modo di pensare l'agricoltura offre possibili soluzioni alle sfide future di produttività, sostenibilità, impatto ambientale e sicurezza alimentare. In particolare, il telerilevamento permette di raccogliere sistematicamente informazioni su aree geografiche molto vaste ed è molto impiegato nel settore agricolo per il monitoraggio delle coltivazioni e della siccità, per le previsioni del tempo e della produzione agricola, per il controllo e la gestione dell'irrigazione e per la valutazione dell'uso del suolo. I satelliti, insieme ai droni e ai sensori, consentono, quindi, di ricavare una mole considerevole di dati,

caratterizzati da crescenti varietà e complessità, a una velocità senza precedenti. Ciò implica una necessità di archiviazione su larga scala, pre-processamento, analisi e visualizzazione di dati che è soddisfatta dalle piattaforme cloud (*Kamilaris et al., 2017*). All'interno degli ambienti Cloud Engine, come Google Earth Engine e Sentinel Hub, è possibile elaborare immagini satellitari e dataset geospaziali, sfruttando la potenza computazionale di software remoti attraverso la rete internet, senza dover scaricare i dati sul proprio computer personale. In aggiunta, questi strumenti consentono di sviluppare delle applicazioni che possono essere globalmente accessibili, come Global Forest Watch, Collect Earth e Global Surface Water, che si occupano di monitorare rispettivamente la copertura forestale, l'utilizzo del suolo e i corpi idrici superficiali e che saranno presentate in modo più approfondito nel **paragrafo 3.2.2**.

1.4 OBIETTIVI E STRUTTURA DELLA TESI

Lo scopo principale della tesi è quello di esplorare le possibili soluzioni al problema della stima dell'umidità del suolo da remoto, mediante l'applicazione di metodologie basate su informazioni SAR acquisite dai satelliti Sentinel-1, sfruttando le potenzialità di calcolo e di storage delle piattaforme cloud oggi a disposizione. Le stime ricavate saranno impiegate per il controllo dei volumi irrigui nella regione Piemonte.

Oltre a questa prima sezione, in cui è presentata un'introduzione generale dei temi principali e del lavoro svolto, il presente scritto comprende altri sette capitoli.

Nel **Capitolo 2**, si discuterà dei diversi metodi di misurazione dell'umidità del suolo, soffermandosi principalmente sui prodotti satellitari attualmente reperibili ed evidenziando le motivazioni per le quali si è scelto di ricorrere all'impiego di ambienti cloud.

Il **Capitolo 3** verterà sulla valutazione di diverse piattaforme di cloud computing per l'analisi e l'elaborazione dei dati geospaziali, al fine di stabilire quella più adatta a stimare l'umidità superficiale del suolo.

Nel **Capitolo 4** saranno dettagliati sia le caratteristiche della missione Sentinel-1 sia diversi algoritmi di recupero di umidità del suolo.

Il **Capitolo 5** descriverà l'implementazione del metodo di Change Detection (CD) all'interno di Google Earth Engine. Il modello così ottenuto sarà sottoposto a validazione mediante delle misurazioni in situ nel **Capitolo 6**.

Il **Capitolo 7** vedrà l'applicazione dell'algoritmo di CD su una superficie irrigata di 1 km² del Canavese, in modo da studiare l'evoluzione temporale dell'umidità del suolo e valutare i volumi di irrigazione.

Infine, nel **Capitolo 8**, saranno riportati le conclusioni e gli sviluppi futuri del lavoro svolto.

2. PANORAMICA DEI PRODOTTI SATELLITARI DI UMIDITÀ DEL SUOLO ESISTENTI

2.1 L'UMIDITÀ DEL SUOLO E I METODI DI MISURAZIONE

L'umidità del suolo è l'acqua presente nei vuoti interstiziali tra le particelle di terreno. Per umidità superficiale del suolo s'intende l'acqua che è contenuta nei 10 cm superiori del suolo, mentre l'umidità del suolo nella zona radicale rappresenta l'acqua disponibile per le piante, che generalmente è collocata nei primi 200 cm di suolo (Arnold, 1999). L'umidità del suolo condiziona numerosi processi negli ambiti dell'idrologia, dell'agronomia e della climatologia che sono fondamentali per una vasta gamma di applicazioni su scala regionale o locale. A livello regionale, stimare il contenuto di umidità del suolo è importante nella valutazione del rischio di alluvioni e nel monitoraggio della siccità. Nel settore agricolo, la quantificazione dell'acqua presente nel terreno assume un ruolo centrale nella programmazione delle attività nei campi e nel monitoraggio della crescita delle colture. Inoltre, le informazioni riguardanti l'umidità del suolo sono rilevanti nello studio degli effetti dell'estrazione di acque sotterranee e nella gestione e controllo dei sistemi di drenaggio e di irrigazione.

Le misure di umidità del suolo si possono ottenere mediante delle strumentazioni in situ, l'osservazione satellitare o l'applicazione dei "land surface models". Le misurazioni in situ si avvalgono dell'impiego di tensiometri oppure di sensori che rilevano la resistività del suolo o che impiegano la Time-Domain Reflectometry (vedi **Figura 2.1**).



Figura 2.1 – Esempio di sensore di umidità del suolo che sfrutta la tecnologia Time-Domain Reflectometry (Fonte: Landscape Technologies).

Tali misure sono le più accurate, possono essere svolte a differenti profondità e possedere un'elevata risoluzione temporale se i processi di acquisizione sono automatizzati. Tuttavia, questi strumenti forniscono delle informazioni di tipo puntuale e, nel caso in cui si volesse ottenere un'accurata descrizione della distribuzione spaziale dell'umidità del suolo in grandi zone agricole, si dovrebbe usare un numero elevatissimo di sensori che renderebbero questa tecnologia svantaggiosa dal punto di vista economico (Benninga et al., 2018). Al contrario, il telerilevamento, che è basato sulla misura della radiazione riflessa o emessa da corpi differenti (Fonte: SEOS), consente di stimare l'umidità del suolo su vasti domini spaziali con un'accuratezza dipendente dalle specifiche del sensore collocato sul satellite, dalle assunzioni e dai valori dei parametri adottati nell'applicazione degli algoritmi di recupero e dalla copertura del suolo. Poiché tali misurazioni avvengono utilizzando sensori radar, generalmente esse si riferiscono al contenuto di umidità presente nei primi 5 cm di suolo. Usando questi dati come input in modelli numerici detti "land surface models", che simulano gli scambi di acqua ed energia all'interfaccia suolo-atmosfera, si possono stimare i valori di umidità del suolo a profondità maggiori, ad esempio nella zona radicale. L'affidabilità dei risultati di questi modelli dipende dalla struttura degli stessi, dalla qualità delle parametrizzazioni, dalla complessità delle ipotesi e dalle condizioni al contorno, inclusi i termini delle forzanti atmosferiche. Combinando i dati osservati da satellite con alcuni modelli di processo attraverso la tecnica di assimilazione dei dati per fornire stime ottimali dello stato reale e/o di

parametri del modello, è possibile incrementare ulteriormente la precisione delle stime di umidità del suolo (Dumedah et al., 2015).

2.2 ELEMENTI DI TELERILEVAMENTO

Come descritto nel capitolo precedente, il remote sensing è un utile strumento per stimare l'umidità del suolo media su scale spaziali medio-grandi. Di seguito è riportata una descrizione dei vari prodotti basati su tecnologie satellitari che, ad oggi, includono stime di umidità del suolo. Tuttavia, prima di addentrarsi nella trattazione, è utile partire da alcune definizioni di base:

- **Satellite:** apparecchiatura più o meno complessa, messa in orbita attorno ad un corpo celeste per scopi scientifici o applicativi (impiego militare o commerciale civile) e costituita da una piattaforma e da uno o più sensori. In base al tipo di orbita si possono distinguere in:
 - **satelliti geostazionari**, molto utilizzati in meteorologia, che sono situati a 36000 km al di sopra dell'Equatore e inquadrano la stessa sezione di superficie terrestre perché il loro periodo di rivoluzione attorno alla Terra coincide il periodo di rotazione terrestre;
 - **satelliti eliosincroni**, collocati a 700-900 km di altitudine e molto utilizzati nel monitoraggio ambientale, che impiegano 90-100 min per percorrere un'orbita completa attorno alla Terra e combinano altezza e inclinazione in modo tale che il passaggio al di sopra di ciascun punto della superficie terrestre avvenga sempre alla stessa ora solare.
- **Piattaforma satellitare:** struttura sulla quale è posizionato il dispositivo di rilevamento a distanza.
- **Sensore:** strumento che rileva i valori di una grandezza fisica, o i suoi cambiamenti, e li trasmette ad un sistema di controllo. Questi dispositivi si differenziano in:
 - **sensori attivi**, come il radar o i laser scanner, che emettono una radiazione artificiale verso la Terra e misurano il segnale di ritorno per valutare le

condizioni della superficie del pianeta, senza dipendere dalla presenza di luce solare e dalle condizioni meteorologiche;

- **sensori passivi**, che rilevano la radiazione termica e la radiazione solare riflessa dalla Terra nei campi del visibile e dell'infrarosso dello spettro elettromagnetico.

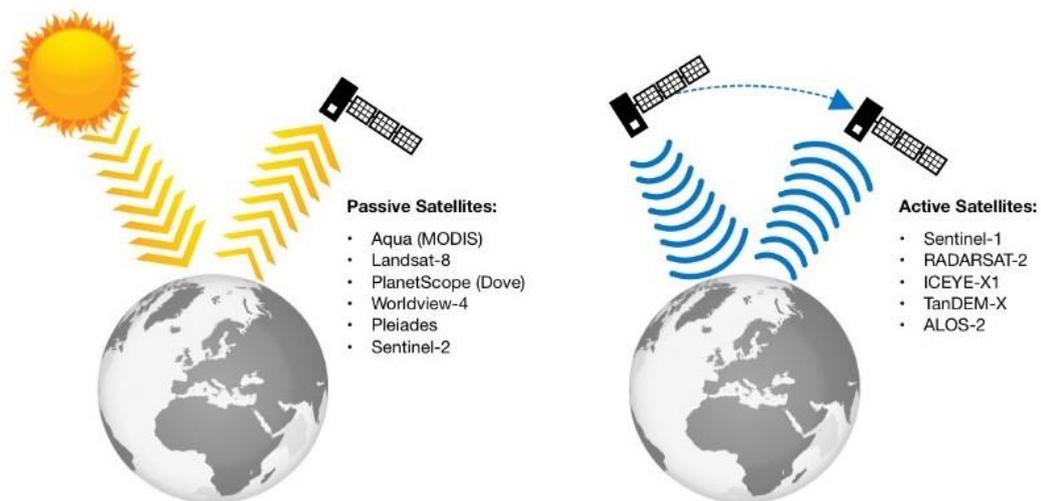


Figura 2.2 – Funzionamento dei satelliti passivi (a sinistra) e attivi (a destra) (Migliarese, 2018).

- **Prodotto satellitare:** risultato di una elaborazione delle informazioni rilevate da satellite. In base al grado di elaborazione dei dati, i prodotti possono avere livelli di affidabilità e potenziali applicazioni differenti.
- **Latenza:** intervallo di tempo che intercorre tra l'acquisizione dei dati da parte del satellite e il momento in cui sono disponibili le informazioni elaborate.
- **Risoluzione temporale:** tempo impiegato da un singolo satellite per sorvolare una specifica area.
- **Risoluzione spaziale:** dimensione del più piccolo elemento distinguibile in un'immagine satellitare. Maggiore è la risoluzione e più fine è la griglia dei pixel, più alto è il grado dei dettagli riconoscibili sulla superficie terrestre.



Figura 2.3 – Impianti di tennis di Wimbledon (Londra) raffigurati in immagini satellitari con diversa risoluzione spaziale (Migliarese, 2018).

2.3 I PRODOTTI SATELLITARI DI UMIDITÀ DEL SUOLO

All'interno dei paragrafi successivi, sono esposti i diversi prodotti satellitari di umidità del suolo attualmente disponibili, riportando per ciascuno una breve descrizione e le principali caratteristiche. Per facilitare la trattazione, ai fini del presente lavoro di tesi, si è scelto di classificare questi prodotti in tre gruppi sulla base della risoluzione spaziale, come riportato in **Figura 2.4**:

- **prodotti a risoluzione spaziale bassa** (nell'ordine delle decine di chilometri);
- **prodotti a risoluzione spaziale elevata** (nell'ordine del chilometro);
- **prodotti a risoluzione spaziale molto elevata** (~10-100 m).



Figura 2.4 – Classificazione dei prodotti di umidità del suolo più noti sulla base della risoluzione spaziale.

2.3.1 Risoluzione spaziale bassa

2.3.1.1 ASCAT Soil Moisture Products

I prodotti di umidità ASCAT sono derivati dalle misurazioni del coefficiente di diffusione effettuate dall'Advanced Scatterometer (ASCAT), uno strumento radar che opera in banda C ed è posto a bordo dei satelliti Metop-A e Metop-B, lanciati rispettivamente nell'ottobre 2006 e nel settembre 2012. Vi sono tre differenti gruppi di prodotti, illustrati in **Tabella 2.1**, che sono disponibili attraverso il portale EUMETSAT H SAF (<http://hsaf.meteoam.it>). Il primo gruppo (ASCAT NRT SSM) contiene stime del contenuto di umidità dei primi 2,5 cm del terreno, ricavate attraverso l'algoritmo di change detection proposto dall'Università tecnica di Vienna, che sarà approfondito nel **Capitolo 4**. Tali misure sono espresse in gradi di saturazione, sono disponibili quasi in tempo reale e hanno risoluzioni spaziali di 25 km e 50 km. Il secondo gruppo contiene un prodotto di umidità del suolo nella zona radicale, con una risoluzione spaziale di 25 km, ottenuto dall'assimilazione dei dati ASCAT NRT SSM nel ECMWF Land Data Assimilation System. Infine, l'ultimo gruppo include un prodotto di umidità

superficiale del suolo ad alta risoluzione spaziale (1 km), disponibile solo per il continente europeo, ricavato dalla disaggregazione dei dati ASCAT NRT SSM. Tutte queste osservazioni sono state applicate con successo nella stima delle precipitazioni, nella previsione di inondazioni, nella predizione e nel monitoraggio della siccità (Brocca *et al.*, 2017).

Tabella 2.1 – Prodotti di umidità del suolo ASCAT (Brocca *et al.*, 2017).

	SSM ASCAT-A/B NRT O Umidità del suolo superficiale	SM-DAS-2 Umidità nella zona radicale	SSM ASCAT NRT DIS Umidità del suolo superficiale
Copertura spaziale	globale	globale	Europa
Risoluzione spaziale	25 km x 34 km 50 km x 50 km	25 km	1 km
Latenza	2 ore	36 ore	135 min
Metodo	Change Detection Method	assimilazione di dati radar ASCAT nel ECMWF Land Data Assimilation System	disaggregazione dei dati SSM ASCAT NRT
Formato dati	BUFR	Grib-1	BUFR/NetCDF

2.3.1.2 SMOS – Soil Moisture and Ocean Salinity

La missione SMOS è stata lanciata dall’Agenzia Spaziale Europea (ESA) nel novembre 2009 con l’obiettivo di fornire delle stime globali di salinità degli oceani e di umidità volumetrica del suolo, con risoluzioni spaziali di 15 km e 25 km e un’accuratezza di 0,04 m³/m³ (Kerr *et al.*, 2012), unitamente a delle misure giornaliere dello spessore di ghiaccio marino. Questi dati sono ottenuti attraverso l’acquisizione delle temperature di brillanza mediante il MIRAS, un radiometro passivo interferometrico a due dimensioni che lavora nella banda L, e la loro successiva elaborazione. In base al grado di processamento e al tipo di informazioni fornite, i prodotti SMOS si suddividono in quattro livelli. Dal processamento dei prodotti di livello 1, che riguardano le temperature di brillanza, l’ESA fornisce un prodotto di livello 2, le cui caratteristiche sono riportate in **Tabella 2.2**, che contiene dei valori globali di umidità del suolo. I prodotti di livello 3 (**Tabella 2.3**) derivano dal processamento di dati di livello 1 e 2, sono distribuiti dal Centre Aval de Traitement des Donnés SMOS (CATDS) e dal Barcelona Expert Center (BEC) e racchiudono mappe globali di umidità del suolo e

misure della profondità ottica della vegetazione e della costante dielettrica. Invece, i prodotti di livello 4, sviluppati sempre dal CATDS e dal BEC e presenti in **Tabella 2.4**, forniscono stime dell'umidità del suolo nella zona radicale, dell'indice di siccità in agricoltura e della rugosità della superficie (ESA, 2017).

Tabella 2.2 – Prodotti SMOS di livello 2 (ESA, 2017).

PRODOTTO	RISOLUZIONE SPAZIALE	LATENZA	METODO	FORMATO DATI
Level 2 Soil Moisture, Vegetation Optical Depth and Ancillary Land product	15 km	8-12 ore	processamento dati di Livello 1	EEF e NetCDF
Level 2 Soil Moisture in near real time (NRT) product	15 km	3 ore	applicazione di algoritmi statistici (es. reti neurali) su dati di umidità del suolo di livello 2	NetCDF

Tabella 2.3 – Prodotti SMOS di livello 3 (ESA, 2017).

PRODOTTO	RISOLUZIONE SPAZIALE	RISOLUZIONE TEMPORALE	METODO	FORMATO DATI
Level 3 CATDS Soil Moisture, Vegetation Optical Depth and Ancillary Land products	25 km	1,3,10 giorni, 1 mese	applicazione di un approccio multi-orbita sui dati L1B (prodotto giornaliero) – aggregazione di dati giornalieri (tutti gli altri)	NetCDF
Level 3 BEC Soil Moisture, Vegetation Optical Depth and ancillary land products	15-25 km	1,3,9 giorni, 1 mese, 1 anno	processamento di dati di Livello 2 (prodotto giornaliero) – aggregazione di dati giornalieri (tutti gli altri)	NetCDF

Tabella 2.4 – Prodotti SMOS di livello 4 (ESA, 2017).

PRODOTTO	RISOLUZIONE SPAZIALE	RISOLUZIONE TEMPORALE	METODO	FORMATO DATI
Level 4 CATDS Ancillary Land products: -root zone daily product -agriculture drought index daily product -synergy soil moisture daily product	25 km	1 giorno	-Combinazione di dati L3 CATDS Soil Moisture con informazioni del modello di rianalisi ECMWF (root zone daily product) -Inserimento di dati L3 CATDS Soil Moisture in un modello idrologico (agriculture drought index daily product) -Combinazione di dati di umidità del suolo AMSR-E e SMOS L3 (synergy soil moisture daily product)	NetCDF
Level 4 BEC High Resolution Soil Moisture over Iberian Peninsula product	1 km	1 giorno	Combinazione di dati ESA SMOS L1C con uso del suolo e indici di vegetazione ricavati da modelli (ECMWF Era-interim) e osservazioni satellitari (NASA Terra/Aqua MODIS)	NetCDF

2.3.1.3 ESA CCI Soil Moisture

Il progetto Soil Moisture CCI fa parte del programma dell'Agenzia Spaziale Europea riguardante il monitoraggio globale delle variabili climatiche essenziali, meglio noto

come Climate Change Initiative (CCI), ed è divenuto operativo nel 2010, dando un contributo fondamentale in numerosi studi idrologici e climatologici. Nell'ambito di tale progetto, è realizzato un prodotto di umidità superficiale del suolo aggiornato ogni anno, con una copertura temporale di oltre quaranta anni, che è composto da tre differenti dataset, le cui caratteristiche sono riportate in **Tabella 2.5**:

- **ACTIVE Product**, originato dalla fusione di dati scatterometrici;
- **PASSIVE Product**, generato dalla fusione di dati radiometrici;
- **COMBINED Product**, che è dato dall'unione dei dataset precedenti.

Tabella 2.5 – Specifiche dei dataset ESA CCI Soil Moisture (ESA, 2019).

Copertura spaziale	globale
Copertura temporale	Novembre 1978 – 31 Dicembre 2019 (v05.2)
Risoluzione spaziale	0,25° (~ 25 km)
Risoluzione temporale	1 giorno
Formato Dati	NetCDF-4
Accesso ai dati	gratuito

I dati di umidità superficiale del suolo sono derivati dai sensori presenti in **Figura 2.5**, all'interno della quale è contenuto anche uno schema semplificato dell'algoritmo di fusione posto alla base del prodotto ESA CCI Soil Moisture.

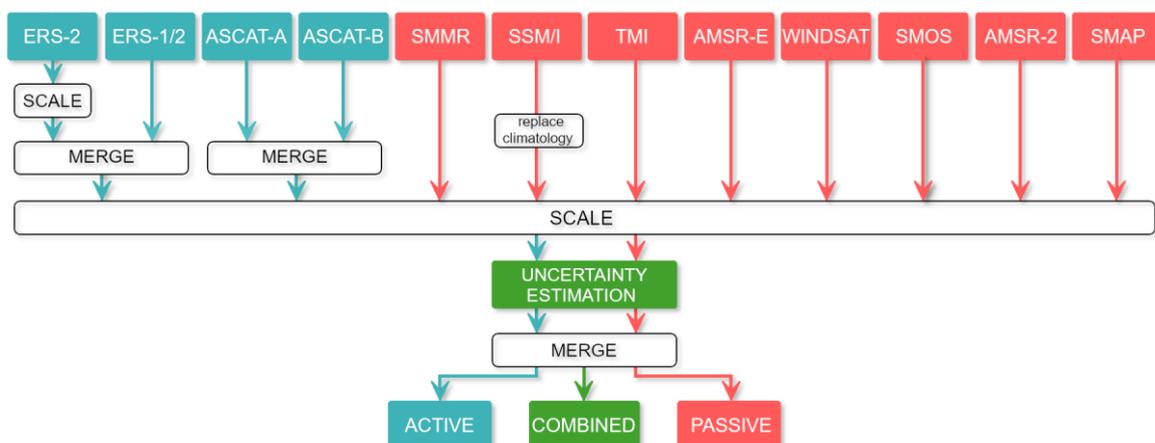


Figura 2.5 - Schema dell'algoritmo di fusione del prodotto ESA CCI Soil Moisture (ESA, 2019).

2.3.1.4 AMSR2/GCOM-W1

I prodotti di umidità superficiale del suolo AMSR2 derivano dalle misurazioni delle temperature di brillanza condotte da un radiometro a frequenza multipla (AMSR2), che è posizionato sul satellite GCOM-W1. Questa missione, lanciata da JAXA nel maggio 2012, si pone l'obiettivo di comprendere i meccanismi e le variazioni del ciclo dell'acqua. Per ottenere i valori di umidità superficiale del suolo, sono applicati due algoritmi differenti: il Land Parameter Retrieval Model (LPRM), basato sul modello di trasferimento radiativo, e l'algoritmo JAXA. In particolare, esistono tre differenti prodotti originati dall'applicazione dell'algoritmo LPRM ai dati AMSR2, distinti in base alla principale lunghezza d'onda usata per il recupero dell'umidità del suolo. Inoltre, i prodotti sono suddivisi in vari livelli, dipendenti dal grado di processamento dei dati. I prodotti di livello 2 provengono dall'elaborazione dei dati di temperatura di brillanza di livello 1 e, a loro volta, fungono da base per i prodotti di livello 3.

Tabella 2.6 – Prodotti di umidità del suolo AMSR2 (Fonte: Goddard Earth Science Data and Information Services Center).

Umidità del suolo superficiale	Livello 2	Livello 3
Copertura spaziale	globale	globale
Copertura temporale	02/07/2012 - presente	03/07/2012 - presente
Risoluzione spaziale	31 km x 31 km/46 km x 46 km 10 km x 10 km	25 km x 25 km 10 km x 10 km
Risoluzione temporale	(non specificato)	1 giorno
Metodo	Land Parameter Retrieval Model (LPRM)	Land Parameter Retrieval Model (LPRM)
Formato dati	netCDF	netCDF

2.3.1.5 SMAP – Soil Moisture Active Passive

La missione SMAP è stata lanciata dalla NASA il 31 gennaio 2015 con l'obiettivo di monitorare lo stato dell'idrosfera. A bordo del satellite sono stati posizionati un sensore radar (attivo) e un radiometro (passivo), entrambi operanti in banda L, per ottenere delle mappature globali di umidità superficiale del suolo e dello stato di gelo-disgelo, con una precisione di $0,04 \text{ m}^3/\text{m}^3$, una risoluzione temporale di 2-3 giorni e tre differenti risoluzioni spaziali: 3 km, 9 km e 36 km. Tuttavia, a causa di un danno

irreparabile che ha interessato il sensore radar nel luglio 2015, per molto tempo sono stati distribuiti solo i prodotti con risoluzioni di 9 km e 36 km. Attualmente, è disponibile anche un prodotto con una risoluzione spaziale di 3 km che unisce i dati radiometrici SMAP con le informazioni radar derivanti dai satelliti Sentinel-1 (Chan et al., 2016). In generale, i prodotti SMAP si suddividono in quattro livelli, a seconda del grado di processamento dei dati. I prodotti riguardanti l'umidità del suolo sono quelli di livello 2, 3 e 4 e sono riportati, con le loro specifiche, in **Tabella 2.7**. Quelli di livello 2 si basano sull'elaborazione di dati radar e radiometrici di livello 1 e le loro composizioni giornaliere costituiscono i prodotti di livello 3. Poiché SMAP fornisce stime del contenuto di umidità nei 5 cm superiori del terreno, attraverso l'assimilazione dei dati all'interno di un "land surface model", si ottiene un prodotto di livello 4 che contiene delle misure dell'umidità del suolo nella zona radicale.

Tabella 2.7 – Prodotti SMAP di umidità del suolo (Fonte: NASA SMAP Soil Moisture Active Passive).

PRODOTTO	RISOLUZIONE SPAZIALE	LATENZA	METODO	FORMATO DATI	COPERTURA TEMPORALE
L2_SM_A	3 km	24 ore	processamento dati radar L1C_S0_HiRes	HDF5	13/04/2015 -07/07/2015
L2_SM_P	36 km	24 ore	processamento di dati radiometrici L1C_TB	HDF5	31/03/2015 - presente
L2_SM_P_E	9 km	24 ore	processamento di dati radiometrici L1C_TB_E	HDF5	31/03/2015 - presente
L2_SM_AP	9 km	24 ore	combinazione di dati SMAP radar e radiometrici	HDF5	13/04/2015 -07/07/2015
L2_SM_SP	3 km	24 ore	combinazione di dati Sentinel-1 (attivo) e SMAP (passivo)	HDF5	31/03/2015 - presente
L3_SM_A	3 km	50 ore	composizione giornaliera di dati L2_SM_A	HDF5	13/04/2015 -07/07/2015
L3_SM_P	36 km	50 ore	composizione giornaliera di dati L2_SM_P	HDF5	31/03/2015 - presente
L3_SM_P_E	9 km	50 ore	composizione giornaliera di dati L2_SM_P_E	HDF5	31/03/2015 - presente
L3_SM_AP	9 km	50 ore	composizione giornaliera di dati L2_SM_AP	HDF5	13/04/2015 -07/07/2015
L4_SM	9 km	7 giorni	assimilazione di dati radiometrici in un modello di superficie del terreno per la valutazione dell'umidità del suolo nella zona radicale	HDF5	31/03/2015 - presente

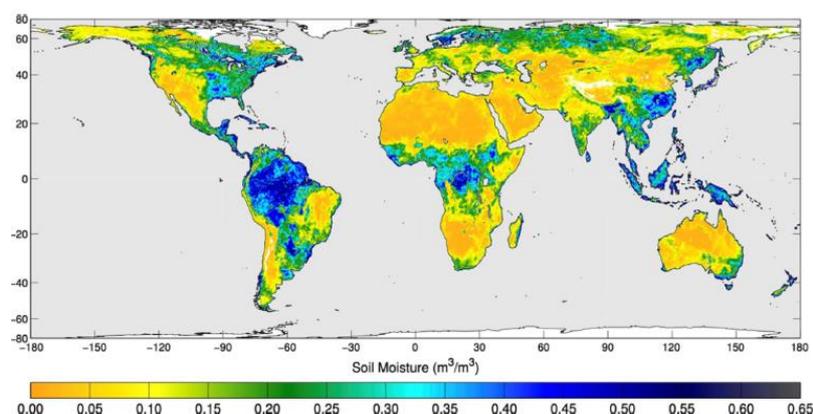


Figura 2.6 – Umidità del suolo SMAP livello 2 tra il 1° e il 7 giugno 2015 (Chan et al., 2016).

2.3.1.6 NASA USDA Global Soil Moisture Data

Le misure di umidità del suolo della NASA-USDA sono generate dall'assimilazione dei dati SMOS e SMAP all'interno del modello Palmer modificato a due strati. I dati, le cui specifiche sono riportate in **Tabella 2.8**, possiedono una copertura globale e una risoluzione spaziale di 0,25°x0,25° e includono informazioni riguardanti l'umidità del suolo (mm) sia in superficie che in profondità, il profilo di umidità del suolo (%) e le anomalie di umidità del terreno registrate (mm). L'assimilazione delle osservazioni da satellite permette di migliorare le previsioni di umidità del suolo basate su modelli, specialmente in quelle aree del mondo dove vi è uno scarso numero di pluviometri. Questo prodotto, oltre a essere distribuito tramite il portale Crop Explorer (<https://ipad.fas.usda.gov/cropexplorer/>), è disponibile nel catalogo di dati di Google Earth Engine (GEE), che sarà descritto nel **Capitolo 3**.

Tabella 2.8 – Specifiche del NASA USDA Global Soil Moisture Data (Fonte: NASA Earth Sciences).

Copertura temporale	1 gennaio 2010 – presente (NASA-USDA Global Soil Moisture) 1 aprile 2015 – presente (NASA-USDA SMAP Global Soil Moisture)
Copertura spaziale	globale
Cadenza	3 giorni
Risoluzione spaziale	0,25° (~ 25 km)
Metodo utilizzato	integrazione delle osservazioni satellitari di umidità del suolo SMOS e SMAP nel modello Palmer modificato attraverso un approccio di assimilazione dei dati 1-D EnKF
Formato dati	GRIB
Accesso ai dati	gratuito
Portali di distribuzione	Crop Explorer (presente anche nel catalogo di Google Earth Engine)

2.3.2 Risoluzione spaziale elevata

2.3.2.1 Copernicus Global Land Service SSM

Il Copernicus Global Land Service (CGLS) è una componente del Land Monitoring Service (CLMS) di Copernicus, il programma europeo di osservazione satellitare della Terra. Il CGLS si occupa di sviluppare dei prodotti in tempo quasi reale, sia su scala mondiale che su scala europea, concernenti le variabili geofisiche che descrivono i cicli

dell'acqua e dell'energia, lo stato della vegetazione e la criosfera terrestre. Tali informazioni, liberamente accessibili, sono impiegate dalle aziende e dall'Unione Europea nella definizione di politiche e azioni che interessino l'agricoltura, che tutelino la sicurezza alimentare, la biodiversità e l'ambiente, che regolamentino la gestione delle risorse naturali e che permettano di adattarsi al cambiamento climatico. Tra i prodotti disponibili, ve n'è uno riguardante l'umidità relativa nei primi 5 cm di suolo, che può essere convertita in valori volumetrici utilizzando le informazioni sulla porosità. Queste misure si ricavano mediante l'applicazione del TU Wien Change Detection Method (vedi **Capitolo 4**) ai dati radar acquisiti dai satelliti Sentinel-1, il cui funzionamento sarà illustrato nel **Capitolo 4**. Sono disponibili solo per il continente europeo, hanno una risoluzione spaziale di 1 km e una risoluzione temporale di 1,5-4 giorni, a seconda della località. Tutte le caratteristiche salienti del prodotto distribuito dal Copernicus Global Land Service sono riassunte in **Tabella 2.9**.

Tabella 2.9 – Principali caratteristiche del CGLS SSM (Fonte: Copernicus Global Land Service).

Sensore	Sentinel-1 C-SAR
Copertura spaziale	Europa
Copertura temporale	Gennaio 2015 - presente
Risoluzione spaziale	1 km
Cadenza	giornaliera
Metodo	Change Detection Method
Formato file	netCDF, GeoTIFF
Accesso ai dati	Portale del prodotto (accesso libero)

2.3.3 Risoluzione spaziale molto elevata

2.3.3.1 *VanderSat Soil Moisture*

VanderSat è un'azienda olandese, fondata nel 2015, con gli obiettivi di fornire prodotti e servizi che abbiano un impatto positivo nella società, in particolar modo nei settori agricolo, assicurativo e della gestione delle acque, e di sviluppare dei prodotti di

umidità del suolo con risoluzioni spaziale e temporale senza precedenti, sfruttando i sensori a microonde. Per lo svolgimento di tale progetto, VanderSat ha anche ottenuto dei finanziamenti dalla Commissione Europea nell'ambito del programma Horizon 2020, già citato nel **Capitolo 1**. Attualmente, è distribuito un prodotto di umidità del suolo, disponibile quasi in tempo reale, con una risoluzione spaziale di 100 m x 100 m e una copertura globale e giornaliera, indipendentemente dalla nuvolosità o dall'oscurità. Le misure sono ottenute mediante l'applicazione di algoritmi di downscaling ai dati provenienti da diverse costellazioni di satelliti NASA, ESA e JAXA e sono accurate quanto i sensori di terra, con il vantaggio di possedere una migliore risoluzione spaziale e non richiedere alcuna manutenzione. Tuttavia, lo scaricamento di questi dati non è libero, come per tutti gli altri prodotti elencati in questo capitolo, ma richiede il pagamento di una somma in denaro.

Tabella 2.10 – Caratteristiche salienti del prodotto di umidità del suolo di VanderSat (Fonte: VanderSat).

Copertura spaziale	globale
Copertura temporale	Aprile 2002 - presente
Risoluzione spaziale	100 m
Risoluzione temporale	1 giorno
Profondità di rilevamento	0-5 cm
Metodo	Downscaling di prodotti delle costellazioni NASA, ESA e JAXA
Formato file	GeoTIFF, netCDF (immagini), CSV (serie temporali)
Portali di distribuzione	VanderSat Viewer, VanderSat API

2.3.3.2 Theia VHSR Soil Moisture product

Theia Land Data Centre è un'iniziativa creata alla fine del 2012 da nove istituzioni pubbliche francesi, coinvolte nell'osservazione satellitare della Terra e nelle scienze ambientali. Lo scopo di tale progetto è la promozione dell'uso del telerilevamento nella valutazione della pressione antropica e climatica sugli ecosistemi e sulle aree locali, nell'osservazione e nella modellazione dei cicli dell'acqua e del carbonio, nel monitoraggio delle pratiche agricole e nella comprensione delle dinamiche della biodiversità. Nell'ambito di quest'iniziativa, si è realizzato il VHSR Soil Moisture

product, un prodotto che offre mappe di umidità del suolo ogni sei giorni, alla scala dei subalterni catastali (~ 12 m), su diversi siti della Francia, dell'Europa e del bacino del Mediterraneo, riportati in **Figura 2.7** e **Tabella 2.11**.

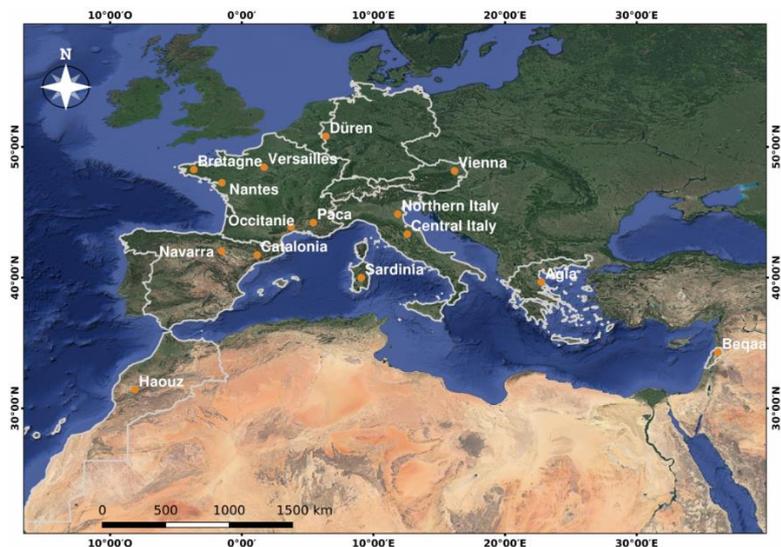


Figura 2.7 – Siti per cui sono disponibili le mappe Theia di umidità del suolo (ottobre 2020) (THEIA-LAND, 2020).

Tabella 2.11 – Siti per cui sono disponibili le mappe Theia di umidità del suolo (ottobre 2020) (THEIA-LAND, 2020).

		DATA	LAND COVER MAP USED
	Occitanie	September 2016 to March 2020	OSO then RPG since August 2019
	Provence	September 2017 to August 2020	OSO then RPG since September 2018
	Chartres-Versailles	March 2016 to August 2020	OSO then RPG since January 2019
FRANCE	Rennes	September 2018 to April 2020	RPG 2017
	Nantes	June 2018 to August 2019	RPG 2017
	La Rochelle-Poitiers	January 2019 to December 2019	RPG 2018
	Maine-et-Loire	January 2019 to December 2019	RPG 2018
LEBANON	Beqaa	September 2017 to August 2020	National Centre for Remote Sensing CNRS-Lebanon 2017
GREECE	Agia	October 2017 to September 2018	IGB-3, Germany
AUSTRIA	Vienna	September 2017 to September 2018	Corine Land Cover map 2018
MOROCCO	Haouz	October 2017 to August 2020	LMI TREMA, Maroc
	Sardinia	September 2017 to August 2020	Corine Land Cover map 2018
ITALY	Northern Italy	September 2017 to October 2019	Corine Land Cover map 2018
	Central Italy	September 2016 to December 2019	Corine Land Cover map 2018
GERMANY	Dürren	September 2017 to December 2018	IGB-3, Germany
SPAIN	Catalonia	September 2017 to August 2020	SIGPAC
	Navarre	April 2016 to December 2019	Corine Land Cover map

Le misure di umidità del suolo sono ricavate dai dati radar Sentinel-1 e dalle misurazioni ottiche Sentinel-2. L'algoritmo impiegato per l'inversione del segnale radar prevede l'utilizzo di reti neurali, che saranno trattate nel **Capitolo 4**, e si applica alle particelle agricole, che sono individuate attraverso mappe di copertura del suolo. Il modello presuppone, inoltre, come input l'indice NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), che si ottiene dalle immagini Sentinel-2 e di cui si parlerà più approfonditamente sempre nel **Capitolo 4**, per simulare il contributo della vegetazione nel segnale radar totale. Grazie ad una vasta campagna di confronto con misurazioni in situ condotta nei pressi di Montpellier (Francia), la precisione delle stime di umidità del suolo è risultata pari a circa il 6% vol. (THEIA-LAND, 2020).

