

Utilizzo dei dati Sentinel-2 per la verifica delle prenotazioni irrigue e per il monitoraggio del prelievo difforme della risorsa idrica rispetto all'assegnazione: il caso studio del Consorzio di Bonifica Trapani 1

Salvatore Falanga Bolognesi¹, Ignazio Aurelio Marino², Fabio Sardo², Carlo De Michele¹ e Guido D'Urso³

¹ Ariespace s.r.l., Centro Direzionale IS. A3, 80143 Napoli, salvatore.falanga@ariespace.com; carlo.demichele@ariespace.com

² Consorzio di Bonifica 1 Trapani, Corso Italia 42, Trapani. i.marino@cobon1tp.it; f.sardo@cobon1tp.it