Tabella 2.12 – Specifiche del prodotto Theia VHSR Soil Moisture (THEIA-LAND, 2020).

Satelliti	Sentinel-1 e Sentinel-2
Copertura spaziale	diversi siti in Francia, Europa e nel bacino del Mediterraneo (vedi immagine)
Copertura temporale	dipendente dal sito d'interesse (vedi qui)
Risoluzione spaziale	scala delle sub-particelle catastali (da 0,2 ettari in su)
Cadenza	6 giorni
Metodo	Reti neurali per l'inversione del segnale radar
Formato dati	GeoTiff
Accesso ai dati	gratuito
Portali di distribuzione	catalogue.theia-land.fr , Thisme

2.4 OSSERVAZIONI

Per concludere la trattazione sui diversi prodotti di umidità del suolo attualmente disponibili, sono di seguito riportate delle considerazioni utili per poter sviluppare l'obiettivo di questa tesi. Innanzitutto, è possibile notare come la maggior parte dei prodotti distribuiti sia applicata con successo nella stima delle precipitazioni, nella

valutazione del rischio inondazioni e nel settore agricolo per monitorare la crescita delle colture, i periodi di siccità e la gestione dell'irrigazione a scala globale. Proprio perché la gran parte di questi prodotti possiede una risoluzione spaziale dell'ordine di alcune decine di chilometri, sono fortemente limitate delle possibili applicazioni a scala di campo. Tuttavia, negli ultimi tempi, grazie anche all'avvento dei prodotti ad alta risoluzione del programma Copernicus Sentinel, in diversi studi (*Li et al., 2018; Bai et al., 2019*) si è cercato di incrementare la risoluzione spaziale delle misure di umidità del suolo provenienti dalle missioni SMOS e SMAP. In aggiunta, anche i due prodotti illustrati nel **paragrafo 2.3.3**, che hanno una risoluzione spaziale molto elevata, presentano diversi svantaggi. Nonostante le misurazioni di VanderSat abbiano una copertura globale, il loro principale punto a sfavore è dovuto all'impossibilità di poter accedere liberamente ad esse. Il Theia VHSR Soil Moisture product, invece, è disponibile solo per determinati siti e con delle coperture temporali limitate e, malgrado all'inizio del presente lavoro annoverasse dei dati rilevati in Italia Settentrionale, questi non comprendevano la regione Piemonte. Le stime di umidità del suolo sul territorio piemontese sono state rese disponibili soltanto a partire dal mese di febbraio 2021, quando lo studio si trovava ad uno stadio di sviluppo molto avanzato. Per tutte queste motivazioni, nella presente tesi sono state utilizzate le informazioni provenienti dai satelliti della costellazione Sentinel, disponibili gratuitamente attraverso diversi portali, in modo da poter ottenere delle misurazioni di umidità del suolo con una risoluzione spaziale molto elevata, che possono essere impiegate per controllare i volumi irrigui della pianura piemontese.

3. LE PIATTAFORME PER LA GESTIONE E L'ANALISI DEI BIG DATA DERIVANTI DAL TELERILEVAMENTO

3.1 CONTESTO

Negli ultimi anni, la quantità di dati derivanti dall'osservazione satellitare della Terra, che sono liberamente accessibili e utilizzati da ricercatori, aziende e organismi politici per pianificare e intraprendere azioni volte alla protezione ambientale e alla gestione sostenibile delle risorse naturali, è aumentata notevolmente. Come è possibile osservare in **Figura 3.1**, il volume dei dati accessibili senza limitazioni, provenienti dalle missioni Landsat-7, Landsat-8, MODIS, Sentinel-1, Sentinel-2 e Sentinel-3, è passato da 0,5 PB nel 2015 a circa 4,25 PB nel 2019. Ciò è avvenuto grazie ai progressi tecnologici e alle politiche di open data adottate dai governi e dalle agenzie spaziali.

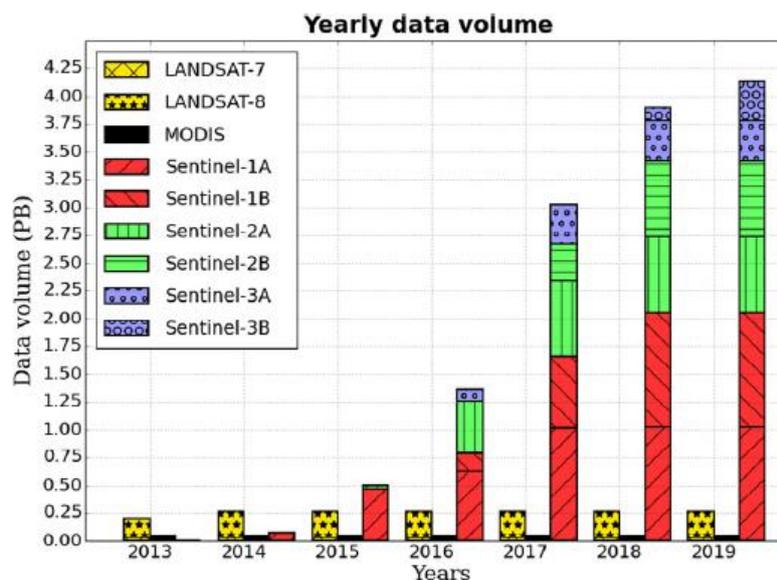


Figura 3.1 – Volume annuale di dati liberamente accessibili prodotti da Landsat-7, Landsat-8, MODIS e le tre missioni Sentinel (Soille et al., 2018).

Gestire questi grandi insiemi di dati spaziali, che spesso superano le capacità di memoria, archiviazione ed elaborazione dei personal computer e che hanno differenti risoluzioni spaziali, temporali e spettrali, è divenuto complesso. Per facilitare l'accesso e la manipolazione dei dati, si è reso, dunque, necessario sviluppare delle nuove soluzioni tecnologiche basate sul cloud computing e sui sistemi distribuiti. Una delle tecnologie che ha permesso di colmare un'importante lacuna esistente nella memorizzazione e nella gestione dei megadati derivanti dal telerilevamento sono gli Array Database Management Systems (Array DBMS). Si tratta di sistemi di gestione di database in cui i dati, come ad esempio le immagini satellitari, sono rappresentati mediante vettori multidimensionali e regolari. La maggior parte degli Array DBMS ha la capacità di suddividere array di grandi dimensioni in blocchi indicizzati o in porzioni che sono archiviate e condivise tra molteplici computer per migliorare le prestazioni e l'efficienza. Esempi di Array DBMS sono RasDaMan e SciDB, ognuno dei quali ha un proprio linguaggio di interrogazione dei dati. Un altro approccio esplorato per la gestione dei big data provenienti dal remote sensing riguarda il sistema MapReduce. Esso consiste in un'architettura logica che serve a supportare la manipolazione di grandi quantità di dati in cluster di computer. A differenza dei sistemi tradizionali, in cui i nodi di elaborazione e quelli di archiviazione sono separati, nei sistemi MapReduce ogni nodo svolge entrambe le funzioni, riducendo il traffico di rete e incrementando le prestazioni. Tuttavia, le tecnologie appena descritte affrontano questioni legate esclusivamente all'archiviazione e all'accesso ai dati. Ciò risulta problematico perché un numero crescente di applicazioni ha raggiunto una velocità di acquisizione e un volume di dati tali da impedirne lo scaricamento nei sistemi locali per l'elaborazione e l'analisi. L'avvento del modello Moving Code ha consentito di individuare una valida alternativa in questo contesto. Quest'approccio consiste nell'esecuzione di un'applicazione o di un codice sorgente direttamente sui server dove sono collocati i dati, senza che ci sia spostamento degli stessi. Una soluzione basata sul Moving Code è rappresentata dagli ambienti di cloud computing, che sono offerti dai provider come servizi. Questi ambienti hanno il vantaggio di essere altamente scalabili e mettono a disposizione database, strumenti per sviluppatori, spazi di archiviazione e servizi di rete (Gomes et al., 2020). Intuendo le potenzialità di questa

nuova tecnologia, la Commissione Europea ha sovvenzionato lo sviluppo di cinque piattaforme basate su cloud (in **Figura 3.2**) note come DIAS, ovvero Data and Information Access Services (servizi di accesso a dati e informazioni).

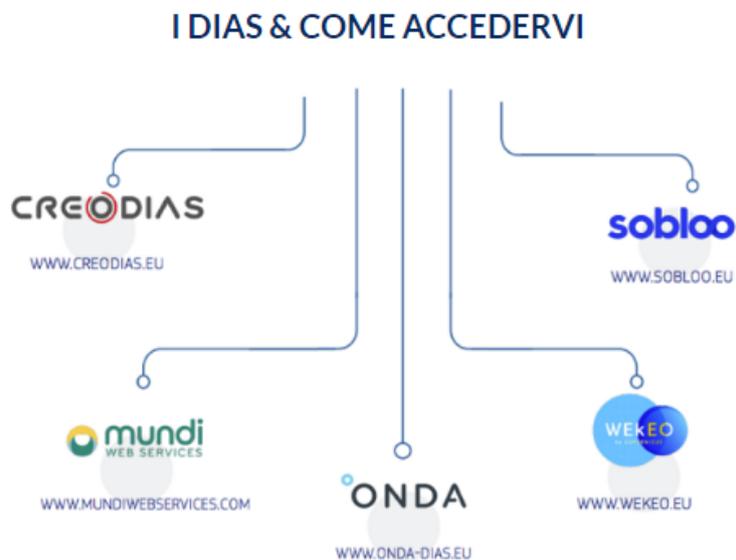


Figura 3.2 – I DIAS e gli indirizzi web di accesso (Fonte: Copernicus DIAS).

Queste piattaforme consentono un accesso centralizzato a tutti i dati e le informazioni del programma Copernicus, già citato nel **paragrafo 1.2**, compresi i dati rilevati dai satelliti Sentinel, i prodotti dei sei servizi operativi di Copernicus e gli strumenti cloud, che possono essere ad accesso libero o a pagamento in base all'effettivo utilizzo. Attraverso i DIAS, gli utenti possono scoprire, adoperare, elaborare e scaricare questi dati oppure possono sviluppare proprie applicazioni e salvarle nel cloud, evitando la movimentazione e il processamento di dati di dimensioni notevoli in locale.



Figura 3.3 – Schema di accesso ai dati grezzi acquisiti da diversi satelliti. I DIAS sono rappresentati dagli Interface Services e consentono ad aziende, sviluppatori e istituzioni di accedere alle informazioni contenute in vari dataset e di realizzare degli specifici prodotti che sono resi accessibili al pubblico finale (aziende e cittadini privati) (Fonte: Copernicus DIAS).

Nei prossimi paragrafi saranno descritte le sette piattaforme cloud per la gestione e l'analisi di dati provenienti dall'osservazione satellitare della Terra indicate di seguito:

- **Google Earth Engine (GEE);**
- **Sentinel Hub (SH);**
- **Open Data Cube (ODC);**
- **System for Earth Observation Data Access, Processing and Analysis for Land Monitoring (SEPAL);**
- **JEODPP;**
- **openEO.**

Per ciascuna piattaforma saranno indicati i proprietari, l'architettura del software le modalità di memorizzazione, elaborazione e disponibilità dei dati, le astrazioni dei dati utilizzati, le possibilità di estensione e di riproducibilità delle analisi. Al termine della trattazione, le varie piattaforme saranno sottoposte a confronto al fine di individuare quella più adatta al calcolo delle stime di umidità superficiale del suolo.

3.2 GOOGLE EARTH ENGINE

3.2.1 Descrizione

Google Earth Engine è una delle prime piattaforme cloud che hanno messo a disposizione degli utenti dei dati geospaziali, già pre-processati e pronti per la fase di analisi, i cosiddetti Analysis Ready Data (ARD), su un'infrastruttura di big data (Vollrath *et al.*, 2020). Infatti, questo sistema, di cui l'azienda Google è proprietaria, è entrato in funzione nel 2010 con lo scopo di promuovere le analisi scientifiche e la visualizzazione di set di dati. È disponibile gratuitamente per la ricerca, l'istruzione e l'utilizzo senza fini di lucro, mentre è necessario ottenere una licenza a pagamento per usi commerciali. Questa piattaforma non deve essere confusa con Google Earth, che è un software che permette la visualizzazione di mappe, immagini satellitari, terreni e edifici in 3D, ma non è uno strumento di analisi. Infatti, a differenza di Google Earth Engine, non consente di vagliare informazioni geospaziali, come la copertura forestale, i cambiamenti di uso del suolo o lo stato delle colture, e di trasformarle in un vero

prodotto applicativo. GEE ha un potere computazionale molto elevato e sfrutta una serie di tecnologie disponibili sull'infrastruttura Google, tra cui il sistema di gestione di cluster di computer su larga scala Borg, i database distribuiti Bigtable e Spanner, il file system distribuito Colossus e l'architettura logica FlumeJava per il processamento di dati in parallelo. Uno schema semplificato dell'architettura del sistema è riportato in **Figura 3.4**.

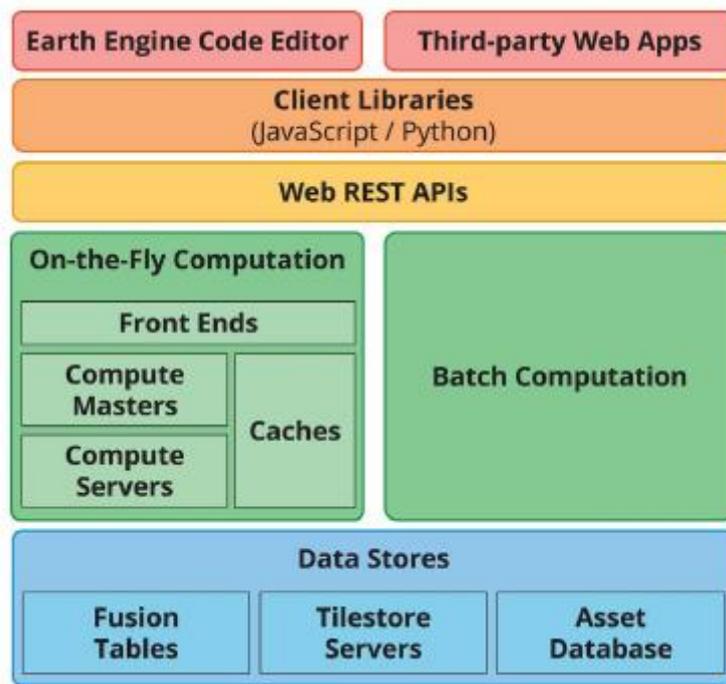


Figura 3.4 – Schema semplificato dell'architettura del sistema di GEE (Gorelick et al., 2017).

Il **catalogo dei dati** disponibile in Google Earth Engine ospita un vasto archivio di dataset geospaziali pubblicamente accessibili, che comprendono l'intero catalogo Landsat, numerosi dataset MODIS, i dati delle missioni Sentinel attualmente operativi e informazioni riguardanti variabili legate alla superficie terrestre, al clima e alla meteorologia. Gli utenti possono accedere e analizzare questi dati utilizzando **JavaScript API** o **Python API**, delle application programming interface dotate di proprie librerie software e linguaggio di programmazione e alle quali sono associati degli specifici ambienti web di sviluppo integrato. Alla versione JavaScript API è abbinato l'**Earth Engine Code Editor**, che è riportato in **Figura 3.5** e consiste in un Interactive Development Environment (IDE) dove i fruitori

possono accedere facilmente ai dati e alle applicazioni disponibili e visualizzare in tempo reale i risultati del processamento (Gorelick *et al.*, 2017).

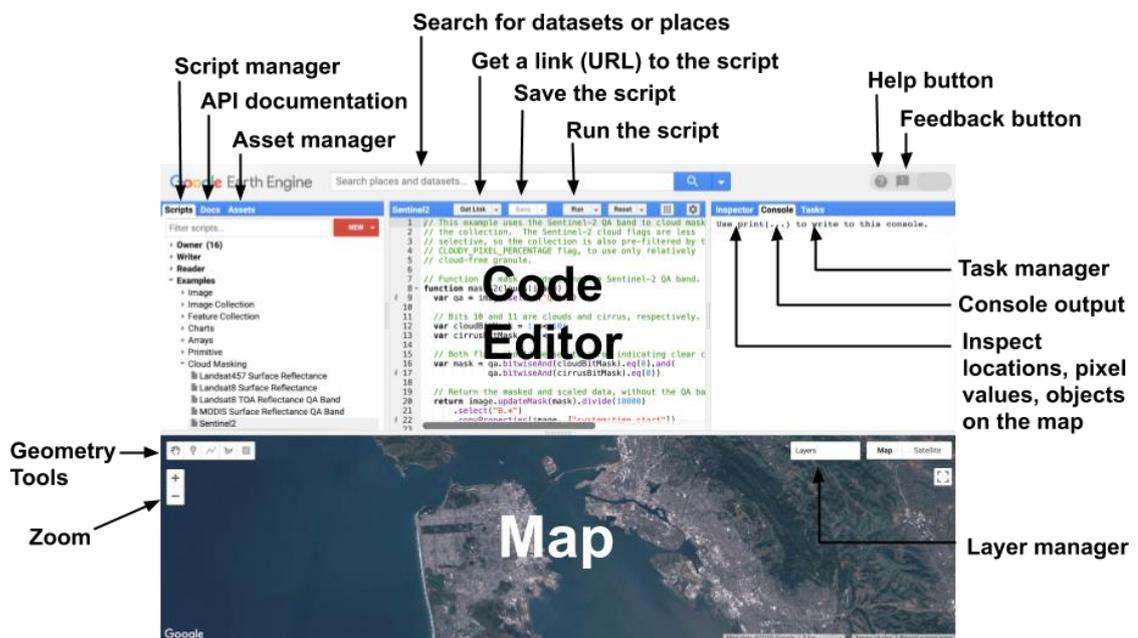


Figura 3.5 – Componenti dell’Earth Engine Code Editor (Google Earth Engine, 2020a).

Come è possibile osservare in **Figura 3.5**, nella parte centrale è collocato il JavaScript editor, dove effettivamente si sviluppa lo script che consente la fruizione, l’analisi e la visualizzazione dei dati. Al di sopra del code editor, vi sono dei pulsanti che consentono l’esecuzione e il salvataggio del codice, la reimpostazione della console e della mappa di output e la creazione di un collegamento web allo script che può essere condiviso con altri utenti. Nella parte inferiore, invece, è presente una mappa su cui sono riportati i risultati dell’esecuzione del codice. Sono, inoltre, contenuti degli strumenti che consentono di navigare nella mappa e di tracciare l’area di interesse direttamente su di essa. Sul lato sinistro dell’interfaccia web sono situati tre schede: lo Script manager, in cui sono archiviati i codici realizzati, quelli condivisi e quelli di esempio ospitati anche in GitHub; l’API reference, che contiene la documentazione completa dell’API; l’Asset manager, attraverso il quale è possibile caricare e gestire i propri dati geospaziali. Anche sul lato destro sono contenute tre schede differenti: l’Inspector tab, che consente di controllare i risultati ottenuti nella mappa; la Console tab, su cui appaiono gli output creati nello script; la Task tab, mediante la quale si

gestisce l'attività di esportazione delle immagini e dei dati vettoriali (*Google Earth Engine, 2020a*).

Per raffigurare i dati, Google Earth Engine utilizza quattro tipi di oggetti:

- **Image**, che rappresenta i dati raster, i quali possono essere costituiti da una o più bande e contengono un nome, un formato di dati, una scala e un tipo di proiezione;
- **Image Collection**, che consiste in una serie temporale di immagini;
- **Feature**, che simboleggia i dati vettoriali, costituiti da un tipo di geometria (punto, linea o poligono) e da un elenco di attributi;
- **Feature Collection**, che rappresenta degli insiemi di dati vettoriali correlati tra di loro.

Il processamento delle informazioni avviene secondo un sistema di elaborazione parallela che suddivide automaticamente il calcolo in modo che possa essere eseguito in un ambiente distribuito, consentendo alla piattaforma di ottenere delle prestazioni molto elevate. Al termine di questo processo, i risultati possono essere visualizzati nell'IDE oppure possono essere salvati in Google Drive, Google Cloud Storage o come un nuovo asset di Earth Engine in diversi formati, tra cui GeoTIFF e TFRecord per le immagini e CSV, SHP, GeoJSON, KML, KMZ per i dati vettoriali.

Dal momento che GEE è un sistema informatico che prevede delle risorse condivise tra gli utenti, sono imposti dei limiti nella modalità di utilizzo iterativo, rappresentata dall'On-the-Fly Computation box in **Figura 3.4**. Queste restrizioni riguardano la durata massima delle richieste, il numero massimo simultaneo di richieste per utente e la massima esecuzione di operazioni complesse come le aggregazioni spaziali. È possibile oltrepassare queste soglie, elaborando i dati in modalità batch. Nonostante la libreria di Google Earth Engine ospiti numerose funzioni per il maneggiamento dei dati satellitari, queste sono di tipo chiuso, cioè non possono essere estese dalle loro funzionalità di base, e l'implementazione di procedure, che non sono direttamente disponibili nell'API, richiede un notevole sforzo da parte degli utenti. Tuttavia, questa piattaforma trova numerosi impieghi in ambito scientifico perché consente di condividere i propri script con altri utenti, riconosce agli utilizzatori la proprietà

intellettuale dei propri codici e la società proprietaria garantisce il non impiego delle informazioni per scopi diversi da quelli di offrire un servizio ai fruitori (Gorelick et al., 2017; Google Earth Engine, 2020a).

3.2.2 Applicazioni

3.2.2.1 Global Forest Watch

Global Forest Watch è una piattaforma online, lanciata dal World Resources Institute nel 2014, che fornisce dati affidabili e aggiornati sulle foreste di tutto il mondo per garantirne una gestione e una conservazione migliori. Per misurare e visualizzare i cambiamenti nella copertura forestale, la piattaforma fa ricorso a Google Earth Engine. Le immagini e i dati sono prodotti con una risoluzione temporale di alcune settimane, che diventa di un giorno nel caso di allarmi di incendio. La risoluzione spaziale è di 30 m per il mondo intero, mentre è più elevata nei punti chiave. Le informazioni contenute nel Global Forest Watch sono utilizzate da aziende, governi e organizzazioni non-profit nella protezione delle foreste dal disboscamento illegale e nella gestione e controllo della silvicoltura (Gunther, 2015).

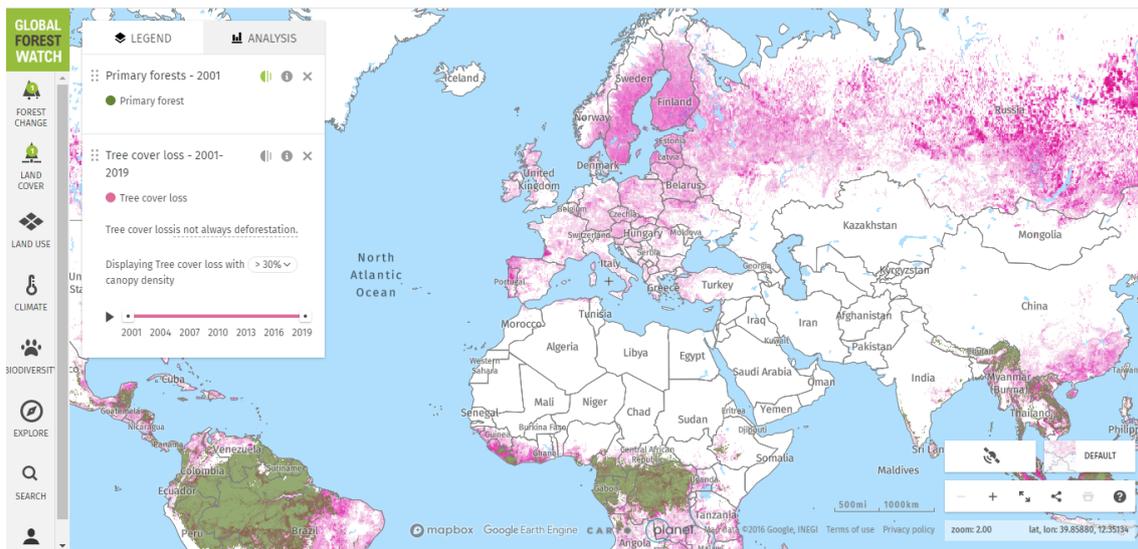


Figura 3.6 – Interfaccia web del Global Forest Watch (Fonte: Global Forest Watch).

3.2.2.2 Collect Earth

Collect Earth è uno strumento, sviluppato dall'Organizzazione delle Nazioni Unite per l'alimentazione e l'agricoltura (FAO) nel 2014 e facente parte del software Open Foris, che è stato progettato per aiutare le istituzioni politiche, le università e le organizzazioni non-profit a monitorare l'utilizzo del suolo, la desertificazione e i cambiamenti della copertura forestale. Collect Earth è accessibile gratuitamente ed è open source e di facile utilizzo. Attraverso l'impiego di Google Earth, Bing Maps e Google Earth Engine, questo strumento è in grado di analizzare singoli appezzamenti di terreno al fine di valutare la deforestazione e altri cambiamenti nell'utilizzo del suolo (Fonte: *Open Foris. Collect Earth*).

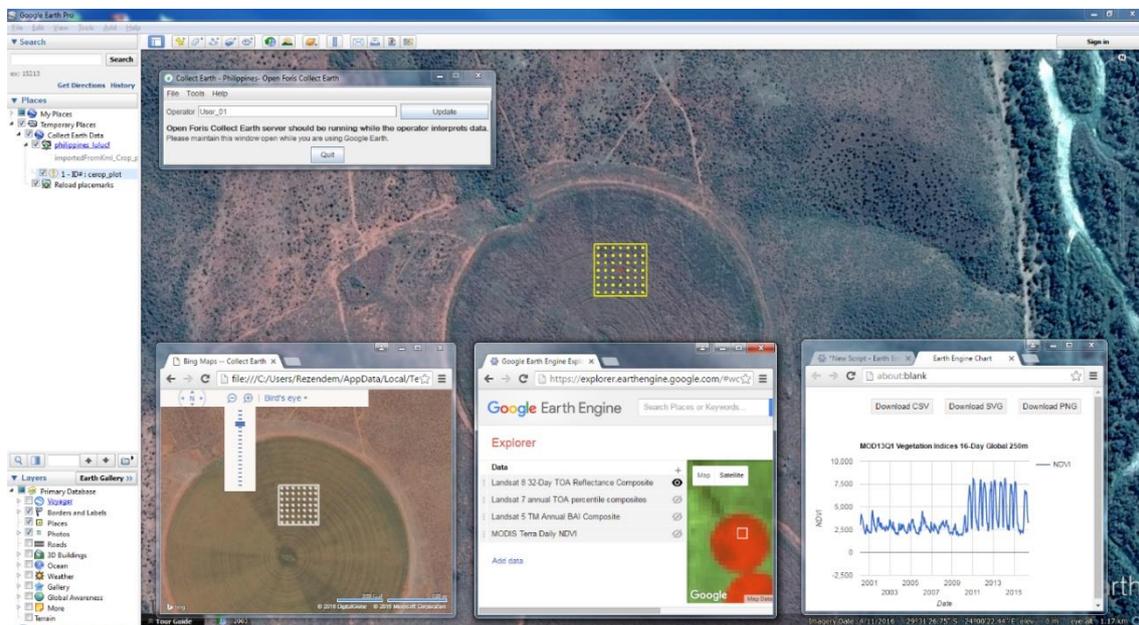


Figura 3.7 – Open Foris Collect Earth (Fonte: Open Foris. Collect Earth).

3.2.2.3 Global Surface Water

Il Centro Comune di Ricerca (JRC) della Commissione Europea, attraverso l'impiego di Google Earth Engine, ha sviluppato il dataset Global Surface Water. Questo è derivato da immagini Landsat raccolte negli ultimi tre decenni e comprende una serie di mappe ad alta risoluzione riguardanti la presenza, i cambiamenti, la stagionalità e le transizioni delle acque superficiali globali. La comprensione delle trasformazioni a cui sono sottoposti nel tempo questi corpi idrici è importante per: garantire la sicurezza

dell'approvvigionamento idrico a livello globale per l'agricoltura, l'industria e il consumo umano; valutare la riduzione e il recupero dei disastri legati a inondazioni; studiare l'inquinamento atmosferico e la diffusione di malattie (Fonte: *Global Surface Water Explorer*).

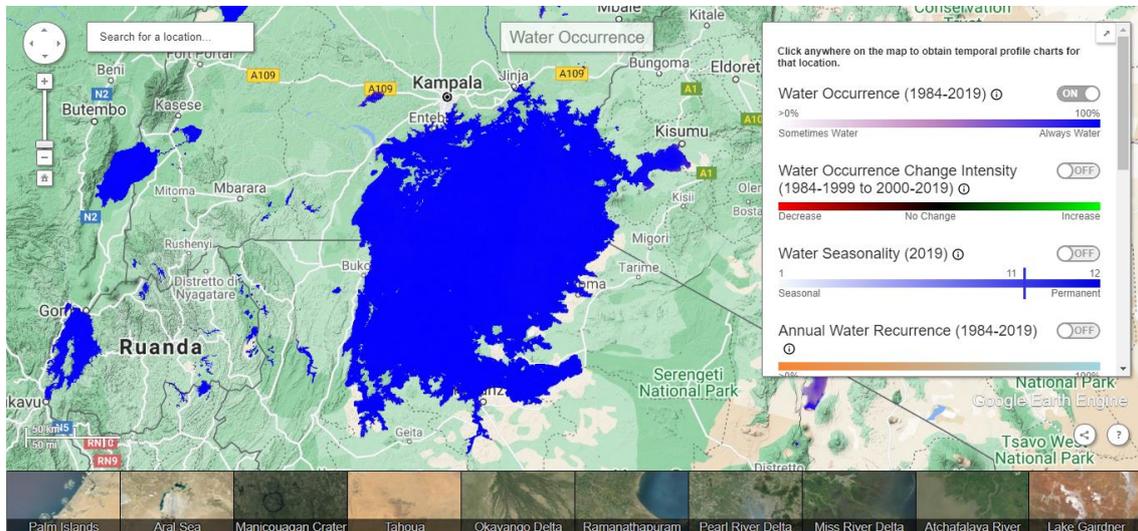


Figura 3.8 – Interfaccia del *Global Surface Water Explorer* (Fonte: *Global Surface Water Explorer*).

3.3 SENTINEL HUB

3.3.1 Descrizione

Sentinel Hub è una piattaforma cloud, sviluppata da Sinergise, che fornisce un facile accesso ai dati dedotti attraverso l'osservazione satellitare della Terra e già sottoposti a pre-processamento. Poiché si tratta di una piattaforma privata, l'utilizzo delle varie funzionalità, a differenza di Google Earth Engine, dipende dai piani tariffari prescelti dagli utenti. Il piano gratuito consente di visualizzare e scaricare dati grezzi attraverso le app EO Browser e Sentinel Playground. Mediante EO Browser (<https://apps.sentinel-hub.com/eo-browser/>), è possibile ricercare e confrontare immagini a piena risoluzione, provenienti dalle missioni riportate in **Figura 3.11**, selezionando semplicemente l'area di interesse, l'intervallo di tempo desiderato e la percentuale di copertura nuvolosa. L'app consente, inoltre, di provare diverse visualizzazioni o di crearne delle proprie, di

ricavare dati statistici per analisi a medio/lungo termine, di eseguire il download di immagini ad alta risoluzione e di realizzare dei time-lapse.

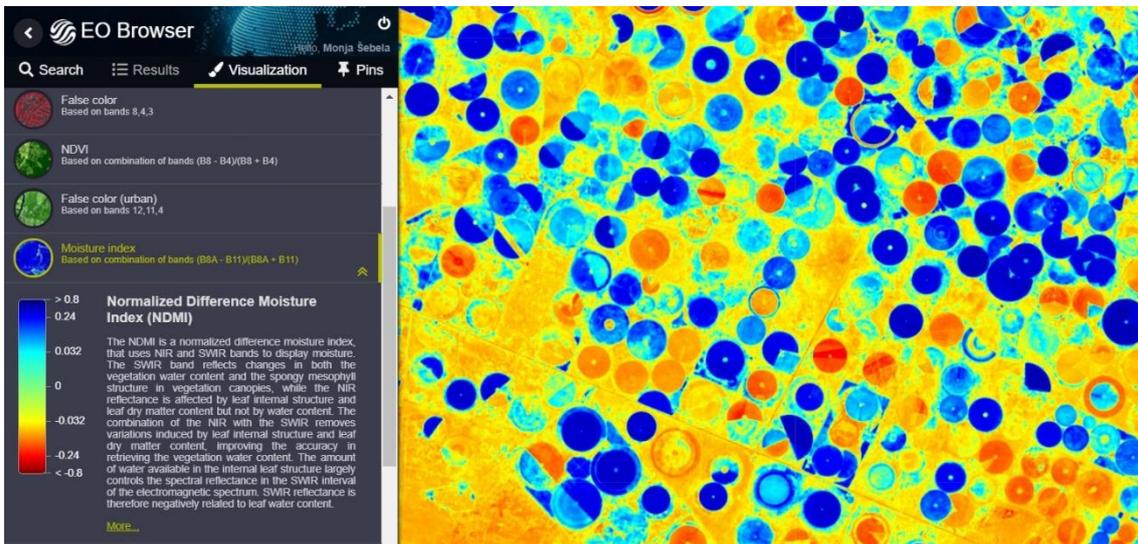


Figura 3.9 – Visualizzazione dei dati di indice di umidità in EO Browser (Fonte: Sentinel Hub EO Browser).

Sentinel Playground (<https://apps.sentinel-hub.com/sentinel-playground/>) è, invece, un'interfaccia grafica che consente una semplice esplorazione delle immagini Sentinel-1, Sentinel-2, Landsat 8, DEM e MODIS ed è molto utile nella ricerca degli ultimi dati disponibili di particolari eventi, come gli incendi boschivi o la siccità, e nel comprendere come sono strutturati i prodotti satellitari.

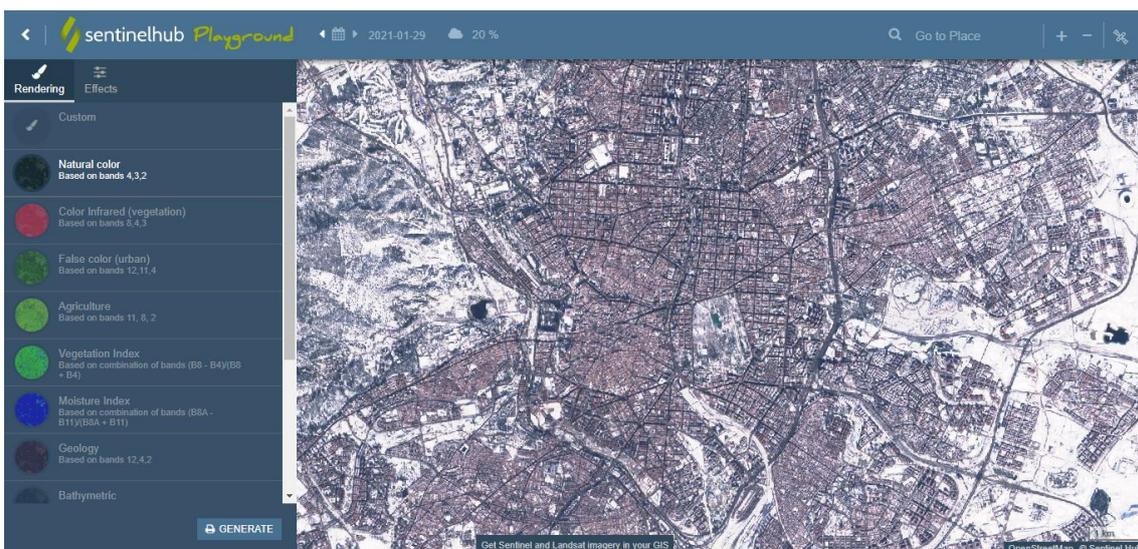


Figura 3.10 – Immagine a colori reali, scattata su Madrid (Spagna), in Sentinel Playground (Fonte: Sentinel Playground).

L'adozione di un piano a pagamento consente l'accesso e l'elaborazione dei dati, sfruttando i servizi di cloud computing forniti da CREODIAS (vedi **paragrafo 3.1**), tramite i protocolli OGC o una specifica API. Uno schema dell'architettura del sistema è contenuto in **Figura 3.11**.

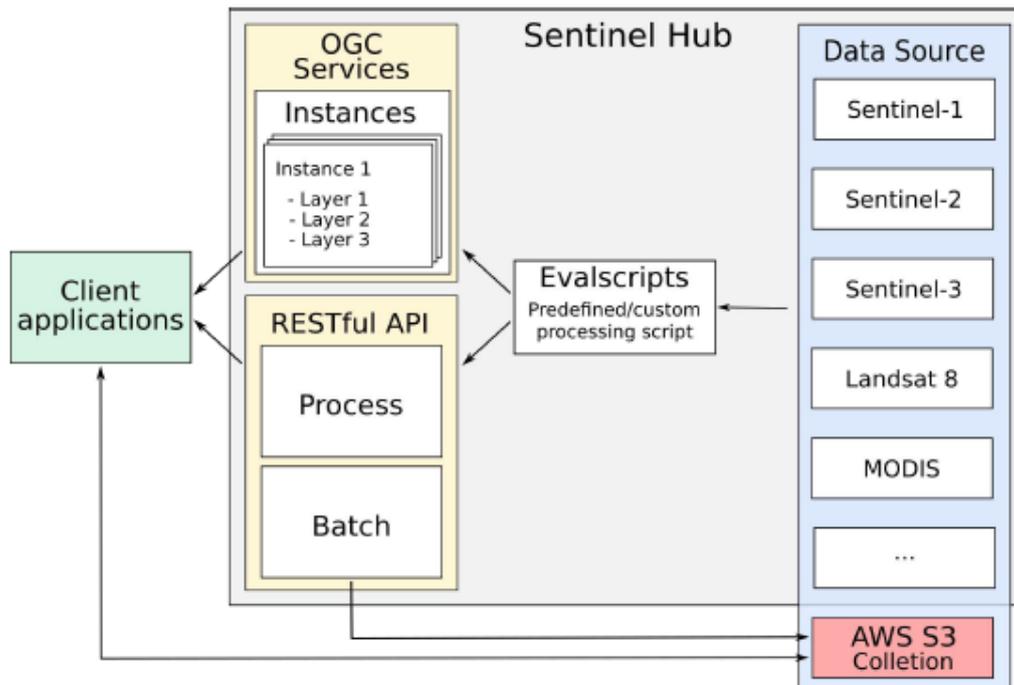


Figura 3.11 – Schema dell'architettura del sistema di Sentinel Hub (Gomes et al., 2020).

Per la rappresentazione dei dati, Sentinel Hub utilizza i seguenti concetti:

- **Data source**, che consiste in un insieme di dati, che condividono lo stesso tipo di bande e metadati, ed è equivalente alle Image Collection di Google Earth Engine;
- **Instance**, che si comporta come un servizio OGC che fornisce un set di layer rispondente alle esigenze degli utenti;
- **Layer**, che è associato a una o più bande di una specifica Data source e di uno script.

All'interno della piattaforma, i codici sono chiamati **Evalsript** e sono applicati a ogni singolo pixel dei dati richiesti. Questi script possono essere eseguiti anche attraverso l'API nelle modalità Process e Batch, che hanno un funzionamento simile a quanto

visto in GEE. Le funzioni contenute nella libreria di Sentinel Hub sono riportate in maniera esaustiva, corredate di esempi, all'interno della documentazione della piattaforma. Tuttavia, queste funzioni hanno lo svantaggio di essere di tipo chiuso e, pertanto, non possono essere estese. Un altro elemento critico è l'assenza di uno strumento che permetta di condividere gli script tra gli utenti direttamente dall'interno della piattaforma. Nonostante ciò, esistono degli archivi in GitHub in cui è possibile condividere i propri codici o trovare numerosi Evalscript, chiamati anche Custom Script, realizzati da altri sviluppatori e pronti all'uso. In maniera analoga a quanto avviene per Google Earth Engine, i termini di servizio di Sentinel Hub riconoscono agli utenti la proprietà intellettuale dei propri codici e garantiscono il non utilizzo dei contenuti per finalità secondarie (Gomes et al., 2020; Sentinel Hub).

3.3.2 Soil Moisture Estimation Script

All'interno dell'archivio Custom Script di Sentinel Hub, è presente un codice per la stima dell'umidità superficiale del suolo mediante l'applicazione del metodo di Change Detection proposto dall'Università Tecnica di Vienna, che sarà trattato nel **Capitolo 4**, utilizzando dati di backscatter rilevati dai satelliti Sentinel-1. Il codice permette di visualizzare dei valori di umidità del suolo compresi tra 0% (colore rosso) e 60% (colore blu) e aventi un'alta risoluzione spaziale. Per ridurre i falsi risultati, i corpi idrici permanenti e le aree urbane sono mascherati attraverso l'imposizione di soglie di intensità di backscatter. Questo approccio di mascheramento risulta robusto perché fa riferimento a lunghe serie temporali di dati. L'algoritmo contenuto nello script può essere applicato globalmente, è resistente alle variazioni stagionali di umidità del suolo e permette di avere buoni risultati su terreni pianeggianti o con una moderata pendenza. Lo script può essere eseguito su Sentinel Playground Temporal, che consente di scaricare gratuitamente solo file in formato .jpg. Utilizzando i piani a pagamento di Sentinel Hub, è possibile eseguire il download di questi dati in formato GeoTIFF, in modo tale che essi siano utilizzabili anche in ambiente GIS (Fonte: *Custom-scripts Sentinel Hub*).

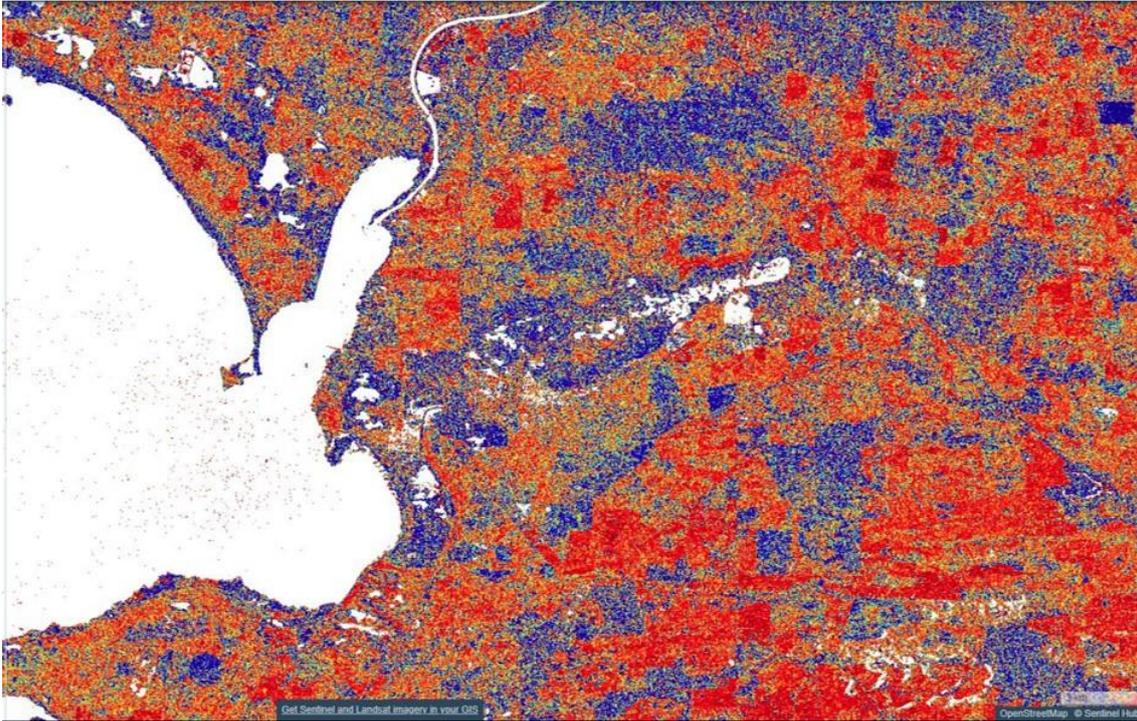


Figura 3.12 – Risultati del Soil Moisture Estimation Script su un'area nei pressi di Malinong in Australia (Fonte: Custom-scripts Sentinel Hub).

3.4 OPEN DATA CUBE

Open Data Cube (ODC) è un software open source, gratuito per tutti gli utilizzi e rilasciato secondo i termini della licenza Apache 2.0, che facilita la gestione e l'analisi dei dati rilevati da satellite. Questa iniziativa è supportata da sei partner istituzionali: Geoscience Australia (GA), NASA/Committee on Earth Observation Satellites (CEOS), United States Geological Survey (USGS), Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization (CSIRO), Catapult Satellite Applications e Analytical Mechanics Associates (AMA) (*Open Data Cube, 2020*). In **Figura 3.13**, è rappresentato uno schema semplificato del funzionamento di Open Data Cube.

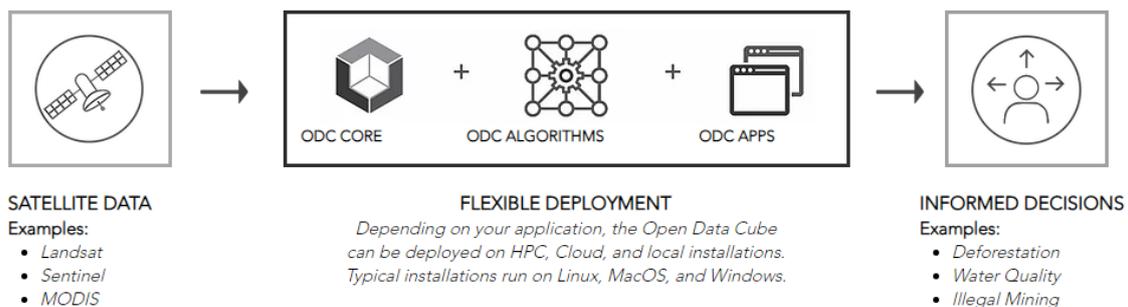


Figura 3.13 – Schema semplificato del funzionamento di ODC (Open Data Cube, 2020).

ODC offre agli utenti dei dati satellitari che possono essere allo stato grezzo oppure già pre-processati e pronti all'uso. L'elemento principale, che si occupa dell'indicizzazione dei dati, è l'ODC Core, che consiste in un insieme di script in Python, che catalogano i metadati attraverso un database PostgreSQL, e fornisce un'API per l'accesso alle informazioni. Inoltre, l'ODC Core funge da base ad una serie di strumenti, presenti in **Figura 3.14**, che agevolano l'utilizzo dei dati per scopi scientifici.

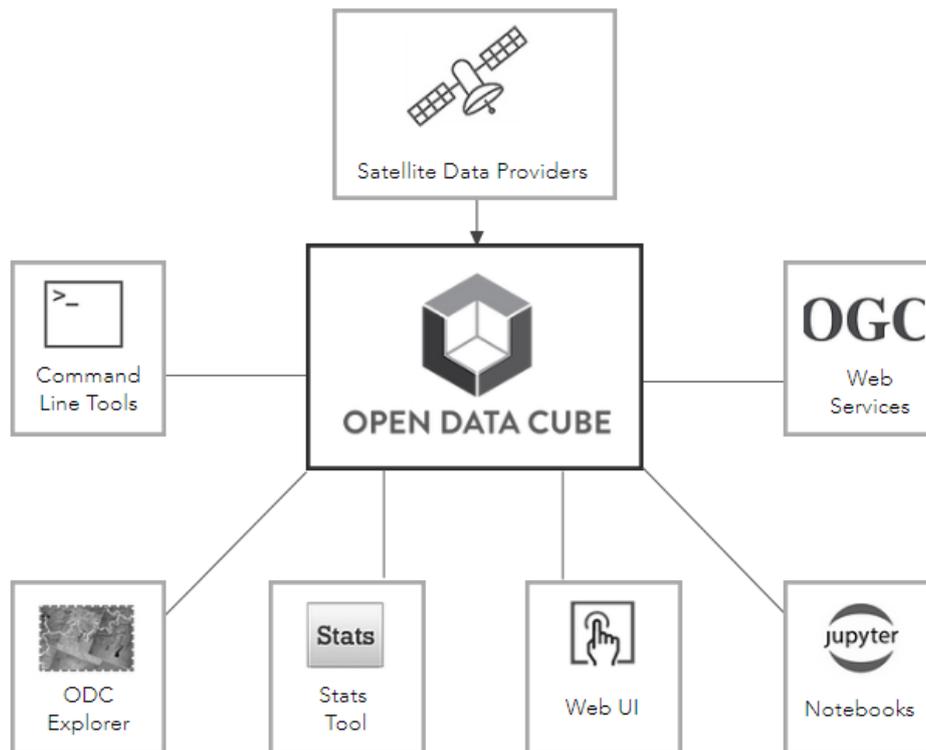


Figura 3.14 – Strumenti che utilizzano l'ODC Core (Open Data Cube, 2020).

Tra questi vi sono:

- **Command Line Tools**, utilizzati dai programmatori come interfaccia con ODC;
- **Open Data Cube Explorer**, un'applicazione web interattiva che consente di esplorare i cataloghi di dati disponibili;
- **Open Data Cube Stats**, che permette di svolgere delle analisi avanzate ed è particolarmente rivolto ai ricercatori;
- **Web User Interface (Web UI)**, un'applicazione web volta a visualizzare gli output dei codici in modo interattivo;
- **Jupyter Notebooks**, un insieme di script eseguibili e commentati molto dettagliatamente, che si rivelano molto preziosi soprattutto per i nuovi utenti;

- **Open Geospatial Consortium (OGC) Web Services**, che connettono dei servizi esterni a Open Data Cube.

Tutti questi strumenti, unitamente al codice sorgente di ODC, sono disponibili attraverso gli archivi di GitHub (<https://github.com/opendatacube/>) (Open Data Cube, 2020).

Per la rappresentazione dei dati, Open Data Cube fa riferimento a due concetti:

- **Dataset**, che è la più piccola aggregazione di dati esistente nella piattaforma e generalmente consiste in delle scene salvate in singoli file;
- **Product**, che è formato da una raccolta di Dataset che condividono lo stesso insieme di misure e alcuni sottoinsiemi di metadati.

A differenza di quanto già visto per Google Earth Engine e Sentinel Hub, la piattaforma non attua una distribuzione di dati tra server e, per tale motivo, la scalabilità dell'archiviazione e dell'accesso alle informazioni e la parallelizzazione dei processi di elaborazione dei dati sono sotto la responsabilità degli utenti (Gomes et al., 2020). Un altro svantaggio è l'assenza di uno strumento che agevoli la condivisione di codici e applicazioni tra ricercatori. Infatti, affinché i risultati raggiunti in ODC siano riproducibili da altri utenti, è necessario condividere e indicizzare manualmente i dati e le applicazioni utilizzate (Gomes et al., 2020). Tra le applicazioni di Open Data Cube più frequenti vi sono la mappatura dei corpi idrici, la classificazione del terreno e l'analisi dei cambiamenti di uso del suolo (Open Data Cube, 2020).

3.5 SEPAL

System for Earth Observation Data Access, Processing and Analysis for Land Monitoring (SEPAL) è una piattaforma cloud, facente parte del progetto Open Foris, già citato nel **paragrafo 3.2.2.2**, e sviluppata con il supporto del Dipartimento Foreste della FAO e della Norvegia per il monitoraggio automatico della copertura del suolo. Unisce dei servizi cloud come Google Earth Engine e Amazon Web Services Cloud (AWS) con dei software open source, tra cui RStudio e GDAL, e il suo codice sorgente, ancora in fase di sviluppo, è disponibile con la licenza MIT su GitHub

(<https://github.com/openforis/sepal>). La piattaforma SEPAL è accessibile tramite il proprio portale web (<http://www.openforis.org/tools/sepal.html>), in esecuzione sull'infrastruttura AWS, oppure può essere installata in locale. Uno schema semplificato dell'architettura del sistema è riportato in **Figura 3.15**.

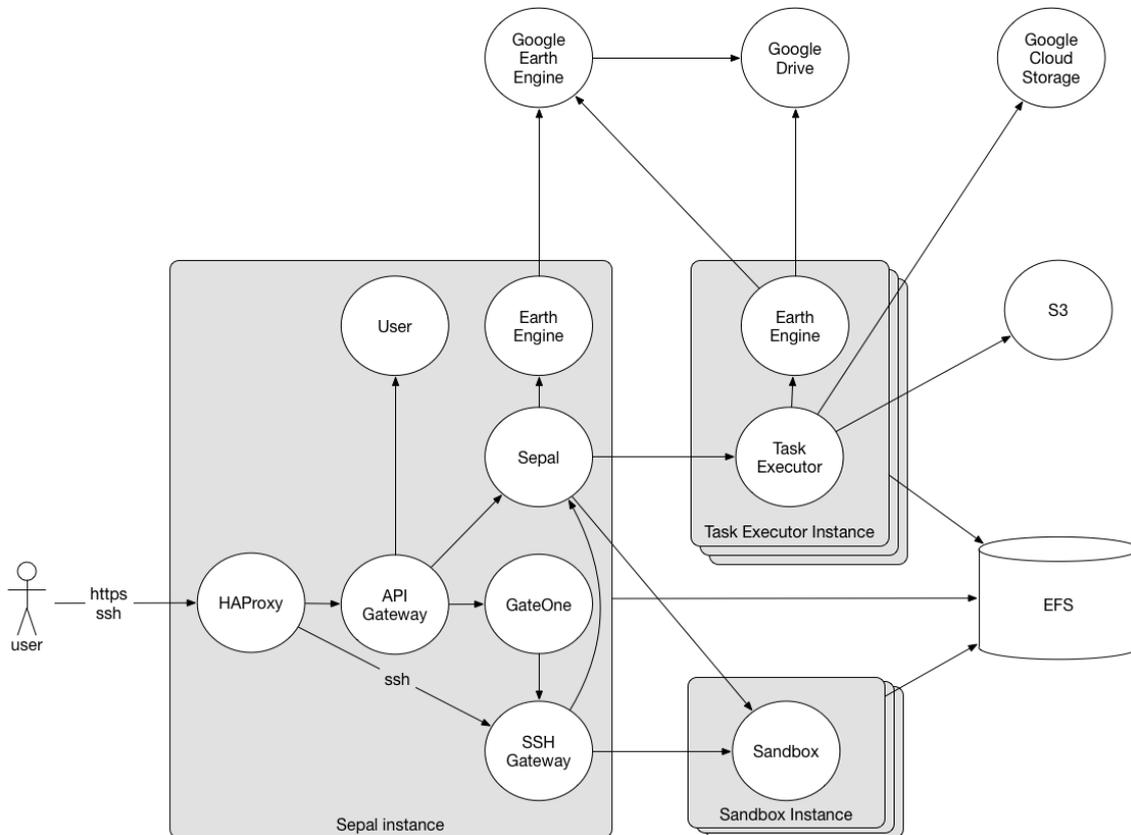


Figura 3.15 – Schema semplificato dell'architettura del sistema di SEPAL (Fonte: Open Foris. SEPAL).

La parte principale del sistema è rappresentata dal server SEPAL e dai sandbox. Il server SEPAL fornisce un'interfaccia web attraverso la quale è possibile esplorare, elaborare e visualizzare dati geospaziali prodotti da diversi provider. I sandbox, invece, sono degli spazi all'interno dei quali gli utenti hanno accesso al proprio archivio e a una serie di strumenti per il trattamento dei dati, come Orfeo ToolBox e Open Foris Geospatial Toolkit (Fonte: *Open Foris. SEPAL*). Per il processamento e il recupero delle informazioni, la piattaforma SEPAL impiega Google Earth Engine, mentre Amazon Web Services Cloud è usato per la conservazione dei dati e, come già anticipato, rappresenta l'infrastruttura su cui è eseguito il sistema. Gli output degli algoritmi implementati in SEPAL possono essere salvati in Google Cloud Storage o Google Drive.

Nel portale web, le funzionalità sono raggruppate in quattro aree differenti:

- **Process**, dove i fruitori di SEPAL possono cercare immagini da visualizzare o sottoporre ad ulteriori elaborazioni, selezionando l'area di interesse, la tipologia di missione satellitare e l'intervallo temporale di riferimento;
- **Files**, in cui gli utenti possono accedere ai file precedentemente salvati in archivio;
- **Terminal**, che permette agli utenti di avviare una macchina virtuale in AWS Cloud tra quelle proposte, a cui è associato un costo orario di utilizzo;
- **App**, dove sono disponibili delle applicazioni per l'elaborazione e l'analisi di dati precedentemente salvati nello spazio di archiviazione personale.

Nonostante SEPAL offra delle funzionalità per la gestione e la visualizzazione dei dati, questa piattaforma si concentra principalmente sulla gestione di macchine virtuali e sulla fornitura di dati pre-processati da altri provider. Inoltre, non sono presenti degli strumenti che consentono la condivisione di script tra utenti (*Gomes et al., 2020*).

3.6 JEODPP

La JRC Big Data Analytics Platform (JEODPP) è una piattaforma basata sul cloud computing, sviluppata dal Centro Comune di Ricerca della Commissione Europea a partire dal 2016 e finalizzata all'archiviazione, alla gestione e al processamento dei megadati ricavati tramite l'osservazione satellitare della Terra. JEODPP impiega un insieme di server per l'archiviazione delle informazioni, che utilizzano il file system distribuito EOS e memorizzano i dati nel formato originale, con la sola aggiunta di rappresentazioni piramidali per velocizzarne la lettura e la visualizzazione. Invece, il processamento utilizza un set di server differente e può essere svolto a vari livelli, come osservabile in **Figura 3.16**:

- **JEO-lab**, che consiste in una visualizzazione e un'elaborazione di alto livello dei dati grazie a Jupyter Notebook e a un'API dotata di interfaccia web;

- **JEO-desk**, livello intermedio raggiungibile attraverso la connessione a un terminale remoto, su cui sono collocati dei software per l'elaborazione dei dati, come R, MATLAB, Grass, QGIS;
- **JEO-batch**, elaborazione batch di basso livello, consentita da HTCondor.



Figura 3.16 – Struttura semplificata della piattaforma JEODIPP (European Commission, 2020).

Il codice sorgente di JEODIPP non è reso disponibile per ulteriori implementazioni e, sulla base della documentazione accessibile, la piattaforma non dispone di strumenti per la condivisione degli script tra utenti. Questa funzionalità è consentita soltanto per l'uso interno del Centro Comune di Ricerca (European Commission, 2020).

3.7 OPENEO

openEO è un'iniziativa, finanziata dall'Unione Europea attraverso il programma Horizon 2020, che è stata avviata nel 2017 con lo scopo di potenziare le tecnologie basate sul cloud computing e riguardanti la gestione, il processamento e l'analisi di grandi volumi di dati telerilevati. Poiché le piattaforme cloud attualmente disponibili hanno tutte diverse API, risulta difficile validare o riprodurre le analisi delle

informazioni e confrontare i vari sistemi informatici in termini di caratteristiche, prestazioni e costi. Pertanto, openEO si prefigge di ridurre queste problematiche fornendo agli scienziati una metodologia standardizzata che consenta di svolgere agevolmente le analisi e le comparazioni di diversi back-end. Per raggiungere questo obiettivo, openEO è stato sviluppato come una piattaforma open source, disponibile su GitHub (<https://github.com/Open-EO>), dotata di un'interfaccia unificata che favorisce l'integrazione tra le infrastrutture informatiche di archiviazione e analisi dei dati geospaziali e le applicazioni del programma europeo Copernicus. L'architettura di openEO, visibile in **Figura 3.17**, è organizzata su tre livelli differenti:

- **Clients**, che comprende diversi pacchetti o moduli in R, Python o JavaScript, i quali fungono da input nei processi di analisi condotti dai ricercatori;
- **openEO o Core API**, che svolge l'omogeneizzazione delle richieste provenienti dai Clients, avvalendosi di alcuni microservizi web, al fine di consentire un accesso standardizzato alle soluzioni tecnologiche per il processamento dei dati;
- **Drivers**, che agisce da collegamento tra openEO API e i servizi di back-end, basati sullo stoccaggio e sull'elaborazione dei dati.

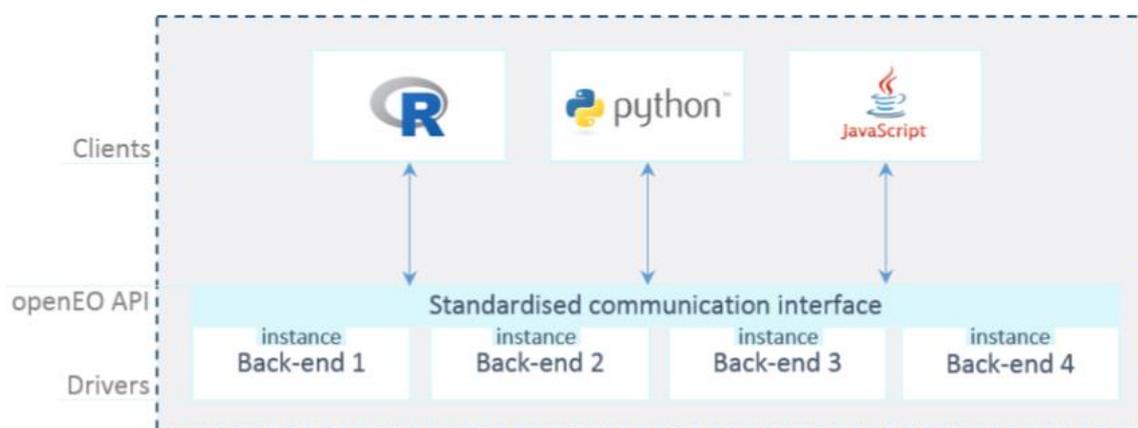


Figura 3.17 – Architettura di openEO (openEO, 2020).

Per la rappresentazione dei dati, si utilizzano due concetti di base:

- **Granule**, che è il più piccolo insieme di dati che può essere gestito in maniera indipendente e riguarda un'area specifica (es. scena);
- **Collection**, che consiste in una raccolta di Granule che condividono le stesse proprietà (openEO, 2020).

Invece, l'interazione tra i Clients e la Core API è governata da quattro tipologie di astrazione:

- **Process Graphs**, che definisce le richieste inviate dagli utenti ai server di openEO;
- **Tasks**, che riguarda l'elaborazione delle richieste;
- **User Defined Functions**, che rappresenta le funzioni definite dall'utente, le quali sono eseguite sul lato server;
- **Data View**, che permette agli utenti di selezionare le risoluzioni spaziale e temporale dei dati da visualizzare.

Nonostante la notevole flessibilità di openEO, dal momento che non sono attuate delle limitazioni alle tecnologie utilizzate nei back-end per l'archiviazione e il trattamento dei dati, non è possibile garantire che tutte le funzionalità della Core API siano anche disponibili nelle varie piattaforme che si occupano dell'analisi dei megadati telerilevati. Per lo stesso motivo, non è assicurato che le applicazioni sviluppate siano eseguite correttamente dai diversi back-end, ponendo dei vincoli alla riproducibilità delle analisi (*Gomes et al., 2020*).

3.8 CONFRONTO E SCELTA DELLA PIATTAFORMA

Nei paragrafi precedenti, sono state illustrate diverse soluzioni, basate sul cloud computing, che consentono di archiviare, gestire ed elaborare grandi volumi di informazioni, ricavate attraverso l'osservazione satellitare della Terra, senza che esse siano scaricate in locale. Inoltre, questi sistemi informatici offrono ai ricercatori e agli utenti dei dati che hanno già subito un certo livello di processamento. Per individuare la piattaforma migliore, mediante la quale stimare l'umidità superficiale del suolo su terreni agricoli, si è fatto riferimento allo studio condotto da *Gomes et al. (2020)*. All'interno di questo lavoro, oltre alla presenza di una panoramica delle piattaforme cloud esistenti, vi è uno spazio molto esteso e dedicato alla valutazione delle stesse. I giudizi espressi sono basati sui seguenti dieci criteri:

- **Astrazione dei dati**, che consiste nella riduzione dei dati telerilevati a un insieme di elementi essenziali, in modo da agevolarne l'utilizzo, senza che vi siano limitazioni nell'accessibilità agli stessi;
- **Astrazione del processamento**, che riguarda la capacità di non rendere visibili agli utenti alcuni dettagli della fase di elaborazione dei dati, senza intervenire sulla potenza di processamento;
- **Astrazione dell'infrastruttura fisica**, che è la capacità di tenere nascosti agli utenti degli aspetti riguardanti il numero di server operanti e le risorse hardware e software;
- **Open Governance**, consistente nella possibilità, da parte della comunità scientifica, di partecipare nella direzione e nello sviluppo della piattaforma;
- **Riproducibilità delle analisi**, che si basa sulla presenza di strumenti volti a facilitare la condivisione degli script e la riproduzione delle analisi da parte di altri ricercatori;
- **Replicabilità dell'infrastruttura**, ovvero la capacità di replicare lo stack software, i processi e i dati su un'infrastruttura propria;
- **Scalabilità di elaborazione**, che riguarda la possibilità di incrementare le prestazioni, aggiungendo più risorse software o hardware, senza che siano modificate le modalità di svolgimento delle analisi da parte dei ricercatori;
- **Scalabilità di archiviazione**, che consiste nella capacità di incrementare lo spazio di archiviazione, aggiungendo più risorse software o hardware, evitando cambiamenti diretti nelle procedure di accesso ai dati;
- **Interoperabilità dell'accesso ai dati**, che si basa sulla presenza di strumenti, costruiti su un'interfaccia unificata, che permettono l'accesso ai risultati delle analisi o al catalogo dati da parte di applicazioni terze;
- **Estensibilità**, che riguarda la possibilità di aggiungere nuovi strumenti software che adoperano i moduli di processamento e archiviazione già presenti internamente nella piattaforma.

Per ogni piattaforma, tutti i criteri sono stati classificati da *Gomes et al. (2020)* secondo tre livelli: basso, medio, alto. Uno schema riassuntivo della valutazione condotta sulle

piattaforme è riportato in **Tabella 3.1**, dove ad ogni giudizio è associato un colore per facilitare la lettura: rosso (basso), giallo (medio), verde (alto).

Tabella 3.1 – Valutazione delle piattaforme di cloud computing (Gomes et al., 2020).

	GEE	SH	ODC	SEPAL	JEODPP	openEO
Astrazione dei dati	Alta	Alta	Alta	Bassa	Bassa	Alta
Astrazione del processamento	Media	Media	Media	Bassa	Bassa	Media
Astrazione dell'infrastruttura fisica	Alta	Alta	Media	Media	Media	Alta
Open Governance	Bassa	Bassa	Alta	Media	Bassa	Media
Riproducibilità delle analisi	Media	Bassa	Bassa	Bassa	Bassa	Bassa
Replicabilità dell'infrastruttura	Bassa	Bassa	Alta	Media	Bassa	N.D.
Scalabilità di elaborazione	Alta	Alta	Media	Bassa	Media	N.D.
Scalabilità di archiviazione	Alta	Alta	Alta	Alta	Alta	N.D.
Interoperabilità dell'accesso ai dati	Media	Alta	Alta	Bassa	Bassa	Alta
Estensibilità	Bassa	Bassa	Alta	Alta	Bassa	Bassa

Tra le piattaforme presentate in questo capitolo, quelle meno adatte allo sviluppo di un'applicazione in grado di misurare l'umidità superficiale del suolo sono SEPAL e JEODPP. In particolare, SEPAL è una soluzione tecnologica che è incentrata principalmente sulla gestione di macchine virtuali e sulla predisposizione di strumenti per l'analisi delle informazioni satellitari. Non essendo direttamente collegata all'elaborazione di megadati, il saper utilizzare in modo efficiente le risorse hardware e software messe a disposizione è compito dei singoli utenti. Dal punto di vista della facilità di utilizzo, sia SEPAL che JEODPP non prevedono delle rappresentazioni

semplificate dei dati telerilevati e l'astrazione dei flussi di processamento. Per tale motivo, gli utenti sono costretti a creare delle applicazioni utilizzando direttamente i file in formato originale e a implementare personalmente delle procedure di elaborazione degli stessi.

Basandosi su questi due criteri citati poc'anzi, invece, la proposta più flessibile è rappresentata da openEO, perché consente ai ricercatori di trattare i dati in diversi modi (scene, serie temporali, cubi e finestre). Tuttavia, la piattaforma non assicura che i sistemi di back-end forniscano dati, funzionalità e implementazioni che siano compatibili tra di loro.

Sebbene Open Data Cube sia la soluzione che presenta il migliore equilibrio tra i criteri investigati, si è scelto di scartare anche questa piattaforma, perché vi è la mancanza di un supporto per la riproducibilità delle analisi, che è un problema riscontrato anche per i sistemi informatici già menzionati. Nella fase di scelta, ai fini del lavoro di tesi, questo criterio risulta uno dei più importanti, dal momento che si vuole ottenere un algoritmo di stima dell'umidità superficiale del suolo che sia applicabile e implementabile da altri utenti. Un altro elemento a sfavore di ODC è il fatto che sia richiesto ai fruitori della piattaforma di essere esperti sulle modalità di processamento utilizzate (sequenziale o parallela). Ciò si rende necessario perché, per eseguire un'elaborazione in parallelo, nonostante siano offerti degli strumenti volti a facilitare lo sviluppo di un'applicazione, lo svolgimento delle procedure è a carico degli utenti.

Infine, Google Earth Engine e Sentinel Hub sono due proposte con delle caratteristiche molto simili. Entrambe sono di facile utilizzo e hanno una maggiore maturità di sviluppo rispetto ad altre soluzioni più recenti. Inoltre, sono delle piattaforme chiuse, ovvero la comunità scientifica non ha accesso alla governance del sistema ed è molto difficoltoso per gli utenti estendere le funzionalità presenti. Malgrado ciò, si è preferito scegliere Google Earth Engine come ambiente di sviluppo dell'algoritmo di recupero dell'umidità del suolo, perché è l'unica piattaforma, tra quelle illustrate, che è dotata di strumenti per la condivisione degli script e per la riproducibilità delle analisi ed è utilizzabile gratuitamente, a differenza di Sentinel Hub che richiede la scelta di un piano tariffario per il suo impiego.

4. I MODELLI MATEMATICI PER LA STIMA DELL'UMIDITÀ DEL SUOLO ATTRAVERSO IL TELERILEVAMENTO

4.1 PRESENTAZIONE

Come già visto nel **Capitolo 2**, la maggior parte dei prodotti di umidità del suolo attualmente disponibili ha una risoluzione spaziale bassa, tipicamente compresa tra i 25 km e i 40 km, che non li rende adatti per studi agricoli condotti a scala locale/di campo. Una possibile alternativa consiste nell'utilizzo dei dati SAR (Synthetic Aperture Radar) della missione Sentinel-1, che uniscono una risoluzione spaziale di 10 m a un tempo di rivisitazione di 6 giorni, considerando sia il satellite Sentinel-1A che Sentinel-1B. Poiché l'Agenzia Spaziale Europea non fornisce alcun prodotto di umidità del suolo derivato dalle informazioni Sentinel-1, si è scelto di elaborare questo grande volume di dati geospaziali, liberamente accessibile, all'interno di una piattaforma cloud. Nel **Capitolo 3**, dopo aver esaminato diverse proposte, si è scelto di utilizzare Google Earth Engine perché garantisce facilità di utilizzo e riproducibilità delle analisi. Nel presente capitolo, si procederà con la descrizione delle principali caratteristiche della missione Sentinel-1 e del funzionamento dei sensori SAR, che sarà utile per comprendere come avviene la stima dell'umidità del suolo. Successivamente, saranno illustrati i modelli matematici più frequentemente utilizzati per il calcolo del contenuto di umidità nel suolo a partire dalle informazioni acquisite. Al termine della trattazione, sarà svolto un confronto tra i modelli presentati, al fine di scegliere quello più adatto ad essere implementato in ambiente cloud.

4.2 LA MISSIONE SENTINEL-1

4.2.1 Caratteristiche generali

Sentinel-1 è una missione sviluppata dall’Agenzia Spaziale Europea, nell’ambito del programma Copernicus, con lo scopo di monitorare la superficie terrestre e l’ambiente marino, di osservare il cambiamento climatico e di offrire un supporto agli aiuti umanitari in situazioni di crisi. Quest’iniziativa è condotta da una costellazione di due satelliti, Sentinel-1A e Sentinel-1B, lanciati rispettivamente nell’aprile 2014 e nell’aprile 2016, che condividono lo stesso piano orbitale. Sui satelliti è collocata una strumentazione radar avanzata, che fornisce immagini in continuo e opera a lunghezze d’onda tali da permettere l’acquisizione di informazioni su di una località, sia di giorno che di notte, indipendentemente dalle condizioni meteorologiche. Maggiori dettagli della missione sono riportati in **Tabella 4.1**.

Tabella 4.1 - Principali caratteristiche della missione Sentinel-1 (Fonte: Sentinel Online).

PRINCIPALI CARATTERISTICHE MISSIONE SENTINEL-1	
Lancio	Sentinel-1A: 3 aprile 2014 Sentinel-1B: 25 aprile 2016
Orbita	Polare, eliosincrona ad un’altitudine di 693 km
Tempo di rivisitazione	6 giorni all’Equatore, considerando entrambe i satelliti
Strumento	Radar ad Apertura Sintetica (SAR) in banda C
Modalità operative e risoluzione spaziale	<ul style="list-style-type: none">• Stripmap (SM) – 5 m x 5 m• Interferometric Wide Swath (IW) – 5 m x 20 m• Extra-Wide (EW) – 20 m x 40 m• Wave (WV) – 5 m x 5 m
Prodotti	<ul style="list-style-type: none">• Livello 0 – dati grezzi SAR compressi;• Livello 1 – dati focalizzati derivati dall’elaborazione delle informazioni L0. Si suddividono in SLC e GRD;• Livello 2 – informazioni geofisiche geolocalizzate, derivate dai prodotti L1.
Principali applicazioni	<ul style="list-style-type: none">• Monitoraggio della superficie terrestre e dell’ambiente marino• Gestione delle emergenze
Accesso ai dati	https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/

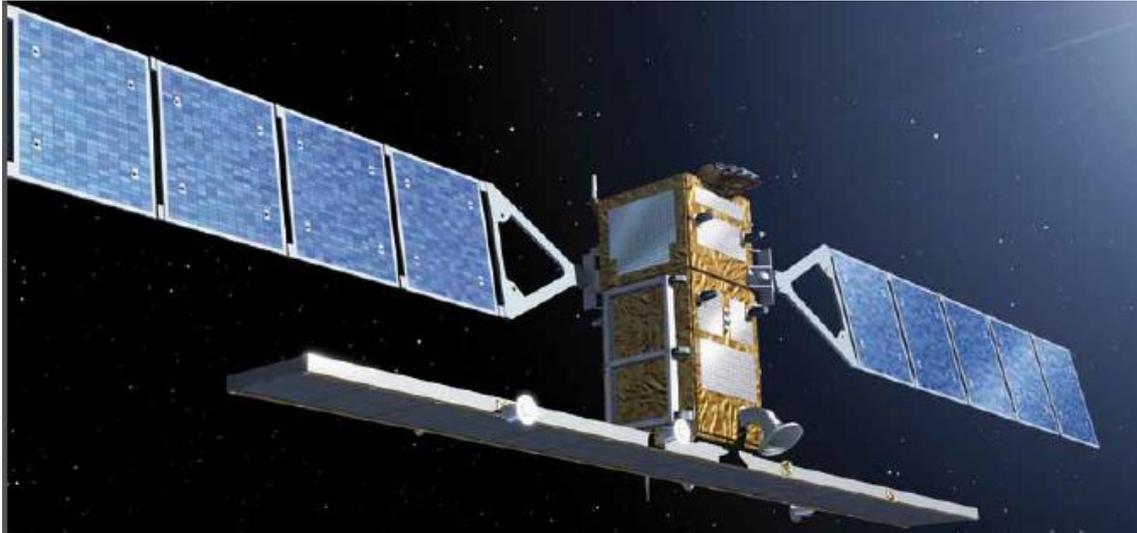


Figura 4.1 - Satellite Sentinel-1 (Fonte: Sentinel Online).

4.2.2 Strumento Radar ad Apertura Sintetica (SAR)

A bordo dei satelliti della costellazione Sentinel-1, è ospitato uno strumento radar ad apertura sintetica (SAR) in banda C che opera ad una frequenza centrale di 5,405 GHz. Questo tipo di banda di frequenza è abitualmente utilizzato nella stima dell'umidità del suolo, perché il segnale radar ha una bassa suscettibilità ai fenomeni atmosferici, è in grado di effettuare rilevazioni anche attraverso dense coperture nuvolose e penetra negli strati superiori del terreno.

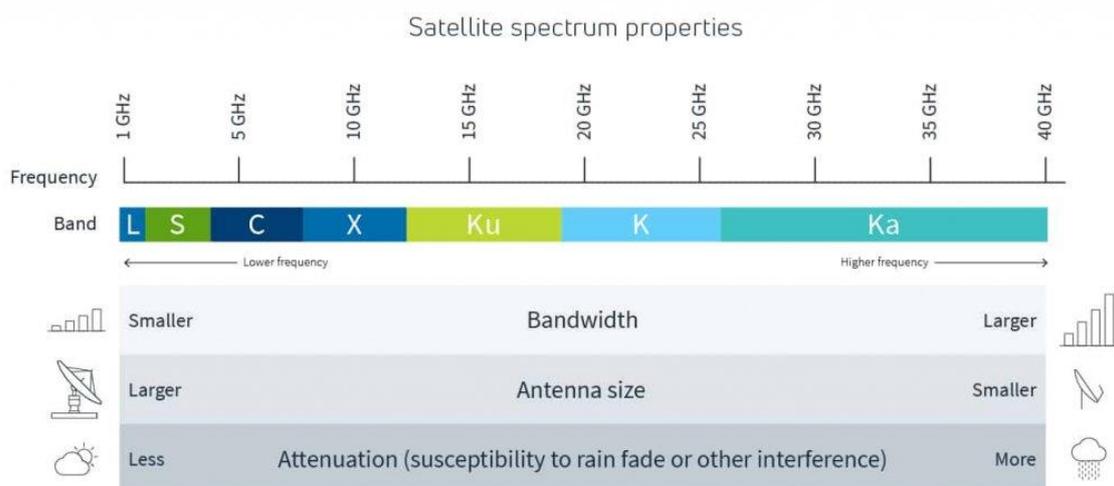


Figura 4.2 – Bande di frequenza radar (Fonte: Lotus Arise).

Lo strumento C-SAR permette una rapida scansione in elevazione e in azimut ed è caratterizzato dalla presenza di due sottosistemi:

- il **sottosistema antenna (SAS)**, costituito da un array attivo a scansione elettronica, che ha il compito di trasmettere e ricevere il segnale radar;
- il **sottosistema elettronico (SES)**, che si occupa del comando e del controllo del segnale radar, ne regola la frequenza, la conversione e la modulazione e cura la digitalizzazione e la compressione dei dati.

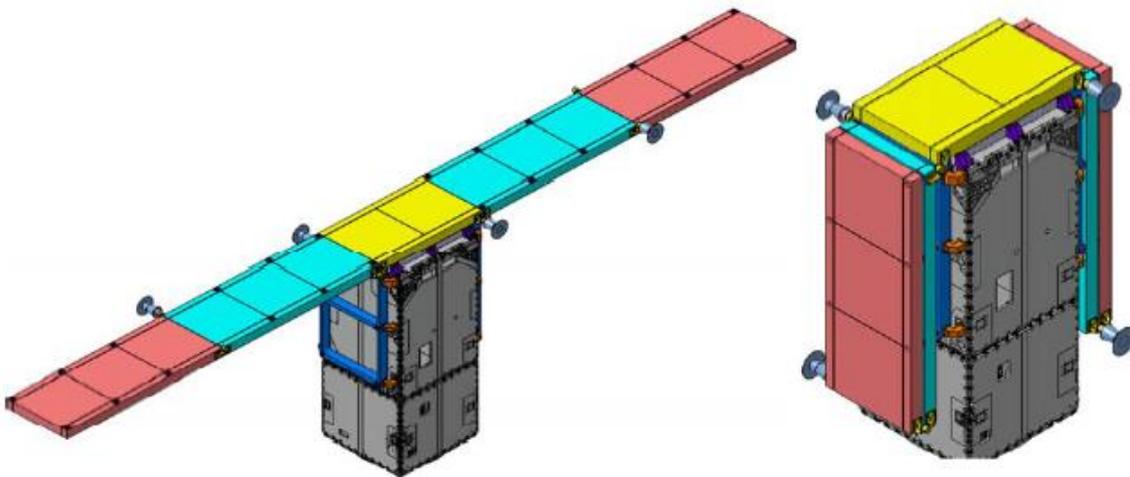


Figura 4.3 - Antenna SAR in posizione (a sinistra) e riposta (a destra) (Fonte: Sentinel Online).

Tale strumento supporta il funzionamento in polarizzazione singola selezionabile (HH o VV) o in doppia polarizzazione (HH+HV, VV+VH), implementato attraverso una catena di trasmissione, intercambiabile su H o V, e due catene parallele di ricezione per le polarizzazioni H e V.

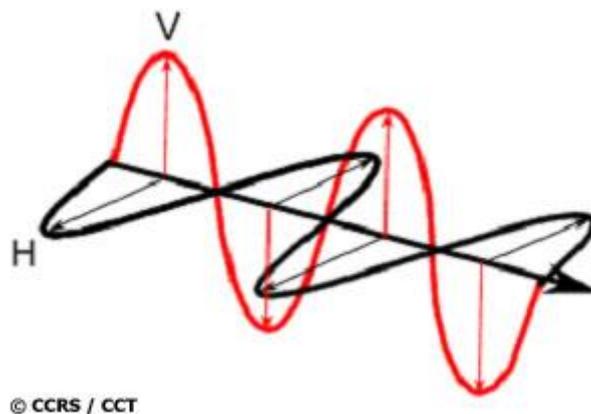


Figura 4.4 - Polarimetria radar (Fonte: Natural Resources Canada).

Può operare in quattro differenti modalità di acquisizione, illustrate in **Figura 4.5**:

- Strip Map (SM);
- Interferometric Wide Swath (IW);
- Extra-Wide Swath (EW);
- Wave mode (WV).

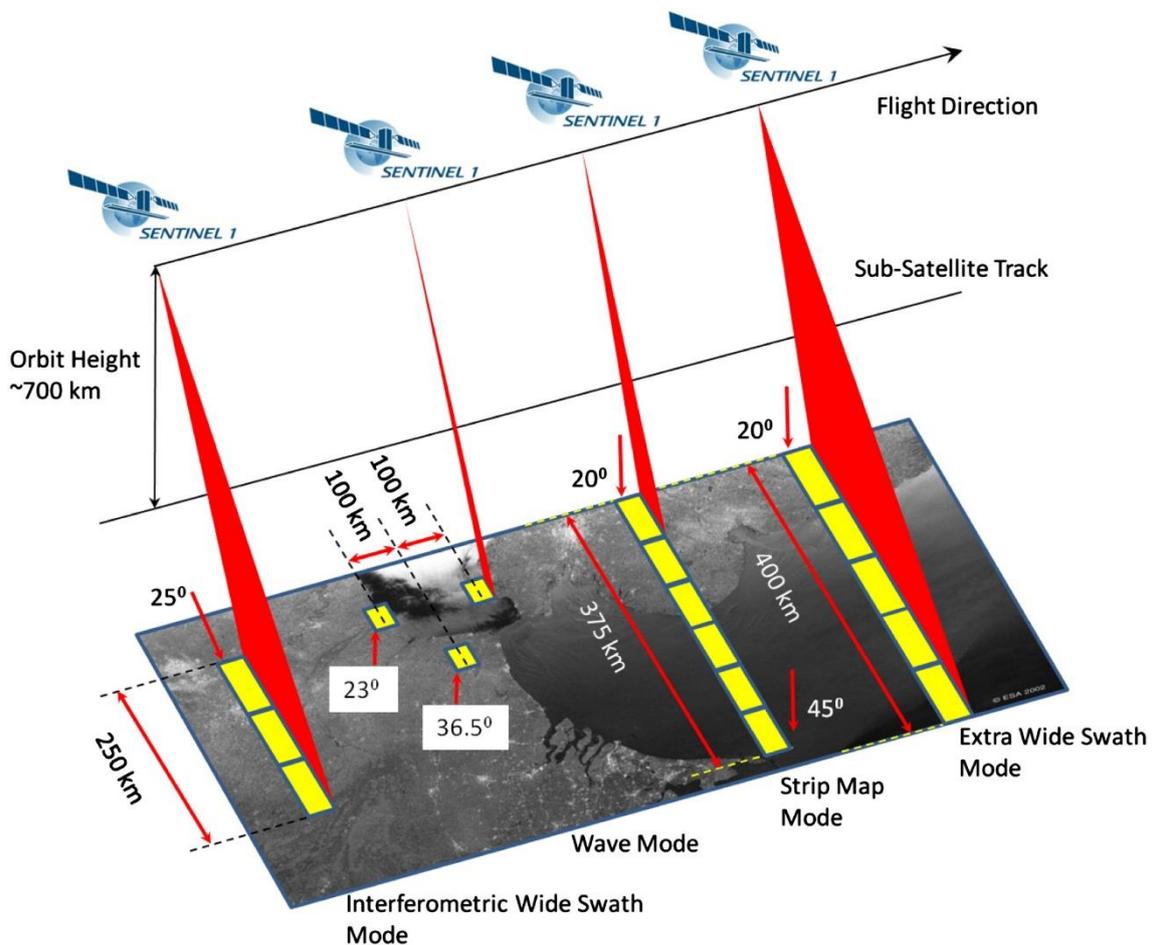


Figura 4.5 - Modalità di acquisizione Sentinel-1 (Fonte: Sentinel Online)..

La modalità **Strip Map** ha l'obiettivo di garantire la continuità delle missioni ERS ed Envisat e fornisce delle immagini con una risoluzione di 5 m x 5 m e una larghezza di acquisizione di 80 km. Sei andane (*swath* in inglese) sovrapposte hanno una lunghezza totale di 375 km. È possibile selezionare una di esse modificando l'angolo di incidenza del fascio radar. La modalità **Interferometric Wide Swath** è quella abitualmente utilizzata per acquisizioni al di sopra delle terre emerse e unisce una risoluzione geometrica moderata (5 m x 20 m) a un'ampia larghezza della strisciata (250 km), la quale può essere suddivisa in tre *sub-swath*. La modalità **Extra-Wide Swath** trova

impiego nella sorveglianza dell'ambiente marittimo e nel monitoraggio dei ghiacciai marini, perché consente di ottenere immagini con una vasta copertura spaziale e tempi di rivisitazione brevi. Differisce dalla modalità IW dal momento che i dati hanno una risoluzione geometrica inferiore (20 m x 40 m) e ogni *swath* può essere suddivisa in cinque *sub-swath*. Infine, **Wave mode** è utilizzata per determinare la direzione, la lunghezza e l'altezza delle onde negli oceani aperti e prevede l'acquisizione di immagini su aree marine di dimensioni 20 km x 20 km, con due diversi angoli di incidenza, ogni 100 km. Le immagini con lo stesso angolo di incidenza sono rilevate su aree distanti 200 km (Fonte: *Sentinel Online*).

I satelliti della costellazione Sentinel-1 seguono delle orbite polari con direzione di volo ascendente o discendente rispetto al Nord, consentendo il rilevamento di dati su una stessa area da due punti di vista geometrici differenti. Quando un satellite percorre la sua orbita nel tratto discendente, muovendosi da Nord verso Sud, inquadra un'area di interesse guardando verso Ovest. Invece, quando si trova nel tratto ascendente della sua orbita, il satellite viaggia da Sud verso Nord e osserva la medesima area rivolgendosi verso Est (*Mora et al., 2016*). L'utilizzo sinergico di informazioni derivanti da orbite ascending e descending consente di ottenere una frequenza di ripetizione di 3 giorni all'Equatore e di 1-3 giorni sul continente europeo (Fonte: *Sentinel Online*).

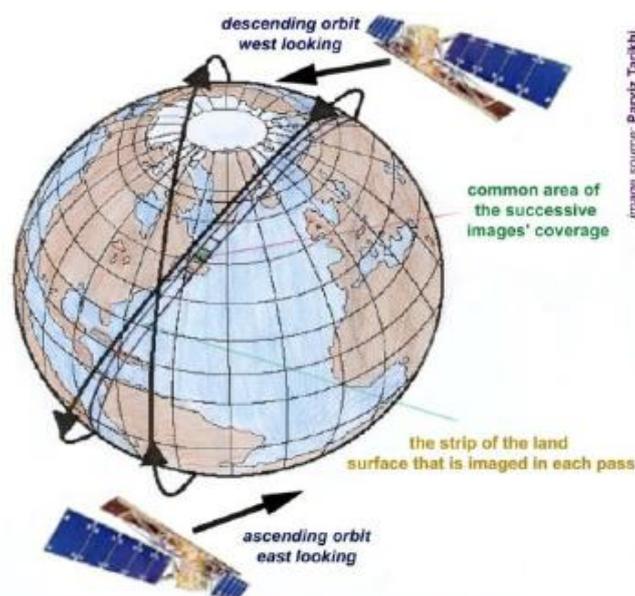


Figura 4.6 - Differenza tra orbita ascending e orbita descending (Tarikhi, 2012).

4.3 MISURAZIONI GEOFISICHE CON SENTINEL-1: ALCUNI CONCETTI TEORICI

Lo strumento radar ad apertura sintetica, ospitato dai satelliti della costellazione Sentinel-1, essendo un sensore attivo, non richiede la presenza dell'illuminazione solare per effettuare dei rilevamenti, pertanto può osservare la Terra in qualsiasi momento del giorno o della notte. Il SAR "illumina" la superficie terrestre, emettendo un'onda elettromagnetica, che forma un angolo con la normale alla superficie nel punto di incidenza, detto angolo di incidenza, e riceve una porzione dell'energia trasmessa come retrodiffusione dal suolo.

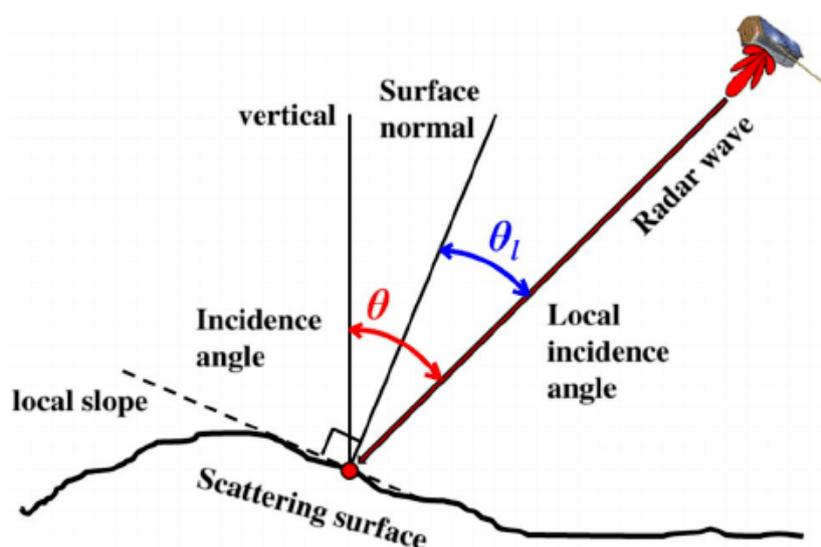


Figura 4.7 - Angolo di incidenza (Rizzoli e Braütigam, 2014).

Il segnale restituito al satellite dipende non solo da quest'angolo di incidenza, ma anche dalla struttura del terreno e dalla rugosità della superficie. Quest'ultima è una componente della tessitura superficiale ed è la misura delle micro-irregolarità finemente spaziate presenti sulla superficie terrestre (Hashmi, 2017). In generale, maggiore è la rugosità, maggiore è il backscattering. Le superfici ruvide disperdono una quantità considerevole dell'energia trasmessa e appaiono più luminose all'interno delle scene riprese dal satellite. Allo stesso modo si comportano dei bersagli strutturalmente complessi come le foreste, perché l'interazione del segnale trasmesso con le foglie, i rami e i tronchi provoca un incremento del segnale restituito al sensore (Fonte: Sentinel Online).

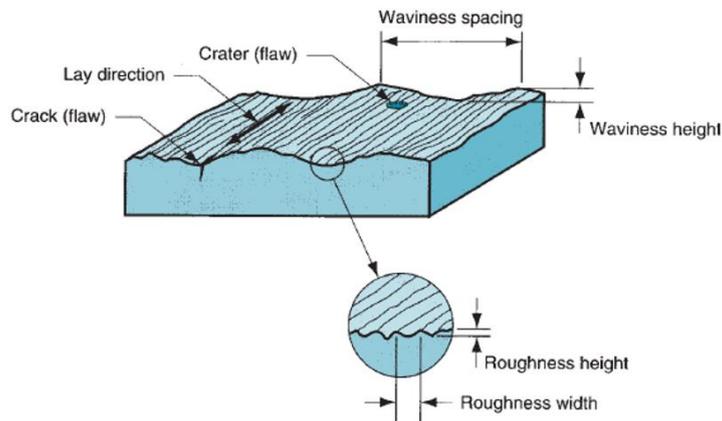


Figura 4.8 – Rugosità superficiale (Janani, 2020).

Nello svolgimento delle misurazioni, un ruolo di primo piano è rivestito anche dalla costante dielettrica dei materiali che compongono il terreno. Questa grandezza esprime la quantità di energia potenziale elettrica, sotto forma di polarizzazione indotta, che è immagazzinata in un dato volume di un materiale sotto l'azione di un campo elettrico (Parker, 2001). Il valore della costante è compreso tra 3 e 8 per il suolo in condizioni secche, mentre è pari a circa 80 per l'acqua. La costante dielettrica influenza la riflettività e la presenza di umidità nel suolo e nella vegetazione causa un incremento significativo del segnale retrodiffuso (Fonte: *Sentinel Online*).

4.4 GLI ALGORITMI DI RECUPERO DELL'UMIDITÀ DEL SUOLO

Le tecniche più largamente utilizzate per il calcolo dell'umidità del suolo a partire dai dati SAR sono (Gao et al., 2017):

- Reti neurali (NN);
- Water Cloud Model (WCM);
- Change Detection Method (CD).

4.4.1 Reti Neurali (Neural Networks – NN)

Le reti neurali sono dei modelli computazionali che si ispirano ai processi biologici del cervello umano e sono costituiti da neuroni artificiali interconnessi tra di loro e organizzati in più livelli. Vi sono:

- uno **strato d'ingresso**, che comprende i nodi deputati a ricevere ed elaborare le informazioni esterne, che possono trovarsi sotto forma di modelli o segnali;
- un certo numero di **livelli intermedi** (hidden layers) dipendente dalla complessità del problema da risolvere;
- uno **strato d'uscita**.

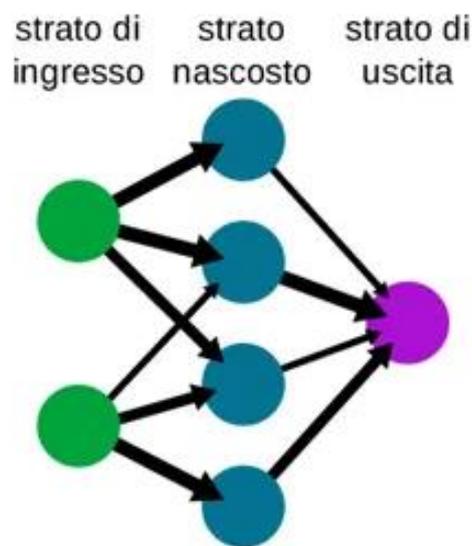


Figura 4.9 – Schematizzazione di una rete neurale (Furioso, 2020).

Ad ogni neurone è attribuito un peso, che inizialmente assume dei valori casuali. Di conseguenza, per ottenere un output corretto, si rende necessario addestrare la rete. Il processo di apprendimento è condotto fornendo dei dati di input alla rete e confrontando i valori in uscita dall'algoritmo con dei risultati noti. Le informazioni di questo raffronto consentono di valutare l'errore commesso dalla rete e sono trasmesse nuovamente all'interno del modello computazionale per calcolare e applicare le correzioni da apportare ai pesi. Quindi, con l'avanzamento dell'addestramento, l'algoritmo è progressivamente modificato affinché la rete fornisca dei risultati sempre più precisi. Al termine di questo procedimento, la rete neurale può essere applicata a

casi con esito sconosciuto (Furioso, 2020). L'utilizzo di queste reti neurali è particolarmente utile nelle applicazioni in cui la complessità dei dati o la difficoltà di elaborazione rende impraticabile il ricorso a soluzioni analitiche. Un esempio è rappresentato dalla stima dell'umidità del suolo attraverso l'inversione di modelli di backscattering radar, come l'Integration Equation Model (IEM) e il modello Dubois modificato (MDM) (Mirsoleimani et al., 2019). Tali modelli hanno come parametri noti le configurazioni del sensore SAR (angolo di incidenza, polarizzazione e frequenza) e come incognite la costante dielettrica del suolo e la rugosità superficiale. Mirsoleimani et al. (2019) hanno calcolato il contenuto d'acqua presente in un suolo nudo, impiegando una rete addestrata per ricevere esclusivamente immagini Sentinel-1, con un'accuratezza del 3-3,3% vol. in polarizzazione VV. Invece, El Hajj et al. (2017) hanno stimato l'umidità del suolo superficiale su aree coltivate utilizzando una rete in cui sono introdotti sia dati radar sia degli indici vegetazionali, derivati da informazioni Sentinel-2, per considerare il contributo della vegetazione nel segnale retrodiffuso. Per terreni in condizioni secche o debolmente umide, i risultati ottenuti sono dotati di un'accuratezza del 4,0% vol. in presenza di informazioni a priori utilizzate per l'apprendimento della rete, che riguardano valori di umidità del suolo misurati in situ e dati di precipitazione rilevati da pluviometri, e del 5,5% vol. senza informazioni a priori. Per suoli umidi, si è raggiunta un'accuratezza del 5,1% vol. e del 6,9% vol. rispettivamente in presenza e in assenza di informazioni a priori. Tutti questi valori riportati si riferiscono all'utilizzo di dati radar in polarizzazione VV.

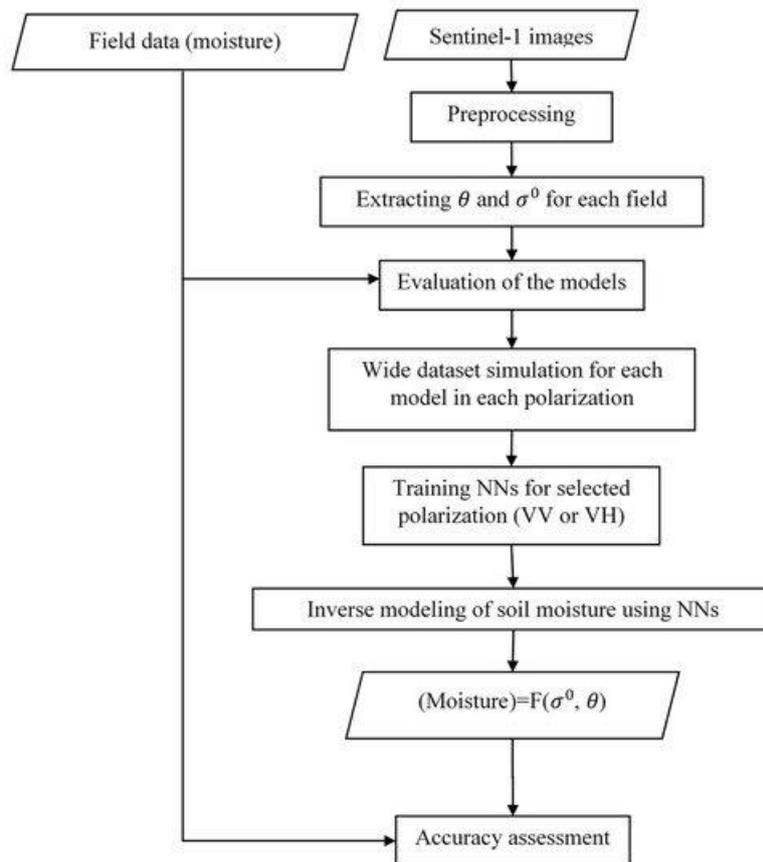


Figura 4.10 – Diagramma di flusso del metodo proposto da Mirsoleimani et al. (2019).

4.4.2 Water Cloud Model (WCM)

Il Water Cloud Model è un modello semi-empirico di diffusione del segnale radar, sviluppato da *Attema e Ulaby (1978)*, che, grazie alla sua semplice impostazione, è largamente utilizzato per stimare l'umidità in suoli coperti da vegetazione. Poiché nel WCM si trascura l'effetto della diffusione multipla tra gli strati di suolo e di vegetazione, il coefficiente totale di backscattering, che rappresenta l'ampiezza del segnale restituito al sensore, è formulato come

$$\sigma^0 = \sigma_{veg}^0 + \tau^2 \sigma_{soil}^0 \quad (4.1)$$

in cui τ^2 è un fattore di attenuazione, che si esprime come

$$\tau^2 = \exp(-2 B V \sec \theta). \quad (4.2)$$

Tale fattore dipende dall'angolo d'incidenza θ del segnale radar e da parametri descrittivi della vegetazione V .

Il primo termine dell'equazione (4.1) descrive il fenomeno di diffusione dovuto alla presenza di vegetazione ed è modellato come

$$\sigma_{veg}^0 = A V \cos \theta (1 - \tau^2). \quad (4.3)$$

Il secondo termine, invece, rappresenta lo scattering dello strato di suolo attenuato dalla copertura vegetale ed è descritto attraverso l'espressione

$$\sigma_{soil}^0 = C 10^D M^v, \quad (4.4)$$

in cui M_v è il contenuto d'acqua presente nel suolo.

A , B , C e D sono dei parametri che derivano dalla calibrazione del modello e dipendono dalla tipologia di coltura e dalla configurazione del segnale SAR. Questi valori possono essere facilmente ottenuti anche da letteratura (Gherboudj et al., 2011).

Bousbih et al. (2018) hanno stimato l'umidità del suolo, mediante il Water Cloud Model, per mappare l'irrigazione in una regione semi-arida della Tunisia, raggiungendo un'accuratezza del 6,4% vol.

4.4.3 Modelli di Change Detection (CD)

I modelli di Change Detection possono essere usati proficuamente quando vi è la disponibilità di dati satellitari multi-temporali e in assenza di informazioni a priori sull'area di interesse. Esistono modelli di CD che utilizzano esclusivamente dati SAR e altri che comprendono sia dati radar che indici di vegetazione. Nel primo caso, si assume che i cambiamenti nella vegetazione e nella rugosità superficiale abbiano una minore influenza sulle variazioni del coefficiente di backscattering rispetto alle oscillazioni di umidità presente nel suolo. Nel secondo caso, invece, è introdotto l'NDVI, illustrato con maggior dettaglio nel **paragrafo 4.4.3.2**, per considerare il contributo della vegetazione nel segnale retrodiffuso. In questo modo, le variazioni temporali di umidità del suolo sono riconducibili direttamente alle dinamiche del segnale radar e l'effetto della rugosità superficiale può essere trascurato (Gao et al., 2017).

4.4.3.1 TU Wien Change Detection Method

Quest'algorithmo di recupero dell'umidità del suolo, impiegato anche dal Copernicus Global Land Service (vedi **paragrafo 2.3.2.1**), è basato sul modello di change detection proposto dall'Università Tecnica di Vienna per le informazioni ASCAT e adattato ai dati Sentinel-1.

Per calcolare il valore di umidità del suolo all'istante t , il coefficiente di backscattering $\sigma^0(\theta, t)$ misurato all'istante t con un angolo d'incidenza θ , è normalizzato a un angolo di riferimento pari a 40° (Bazzi *et al.*, 2019), dal momento che, per acquisizioni in modalità IW, l'intervallo degli angoli di incidenza è compreso tra $29,1^\circ$ e 46° (Fonte: Sentinel Online). Il coefficiente di backscattering normalizzato segue l'espressione

$$\sigma^0(40, t) = \sigma^0(\theta, t) - \beta(\theta - 40) [dB], \quad (4.5)$$

dove β si valuta come la pendenza della retta di regressione lineare in cui la variabile indipendente è l'angolo di incidenza, mentre la variabile dipendente è rappresentata da una serie temporale di coefficienti di backscattering (in dB) sufficientemente lunga (Hornáček, *et al.*, 2012). L'umidità relativa del suolo all'istante t , espressa in percentuale, è data dal rapporto

$$Mv_t(t) = \frac{\Delta\sigma^0(40, t)}{S(40)} [\%], \quad (4.6)$$

dove $\Delta\sigma^0(40, t)$ è la variazione del coefficiente di backscattering normalizzato rispetto alle condizioni secche, calcolata come

$$\Delta\sigma^0(40, t) = \sigma^0(40, t) - \sigma_{dry}^0(40) [dB], \quad (4.7)$$

e $S(40)$ è la sensibilità ai cambiamenti di umidità del suolo riferiti a $\theta = 40^\circ$, espressa come

$$S(40) = \sigma_{wet}^0(40) - \sigma_{dry}^0(40) [dB], \quad (4.8)$$

in cui $\sigma_{wet}^0(40)$ e $\sigma_{dry}^0(40)$ sono rispettivamente il massimo e il minimo valore di backscatter osservati storicamente per ogni singolo pixel.

Per convertire i risultati ottenuti in valori di umidità volumetrica (% vol.), si utilizza la relazione

$$Mv_\alpha(t) = Mv_t(t) \cdot (Mv_{max} - Mv_{min}) + Mv_{min} [\% vol.]. \quad (4.9)$$

Mv_{max} e Mv_{min} rappresentano rispettivamente il valore massimo e il valore minimo di umidità del suolo registrati. È possibile individuarli facendo riferimento a dei valori misurati in situ, se presenti, come nello studio condotto da *Bazzi et al. (2019)*. Sempre nello stesso lavoro, conducendo una vasta campagna di misurazioni in situ nella Francia Meridionale, si è osservato che il prodotto di umidità del suolo fornito dal CGLS, con una risoluzione spaziale di 1 km, ha un'accuratezza del 6,0% vol.

4.4.3.2 Metodo 1 con NDVI

Questo metodo, proposto da *Gao et al. (2017)*, considera il Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), un indice che descrive lo stato di vigoria delle colture, per valutare il contributo della vegetazione sul segnale radar restituito al sensore. Quest'indice si ricava attraverso i dati multispettrali ad alta risoluzione della missione Sentinel-2 e si calcola come

$$NDVI = \frac{NIR-RED}{NIR+RED} \quad (4.10)$$

in cui NIR è la banda 8, mentre RED è la banda 4. L'NDVI ha valori compresi tra -1 e 1 e, per le zone agricole, tipicamente varia tra 0,1 e 0,8.

In questo metodo, la formulazione dell'umidità volumetrica del suolo per ogni singolo pixel (i, j) e in una data d è la seguente:

$$Mv(i, j, NDVI, d) = \frac{\Delta\sigma_{(i,j)}^{NDVI}}{f(NDVI)} (Mv_{max} - Mv_{min}) + Mv_{min}(i, j, d) \text{ [% vol.]} \quad (4.11)$$

$\Delta\sigma_{(i,j)}^{NDVI}$ è la differenza del segnale radar per un dato pixel (i, j) riferita alle condizioni secche e si può scrivere come

$$\Delta\sigma_{(i,j)}^{NDVI} = \sigma_{(i,j),NDVI}^0(d) - \sigma_{dry,(i,j),NDVI}^0 = H_{(i,j)}(NDVI, Mv), \quad (4.12)$$

dove: $\sigma_{(i,j),NDVI}^0(d)$ è il segnale retrodiffuso per una determinata cella (i, j) alla data d , con il valore corrispondente di NDVI; $\sigma_{dry,(i,j),NDVI}^0$ è il più basso valore di backscatter misurato nella cella (i, j) e riferito allo stesso NDVI registrato nella data d ; $H_{(i,j)}(NDVI, Mv)$ è una funzione dipendente da NDVI e dal contenuto d'acqua del suolo nella cella (i, j) .

$f(NDVI)$ è uguale alla massima differenza di backscatter registrata per un valore fissato di NDVI.

Poiché per lo studio non erano disponibili misurazioni in situ in numero sufficiente, Mv_{\max} e Mv_{\min} si sono ottenuti considerando delle limitazioni tecnologiche dei satelliti nel rilevamento dell'umidità del suolo. Come si può osservare in **Figura 4.11**, esiste una relazione lineare tra i valori SMOS di umidità volumetrica del terreno e il segnale retrodiffuso fino a $Mv = 0,32 \text{ m}^3/\text{m}^3$, oltre il quale il segnale si satura e assume un valore costante. Per tale motivo, si è considerato $Mv_{\max} = 0,32 \text{ m}^3/\text{m}^3$, mentre si è scelto $Mv_{\min} = 0,05 \text{ m}^3/\text{m}^3$.

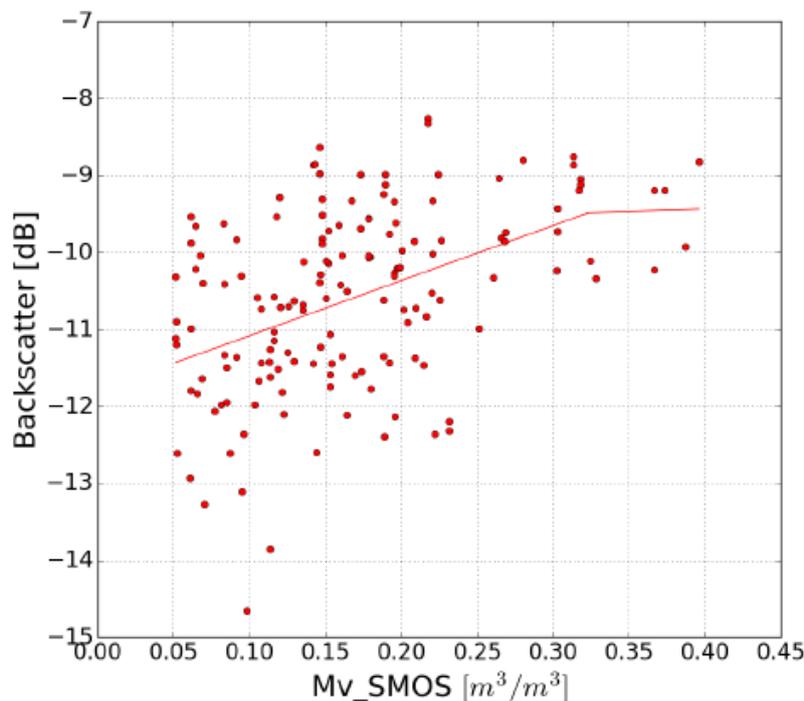


Figura 4.11 – Segnale radar retrodiffuso in funzione dei valori SMOS di umidità del suolo (Gao et al., 2017).

Dalla validazione di questo metodo, si è ottenuto un Root Mean Square Error (RMSE) pari a 8,7% vol.

4.4.3.3 Metodo 2 con NDVI

Anche questo secondo modello, che considera l'indice NDVI, è stato proposto da Gao et al. (2017) e si distingue dal Metodo 1 perché si basa sulla differenza del segnale di

backscattering osservata su due giorni consecutivi t_1 e t_2 di dati Sentinel-1. Quindi, il valore di umidità del suolo $Mv(i, j, t_2)$ per ogni singolo pixel (i, j) segue la formula

$$Mv(i, j, t_2) = H(\delta\sigma(t_1, t_2)) + Mv(i, j, t_1) \text{ [% vol.]}, \quad (4.13)$$

e dipende da $Mv(i, j, t_1)$, che rappresenta la misura di contenuto d'acqua del terreno ricavata per il giorno di acquisizione precedente, e da H , che si calcola come

$$H(\delta\sigma(t_1, t_2)) = \frac{\delta\sigma_{NDVI}}{g(NDVI)} (\delta Mv_{max}). \quad (4.14)$$

All'interno dell'equazione (4.14) $\delta\sigma_{NDVI}$ è la differenza del coefficiente di backscattering tra due date consecutive di acquisizione per un determinato NDVI, mentre $g(NDVI)$ è uguale alla massima variazione del segnale radar corrispondente alla massima oscillazione di umidità del suolo δMv_{max} per lo stesso valore di NDVI. Basandosi su statistiche di misurazioni in situ, si è assunto δMv_{max} pari a $0,15 \text{ m}^3/\text{m}^3$. Per poter applicare questo modello, è necessario disporre di informazioni a priori riguardanti l'umidità del suolo presente nel primo giorno del periodo analizzato. Questo metodo è stato testato con delle misurazioni sul campo, ottenendo un valore di accuratezza pari a 5,9% vol.

4.5 CONFRONTO E SCELTA DEL MODELLO

Tra i modelli analizzati, quello che consente di raggiungere l'accuratezza più elevata è rappresentato dalle reti neurali. Queste reti sono molto vantaggiose da utilizzare perché, per la loro conformazione, sono in grado di lavorare in parallelo, trattando, così, un elevato numero di dati, e permettono di risolvere problemi difficili da studiare per via analitica. Nonostante questi pregi, le reti neurali necessitano della presenza di informazioni a priori riguardanti l'umidità del suolo e la rugosità superficiale affinché forniscano dei risultati accurati. La fase di addestramento delle reti può richiedere molto tempo, se il numero di variabili e di dati analizzati è molto grande, e la riuscita del modello computazionale dipende molto dall'esperienza degli utenti, perché non esistono dei teoremi che stabiliscano la bontà di una rete. Inoltre, in Google Earth Engine, sebbene vi siano delle funzioni di machine learning per la classificazione delle immagini e tenendo presente che la piattaforma è di tipo chiuso, con funzionalità

difficili da estendere, allo stato attuale non è possibile implementare ed eseguire una rete neurale per la stima del contenuto d'acqua del terreno. Per tutte queste considerazioni, si è scelto quindi di scartare questi modelli computazionali.

Il Water Cloud Model è noto per la sua semplice costruzione e permette di ottenere risultati dotati di un'elevata accuratezza, ma richiede la presenza di una conoscenza a priori dell'area di interesse per poter calibrare il modello. Poiché si vuole stimare il contenuto d'acqua del suolo in aree agricole dove potrebbero non esserci delle strumentazioni in situ, si è escluso anche questo metodo.

Dal momento che Google Earth Engine mette a disposizione degli utenti dei dati satellitari multi-temporali e in assenza di informazioni a priori sull'area di studio, il modello più indicato ad essere implementato in ambiente cloud è il Change Detection Method. Dei tre modelli di CD presentati, si è scelto l'algoritmo proposto dall'Università Tecnica di Vienna, che ha una struttura semplice, anche se potrebbe avere una minore accuratezza nei campi agricoli caratterizzati da densa vegetazione, perché trascura l'effetto delle piante nel segnale restituito al satellite. Il Metodo 1 proposto da *Gao et al. (2017)* è stato escluso perché ha una costruzione complessa e un'accuratezza inferiore a tutti gli altri metodi analizzati, nonostante comprenda al suo interno l'indice NDVI. Il Metodo 2, invece, ha una buona accuratezza, ma non è stato applicato dal momento che sono necessarie delle informazioni a priori per poter svolgere il primo step.

5. IMPLEMENTAZIONE DEL CHANGE DETECTION METHOD IN GOOGLE EARTH ENGINE

5.1 INTRODUZIONE

Nel presente capitolo, sarà illustrata l'implementazione del Change Detection Method in Google Earth Engine. In particolare, ci si soffermerà sulla descrizione delle caratteristiche del dataset Sentinel-1 fornito dalla piattaforma e sul codice di calcolo realizzato, mettendo in risalto alcune limitazioni della piattaforma e del modello matematico manifestatesi in fase di sviluppo.

5.2 DATASET COPERNICUS/S1_GRD

Il dataset utilizzato per il calcolo del contenuto di umidità nel suolo in Google Earth Engine è il COPERNICUS/S1_GRD, che consiste in una serie temporale di immagini Sentinel-1 di Livello 1 Ground Range Detected (GRD), già pre-processate e contenenti misure del coefficiente di backscattering σ^0 espresse in decibel (dB). Questa raccolta di immagini è aggiornata quotidianamente e l'inserimento delle nuove scene rilevate da satellite avviene entro due giorni da quando queste sono rese disponibili dall'Agenzia Spaziale Europea. Ogni scena è pre-processata da Google Earth Engine attraverso il Sentinel-1 Toolbox, che consiste in una raccolta di strumenti di elaborazione e in un'applicazione di visualizzazione e analisi di dati delle missioni SAR dell'ESA (Fonte: *The Sentinel-1 Toolbox*). I passaggi applicati nel pre-processamento delle immagini sono i seguenti:

1. **applicazione dei file di orbita**, per ottenere un'accurata posizione delle immagini SAR;

2. **rimozione del rumore e dei dati non validi ai bordi delle scene;**
3. **rimozione del rumore termico**, per ridurre le discontinuità tra diverse sub-swath in scene ottenute con una modalità di acquisizione multi-swath;
4. **calibrazione radiometrica;**
5. **ortorettifica**, che avviene correggendo le deformazioni, presenti nelle scene e accorse durante la fase di ripresa, mediante l'impiego del SRTM DEM 30 m o dell'ASTER DEM per latitudini elevate (maggiori di 60° o minori di -60°).

Per ogni immagine, è possibile selezionare una delle tre risoluzioni spaziali disponibili (10, 25 o 40 metri), la modalità di acquisizione del satellite e le proprietà dell'orbita durante il passaggio satellitare (ascending o descending). Poiché si vuole effettuare uno studio su delle aree agricole a scala di campo, risulta più conveniente impiegare delle immagini con una risoluzione spaziale di 10 m. Ogni scena, inoltre, include una o due delle quattro bande di polarizzazione possibili, dipendenti dalle impostazioni dello strumento, e una banda aggiuntiva chiamata "angle" che contiene il valore approssimato dell'angolo di incidenza per ogni pixel espresso in gradi (*Google Earth Engine, 2020b*).

5.3 IL CODICE DI CALCOLO

Nel presente paragrafo, è presentato lo script realizzato all'interno del Code Editor di Google Earth Engine per il calcolo del contenuto di umidità del suolo, descrivendo dettagliatamente ogni singolo passaggio. Il modello matematico utilizzato nel codice, sulla base delle considerazioni effettuate nel **paragrafo 4.5**, è il Change Detection Method proposto dall'Università Tecnica di Vienna. Una schematizzazione del codice sviluppato è riportata in **Figura 5.1**.

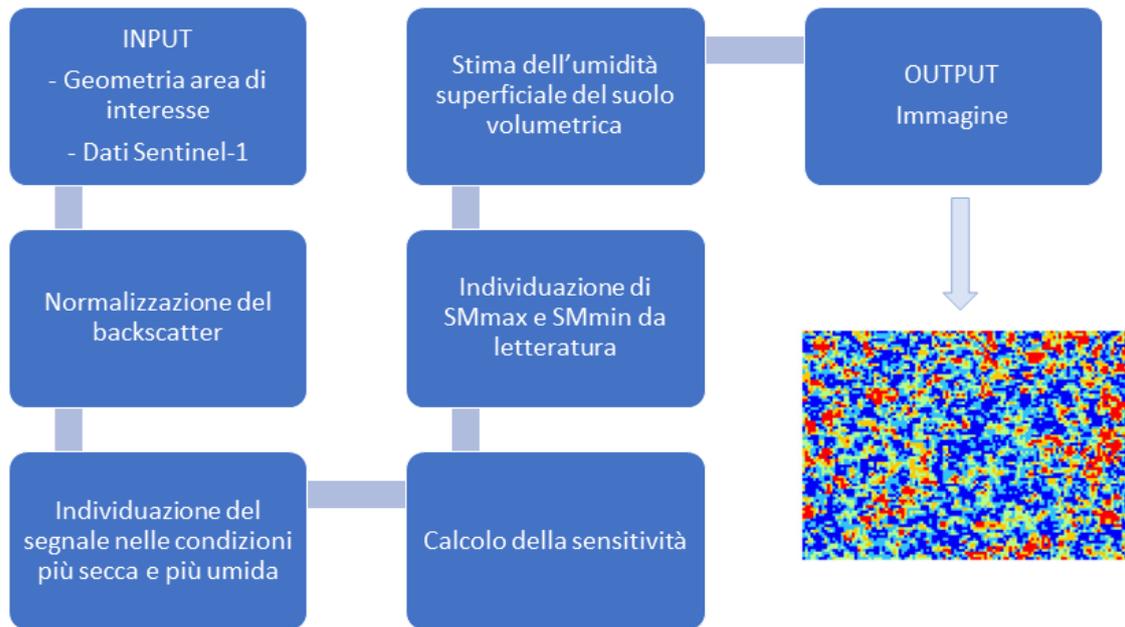


Figura 5.1 – Schematizzazione del codice di calcolo realizzato in GEE.

Il primo step del codice prevede la definizione dell'area di interesse su cui effettuare i calcoli. È possibile tracciare un poligono utilizzando la funzione `ee.Geometry.Polygon` e inserendo al suo interno le coordinate geografiche dei vertici, espresse in gradi, come riportato in **Figura 5.2**. In alternativa, se vi è la disponibilità di uno file in formato .shp rappresentante l'area di studio, è possibile importarlo all'interno della piattaforma cloud come *Asset* e successivamente introdurlo nel codice come *Table*.

```

// Create a geodesic polygon.
var polygon = ee.Geometry.Polygon([
  [[ 7.7007843, 45.3257353], [7.7007843, 45.3167453], [ 7.7135720, 45.3167453], [7.7135720,
  45.3257353]]
]);

// Create a planar polygon.
var planarPolygon = ee.Geometry(polygon, null, false);
  
```

Figura 5.2 – Definizione area di interesse.

Per impostazione predefinita di GEE, una geometria creata all'interno della piattaforma è geodetica e i suoi bordi rappresentano il percorso più breve su una superficie sferica. Per trasformarla in una geometria planare, i cui bordi coincidono con il percorso più breve in un piano cartesiano, si impiega il comando `ee.Geometry` e si imposta un parametro geodetico come **false** (Google Earth Engine, 2020a).

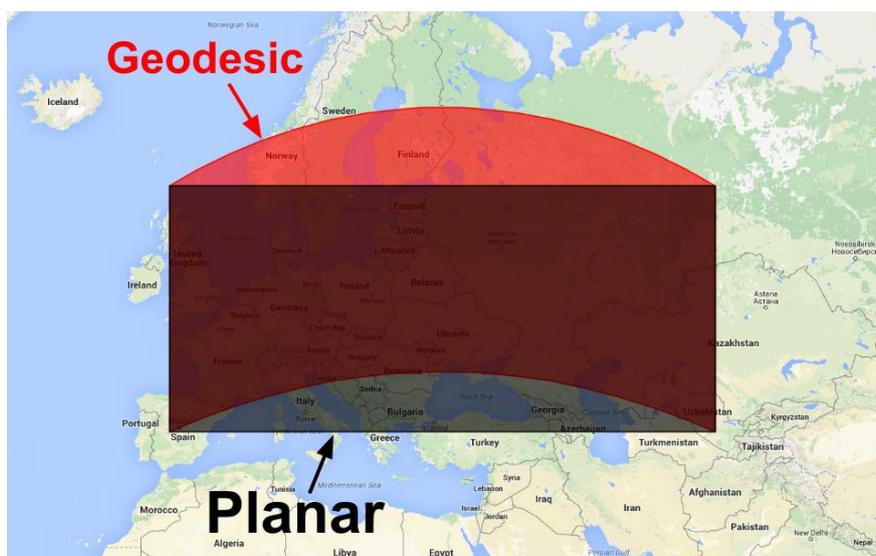


Figura 5.3 – Una geometria geodetica (in rosso) e una planare (in nero) a confronto (Google Earth Engine, 2020a).

Il secondo input dello script è rappresentato dai dati presenti nel dataset COPERNICUS/S1_GRD fornito dalla piattaforma. È possibile filtrare questa Image Collection definendo l'intervallo temporale e la regione di interesse, come rappresentato in **Figura 5.4**. Per stimare l'umidità del suolo, si sono, inoltre, selezionati i dati Sentinel-1 in polarizzazione VV, perché in questa banda il contributo del suolo nel segnale restituito al satellite domina quello relativo alla vegetazione ed è possibile ottenere dei risultati più accurati (El Hajj et al., 2017).

```
// JANUARY
var january=ee.ImageCollection('COPERNICUS/S1_GRD')
    .filterBounds(planarPolygon)
    .filterDate('2018-01-01','2018-02-01')
    .select('VV', 'angle');
```

Figura 5.4 – Definizione dei dati satellitari in ingresso al codice.

Prima di procedere alla normalizzazione dei coefficienti di backscattering $\sigma^0(\theta, t)$ rispetto a un angolo di riferimento $\theta = 40^\circ$, è necessario stimare il parametro β (vedi **equazione (4.5)**). Per il suo calcolo, bisogna disporre di una serie temporale di dati, sufficientemente lunga, su cui eseguire una regressione lineare ai minimi quadrati. Google Earth Engine è in grado di realizzare delle regressioni lineari attraverso dei reducer. Per applicare la funzione `linearFit()`, i dati devono formare un'immagine a due

bande, in cui la prima banda contiene gli angoli di incidenza, che rappresentano la variabile indipendente, mentre la seconda è costituita dai valori del backscattering, che sono la variabile dipendente. L'output della funzione è, a sua volta, un'immagine in due bande, rispettivamente l'intercetta 'offset' e la pendenza 'scale' della retta di regressione lineare. Quest'ultima rappresenta il parametro β calcolato per ogni pixel situato sull'area di interesse.

```
// Select Sentinel-1 images
var collection=ee.ImageCollection('COPERNICUS/S1_GRD')
    .filterBounds(planarPolygon)
    .filterDate('2018-01-01','2019-01-01');

// Calculate the slope parameter for incidence angle normalization
var linearfit=collection.select(['angle', 'VV']).reduce(ee.Reducer.linearFit());
var beta=linearfit.select('scale');
```

Figura 5.5 – Calcolo del parametro β .

Per la normalizzazione dei coefficienti di backscattering, si è realizzata una funzione che aggiunge ad ogni immagine una nuova banda, chiamata "VV_1" e ottenuta tramite l'applicazione dell'equazione (4.5). Questa funzione è eseguita su tutte le immagini presenti nell'Image Collection in ingresso al modello tramite il comando `imageCollection.map()`. Al termine di questo processo, per facilitare i calcoli successivi, si è scelto di creare una nuova serie temporale di immagini contenenti solo il valore normalizzato dei coefficienti di backscattering.

```
// This function adds a band representing the normalized VV backscatter.
// The new band is called 'VV_1'.
var calculateVVnorm=function(image){
    return
    image.addBands(image.select('VV').subtract(beta.multiply(image.select('angle').subtract(40))))
    ;
};

// Map the function over the collection.
var MyCollection=january.map(calculateVVnorm);

// Create a new image collection only with a unique band
// (normalized VV backscatter) for each image
var VVnorm=MyCollection.select('VV_1');
```

Figura 5.6 – Normalizzazione dei coefficienti di backscattering.

Per poter procedere con il calcolo dell'umidità del suolo, bisogna individuare i valori di backscattering massimi e minimi registrati per ogni pixel e calcolare la sensibilità mediante la **formula (4.8)**. I valori massimi e minimi di umidità del suolo inseriti nell'algoritmo sono quelli utilizzati nello studio di *Gao e al. (2017)* e già presentati nel **paragrafo 4.4.3.2**.

```
// Find the driest and the wettest conditions.
var driest=VVnorm.min();
var wettest=VVnorm.max();

// Calculate the sensitivity and define SMmax and SMmin from literature.
var sensitivity=wettest.subtract(driest);
var SMmax=0.32;
var SMmin=0.05;
```

Figura 5.7 – Calcolo dei valori massimo e minimo del coefficiente di backscattering in ogni pixel e della sensibilità.

In maniera analoga a quanto fatto per la normalizzazione del backscattering, per il calcolo dell'umidità volumetrica del suolo, si è creata una funzione che aggiunge ad ogni immagine una nuova banda, ottenuta attraverso l'applicazione dell'**equazione (4.9)**. Una volta eseguita questa funzione su tutti gli elementi dell'Image Collection, si è scelto di creare una nuova raccolta di immagini, contenenti unicamente la banda dei valori di umidità del terreno, per agevolare l'esportazione dei dati.

```
// This function adds a band representing the surface soil moisture.
// The new band is called 'VV_1_1'.
var calculateSSM=function (image){
  return image.addBands(((image.subtract(driest)).divide(sensitivity)).multiply(SMmax-
SMmin).add(SMmin));
};

// Map the function over the collection.
var MyCollwithSSM=VVnorm.map(calculateSSM);

// Create a new image collection only with a unique band
// (surface soil moisture) for each image
var SSM=MyCollwithSSM.select('VV_1_1');
```

Figura 5.8 – Calcolo dell'umidità superficiale del suolo.

Dal momento che non esiste una funzionalità specifica di Google Earth Engine che permetta di esportare tutte le immagini presenti in una Image Collection, si è sviluppata un'apposita procedura che applichi iterativamente la funzione di export di

una singola immagine. Per poter avviare questo ciclo, è necessario convertire l'Image Collection in List, una costruzione di GEE che permette di ricavare una sequenza di immagini. L'esecuzione della procedura ciclica consente il salvataggio di ciascuna immagine, con una risoluzione spaziale di 10 m, all'interno di una cartella Drive, denominata "EE Outputs", attribuendole come nome il giorno e l'orario di acquisizione della stessa. Di default, queste rappresentazioni dell'area di studio sono esportate in formato GeoTIFF, che consente di sottoporle in modo agevole a ulteriori elaborazioni nei software GIS, MATLAB o R.

```
// OUTPUT
// Loop to export images to Google Drive
// The name of each image follows this format: 'YYYY-MM-DD-HH-MM-SS'

// JANUARY
// Locate SSM images of january
var SSM_january=SSM.filterDate('2018-01-01','2018-02-01');
// Find the number of images
var size_january=SSM_january.size().getInfo();
// Create a List with the images of january
var SSM_january_list=SSM_january.toList(size_january);
// Loop to export images
for (var n=0; n<size_january; n++) {
  var image = ee.Image(SSM_january_list.get(n));
  var date = ee.Date(image.get('system:time_start')).format('YYYY-MM-DD-HH');
  date = date.getInfo();
  Export.image.toDrive({
    image: image,
    description: date,
    fileNamePrefix: date,
    folder: 'EE Outputs',
    scale: 10,
    region: planarPolygon,
    maxPixels: 1e13,
  });
};
```

Figura 5.9 – Esportazione dei dati di umidità del suolo in Google Drive.

5.4 LIMITAZIONI DEL MODELLO MATEMATICO

Analogamente a quanto avviene con il prodotto di umidità superficiale del suolo del Copernicus Global Land Service, che è basato su un modello matematico quasi identico, l'algoritmo di recupero implementato in Google Earth Engine non può essere

applicato su deserti, corpi idrici superficiali, aree urbanizzate, foreste e superfici ghiacciate/innevate. Per mascherare i pixel corrispondenti a questi particolari tipi di superfici, è possibile sottoporre le immagini in uscita dal modello a ulteriori elaborazioni in ambiente GIS. Poiché l'algoritmo non considera l'effetto della vegetazione sulle misure di backscatter, potrebbero verificarsi degli errori nel rilevamento dell'umidità del suolo in aree caratterizzate da densa vegetazione. Infine, la correzione del terreno, effettuata dal Sentinel-1 Toolbox, non elimina completamente l'influenza della topografia. Tale limitazione si manifesta principalmente nei territori montani, per i quali il modello potrebbe fornire dei risultati non corretti, ma non interessa in modo particolare le aree agricole, che sono generalmente situate in territori pianeggianti.

5.5 LIMITAZIONI DELLA PIATTAFORMA UTILIZZATA

La limitazione che si è manifestata durante la realizzazione del codice di calcolo riguarda lo scaricamento automatizzato di tutte le immagini facenti parte di una Image Collection. Tale funzionalità non è prevista nella libreria di Google Earth Engine e, per raggiungere tale scopo, si è deciso di sviluppare una procedura che applichi iterativamente la funzione di export prevista per una singola immagine. Per fare ciò, è necessario trasformare l'Image Collection in List, ma questo passaggio potrebbe comportare dei problemi per serie temporali di immagini di grandi dimensioni (*Google Earth Engine, 2020c*). Per tale motivo, all'interno del codice, si è scelto di suddividere Image Collection vaste in diversi sottoinsiemi in fase di download.

6. VALIDAZIONE DEL MODELLO: CASO STUDIO DI CABRIÈRES- D'AVIGNON

6.1 PRESENTAZIONE

Nel presente capitolo, sarà presentato il processo di validazione del modello, così come sviluppato in GEE, con l'obiettivo di esaminarne l'accuratezza delle stime. Per fare ciò, si è deciso di confrontare i risultati forniti dall'algoritmo con delle misurazioni in situ contenute all'interno del database International Soil Moisture Network (ISMN) (<https://ismn.geo.tuwien.ac.at/en/>). Poiché per le stazioni di misura riportate in questa banca dati e situate in Italia sono presenti soltanto delle informazioni relative a un periodo antecedente al lancio della missione Sentinel-1, si è scelto di condurre la validazione del modello presso il sito di Cabrières-d'Avignon, situato in una zona agricola del Sud-Est della Francia.

6.2 DESCRIZIONE DELL'AREA DI INTERESSE

La stazione di misura di Cabrières-d'Avignon è situata nel dipartimento della Vaucluse, appartenente alla regione Provenza-Alpi-Costa Azzurra, in Francia (Coordinate geografiche: Lat. 43° 53' 1.21" N, Long. 5° 9' 53.39" E) (vedi **Figura 6.1**). Nei dati di copertura del suolo forniti dall'ESA, l'area su cui sono collocati i sensori di misurazione è classificata come terreno coltivato non irrigato (Fonte: *ESA CCI Land cover website*). Dal punto di vista granulometrico, il suolo è composto per il 24,20% in peso da ghiaia, per il 47,60% in peso da sabbia e per il 28,20% in peso da silt. La frazione organica costituisce il 2,59% in peso del terreno (Fonte: *International Soil Moisture Network*). Secondo la classificazione climatica di Köppen-Geiger, l'area di

Cabrières-d'Avignon è caratterizzata dalla presenza di un clima di tipo mediterraneo (Fonte: *International Soil Moisture Network*).



Figura 6.1 – Localizzazione della stazione di misura di Cabrières-d'Avignon all'interno della Francia.



Figura 6.2 – Dettaglio dell'area di interesse ricavato mediante Google Earth.

6.3 MATERIALI E METODI

6.3.1 Misurazioni in situ

Per convalidare i risultati del modello implementato in Google Earth Engine, si sono impiegate le misurazioni effettuate tra il 1° marzo 2018 e il 30 giugno 2018 da un sensore che opera con la Time-Domain Reflectometry. Tale strumento, le cui caratteristiche sono riportate in **Tabella 6.1**, acquisisce informazioni a diverse profondità (0,05 m, 0,10 m, 0,20 m e 0,30 m), con una frequenza di campionamento di 1 h. In particolare, si sono considerati i dati di contenuto di umidità nello strato superiore del suolo di spessore pari a 5 cm, che rappresenta la profondità massima alla quale le onde radar emesse dei satelliti Sentinel-1 riescono a penetrare (Fonte: *Copernicus Global Land Service*). Nell'intervallo di tempo analizzato, i valori misurati di umidità del suolo variano tra 8,2% vol. e 32,7% vol.

Tabella 6.1 – Caratteristiche della stazione di misura di Cabrières-d'Avignon (Fonte: International Soil Moisture Network).

Cabrières-d'Avignon (CBR)	
Coordinate	Lat. 43°53'1.21"N Long. 5° 9'53.39"E
Rete di misura	SMOSMANIA
Sensori	Delta-T Devices, ThetaProbe ML2X
Disponibilità dati	Da: 01/01/2008 01:00:00 A: 01/01/2019 00:00:00
Frequenza	1 h
Profondità di misura	0,05 m; 0,10 m; 0,20 m; 0,30 m;
Variabili misurate	Temperatura del suolo [°C] Umidità del suolo [% vol.]
Caratteristiche terreno	Terreno coltivato non irrigato
Classificazione climatica	Csb-clima mediterraneo (Koppen-Geiger)

6.3.2 Immagini Sentinel-1

Per stimare l'umidità del suolo attraverso i dati satellitari, con una risoluzione spaziale di 10 m, si è applicato ai dati Sentinel-1 il Change Detection Method implementato in Google Earth Engine (vedi **Capitolo 5**). Per avere un'alta frequenza di ripetizione dei passaggi satellitari sulla regione di interesse, si sono considerate immagini acquisite sia in modalità ascending, con sorvoli alle ore 17:30 e alle ore 17:39, sia con orbita descending, con passaggi alle ore 05:43 e 05:52. Ciò è anche reso possibile dal fatto che, conducendo la validazione del modello su dati rilevati nel periodo primaverile ed estivo, il rischio di sottostimare l'umidità del suolo per la presenza di ghiaccio, in corrispondenza dei passaggi con orbita descending, è trascurabile. Per i giorni in cui vi è la disponibilità di più sorvoli satellitari, si è selezionata la prima immagine rilevata.

6.3.3 Metodo di validazione

Poiché la strumentazione in situ fornisce delle informazioni di tipo puntuale ed è localizzata in una zona agricola limitrofa a un contesto urbanizzato, come osservabile in **Figura 6.2**, si è scelto di applicare il Change Detection Method unicamente sul campo in cui è situata la stazione di misura. Per ciascuna immagine ottenuta come output del modello, si è calcolato il valore medio dei pixel, che si è poi confrontato con le informazioni derivanti dagli strumenti in loco. Di tutti i dati scaricati dal database International Soil Moisture Network per la stazione di Cabrières-d'Avignon, invece, si sono considerati solo quelli rilevati in prossimità del passaggio dei satelliti. L'accuratezza delle stime di umidità del suolo si è, poi, determinata attraverso il calcolo di alcuni parametri statistici che comprendono lo scarto quadratico medio (*RMSD*), il bias e l'unbiased Root Mean Square Difference (*ubRMSD*). Questi parametri si calcolano attraverso le seguenti equazioni:

$$RMSD = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2} \quad (6.1)$$

$$Bias = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (O_i - P_i) \quad (6.2)$$

$$ubRMSD = \sqrt{RMSD^2 - Bias^2} \quad (6.3)$$

in cui P_i è la misurazione in situ per la data i , O_i rappresenta il valore medio di umidità superficiale del suolo presente nel campo alla data i . I risultati ottenuti sono illustrati nel prossimo paragrafo.

6.4 RISULTATI

L'algoritmo di recupero dell'umidità del suolo implementato in Google Earth Engine è stato convalidato mediante l'utilizzo di misurazioni in loco nel periodo compreso tra i mesi di Marzo 2018 e Giugno 2018. I risultati del confronto sono riportati in **Figura 6.3**, mentre i valori dei parametri statistici calcolati sono contenuti in **Tabella 6.2**.

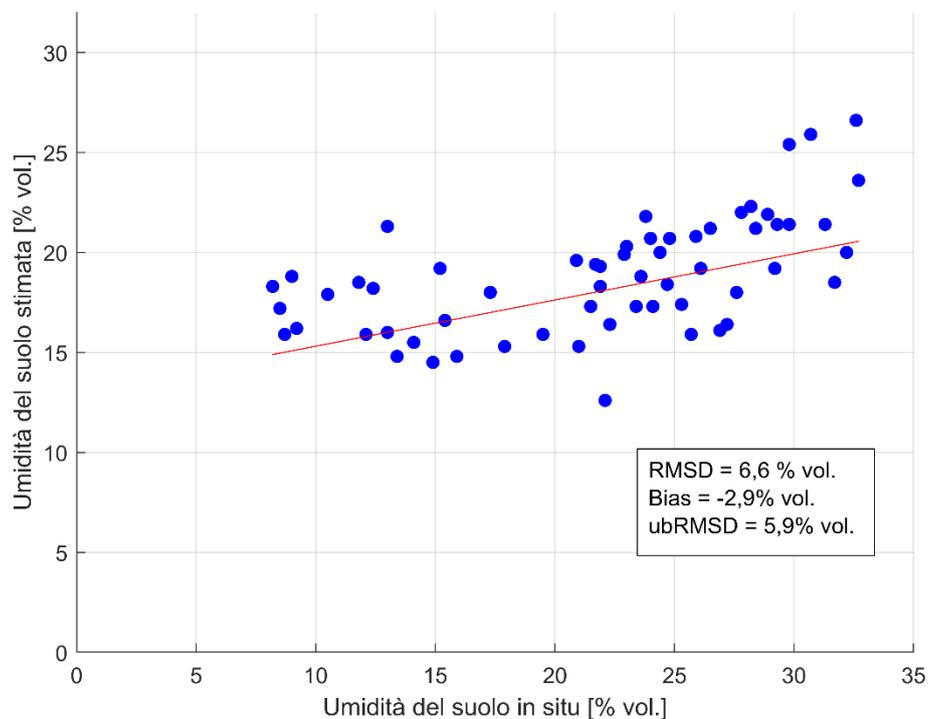


Figura 6.3 – Confronto tra i valori misurati di umidità del suolo in situ e quelli stimati tramite l'osservazione satellitare.

Tabella 6.2 – Parametri statistici del confronto tra i valori misurati di umidità del suolo in situ e quelli stimati tramite l'osservazione satellitare.

RMSD	Bias	ubRMSD
6,6 % vol.	-2,9 % vol.	5,9 % vol.

I risultati di accuratezza ottenuti dal processo di validazione si sono, infine, confrontati con i valori di RMSD tipici di diversi metodi di stima di umidità del suolo, già presentati nel **paragrafo 4.4** e riportati, per semplicità, in **Tabella 6.3**.

Tabella 6.3 – Valori di accuratezza di diversi metodi di stima dell'umidità del suolo

Metodo per la stima dell'umidità del suolo	RMSD [% vol.]
Reti neurali (Sentinel-1 + Sentinel-2)	~ 5 (su aree agricole)
CD Method (Sentinel-1 + NDVI)	
- 1° metodo	8,7
- 2° metodo	5,9
CD Method in GEE (Sentinel-1)	6,6
CD Method (CGLS SSM)	6

Come si può osservare in **Tabella 6.3**, l'accuratezza raggiunta dal modello implementato in GEE è inferiore rispetto a quella che si verifica impiegando le reti neurali o il secondo metodo di Change Detection Method, proposto da *Gao e al. (2017)* e basato sull'utilizzo sinergico di dati radar e ottici, per la stima dell'umidità del suolo. Tuttavia, i metodi sopracitati, come già visto nel **Capitolo 4**, permettono di raggiungere questi valori di accuratezza grazie all'inserimento di informazioni a priori e, pertanto, la loro applicazione è limitata solo sulle aree per cui vi sia una conoscenza pregressa, al contrario di quanto avviene per il modello impiegato nella piattaforma di cloud computing. Rispetto al prodotto fornito dal Copernicus Global Land Service, che ha una risoluzione spaziale di 1 km e utilizza un algoritmo quasi identico, si registra un valore di RMSD leggermente superiore. Ciò è dovuto a una maggiore influenza delle incertezze dovute alla rugosità e alla presenza di elementi sulla superficie terrestre, che, invece, sono più contenute in una scala spaziale meno dettagliata. I risultati del metodo di CD applicato in Google Earth Engine, nonostante le ipotesi semplificative, consentono di ottenere dei risultati migliori rispetto al primo metodo di Change Detection realizzato da *Gao e al. (2017)*, che utilizza anche l'indice NDVI per modellare il contributo della vegetazione nel segnale di backscattering e non necessita di informazioni a priori dell'area di interesse. Per tutte queste motivazioni descritte, si ritiene che il modello implementato nella piattaforma cloud sia abbastanza accurato da poter essere impiegato in altre applicazioni.

7. CASO STUDIO DEL CANAVESE

7.1 INTRODUZIONE

Dopo aver verificato la validità del modello implementato in Google Earth Engine, si è scelto di applicare l'algoritmo di change detection su un'area agricola di 1 km² della pianura piemontese per studiare l'evoluzione nel tempo dei dati di umidità del suolo. Più specificatamente, si è analizzata la relazione tra il contenuto di acqua nel terreno e i dati di precipitazione, evidenziando i punti di forza e delle limitazioni del modello. Per esaminare il contributo dell'irrigazione nel segnale di umidità del suolo, a causa dell'eccessivo frazionamento dei terreni, si è reso necessario lavorare a scala di campo. Una volta individuati gli appezzamenti di terreno su cui si svolgono attività irrigue, si sono, infine, stimati i volumi di irrigazione attraverso la valutazione del bilancio idrologico del suolo.

7.2 DESCRIZIONE DELL'AREA DI INTERESSE

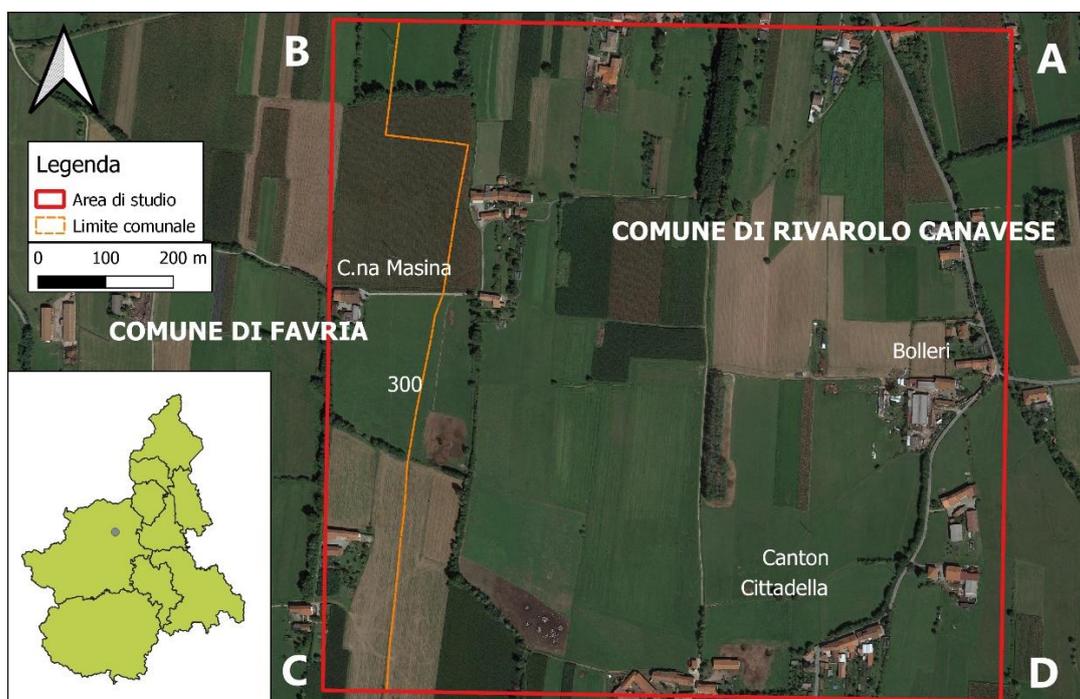


Figura 7.1 – Dettaglio dell'area di interesse, con indicate le coordinate geografiche dei vertici. In basso a sinistra, è presente la localizzazione dell'area all'interno del Piemonte.

L'area oggetto di studio ha un'estensione pari a 1 km² e ricade all'interno dei territori comunali di Rivarolo Canavese e Favria, appartenenti alla Città Metropolitana di Torino, nella Regione Piemonte. Le coordinate geografiche dei vertici di quest'area, rappresentata in **Figura 7.1**, sono riportate in **Tabella 7.1**.

Tabella 7.1 – Coordinate dei vertici dell'area di interesse

Coordinate	A	B	C	D
Latitudine	45.3257353°	45.3257353°	45.3167453°	45.3167453°
Longitudine	7.7135720°	7.7007843°	7.7007843°	7.7135720°

Dal punto di vista geologico, come si può osservare in **Figura 7.2**, il suolo è costituito da depositi ghiaioso-sabbiosi di origine fluvio-glaciale.

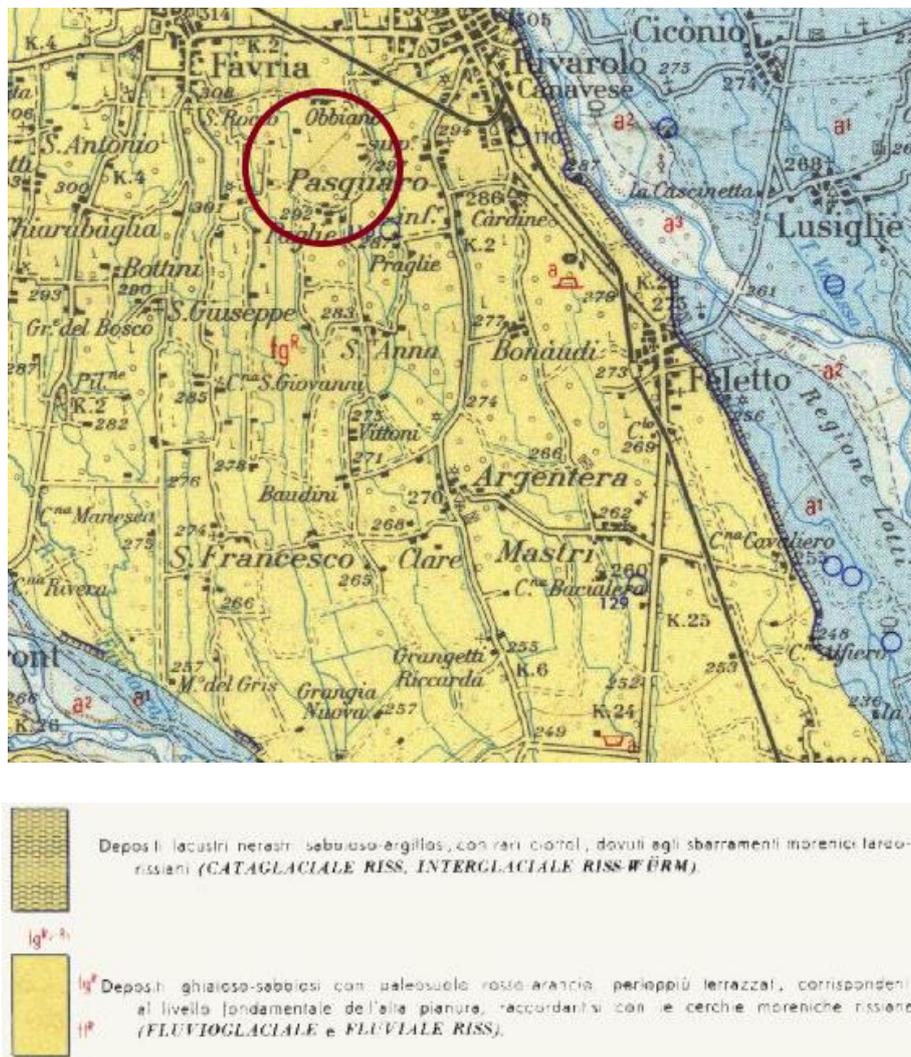


Figura 7.2 – Stralcio del Foglio n°56 – Torino della Carta Geologica d'Italia (1:100.000). In rosso è evidenziata la regione di interesse (Fonte: ISPRA - Dipartimento per il Servizio Geologico d'Italia).

In base ai dati cartografici sull'idrogeologia nella pianura piemontese (scala 1:250.000) disponibili nel portale *GIS di ARPA Piemonte*, il livello della tavola d'acqua della falda superficiale si trova tra 5 e 10 m dal piano campagna nell'area di studio. Per tale motivo, è possibile escludere che il segnale di umidità superficiale del suolo rilevato da remoto sia influenzato da apporti di falda e, di conseguenza, la sua evoluzione temporale dipende unicamente dai contributi delle piogge e dell'irrigazione.

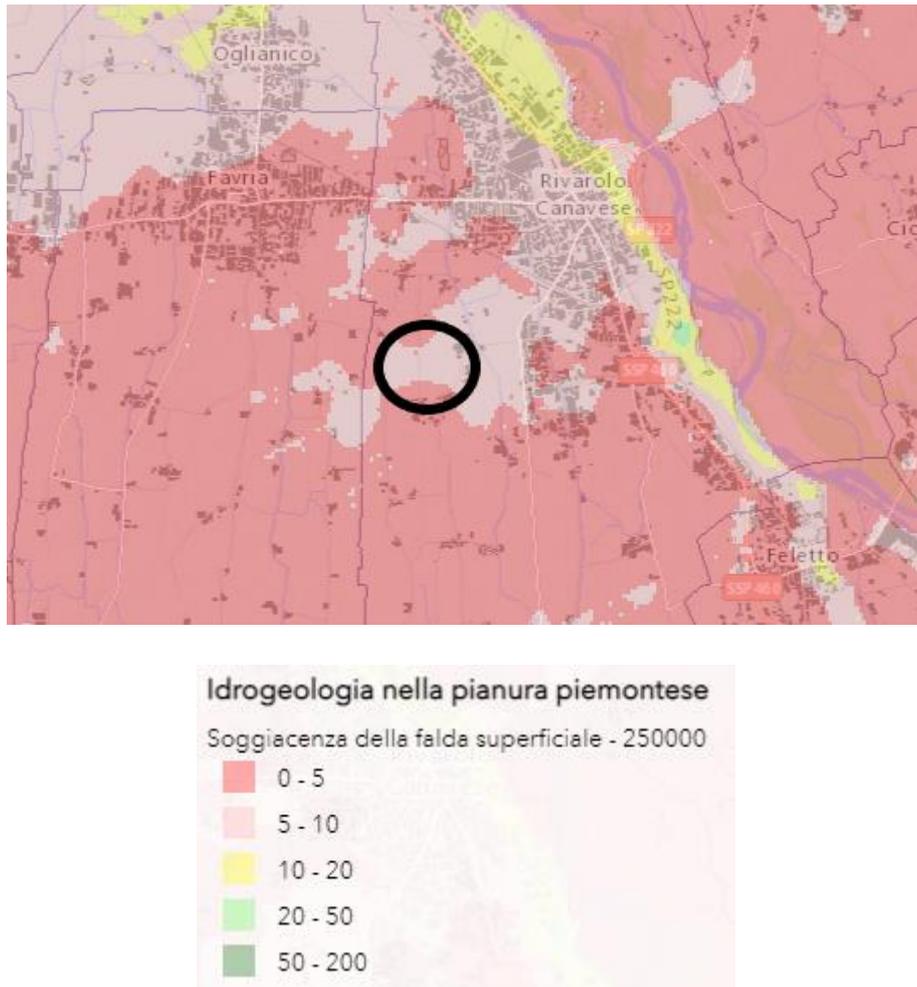


Figura 7.3 - Stralcio della carta della soggiacenza della pianura piemontese (scala 1:250.000). In nero è evidenziata la regione di interesse (Fonte: Webgis ARPA Piemonte).

Secondo i dati di copertura del suolo reperibili nel *Geoportale del Piemonte*, la regione di interesse è caratterizzata dalla presenza di campi agricoli classificati come seminativi. In particolare, si coltivano mais, grano tenero e prato polifita (Fonte: *Sistemapiemonte*).

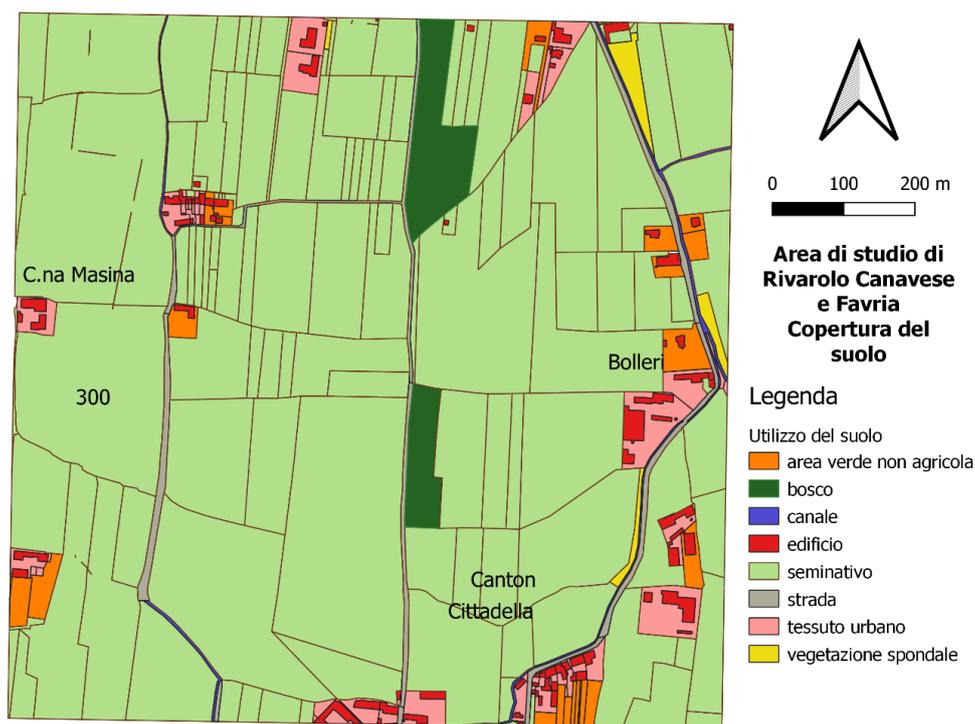


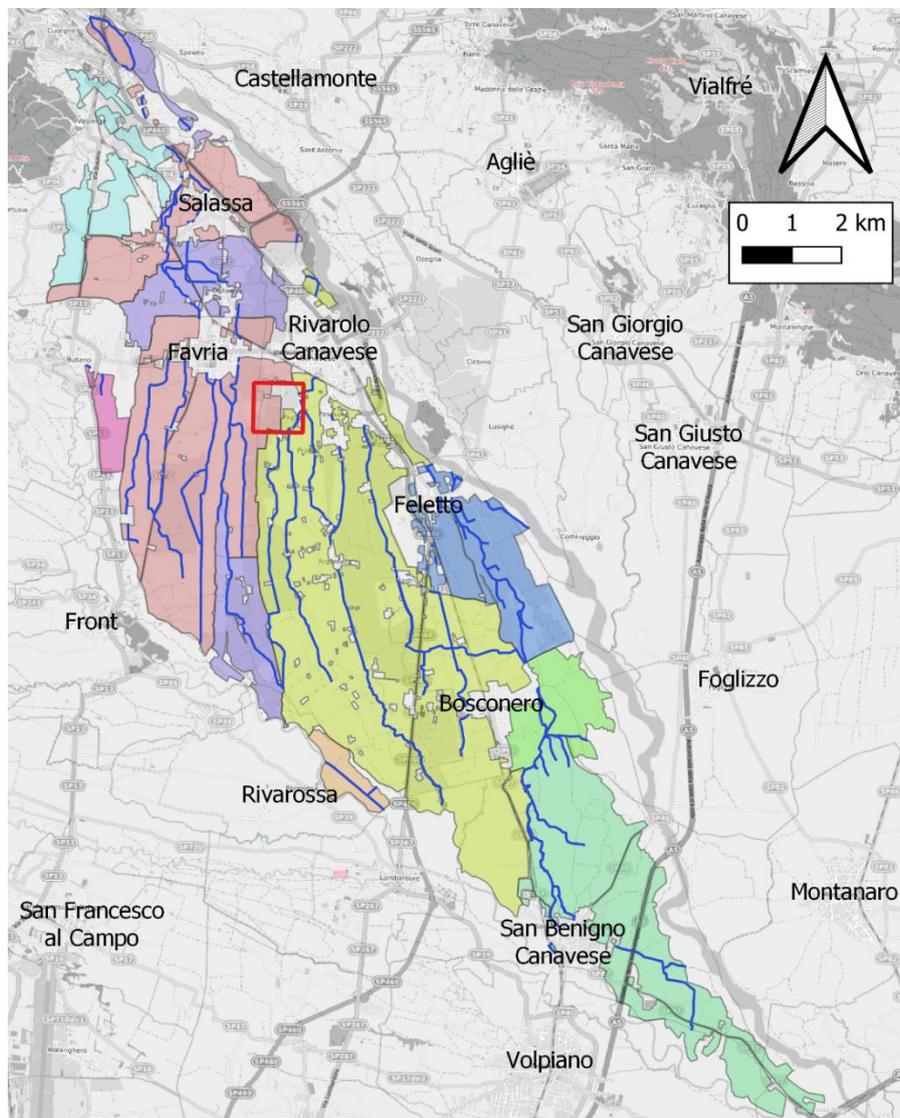
Figura 7.4 – Mappa della copertura del suolo nell’area di interesse realizzata con dati reperiti dal Geoportale del Piemonte.

Secondo la classificazione climatica di Köppen-Geiger, il comune di Rivarolo Canavese è caratterizzato dalla presenza di un clima temperato oceanico (Cfb), con una piovosità significativa durante l’anno, anche nel mese più secco. La temperatura media annua è di 11,4 °C, mentre la piovosità media annua è di 1195 mm (Fonte: *Climate-data.org*).

La regione di interesse è compresa all’interno del territorio del Consorzio Ovest Torrente Orco, un ente che si occupa a livello collettivo di gestire le opere idrauliche per l’irrigazione (manutenzione, nuove costruzioni, ecc...) e di regolamentare la disponibilità di acqua nella rete irrigua, definendo i turni di adacquamento e le portate concesse agli utenti. Il comprensorio irriguo include i terreni della pianura di Rivarolo serviti da una serie di canali principali, tra cui la roggia di Rivarolo e la roggia di Favria, che derivano le acque dal Torrente Orco, e dalle loro diramazioni. È suddiviso in Distretti irrigui, che sono raggruppati in tre zone differenti (*Consorzio Ovest Torrente Orco, 2020a*):

- **Zona 1:** Distretto di Rivarolo e Distretto di Rivarossa;
- **Zona 2:** Distretto di San Benigno, Distretto di Bosconero e Distretto di Feletto;

- **Zona 3:** Distretto di Favria, Distretto di San Ponso, Distretto di Busano, Distretto di Oglianico, Distretto di Salassa.



Legenda

Area di studio

Canale

Consorzio Ovest Torrente Orco

DISTRETTO DI BOSCONERO (CANALE ABBAZIALE)

DISTRETTO DI BUSANO

DISTRETTO DI FAVRIA-SALASSA-SAN PONSO

DISTRETTO DI FELETTO (UTENZA CANALE ABBAZIALE + GURTE' E BUSTIARDO)

DISTRETTO DI OGLIANICO

DISTRETTO DI RIVAROLO CANAVESE

DISTRETTO DI RIVAROSSA

DISTRETTO DI SAN BENIGNO C.SE (CANALE ABBAZIALE)

UTENZA COMUNALE DI VALPERGA

Figura 7.5 – Mappa del Consorzio Ovest Torrente Orco realizzata con dati scaricati dal Sistema Informativo Bonifica e Irrigazione (SIBI) della Regione Piemonte (Regione Piemonte, 2020).

In base a quanto stabilito dalle norme di concessione, ogni annata agricola è caratterizzata da turni e regolamenti per l'irrigazione che hanno inizio il 15 maggio e terminano il 31 agosto di ogni anno solare, salvo casi eccezionali in cui il periodo può essere anticipato o esteso di 15 giorni (*Consorzio Ovest Torrente Orco, 2020b*). La tipologia di irrigazione più diffusa è quella per scorrimento, anche laddove i canali in terra sono stati sostituiti da condotte, che consentono il trasporto dell'acqua senza lavorare in pressione. In settori ristretti del comprensorio, è praticata, invece, l'irrigazione in pressione mediante "rotoloni" (*Regione Piemonte, 2017*). Considerando più dettagliatamente l'area di interesse, è possibile notare in **Figura 7.6**, che la parte posta a ovest appartiene al Distretto di Favria (in arancione), la zona situata a sud-est è compresa nel Distretto di Rivarolo (in azzurro), mentre la parte a nord-est non risulta irrigata.

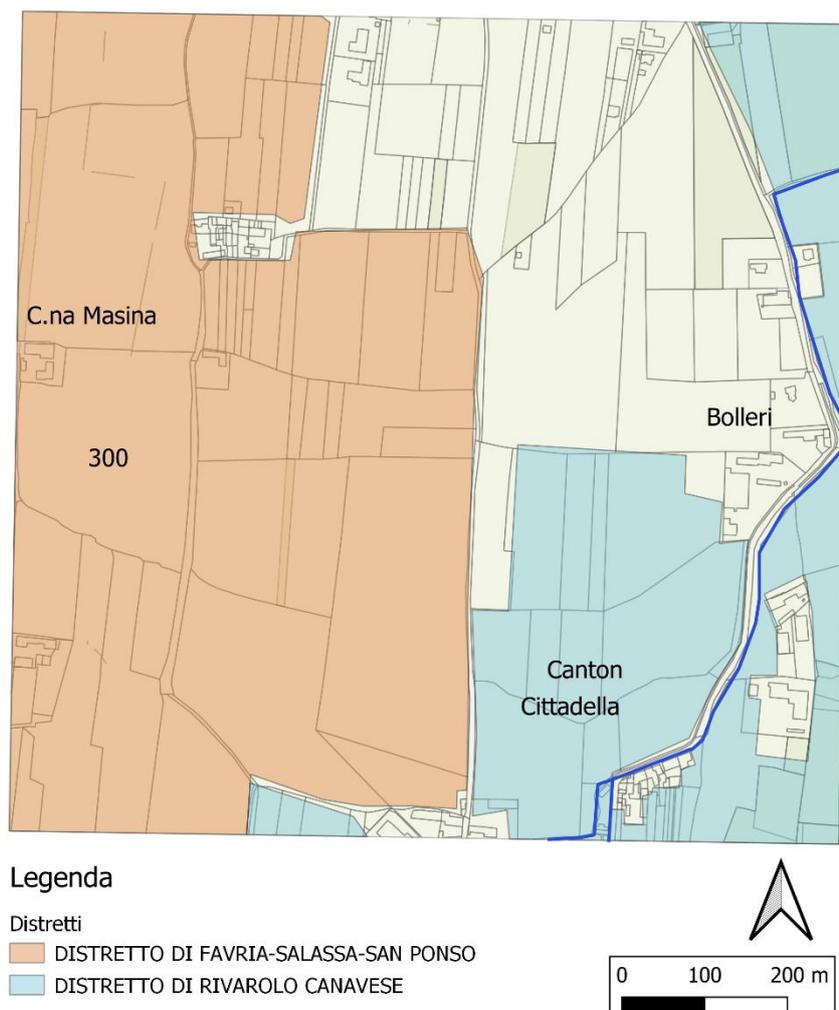


Figura 7.6 – Dettaglio dei Distretti irrigui nell'area di interesse.

Dal momento che le due aree irrigate ricadono all'interno di due distretti irrigui differenti, l'acqua a servizio dei fondi agricoli è distribuita con modalità distinte. In particolare, durante il periodo autorizzato per i prelievi irrigui, i terreni appartenenti al Distretto di Rivarolo hanno disponibilità di acqua dalle ore 12:00 del lunedì sino al giovedì successivo alle ore 12:00 (*Consorzio Ovest Torrente Orco, 2020b*), mentre gli utenti del Distretto di Favria sono autorizzati a irrigare i campi, secondo i turni prestabiliti, dalle ore 08:00 di tutti i giovedì alle ore 08:00 di tutti i martedì (*Consorzio Ovest Torrente Orco, 2020c*).

7.3 DATI SENTINEL-1

Come già spiegato nel **paragrafo 7.1**, uno degli obiettivi di questo capitolo è il calcolo dell'umidità del suolo in un'area agricola della pianura piemontese. Queste stime sono state computate utilizzando le informazioni acquisite dai satelliti Sentinel-1 nell'anno 2018, per il quale sono disponibili dati riguardanti sia le precipitazioni sia l'irrigazione. Si è scelto, quindi, di analizzare una superficie di 1 km², con una risoluzione spaziale di 10 m, in modo tale che questa fosse totalmente compresa all'interno delle *image tile* scattate dal satellite sulla regione di interesse. L'idea iniziale era stimare il contenuto di umidità del suolo per ogni giorno, ma ciò non si è rivelato possibile a causa della risoluzione temporale dei satelliti Sentinel-1. Si è, poi, cercato di colmare i giorni caratterizzati da assenza di informazioni attraverso delle tecniche di interpolazione tra i dati rilevati. Questo compito si è dimostrato estremamente complesso a causa dei limiti di programmazione della piattaforma e della presenza di fattori esterni, come le precipitazioni e l'irrigazione, che influenzano l'evoluzione temporale dell'umidità del suolo. Nel caso in cui si verificassero delle piogge e/o delle attività irrigue nei giorni senza dati, l'errore di interpolazione commesso sarebbe molto alto. Per questi motivi, il contenuto d'acqua nel suolo è stato calcolato solo per i giorni in cui sono disponibili dei dati satellitari. Per avere un'alta frequenza di ripetizione sull'area di studio, si sono considerate sia le immagini rilevate dal satellite con orbita descending, acquisite alle ore 05:35 e 05:43, sia quelle scattate in modalità ascending, con passaggi satellitari alle ore 17:23. Così facendo, si è ottenuto un prodotto di umidità del suolo caratterizzato

dalla presenza di tre giorni consecutivi di dati alternati a tre giorni consecutivi di assenza di informazioni. Un esempio della disponibilità temporale di dati, tipico dell'area di Rivarolo Canavese e condotto nel mese di gennaio 2018, è riportato in **Tabella 7.2**. In questa tabella, le date colorate rappresentano i giorni in cui sono disponibili le informazioni satellitari e per i quali si è stimata l'umidità del suolo. In particolare, in rosso e in arancione sono rispettivamente evidenziate le immagini acquisite in modalità descending alle ore 05:35 e alle 05:43, mentre le informazioni rilevate con orbita ascending alle ore 17:23 sono raffigurate in celeste. Le date colorate di bianco rappresentano i giorni in cui non sono presenti dei dati satellitari.

Tabella 7.2 – Date di acquisizione dei dati Sentinel-1 nel mese di gennaio 2018 per la regione di interesse.

Gennaio 2018

L	M	M	G	V	S	D
1	2	3	4	5	6	7
8	9	10	11	12	13	14
15	16	17	18	19	20	21
22	23	24	25	26	27	28
29	30	31	1	2	3	4

Legenda:  descending ore 05:35  descending ore 05:43
 ascending ore 17:23

7.4 L'EVOLUZIONE TEMPORALE DELL'UMIDITÀ DEL SUOLO RISPETTO ALLE PRECIPITAZIONI

7.4.1 Output del modello

Una volta definita la risoluzione temporale del prodotto, si è applicato il Change Detection Method a ciascuno dei 14.544 pixel che costituiscono le immagini satellitari della regione di interesse e rappresentano le stime di umidità del suolo valutate per ogni giorno. Per studiarne l'evoluzione temporale nei confronti delle piogge e dell'irrigazione, si è deciso di calcolare il valor medio del contenuto d'acqua nel terreno

per tutte le date in cui sono disponibili delle informazioni satellitari. I dati di precipitazione utilizzati sono quelli registrati presso la stazione meteo ARPA di Vialfrè. Queste informazioni, scaricate su base oraria, sono, poi, state aggregate con intervalli temporali di 12 h, i cui estremi (ore 05:00 e ore 17:00) coincidono approssimativamente con l'orario di passaggio del satellite al di sopra dell'area indagata. Il confronto grafico tra il segnale di umidità media del suolo e i dati di pioggia è riportato in **Figura 7.7**.

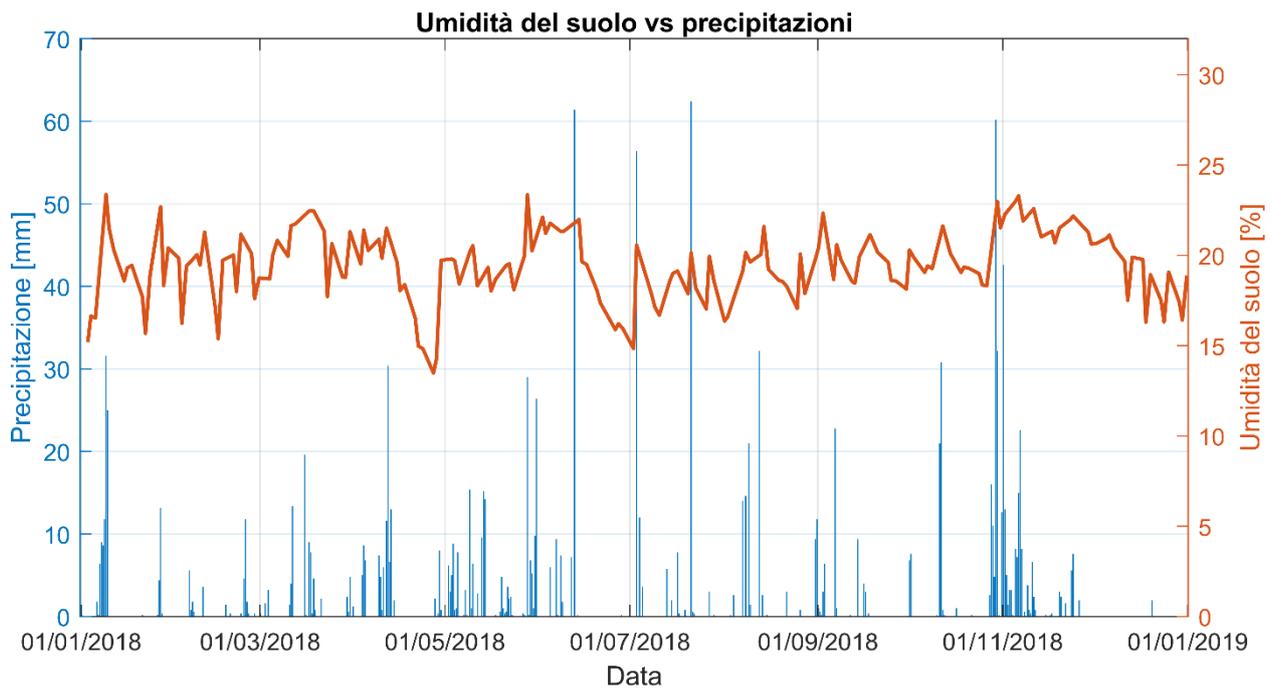


Figura 7.7 – Confronto tra il segnale di umidità media del suolo e i dati di precipitazione.

Attraverso questo raffronto, è possibile osservare come, anche in presenza di precipitazioni molto abbondanti, il valore massimo raggiunto di umidità del suolo supera di poco il 24% vol. Tale grandezza rappresenta la capacità idrica massima (CIM) del suolo superficiale, che si verifica quando vi è la totale saturazione dei pori. Si può, inoltre, notare come, dopo ogni massimo relativo di umidità del terreno, nella maggior parte dei casi, si assiste a un decremento repentino del segnale. Questo fenomeno è dovuto principalmente all'infiltrazione dell'acqua negli strati sottostanti del suolo, che è caratterizzato da un'alta permeabilità (Merlo, 1973).

7.4.2 Relazione tra umidità del suolo e precipitazioni

Per valutare l'esistenza di una relazione tra il segnale di umidità media del terreno e i dati di pioggia, a causa della particolare copertura temporale delle informazioni rilevate da satellite, si è deciso di calcolare la media mobile su 3 giorni sia dei dati di contenuto d'acqua nel suolo sia di quelli di precipitazione disponibili per l'anno 2018. I valori così ottenuti sono stati correlati attraverso la funzione "corrcoef" di MATLAB, che consente di calcolare il coefficiente di correlazione di Pearson ρ .

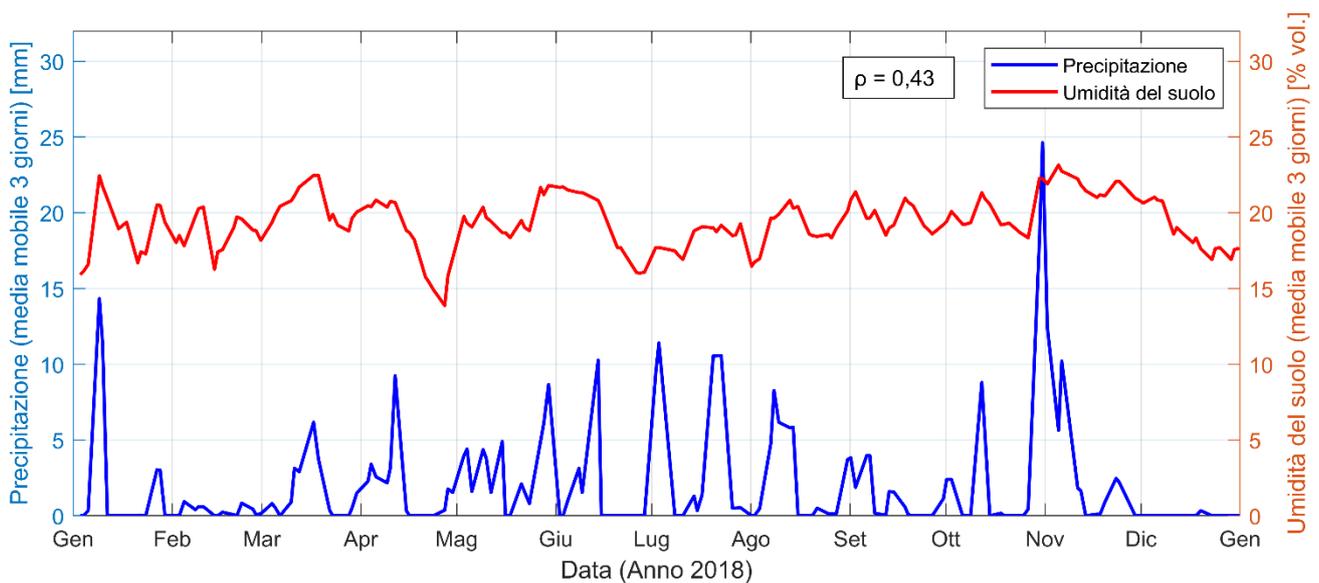


Figura 7.8 – Confronto tra il segnale di umidità del suolo e i dati di precipitazione. Per entrambe le grandezze si sono considerate le medie mobili su 3 giorni.

Il coefficiente ρ ottenuto sull'area indagata è pari a circa 0,43. Per verificare la validità del risultato raggiunto, si è considerato lo studio effettuato da *Sehler et al. (2019)*, in cui si è ricercata l'esistenza di una relazione tra l'umidità del suolo e le precipitazioni a livello globale, utilizzando informazioni telerilevate. Più specificatamente, si sono impiegati i dati di umidità del suolo SMAP (Soil Moisture Active Passive) e quelli di precipitazione TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission). Come si può osservare in **Figura 7.9** e in **Figura 7.10**, il valore di ρ ricavato per la regione di interesse è simile a quello individuato da *Sehler et al. (2019)* per ambienti caratterizzati dalla presenza di un clima temperato, proprio come l'area di Rivarolo Canavese. Questo risultato raggiunto

può fungere da ulteriore validazione al modello di Change Detection implementato in Google Earth Engine.

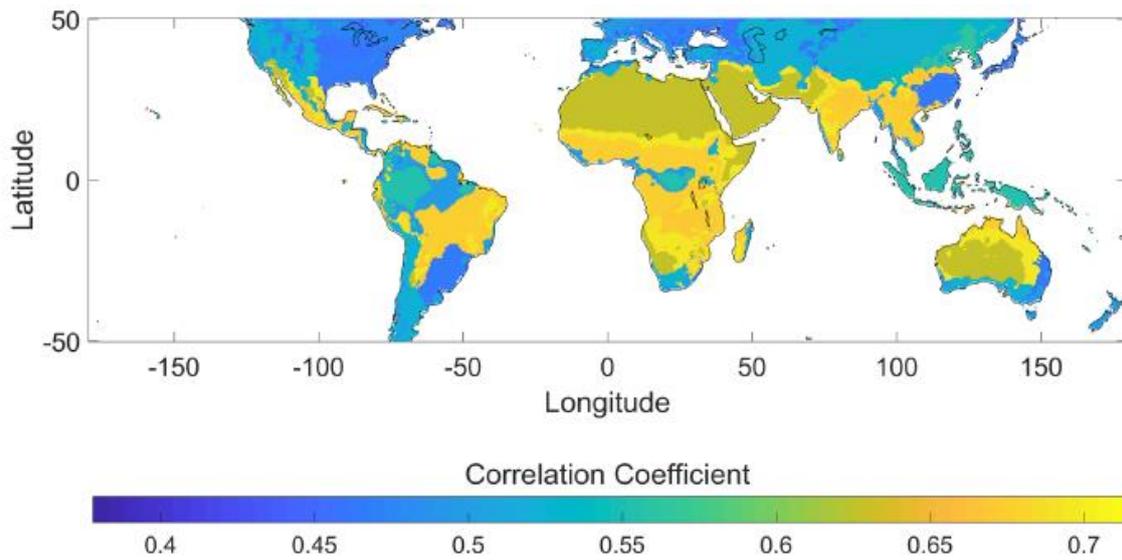


Figura 7.9 – Coefficienti di correlazione medi secondo i regimi di classificazione climatica di Köppen-Geiger (Sehler et al., 2019).

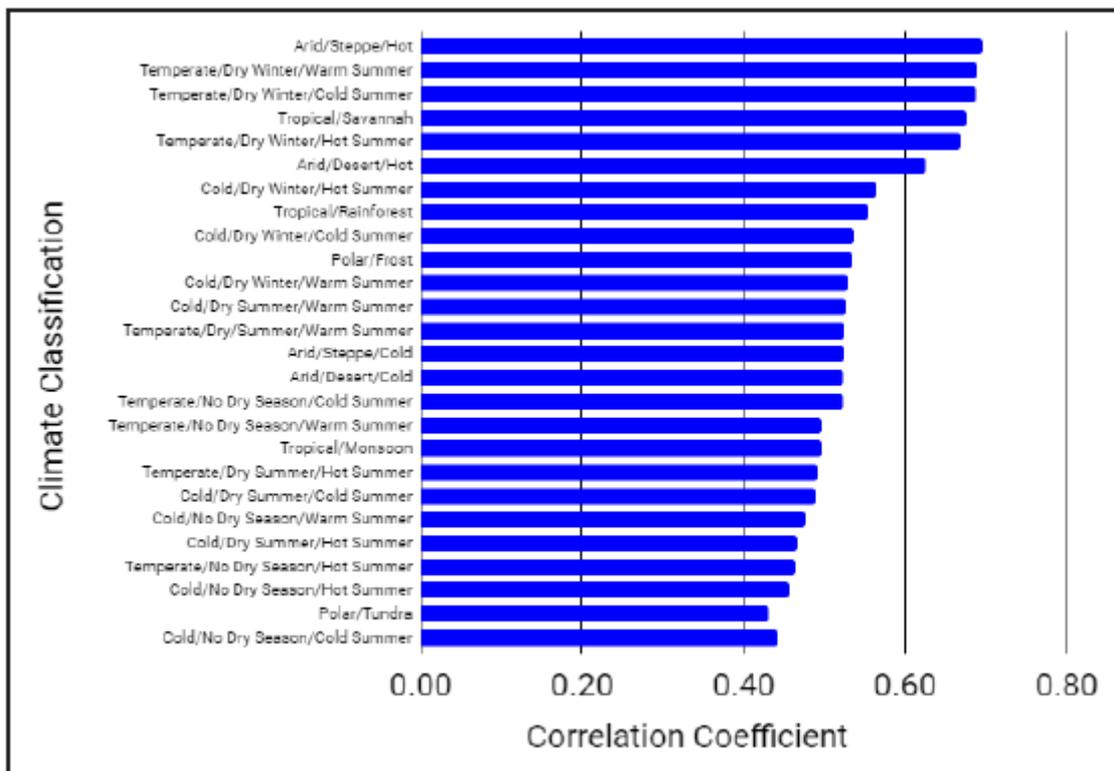


Figura 7.10 – Grafico a barre dei coefficienti di correlazione medi secondo i regimi di classificazione climatica di Köppen-Geiger (Sehler et al., 2019).

7.4.3 Limiti dell’algoritmo di recupero dell’umidità del suolo nell’area di interesse

7.4.3.1 Mancata segnalazione dell’evento pluviometrico del 12 giugno 2018

Si considerino adesso tre differenti eventi pluviometrici, registrati dalla stazione meteo ARPA di Vialfrè nei mesi di giugno e luglio 2018, che sono tra quelli più abbondanti verificatisi nell’anno solare preso in esame.

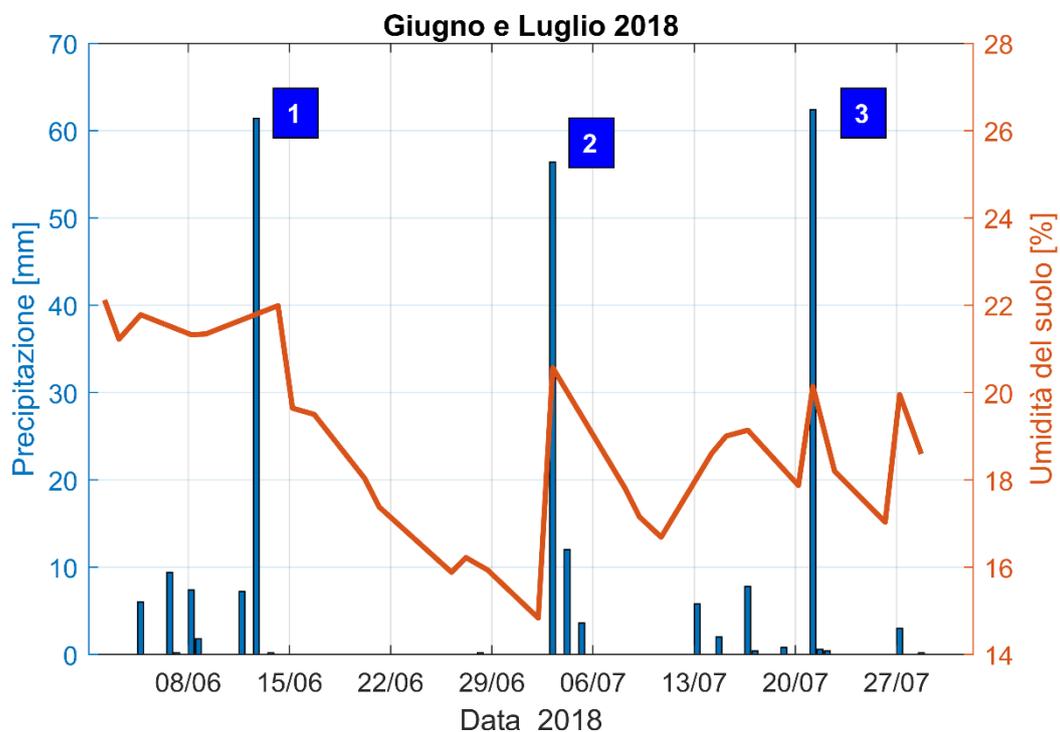


Figura 7.11 – Confronto tra i dati di umidità del suolo e di pioggia registrati nei mesi di giugno e luglio 2018. Nel grafico, sono evidenziati tre eventi pluviometrici, che sono tra quelli più abbondanti registrati nel 2018.

Com'è possibile notare in **Figura 7.11**, in corrispondenza dell’evento precipitativo del 12 giugno si registra solo un piccolissimo incremento di umidità del suolo, a differenza di quanto avviene per gli eventi n°2 e 3. Per spiegare questo fenomeno, si sono vagliate diverse ipotesi. Poiché si stanno analizzando degli eventi di carattere temporalesco, che sono di breve durata, molto intensi e localizzati, si è pensato, inizialmente, che le precipitazioni abbiano interessato principalmente la zona in cui è situata la stazione di misura, coinvolgendo in modo marginale l’area oggetto di studio. Successivamente, si

è ipotizzato che la mancata segnalazione dell'evento pluviometrico del 12 giugno fosse collegata alla particolare copertura temporale dei dati acquisiti da remoto. Confrontando la precipitazione cumulata con l'orario di passaggio del satellite in **Figura 7.12**, si è potuto constatare che, per l'evento n°1, il sensore sorvola la regione di interesse dopo circa due giorni dalla conclusione della precipitazione. Per gli altri eventi, il passaggio del satellite avviene dopo poche ore dal termine delle piogge.

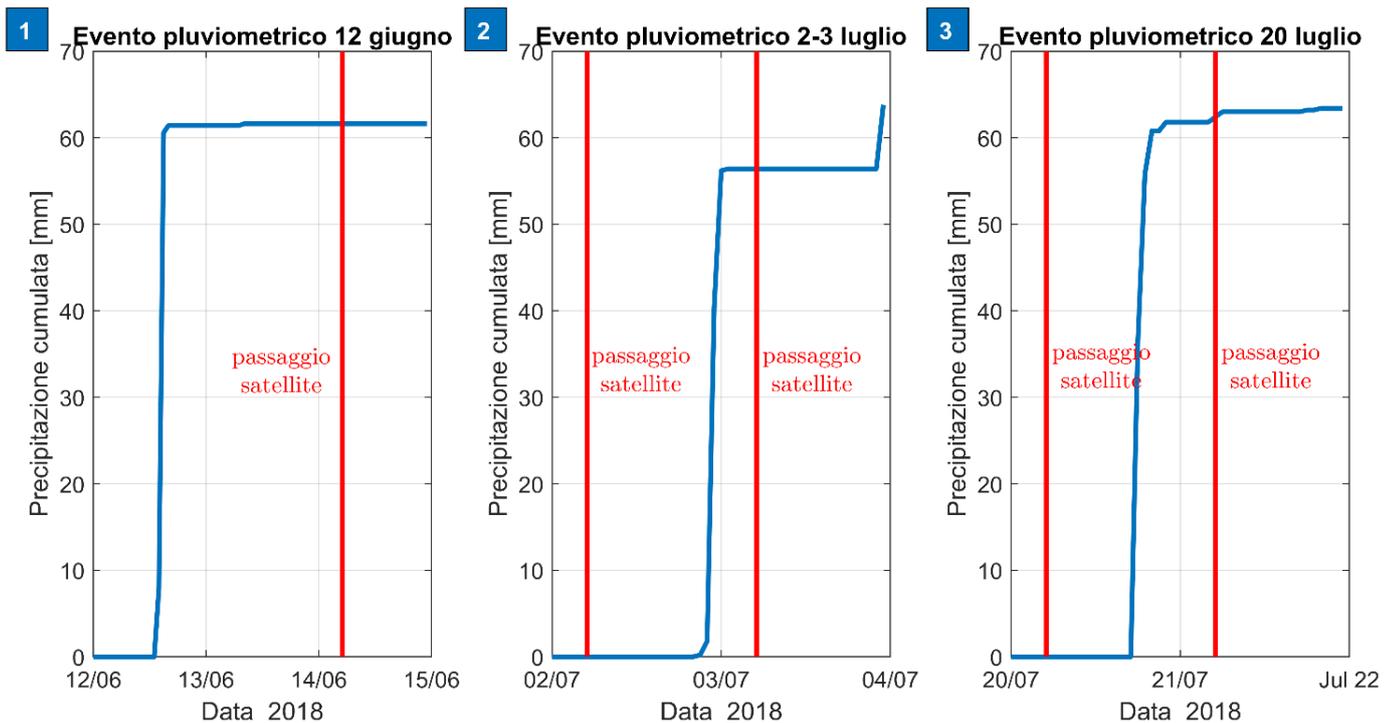


Figura 7.12 – Confronto tra la precipitazione cumulata e l'orario dei passaggi satellitari per i tre eventi pluviometrici di grande entità registrati nei mesi di giugno e luglio 2018.

Avendo osservato che, al termine di un evento precipitativo, si verifica una brusca diminuzione dell'umidità superficiale del suolo, dovuta principalmente all'infiltrazione dell'acqua gravitazionale nel sottosuolo, che, come già detto in precedenza, è caratterizzato da un'alta permeabilità, si è ricostruito il picco di umidità in corrispondenza dell'evento n°1. Per fare ciò, si è tenuto conto che, generalmente, nel sito esaminato, il decremento del contenuto d'acqua nel suolo dopo due giorni dal termine delle precipitazioni è pari a circa 1,95% vol.

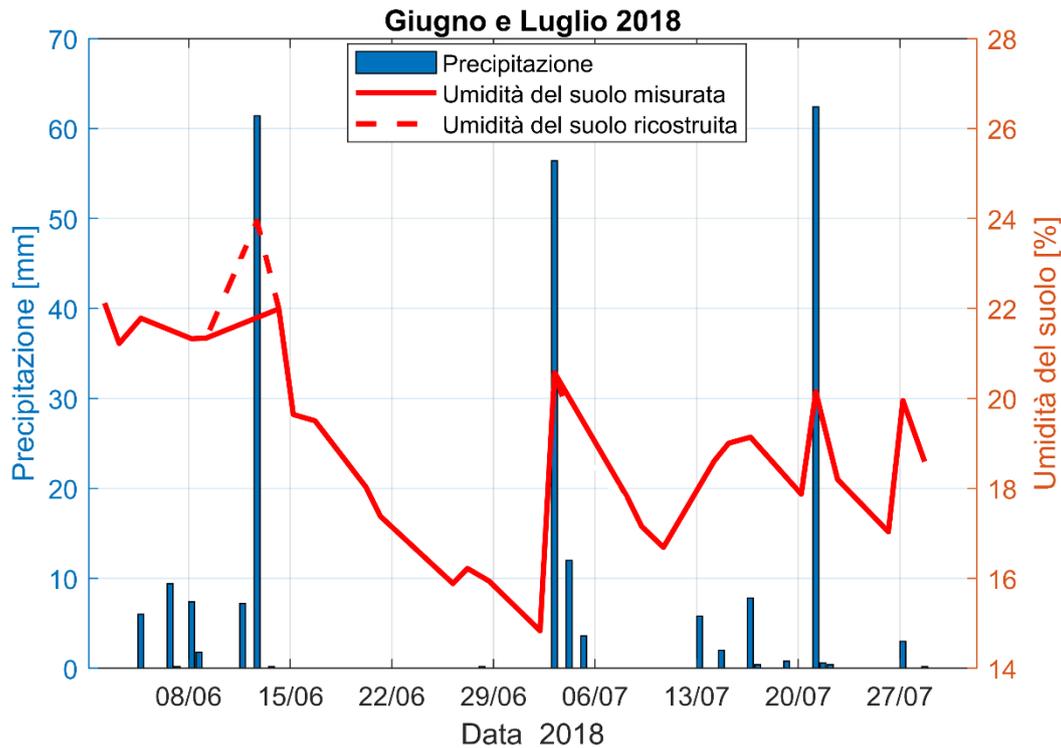


Figura 7.13 – Confronto tra le precipitazioni e il segnale di umidità del suolo, che comprende il picco ricostruito in corrispondenza dell'evento pluviometrico del 12/06/2018.

7.4.3.2 Presenza di ghiaccio/brina

Nel periodo invernale, le immagini acquisite in modalità descending alle ore 05:35 UT e 05:43 UT hanno un'alta probabilità di rappresentare il suolo in presenza di ghiaccio o brina, causando una sottostima dell'umidità del suolo. In **Figura 7.14** si può chiaramente osservare come, in corrispondenza di temperature dell'aria inferiori a 2°C, si registrano i minimi relativi della curva del contenuto di umidità nel terreno. Questa soglia di temperatura può essere spiegata considerando che le misure di temperatura dell'aria sono effettuate ad un'altezza di 1,5 m dal piano campagna e che, a tale posizione, la temperatura è generalmente più alta rispetto a quella registrata in prossimità del terreno (Benninga et al., 2019). Per tale motivo e in queste condizioni, è verosimile pensare che il suolo si trovi in condizioni ghiacciate. Tuttavia, dal momento che questa particolare limitazione del modello di Change Detection riguarda un periodo in cui non si svolgono attività irrigue, ai fini del presente lavoro di tesi, si può

considerare trascurabile e non necessita del mascheramento dei dati rilevati in modalità descending nei mesi invernali.

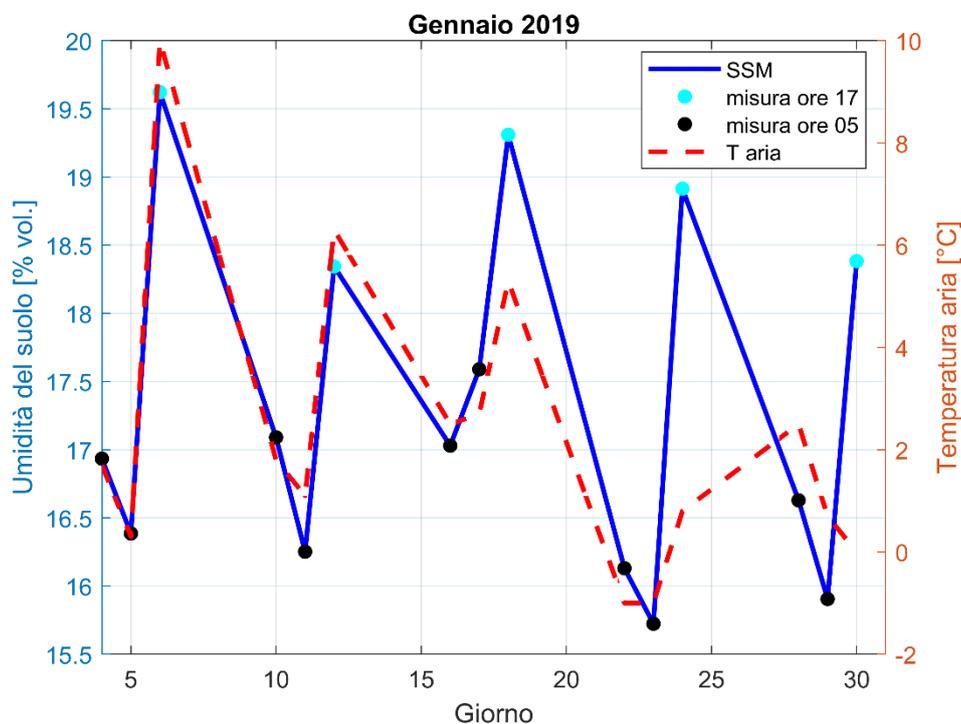


Figura 7.14 – Raffronto tra il segnale di umidità superficiale del suolo e la temperatura dell'aria nel mese di gennaio 2019.

7.5 ANALISI DELL'IRRIGAZIONE

7.5.1 Il rilevamento dell'irrigazione

Per analizzare la risposta del segnale di umidità del suolo nei confronti dell'irrigazione, non avendo a disposizione informazioni riguardanti i prelievi irrigui per ogni singola utenza e la quantità di acqua presente nel reticolo secondario dei canali, si è deciso di confrontare i dati rilevati da satellite con le portate transitanti nella roggia di Rivarolo, che è il canale principale che serve il Distretto irriguo di Rivarolo. Tali portate sono state misurate nel punto di derivazione delle acque del Torrente Orco, con cadenza oraria, e sono state fornite dalla Regione Piemonte. In modo analogo a quanto fatto con i dati di pioggia, anche i valori di portata sono stati ricampionati con intervalli temporali di 12 ore, in modo tale che i loro estremi corrispondano all'incirca all'orario

in cui il satellite sorvola l'area di studio. Inizialmente, quest'analisi è stata condotta utilizzando i valori medi di umidità del suolo stimati per ciascun giorno dell'anno 2018 in cui sono disponibili delle osservazioni satellitari. Così facendo, si è constatato che non esiste alcun tipo di correlazione tra il contenuto di umidità nel terreno e la portata del canale principale. Quest'esito si può considerare ragionevole perché l'area esaminata è servita da un reticolo irriguo secondario e il segnale di umidità del suolo è il risultato della media dei valori registrati non solo sui terreni appartenenti al Distretto di Rivarolo, ma anche sui fondi agricoli che ricadono sia nel Distretto di Favria sia in una zona non irrigata. Negli unici punti in cui sembra esserci una relazione tra i picchi di portata della roggia e quelli di umidità del suolo, evidenziati da rettangoli viola in **Figura 7.15**, è possibile notare che gli incrementi della disponibilità di acqua nel canale, rilevati in concomitanza di picchi di contenuto di umidità nel suolo, sono dovuti alla presenza di piogge e non a una maggiore domanda di irrigazione.

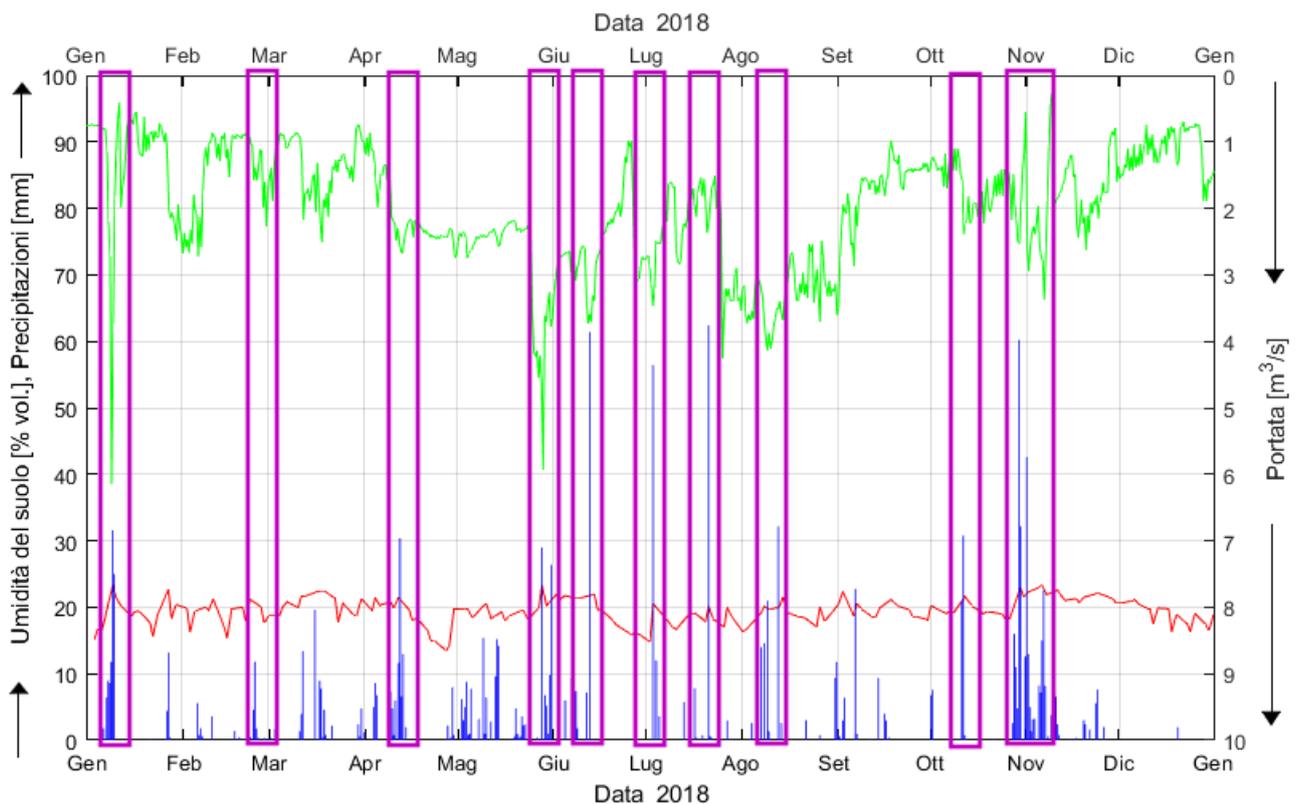


Figura 7.15 – Comparazione globale dei dati di precipitazione (in blu, sull'asse sx), di umidità del suolo (in rosso, sull'asse sx) e di portata del canale (in verde, sull'asse dx). Nei punti evidenziati da rettangoli viola, l'incremento di portata della roggia di Rivarolo, registrato in corrispondenza di un picco di umidità del suolo, è dovuto all'effetto delle piogge e non a una maggiore domanda di irrigazione.

Si è, poi, cercato di individuare dei picchi di umidità del suolo, non collegati alla presenza di piogge, durante il periodo di autorizzazione all'irrigazione, che è compreso tra il 15 maggio e il 31 agosto di ogni anno solare. Tali picchi, verosimilmente, dovrebbero essere causati dallo svolgimento di attività irrigue. Tuttavia, analizzando la curva di umidità media del suolo nell'area di interesse in **Figura 7.16**, si sono potuti distinguere soltanto una variazione di pendenza intorno al 16 giugno e un piccolo incremento del segnale tra il 27 e il 28 giugno.

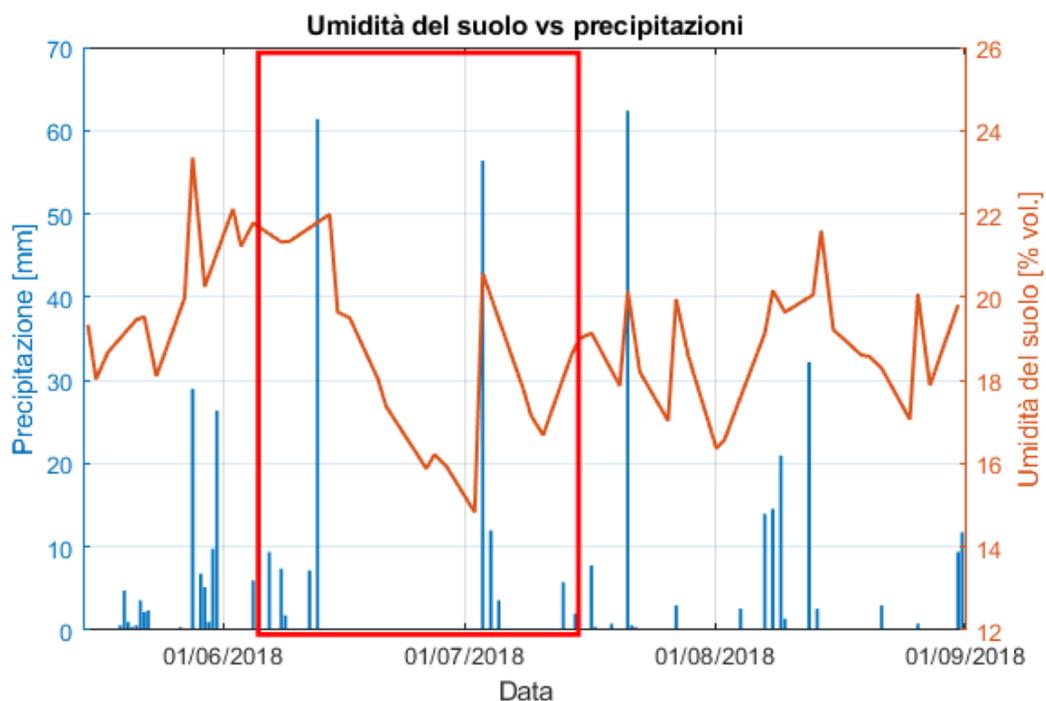


Figura 7.16 – Comparazione tra la curva di umidità del suolo e le precipitazioni nel periodo di autorizzazione all'irrigazione. Nel rettangolo rosso è evidenziato l'arco temporale a cui si è fatto riferimento per il rilevamento dell'irrigazione a scala di campo.

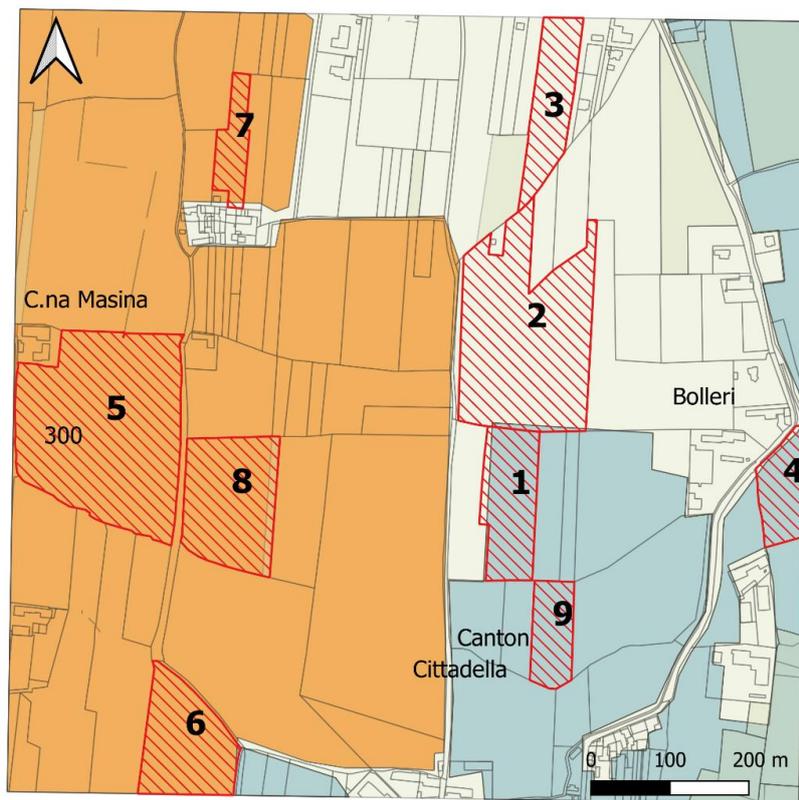
La difficoltà nell'individuazione dei picchi di umidità del suolo legati all'irrigazione è dovuta a diverse concause:

- Il 2018 è stato il quinto anno più piovoso degli ultimi 64 anni, con un surplus pluviometrico del 32% rispetto alla norma 1971-2000 (ARPA Piemonte, 2019), e ciò potrebbe aver causato una riduzione delle attività irrigue nella regione di interesse;
- L'area analizzata comprende al suo interno sia delle aree non irrigate sia dei terreni appartenenti a due distretti che hanno un calendario irriguo differente

tra di loro. Calcolando il valore medio dei pixel per ciascuna immagine, il segnale di irrigazione risulta più debole;

- L'eccessiva suddivisione dei terreni agricoli nella zona studiata e l'autorizzazione ai prelievi irrigui secondo turni prestabiliti e differenti per ogni utenza fanno sì che, valutando il valore medio di umidità del suolo presente nell'area studiata, l'incremento del segnale dovuto ad attività irrigue non sia più riconoscibile.

Per le ragioni sopracitate, si è resa necessaria un'analisi più dettagliata a scala di campo. Per il rilevamento del segnale di irrigazione, si sono selezionati nove campi agricoli, situati in zone differenti all'interno dell'area di studio, su cui indagare più approfonditamente. In particolare, i campi nn°1-4-9 ricadono nel Distretto di Rivarolo, i fondi nn°5-6-7-8 nel Distretto di Favria, mentre gli appezzamenti nn°2-3 sono compresi nell'area non irrigata.



Legenda

-  Campi selezionati
-  DISTRETTO DI FAVRIA-SALASSA-SAN PONSO
-  DISTRETTO DI RIVAROLO CANAVESE

Figura 7.17 – Campi agricoli selezionati per lo studio dell'irrigazione a scala più dettagliata.

Per quest'analisi approfondita, l'arco temporale prescelto è compreso tra il 1° giugno e il 20 luglio e include al suo interno un periodo di assenza di precipitazioni, durante il quale l'umidità media del suolo decresce fino a raggiungere il valore minimo registrato nell'anno 2018 (vedi **Figura 7.16**). Per poter individuare i campi su cui si svolgono le attività irrigue, si sono ottenute, attraverso Sentinel Hub EO Browser, le serie temporali degli indici NDVI e NDMI. Come già visto nel **paragrafo 4.4.3.2**, il Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) è un indice, che si ricava dai dati ottici Sentinel-2 secondo la relazione **(4.10)**, e descrive il livello di vigoria delle colture (*Antognelli, 2018*). Invece, il Normalized Difference Moisture Index (NDMI) è utilizzato per determinare il contenuto d'acqua presente nella vegetazione e per monitorare i periodi di siccità. Anch'esso è derivato dai dati Sentinel-2 e si calcola tramite la formula

$$NDMI = \frac{NIR-SWIR}{NIR+SWIR} \quad (7.1)$$

in cui *NIR* è la banda del vicino infrarosso (banda 8) e *SWIR* è la banda 11. I valori di NDMI sono compresi tra -1 e 1. Valori negativi prossimi a -1 corrispondono alla presenza di suolo nudo, mentre valori attorno allo 0 (da -0,2 a 0,4) rappresentano condizioni di stress idrico. Per NDMI compreso tra 0,4 a 1, non vi sono né problemi di sviluppo vegetativo né stress idrico (*Antognelli, 2018*).

Nel caso in cui nessuno dei campi fosse irrigato, ci si aspetterebbe una diminuzione dei valori di NDVI e NDMI nel periodo di siccità compreso tra il 12 giugno e il 2 luglio. Infatti, l'assenza di apporti idrici, unitamente alle alte temperature tipiche del periodo estivo, è responsabile del decremento dello stato di salute della vegetazione e del contenuto di umidità nelle piante. Invece, in **Figura 7.18**, si può chiaramente osservare come, contrariamente al comportamento atteso, i valori di NDVI e NDMI crescano nel medesimo periodo per i campi nn°1-8-9. Ciò, molto probabilmente, è dovuto alla presenza di attività irrigue.

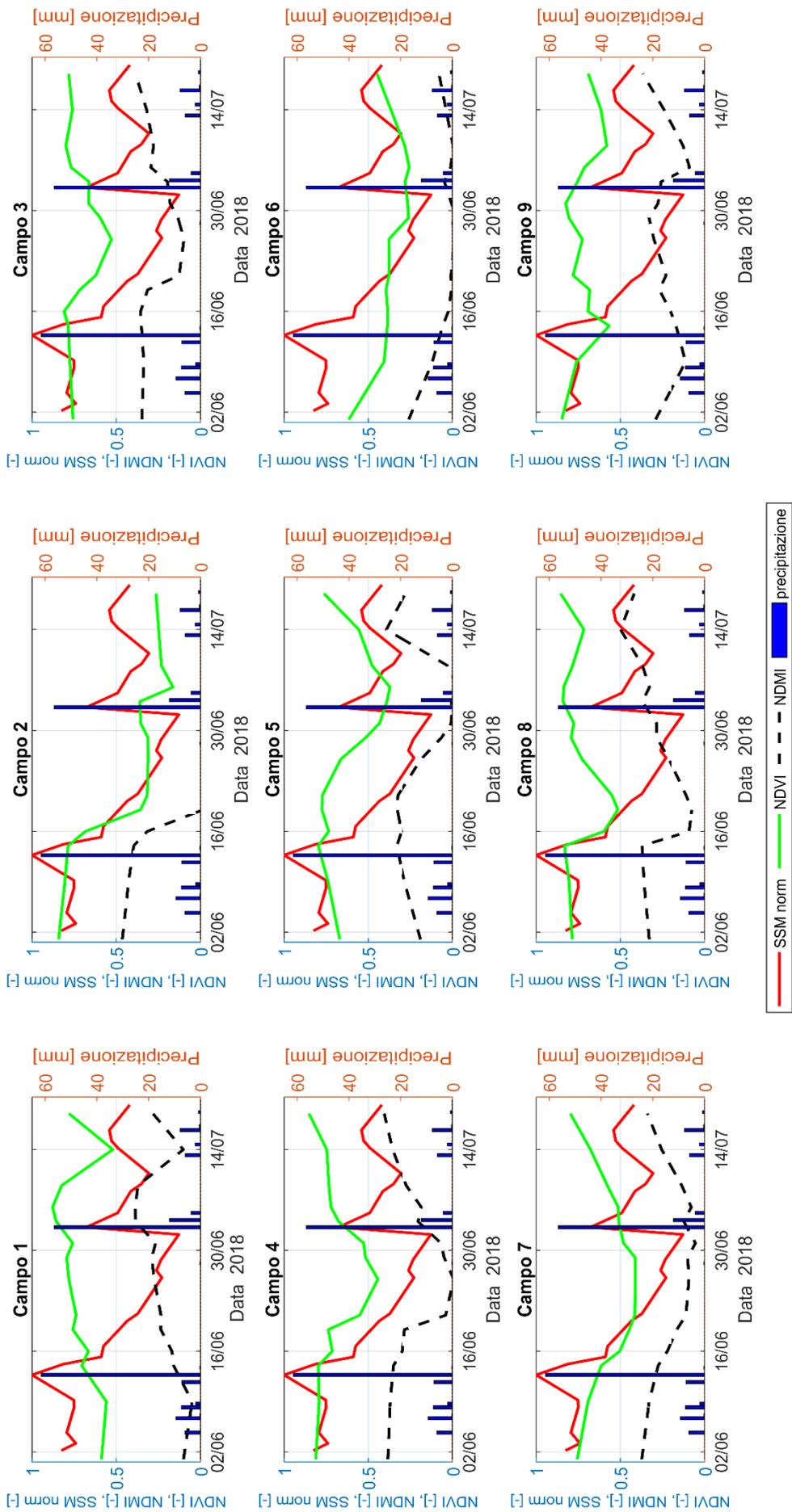


Figura 7.18 – Raffronto tra il segnale di umidità media del suolo per l'area di interesse e i valori di NDMI e NDVI misurati per ciascun campo.

Di conseguenza, si è deciso di ricavare le curve di umidità del suolo per i campi nn°1-8-9 ed è stato possibile riconoscere dei picchi esclusivamente legati all'irrigazione (vedi **Figura 7.19**).

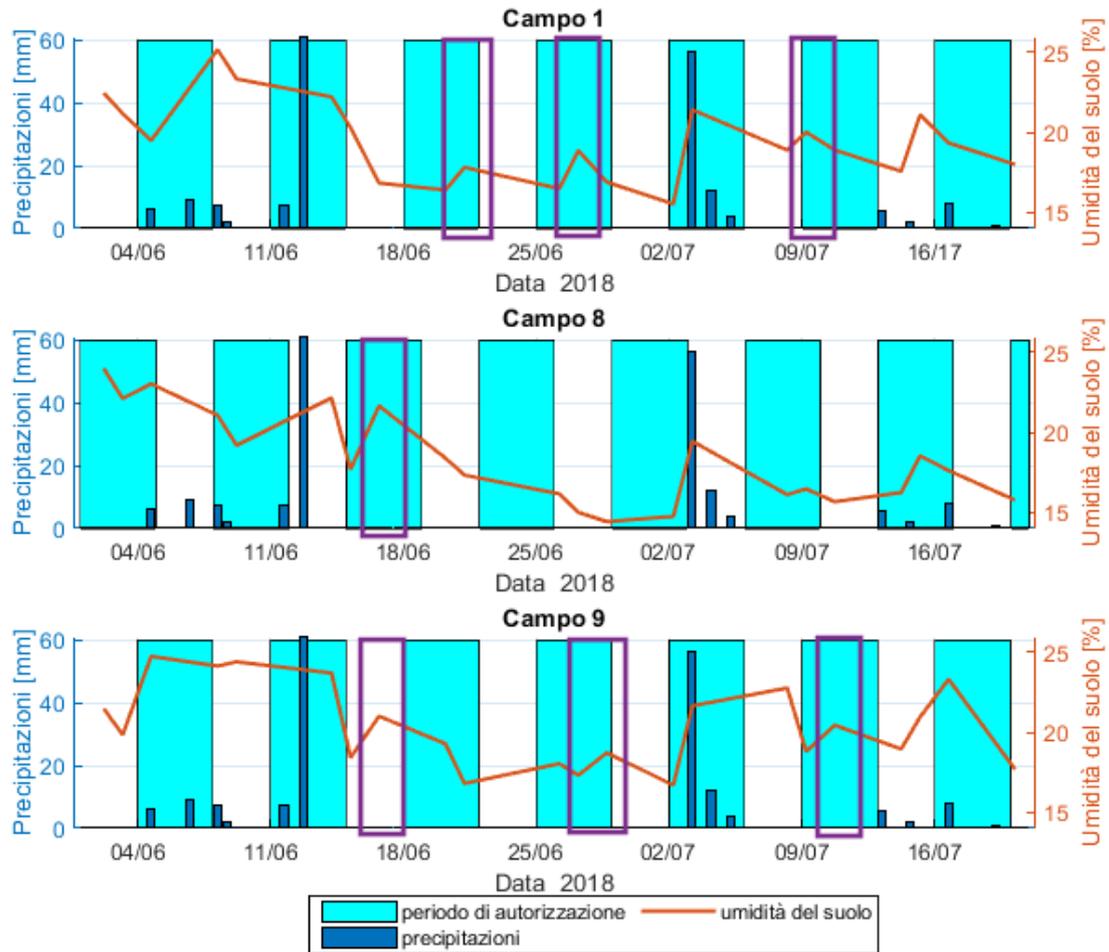


Figura 7.19 – Rilevamento dei picchi di umidità (in viola) esclusivamente legati all'irrigazione.

Dei sette picchi di umidità del suolo individuati e relativi ad attività irrigue, solo quello registrato il 16 giugno nel campo n°9 non è compreso nel calendario di irrigazione, che è evidenziato da finestre temporali celesti in **Figura 7.19**. Questo massimo relativo del contenuto di umidità nel terreno può essere dovuto o a un prelievo non autorizzato o a un recupero del turno di irrigazione. Quest'ultimo è permesso dal regolamento consortile nei casi in cui non sia stato possibile concludere le operazioni irrigue del turno precedente, a causa della scadenza dei giorni consentiti per l'alternanza delle zone nord e sud del Distretto di Rivarolo (*Consorzio Ovest Torrente Orco, 2020b*). Si può, inoltre, osservare che i picchi di umidità del suolo legati all'irrigazione sono rilevati in

date diverse per i campi considerati, a conferma che tale pratica si svolge secondo turni e calendari distinti all'interno dell'area di studio.

7.5.2 Valutazione dei volumi di irrigazione

Una volta individuati questi incrementi di umidità del suolo, si è deciso di calcolare i volumi e le portate di irrigazione per i campi nn°1-8-9, in modo da valutare il grado di attendibilità delle informazioni fornite dal Change Detection Method implementato in Google Earth Engine. Per fare ciò, si è impiegato il modello di bilancio idrico del suolo che, con riferimento ad un generico giorno i , è definito dall'equazione

$$\Delta S(i) = ET(i) + D(i) + R(i) - A_f(i) - P(i) - I(i), \quad (7.2)$$

in cui i termini, tutti espressi in m^3/d , sono:

- $I(i)$ il volume di irrigazione;
- $ET(i)$ le perdite per evapotraspirazione;
- $D(i)$ le perdite per percolazione o drenaggio;
- $R(i)$ le perdite per ruscellamento;
- $A_f(i)$ l'apporto idrico di falda;
- $P(i)$ è il volume di pioggia;
- $\Delta S(i)$ è la variazione del volume di acqua presente nel suolo rispetto al giorno precedente.

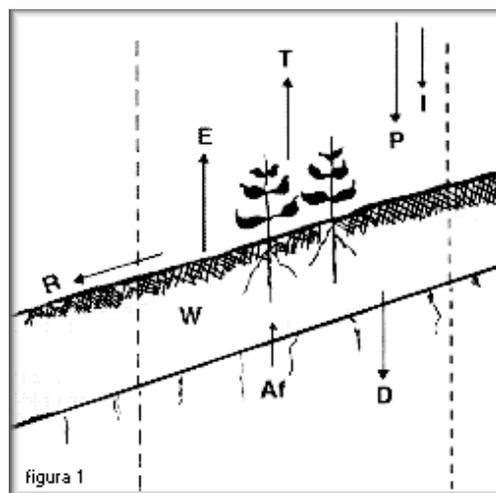


Figura 7.20 – Schematizzazione delle componenti del bilancio idrico di un terreno ricoperto da vegetazione (Fonte: SardegnaArpa).

La relazione (7.2) è stata applicata su uno strato di suolo di profondità pari a 1 m e considerando l'estensione areale in m² dei campi agricoli su cui si sono rilevati degli apporti irrigui.

L'evapotraspirazione $ET(i)$ consiste nella combinazione di due processi separati in cui l'acqua viene ceduta nell'aria, sotto forma di vapore, dalla superficie del suolo per evaporazione e dalle piante per traspirazione (Allen et al., 1998). Per stimarla, si è utilizzata la relazione

$$ET(i) = K_c \cdot \left(\frac{ET_0(i)}{1000} \right) \cdot A [m^3/d], \quad (7.3)$$

dove K_c è un coefficiente colturale [-], ET_0 è l'evapotraspirazione potenziale e si esprime in mm/d e A rappresenta la superficie in m² del fondo agricolo analizzato.

Il valore K_c si può desumere da letteratura (Allen et al., 1998). Tenendo presente che nella regione di interesse si coltivano prevalentemente mais e grano tenero e che il periodo esaminato è compreso nei mesi di giugno e luglio, si è scelto $K_c = 1,15$.

La valutazione dell'evapotraspirazione potenziale ET_0 , che rappresenta la domanda evaporativa dell'atmosfera, può essere effettuata con vari modelli matematici. Sulla base di diverse sperimentazioni, la FAO ha raccomandato l'utilizzo del metodo di Penman-Monteith (Allen et al., 1998), che è descritto dall'equazione

$$ET_0(i) = \frac{0,408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34u_2)}, \quad (7.4)$$

in cui Δ è la pendenza della curva che correla la pressione di vapore alla temperatura dell'aria [kPa/°C], R_n la radiazione netta della superficie coltivata [MJ/(m²d)], G il calore accumulato nel terreno [MJ/(m²d)], γ è la costante psicrometrica [kPa/°C], T è la temperatura media giornaliera, misurata a 2 m di altezza dal piano campagna [°C], u_2 è la velocità del vento a 2 m di altezza dalla superficie del terreno [m/s], e_s è la pressione di vapore in condizioni di saturazione [kPa] e e_a rappresenta la pressione di vapore effettiva [kPa].

Data la difficoltà di misurazione di alcuni parametri e sulla base delle informazioni disponibili, si è scelto di applicare un metodo più semplice e immediato che richiede solamente dati relativi alla temperatura, nonostante possa essere più impreciso.

Questo metodo è il modello di Hargreaves-Samani (*Hargreaves e Samani, 1985*), che è descritto dalla formula

$$ET_0 = R_0 \cdot 0,0023 \cdot (T_{med} + 17,8) \sqrt{T_{max} - T_{min}} \quad (7.5)$$

dove R_0 è la radiazione solare extratmosferica giornaliera [mm/d], che si può desumere da **Tabella 7.3**, e T_{max} , T_{min} e T_{med} sono rispettivamente la temperatura massima, minima e media giornaliera e si esprimono in °C. Questi dati di temperatura possono essere facilmente ricavati per l'area di interesse attraverso le informazioni misurate dalla stazione meteo ARPA di Vialfrè.

Tabella 7.3 – Valori di R_0 , espressi in mm/d in funzione della latitudine e dei mesi (Fonte: Unipd).

lat	G	F	M	A	M	G	L	A	S	O	N	D
48°	4.3	6.6	9.8	13.0	15.9	17.2	16.5	14.3	11.2	7.8	5.0	3.7
44°	5.3	7.6	10.6	13.7	16.1	17.2	16.6	14.7	11.9	8.7	6.0	4.7
40°	6.4	8.6	11.4	14.3	16.4	17.3	16.7	15.2	12.5	9.6	7.0	5.7
36°	7.4	9.4	12.1	14.7	16.4	17.2	16.7	15.4	13.1	10.6	8.0	6.6
32°	8.3	10.2	12.8	15.0	16.5	17.0	16.8	15.6	13.6	11.2	9.0	7.8
28°	9.3	11.1	13.4	15.3	16.5	16.8	16.7	15.7	14.1	12.0	9.9	8.8
24°	10.2	11.9	13.9	15.4	16.4	16.6	16.5	15.8	14.5	12.6	10.7	9.7
20°	11.2	12.7	14.4	15.6	16.3	16.4	16.3	15.9	14.8	13.3	11.6	10.7
16°	12.0	13.3	14.7	15.6	16.0	15.9	15.9	15.7	15.0	13.9	12.4	11.6
12°	12.8	13.9	15.1	15.7	15.7	15.5	15.5	15.6	15.2	14.4	13.2	12.5
8°	13.6	14.5	15.3	15.6	15.3	15.0	15.1	15.4	15.3	14.8	13.9	13.3
4°	14.3	15.0	15.5	15.5	14.9	14.4	14.6	15.1	15.1	15.1	14.5	14.1
0°	15.0	15.5	15.7	15.3	14.4	13.9	14.1	14.8	15.3	15.4	15.1	14.8

Per descrivere il processo di infiltrazione dell'acqua negli strati sottostanti del suolo, si è assunto che il tasso di drenaggio e l'umidità del suolo siano in relazione tra di loro secondo una legge esponenziale (*Dari et al., 2020*). Di conseguenza, le perdite per percolazione si calcolano secondo l'equazione

$$D(t) = a \cdot S_r(i)^b \cdot \frac{24}{1000} \cdot A \text{ [m}^3\text{/d]}, \quad (7.6)$$

in cui $S_r(i)$ è l'umidità relativa del suolo [-], A è l'estensione areale del campo su cui si valuta il bilancio idrico [m²], a e b sono due parametri di drenaggio [-] che si possono ricavare da **Tabella 7.4**. Poiché, come visto nel **paragrafo 7.2**, il suolo è composto da depositi ghiaioso-sabbiosi, si sono considerati $a = 1,2$ e $b = 19,9$.

Tabella 7.4 – Coefficienti di drenaggio per differenti tipi di tessitura del suolo (Jalilvand, et al., 2018).

Soil texture	a	b
Loamy sand	61.1	8.3
Sandy loam	25.9	11.3
Loam	13.2	15.6
Silt loam	6.8	16.2
Clay loam	2.3	17.5
Sandy clay	1.2	19.9
Clay	0.6	24.9

Sulla base dello studio condotto da Brocca et al. (2015), il termine $R(i)$ dovuto al ruscellamento si può considerare trascurabile. Anche gli apporti idrici di falda $A_f(i)$ sono irrilevanti perché, come già specificato nel **paragrafo 7.2**, la tavola d'acqua si trova a una profondità che varia tra i 5 m e i 10 m dal piano campagna. Per valutare il volume di pioggia $P(i)$ caduta sul campo agricolo analizzato, si moltiplica la sua superficie, espressa in m^2 , con la quantità di precipitazione rilevata dal pluviometro ARPA di Vialfrè, dopo averla trasformata da mm in m.

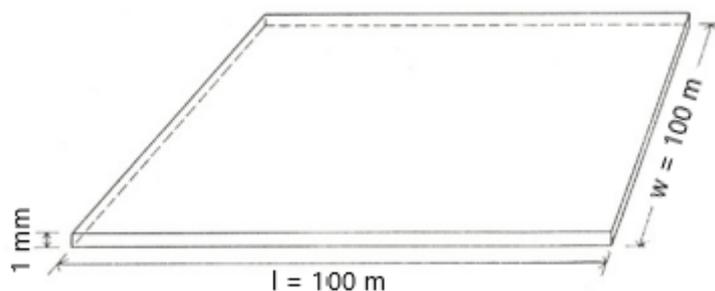


Figura 7.21 – Rappresentazione grafica del calcolo del volume di pioggia (Fonte: Unipd).

Il volume di acqua stoccato nel suolo alla data i si calcola attraverso la relazione

$$S(i) = Mv(i) \cdot s \cdot A [m^3], \quad (7.7)$$

dove $Mv(i)$ è il valore di umidità volumetrica del suolo stimato da satellite nel giorno i ed espresso in percentuale, s è lo spessore del suolo in m, che, nel presente studio, si è stabilito pari a 1 m, e A è la superficie del terreno in m^2 .

Tenendo conto delle assunzioni summenzionate, per calcolare i volumi di adacquamento, l'equazione (7.2) può essere riscritta come

$$I(i) = ET(i) + D(i) - P(i) + \Delta S(i) [m^3]. \quad (7.8)$$

I risultati dell'applicazione del bilancio idrico del suolo sono presentati in **Figura 7.22**. Per consentire il confronto tra i vari campi, la quantità idrica di irrigazione è stata espressa in mm, dividendo il volume di adacquamento in m³ per l'estensione areale dei fondi agricoli analizzati in m².

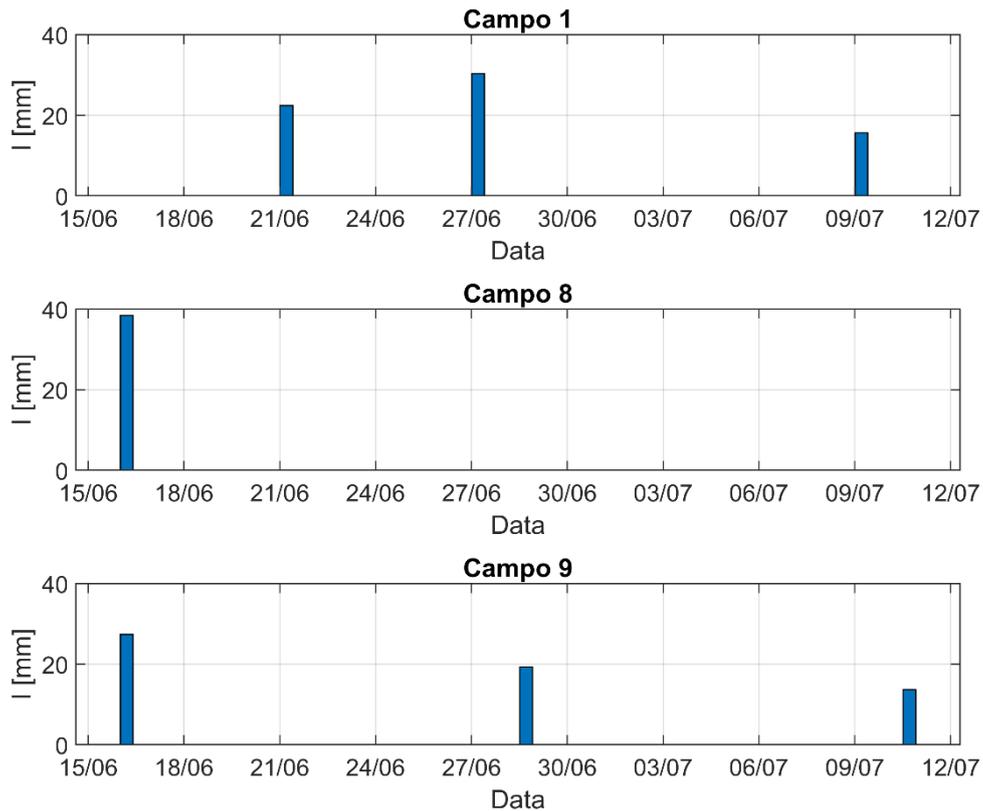


Figura 7.22 – Stime della quantità idrica di irrigazione, espresse in mm.

A causa dell'assenza di dati riguardanti i prelievi irrigui per ogni singola utenza e la disponibilità di acqua presente nella rete secondaria di canali che serve la regione di interesse, si sono confrontati i volumi irrigui giornalieri stimati per ciascun campo con il volume idrico medio giornaliero transitato nella roggia di Rivarolo. Quest'ultimo è stato valutato a partire dai dati di portata del canale forniti dalla Regione Piemonte. In **Figura 7.23**, è possibile notare che i valori dei volumi di adacquamento dei campi agricoli sono più piccoli di alcuni ordini di grandezza rispetto alla quantità d'acqua

fornita giornalmente dal canale di Rivarolo. Poiché quest'opera serve un'area molto più ampia di quella studiata, essi si possono considerare plausibili.

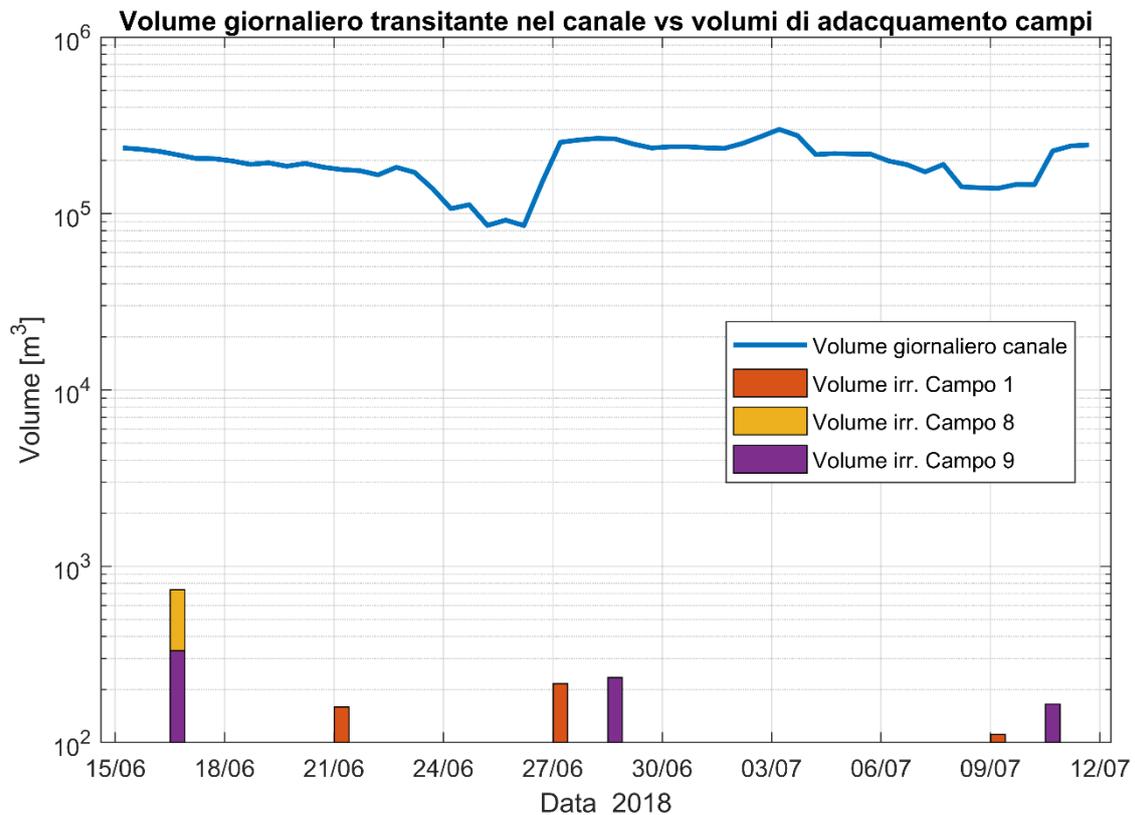


Figura 7.23 – Confronto tra i volumi irrigui giornalieri registrati sui singoli campi e il volume idrico medio giornaliero transitato nella roggia di Rivarolo.

Se i risultati raggiunti sono attendibili dal punto di vista comparativo, lo stesso non si può ancora affermare in senso assoluto. Infatti, è lecito ipotizzare che i volumi di adacquamento riportati in **Figura 7.23** siano sottostimati per diversi motivi. Nell'area di studio, è praticata l'irrigazione per scorrimento (*Regione Piemonte, 2017*), nella quale l'acqua defluisce con un velo sottile sulla superficie del terreno, per tutta la durata dell'adacquata, al fine di consentirne l'infiltrazione. È caratterizzata da un sistema semplice ed è molto adatta a colture idroesigenti, come le coltivazioni foraggere. Questa tecnica di irrigazione, però, richiede un elevato utilizzo della risorsa idrica (ad esempio, per il mais si raggiungono tipicamente dei volumi di 1000-1500 m³/ha per adacquata (Fonte: *Assomais*)) e ha una bassa efficienza. Difatti, la maggior parte

dell'acqua è persa per percolazione profonda, per le colature di fondo campo e per evaporazione (Lombardo, 1999).

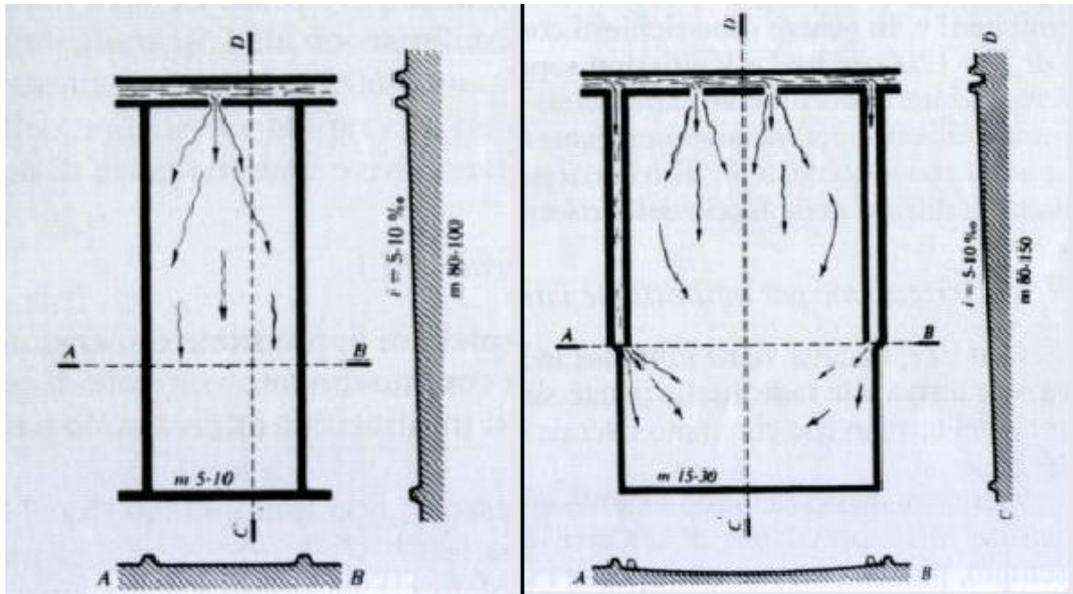


Figura 7.24 – Schemi di irrigazione per scorrimento (Lombardo, 1999).

Anche l'intervallo temporale tra il termine dell'adacquamento e il passaggio del satellite influisce nella stima dei volumi irrigui. Considerando i primi 5 cm del suolo, che, come già visto in precedenza, rappresentano la profondità massima raggiungibile dal segnale radar dei satelliti Sentinel-1, una percentuale non trascurabile degli apporti idrici derivanti dall'irrigazione è persa per evaporazione, mentre una parte consistente di acqua tende a infiltrarsi negli strati di suolo sottostanti in maniera piuttosto veloce anche a causa dell'alta permeabilità del terreno. Maggiore è il tempo che intercorre tra il processo di irrigazione e il passaggio satellitare, maggiori sono le perdite di acqua e minore è l'incremento di umidità del suolo che è rilevato dal sensore. Di conseguenza, anche il volume di irrigazione sarà sottostimato.

Nonostante tutte queste considerazioni, bisogna tener presente che nell'area indagata, durante la stagione estiva, solitamente gli utenti devono affrontare dei problemi di carenza irrigua dovuti alla scarsa efficienza delle reti di diramazione e alle difficoltà gestionali causate da un'eccessiva suddivisione dei terreni agricoli (Merlo, 1973; Regione Piemonte, 2017). Per tali motivazioni, accade con una certa frequenza che la domanda di irrigazione non sia pienamente soddisfatta o che, addirittura, alcune utenze siano

costrette a saltare il turno. Anche l'elevata piovosità riscontrata nell'anno esaminato può aver ridotto la quantità di acqua da apportare tramite irrigazione per ripristinare la riserva facilmente utilizzabile, ovvero la frazione di umidità trattenuta stabilmente dal terreno e resa disponibile alle piante, evitando, inoltre, la presenza di ristagni e la lisciviazione dei nutrienti. Pertanto, l'ottenimento di stime di volumi di adacquamento inferiori rispetto ai risultati tipicamente attesi non deve essere motivo di stupore.

8. CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI

Il metodo di Change Detection implementato all'interno di Google Earth Engine si è dimostrato una valida soluzione per la stima dell'umidità del suolo in aree agricole a scala di campo. Infatti, la maggior parte dei prodotti di umidità del suolo attualmente disponibili e più diffusi è utilizzata con successo per applicazioni agricole a scala globale, ma ha una risoluzione spaziale troppo bassa per poter svolgere delle analisi a una scala molto dettagliata, come nel presente lavoro di tesi. Può, inoltre, essere impiegato come alternativa ai prodotti di umidità del suolo a risoluzione spaziale molto elevata, come Theia e VanderSat, che presentano diverse limitazioni riguardanti l'accessibilità e la copertura spaziale e temporale dei dati.

Nel processo di validazione del modello, si è ottenuto un valore di RMSD pari a 6,6% vol., che si è ritenuto soddisfacente per diversi motivi:

- l'algoritmo non necessita di una conoscenza pregressa dell'area di studio, al contrario delle reti neurali che, per tale motivo, pur consentendo di raggiungere dei risultati più accurati, hanno delle possibilità di applicazione più limitate;
- rispetto al prodotto del Copernicus Global Land Service, che è basato su un modello matematico quasi identico e ha una risoluzione spaziale di 1 km, si certifica un RMSD leggermente superiore, dovuto a una maggiore influenza della rugosità e degli elementi del terreno, che è più contenuta a una scala spaziale meno dettagliata;
- nonostante le ipotesi semplificative, il metodo consente di avere un'accuratezza maggiore rispetto ad altri metodi di Change Detection che utilizzano l'indice NDVI per modellare il contributo della vegetazione nel segnale restituito al satellite.

Per comprendere appieno le potenzialità e i limiti di questo metodo, si è scelto di stimare il contenuto di umidità nel suolo su un'area agricola di 1 km², appartenente al Consorzio irriguo Ovest Torrente Orco, nei pressi di Rivarolo Canavese (TO). Si è potuto verificare che l'evoluzione temporale dei dati di umidità del terreno è coerente

con l'andamento delle precipitazioni, individuando un coefficiente di correlazione tipico di ambienti caratterizzati dalla presenza di un clima temperato, come la zona del Canavese. Le uniche limitazioni di rilievo evidenziate riguardano la mancata segnalazione di un evento di pioggia molto abbondante, a causa della particolare copertura temporale dei dati satellitari.

Per la valutazione dei volumi di irrigazione, dal momento che l'area esaminata è contraddistinta da un'elevata frammentazione dei fondi agricoli e comprende sia una zona non irrigata sia dei terreni appartenenti a due distretti irrigui che hanno calendari e turni distinti tra di loro, si è deciso di svolgere degli studi a scala di campo. Incrociando i dati di umidità del suolo con le serie temporali di NDMI e NDVI, è stato possibile individuare dei picchi nel segnale di contenuto di umidità del terreno legati a fenomeni di irrigazione. Inserendo le stime satellitari di umidità del terreno all'interno del modello di bilancio idrico del suolo, è stato possibile calcolare i volumi irrigui. Questi valori ottenuti, in mancanza di dati relativi ai prelievi irrigui per ogni singola utenza e alla disponibilità idrica nella rete secondaria di canali, sono stati confrontati con i volumi transitanti nella roggia di Rivarolo. Nonostante le assunzioni fatte nel modello di bilancio idrico, i volumi di adacquamento stimati per i singoli campi si sono dimostrati plausibili.

Poiché l'algoritmo implementato in Google Earth Engine si è dimostrato valido nel rilevamento dei picchi di umidità del suolo collegati all'irrigazione, esso può fungere da base a uno strumento informatico utilizzabile dai consorzi irrigui e idoneo a individuare eventuali prelievi d'acqua non autorizzati e a garantire una gestione ottimale delle risorse irrigue.

Per poter valutare in modo automatizzato l'entità degli apporti irrigui, si può fare riferimento a dei modelli matematici, come l'algoritmo SM2RAIN, che calcolano il quantitativo di acqua entrante del terreno a partire dal segnale di umidità del suolo (Brocca *et al.*, 2018; Dari *et al.*, 2020). Questi modelli sono stati attualmente testati soltanto con prodotti di umidità del suolo a risoluzione spaziale bassa, come SMOS e SMAP. Uno degli scopi futuri è indagare la possibilità di impiego di questi algoritmi, studiando gli opportuni adattamenti, in presenza di informazioni satellitari Sentinel-1

ad alta risoluzione spaziale, come quelle ottenute attraverso la piattaforma di cloud computing.

Infine, i dati di umidità del suolo ottenuti in GEE, che si riferiscono agli strati superficiali del terreno, possono essere impiegati per stimare l'umidità presente nella zona radicale mediante dei modelli di trasferimento radiativo. Essa, infatti, riveste un ruolo fondamentale nei sistemi di previsione meteo e nella determinazione del fabbisogno idrico.

BIBLIOGRAFIA

- Allen, R., Pereira, L., Raes, D. e Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements - FAO Irrigation and drainage paper 56. Roma: FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Antognelli, S. (2018). Indici di vegetazione NDVI e NDMI: istruzioni per l'uso. [Online]. <https://www.agricolus.com/indici-vegetazione-ndvi-ndmi-istruzioni-uso/> Ultimo accesso: 1 Marzo 2021.
- Arnold, J. (1999). Soil Moisture. [Online]. <https://weather.msfc.nasa.gov/landprocess/> Ultimo accesso: 18 Gennaio 2021.
- ARPA Piemonte. (2019). Il Clima in Piemonte nel 2018. [Online]. http://www.arpa.piemonte.it/rischinaturali/tematismi/clima/rapporti-di-analisi/annuale_pdf/anno_2018.pdf Ultimo accesso: 1 Marzo 2021.
- Assomais. Irrigazione. [Online]. <http://www.assomais.it/irrigazione/> Ultimo accesso: 21 Marzo 2021.
- Attema, E. e Ulaby, F. (1978). Vegetation modeled as a water cloud. *Radio science*, 13(2), 357-364.
- Bai, J., Cui, Q., Zhang, W. e Meng, L. (2019). An Approach for Downscaling SMAP Soil Moisture by Combining Sentinel-1 SAR and MODIS Data. *Remote Sensing*, 11(23), 2376.
- Bazzi, H., Baghdadi, N., El Hajj, M., Zribi, M. e Belhouchette, H. (2019). A Comparison of Two Soil Moisture Products S2MP and Copernicus-SSM Over Southern France. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 12(9), 3366-3375.
- Benninga, H.-J., Carranza, C., Pezij, M., van Santen, P., van der Ploeg, M., Augustijn, D. e van der Velde, R. (2018). The Raam regional soil moisture monitoring network in the Netherlands. *Earth system science data*, 10(1), 61-79.
- Benninga, H.-J., van der Velde, R., e Su, Z. (2019). Impacts of Radiometric Uncertainty and Weather-Related Surface Conditions on Soil Moisture Retrievals with Sentinel-1. *Remote Sensing*, 11, 2025.
- Bousbih, S., Zribi, M., El Hajj, M., Baghdadi, N., Lili-Chabaane, Z., Gao, Q. e Fanise, P. (2018). Soil Moisture and Irrigation Mapping in A Semi-Arid Region, Based on the Synergetic Use of Sentinel-1 and Sentinel-2 Data. *Remote Sensing*, 10(12), 1953.
- Brocca, L., Massari, C., Ciabatta, L., Moramarco, T., Penna, D., Zuecco, G., Pianezzola L., Borga M., Matgen P. e Martínez-Fernández, J. (2015). Rainfall estimation from in situ soil moisture observations at several sites in Europe: an evaluation of the SM2RAIN algorithm. *Journal of Hydrology*, 63(3), 201-209.

- Brocca, L., Crow, W., Ciabatta, L., Massari, C., de Rosnay, P., Enenkel, M., Hahn S., Amarnath G., Camici S., Tarpanelli A. e Wagner, W. (2017). A review of the Applications of ASCAT Soil Moisture Products. *IEEE journal of selected topics in applied earth observations and remote sensing*, 10(5), 2285-2306.
- Brocca, L., Tarpanelli, A., Filippucci, P., Dorigo, W., Zaussinger, F., Gruber, A. e Fernández-Prieto, D. (2018). How much water is used for irrigation? A new approach exploiting coarse resolution satellite soil moisture products. *International journal of applied earth observation and geoinformation*, 73, 752-766.
- Chan, S., Bindlish, R., O'Neill, P., Njoku, E., Jackson, T., Colliander, A., Chen F., Burgin M., Dunbar S., Piepmeier J., Yueh S., Entekhabi D., Cosh M. H., Caldwell T., Walker J., Wu X., Berg A., Rowlandson T., Pacheco A., McNaim H., Thibeault M., Martínez-Fernández J., González-Zamora Á., Seyfried M., Bosch D., Starks P., Goodrich D., Prueger J., Palecki M., Small E. E., Zreda M., Calvet J.-C., Crow W. T. e Kerr, Y. (2016). Assessment of the SMAP Passive Soil Moisture Product. *IEEE transactions on geoscience and remote sensing*, 54(8), 4994-5007.
- Climate-data.org. [Online]. <https://it.climate-data.org/europa/italia/piemonte/rivarolo-canavese-13524/> Ultimo accesso: 28 Febbraio 2021.
- Consorzio Ovest Torrente Orco. (2020a). Reti irrigue. [Online]. <http://www.consorzioovestorco.it/reti-irrigue> Ultimo accesso: 26 Febbraio 2021.
- Consorzio Ovest Torrente Orco. (2020b). Regolamento consortile Distretto di Rivarolo. [Online]. https://www.dropbox.com/s/5nqga9fl6c8pvqn/2020_Regolamento%20Rivarolo_REV%20FEBBRAIO.pdf?dl=0 Ultimo accesso: 26 Febbraio 2021.
- Consorzio Ovest Torrente Orco. (2020c). Regolamento consortile Distretto di Favria e Distretto Misto. [Online]. https://www.dropbox.com/s/ij4ieo32bj9wr0m/2020_Regolamento%20Favria_rev%20febbraio_Favria%20e%20Misto.pdf?dl=0 Ultimo accesso: 28 Febbraio 2021.
- Copernicus. DIAS. [Online]. <https://www.copernicus.eu/it/accesso-ai-dati/dias> Ultimo accesso: 25 Gennaio 2021.
- Copernicus Global Land Service. Surface Soil Moisture. [Online]. <https://land.copernicus.eu/global/products/ssm> Ultimo accesso: 20 Gennaio 2021.
- Custom-scripts Sentinel Hub. Soil Moisture Estimation Script. [Online]. https://custom-scripts.sentinel-hub.com/sentinel-1/soil_moisture_estimation/ Ultimo accesso: 29 Gennaio 2021.
- Dari, J., Brocca, L., Quintana-Seguí, P., Escorihuela, M., Stefan, V. e Morbidelli, R. (2020). Exploiting High-Resolution Remote Sensing Soil Moisture to Estimate Irrigation Water Amounts over a Mediterranean Region. *Remote Sensing*, 12, 2593.
- Dumedah, G., Walker, J., e Merlin, O. (2015). Root-zone soil moisture estimation from assimilation of downscaled Soil Moisture and Ocean Salinity data. *Advances in Water Resources*, 84, 14-22.

- Earth Observing System. (2019). Soil moisture control: an essential farming constituent. [Online]. <https://eos.com/blog/soil-moisture-control-is-an-essential-farming-constituent/> Ultimo accesso: 14 Gennaio 2021.
- El Hajj, M., Baghdadi, N., Zribi, M., e Bazzi, H. (2017). Synergic Use of Sentinel-1 and Sentinel-2 Images for Operational Soil Moisture Mapping at High Spatial Resolution over Agricultural Areas. *Remote Sensing*, 9(12), 1292.
- ESA. (2017). SMOS Data Products. [Online]. <https://earth.esa.int/documents/10174/1854456/SMOS-Data-Products-Brochure> Ultimo accesso: 19 Gennaio 2021.
- ESA. (2019). Soil Moisture CCI. [Online]. <https://esa-soilmoisture-cci.org/node/93> Ultimo accesso: 20 Gennaio 2021.
- ESA CCI Land cover website. [Online]. <http://www.esa-landcover-cci.org/> Ultimo accesso: 22 Febbraio 2021.
- European Commission. (2020). JRC Big Data Analytics Platform (JEODIPP). [Online]. <https://jeodpp.jrc.ec.europa.eu/home/> Ultimo accesso: 31 Gennaio 2021.
- European Environmental Agency. (2017). Climate change, impacts and vulnerability in Europe 2016. An indicator-based report (Vol. 01/2017). Luxembourg: Publications Office of the European Union.
- European Environmental Agency. (2019). Climate Change adaption in the agricultural sector in Europe (Vol. 04/2019). Luxembourg: Publications Office of the European Union.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2016). Soils, Land and Water for climate change adaptation and mitigation. Roma.
- Furioso, A. (2020). Cosa sono le reti neurali? (Neuragate) [Online]. <https://www.neuragate.it/intelligenza-artificiale/cosa-sono-le-reti-neurali/> Ultimo accesso: 9 Febbraio 2021.
- Gao, Q., Zribi, M., Escorihuela, M. e Baghdadi, N. (2017). Synergic Use of Sentinel-1 and Sentinel-2 Data for Soil Moisture Mapping at 100 m Resolution. *Sensors*, 17, 1966.
- Geoportale Piemonte. Land Cover Piemonte: classificazione uso del suolo 2010 (vettoriale) - storico. [Online]. <http://www.geoportale.piemonte.it/geocatalogorp/?sezione=catalogo> Ultimo accesso: 26 Febbraio 2021.
- Gherboudj, I., Magagi, R., Berg, A. e Toth, B. (2011). Soil moisture retrieval over agricultural fields from multi-polarized and multi-angular RADARSAT-2 SAR data. *Remote Sensing of Environment*, 115(1), 33-43.
- Global Forest Watch. [Online]. <https://www.globalforestwatch.org/> Ultimo accesso: 27 Gennaio 2021.

- Global Surface Water Explorer. [Online]. <https://global-surface-water.appspot.com/>
Ultimo accesso: 27 Gennaio 2021.
- Goddard Earth Science Data and Information Services Center. [Online]. <https://disc.gsfc.nasa.gov/datasets?keywords=AMSR2&page=1> Ultimo accesso: 20 Gennaio 2021.
- Gomes, V., Queiroz, G. e Ferreira, K. (2020). An Overview of Platforms for Big Earth Observation Data Management and Analysis. *Remote Sensing*, 12, 1253.
- Google Earth Engine. (2020a). Guides. [Online]. <https://developers.google.com/earth-engine/guides> Ultimo accesso: 21 Febbraio 2021.
- Google Earth Engine. (2020b). Sentinel-1 Algorithms. [Online]. <https://developers.google.com/earth-engine/guides/sentinel1> Ultimo accesso: 21 Febbraio 2021.
- Google Earth Engine. (2020c). Debugging guide. [Online]. <https://developers.google.com/earth-engine/guides/playground> Ultimo accesso: 21 Febbraio 2021.
- Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D. e Moore, R. (2017). Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*, 202, 18-27.
- Gunther, M. (2015). Google-powered map helps fight deforestation. [Online]. <https://www.theguardian.com/sustainable-business/2015/mar/10/google-earth-engine-maps-forest-watch-deforestation-environment> Ultimo accesso: 27 Gennaio 2021.
- Hargreaves, G. e Samani, Z. (1985). Reference Crop Evapotranspiration from Temperature. *Applied Engineering in Agriculture*, 1(2), 96-99.
- Hashmi, S. (2017). *Comprehensive Materials Finishing (Vol. 1)*. Kidlington: Elsevier.
- Hornáček, M., Wagner, W., Sabel, D., Truong, H.-L., Snoeij, P., Hahmann, T., Diedrich E., Doubková, M. (2012). Potential for High Resolution Systematic Global Surface Soil Moisture Retrieval via Change Detection Using Sentinel-1. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 5(4), 1303-1311.
- International Soil Moisture Network. Data Viewer. [Online]. https://www.geo.tuwien.ac.at/insitu/data_viewer/ Ultimo accesso: 22 Febbraio 2021.
- ISPRA - Dipartimento per il Servizio Geologico d'Italia. Carta Geologica d'Italia scala 1:100.000. [Online]. http://sgi.isprambiente.it/geologia100k/mostra_foglio.aspx?numero_foglio=56# Ultimo accesso: 26 Febbraio 2021.
- Jalilvand, E., Tajrishy, M., Brocca, L., Massari, C., Hashemi, S. e Ciabatta, L. (2018). Estimating the drainage rate from surface soil moisture drydowns: Application of DfD model to in situ soil moisture data. *Journal of Hydrology*, 565, 489-501.

- Janani. (2020). What are The Causes of Surface Roughness. [Online]. <https://medium.com/@taylorhobsonmetrology/what-are-the-causes-of-surface-roughness-fca457eaea45> Ultimo accesso: 7 Febbraio 2021.
- Kamilaris, A., Kartakoullis, A. e Prenafeta-Boldú, F. (2017). A review on the practice of big data analysis in agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*, 143, 23-37.
- Kerr, Y., Waldteufel, P., Richaume, P., Wigneron, J., Ferrazzoli, P., Mahmoodi, A., Al Bithar A., Cabot F., Gruhier C., Enache Juglea S., Leroux D., Mialon A. e Delwart, S. (2012). The SMOS Soil Moisture Retrieval Algorithm. *IEEE transactions on geoscience and remote sensing*, 50(5), 1384-1403.
- Kornelsen, K. e Coulibaly, P. (2013). Advances in Soil Moisture Retrieval from Synthetic Aperture Radar. *Journal of hydrology (Amsterdam)*, 476, 460-489.
- Landscape Technologies. [Online]. <https://www.landscapetechnologies.com.au/tdr-315-sensor-new> Ultimo accesso: 18 Gennaio 2021.
- Li, J., Wang, S., Gunn, G., Joosse, P. e Russel, H. (2018). A model for downscaling SMOS soil moisture using Sentinel-1 SAR data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 72, 109-121.
- Lombardo, V. (1999). Principi e tecnica dell'irrigazione. L'Epos.
- Lotus Arise. [Online]. <https://lotusarise.com/satellite-frequency-bands-upsc/> Ultimo accesso: 6 Febbraio 2021.
- Merlo, S. (1973). L'irrigazione in Piemonte. Torino: IRES.
- Migliarese, A. (2018). Observing the Earth, Fueling Global Development Studios. [Online]. <https://www.geospatialworld.net/blogs/observing-the-earth-fueling-global-development-solutions/> Ultimo accesso: 19 Gennaio 2021.
- Mirsoleimani, H., Sahemi, M., Baghdadi, N. e El Hajj, M. (2019). Bare Soil Surface Moisture Retrieval from Sentinel-1 SAR Data Based on the Calibrated IEM and Dubois Models Using Neural Networks. *Sensors*, 19(14), 3209.
- Mora, O., Ordoqui, P., Iglesias, R. e Blanco, P. (2016). Earthquake rapid mapping using ascending and descending Sentinel-1 TOPSAR interferograms. *Procedia Computer Science*, 100, 1135-1140.
- NASA Earth Sciences. [Online]. <https://earth.gsfc.nasa.gov/hydro/data/nasa-usda-global-soil-moisture-data> Ultimo accesso: 20 Gennaio 2021.
- NASA SMAP Soil Moisture Active Passive. Data Products. [Online]. <https://smap.jpl.nasa.gov/data/> Ultimo accesso: 20 Gennaio 2021.
- Natural Resources Canada. (2015). Radar Polarimetry. [Online]. <https://www.nrcan.gc.ca/maps-tools-publications/satellite-imagery-air-photos/remote-sensing-tutorials/microwave-remote-sensing/radar-polarimetry/9275> Ultimo accesso: 7 Febbraio 2021.

- Open Data Cube. (2020). [Online]. <https://www.opendatacube.org/> Ultimo accesso: 30 Gennaio 2021.
- Open Foris. Collect Earth. [Online]. <http://www.openforis.org/tools/collect-earth.html> Ultimo accesso: 27 Gennaio 2021.
- Open Foris. SEPAL. [Online] <https://github.com/openforis/sepal> Ultimo accesso: 30 Gennaio 2021.
- openEO. (2020). Documentation. [Online] <https://openeo.org/documentation/1.0/> Ultimo accesso: 31 Gennaio 2021.
- Parker, G. (2001). Encyclopedia of Materials: Science and Technology.
- Regione Piemonte. (2017). La rete irrigua e i canali del Piemonte. [Online]. <https://www.regione.piemonte.it/web/temi/agricoltura/agroambiente-meteo-suoli/rete-irrigua-canali-piemonte> Ultimo accesso: 28 Febbraio 2021.
- Regione Piemonte. (2020). Sistema Informativo Bonifica e Irrigazione (SIBI). [Online]. <https://www.regione.piemonte.it/web/temi/agricoltura/agroambiente-meteo-suoli/sistema-informativo-bonifica-irrigazione-sibi> Ultimo accesso: 28 Febbraio 2021.
- Rizzoli, P. e Bräutigam, B. (2014). Radar backscatter modeling based on global tandem-x mission data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 52(9), 5974-5988.
- SardegnaArpa. Il bilancio idrico. [Online]. <http://www.sar.sardegna.it/pubblicazioni/notetecniche/nota1/pag002.asp> Ultimo accesso: 2 Marzo 2021.
- Sehler, R., Li, J., Reager, J. e Ye, H. (2019). Investigating Relationship Between Soil Moisture and Precipitation Globally Using Remote Sensing Observations. *Journal of contemporary water research & education*, 168(1), 106-118.
- Sentinel Hub. [Online]. <https://www.sentinel-hub.com/> Ultimo accesso: 29 Gennaio 2021.
- Sentinel Hub EO Browser. [Online]. Retrieved Gennaio 29, 2021, from <https://www.sentinel-hub.com/explore/eobrowser/> Ultimo accesso: 29 Gennaio 2021.
- Sentinel Online. [Online]. <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/user-guides/sentinel-1-sar> Ultimo accesso: 6 Febbraio 2021.
- Sentinel Playground. [Online]. <https://apps.sentinel-hub.com/sentinel-playground/> Ultimo accesso: 29 Gennaio 2021.
- SEOS. Introduction to Remote Sensing. [Online]. <https://seos-project.eu/remotesensing/remotesensing-c01-p06.html> Ultimo accesso: 18 Gennaio 2021.

- Sistemapiemonte. Anagrafe agricola - data warehouse. [Online]. <http://www.sistemapiemonte.it/cms/privati/agricoltura/servizi/367-anagrafe-agricola-unica-data-warehouse> Ultimo accesso: 26 Febbraio 2021.
- Soille, P., Burger, A., De Marchi, D., Kempeneers, D., Rodriguez, D., Syrris, V. e Vasilev, V. (2018). A versatile data-intensive computing platform for information retrieval from big geospatial data. *Future Generation Computer Systems*, 81, 30-40.
- Tarikhi, P. (2012). InSAR of Aquatic Bodies. *ISPRS - International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 39, 85-90.
- The Sentinel-1 Toolbox. [Online]. <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/toolboxes/sentinel-1> Ultimo accesso: 16 Marzo 2021.
- THEIA-LAND. (2020). Soil moisture at very high spatial resolution. [Online]. <https://www.theia-land.fr/en/product/soil-moisture-with-very-high-spatial-resolution/> Ultimo accesso: 21 Gennaio 2021.
- Unipd. [Online]. Retrieved Marzo 2, 2021, from https://elearning.unipd.it/scuolaamv/pluginfile.php/8197/mod_resource/content/1/acqua-suolo.pdf Ultimo accesso: 2 Marzo 2021.
- VanderSat. Detailed soil moisture data. [Online] <https://vandersat.com/data/soil-moisture/> Ultimo accesso: 21 Gennaio 2021.
- Vollrath, A., Mullissa, A. e Reiche, J. (2020). Angular-Based Radiometric Slope Correction for Sentinel-1 on Google Earth Engine. *Remote Sensing*, 12, 1867.
- Webgis ARPA Piemonte. Monitoraggio della qualità delle acque in Piemonte. [Online]. http://webgis.arpa.piemonte.it/monitoraggio_qualita_acque_mapseries/monitoraggio_qualita_acque_webapp/?entry=2 Ultimo accesso: 26 Febbraio 2021.
- Worldometer. (2019). [Online]. <https://www.worldometers.info/world-population/> Ultimo accesso: 15 Gennaio 2021.

RINGRAZIAMENTI

A conclusione del lavoro di tesi, vorrei dedicare questo spazio alle persone che mi hanno fortemente supportato in questi cinque anni di vita universitaria e nella redazione del presente elaborato.

Vorrei innanzitutto ringraziare i miei relatori, il prof. Pierluigi Claps e il dottorando Matteo Rolle, per aver condiviso con me le loro competenze, per i preziosi consigli fornitimi nella stesura della tesi e per la disponibilità dimostrata, nonostante la pandemia in corso mi abbia costretto a svolgere l'intero lavoro da remoto e abbia reso tutto maggiormente complicato.

Ringrazio infinitamente i miei genitori per avermi fatto intraprendere questo percorso di studi e per avermi supportato e sopportato insieme a mia sorella e mia nonna. Ringrazio anche tutti quei parenti, e in particolare Eleonora e Salvatore e gli zii Michele, Sonia, Luigi e Maria, che hanno sempre creduto in me e che, in vari modi, hanno dimostrato la loro costante vicinanza durante questa lunga avventura.

Un ringraziamento speciale lo dedico a tutte le persone con cui ho condiviso questi anni di permanenza a Torino. A Luigi, che è stata la prima persona conosciuta dal Politecnico e una delle più importanti in questo cammino. A Margherita, sempre paziente e grande compagna di tribolazioni. Ad Aurora, Cassandra, Fabrizio e Sara, per tutti i bei momenti passati insieme e per avermi compreso e sostenuto, forse più di tutti, anche nella notte più buia. A Serena e Flavio, che sono riusciti a lasciare il segno del loro passaggio malgrado abbiamo trascorso insieme solo una piccola parte di questo percorso. A Gianmarco, Giulia, Gloria e Marco, per aver condiviso con me gioie e fatiche della magistrale. Ai miei coinquilini che si sono succeduti negli anni: Michele, da me considerato come una sorta di "spirito guida", nonostante io sia stato la vittima preferita dei suoi scherzi; Mattia; il già citato Luigi e il presidente Domenico.

Ringrazio particolarmente anche i professori e gli amici del Liceo Capece, soprattutto Maria e Lorenzo che mi hanno sostenuto fortemente in questo sprint finale: molto della persona che sono oggi lo devo anche a tutti voi.

Infine, ringrazio Emanuele, Giulia e tutte quelle persone che, pur non espressamente nominate, hanno sempre nutrito stima nei miei confronti e sono state presenti a vario titolo.

Per aspera ad astra,

Giuseppe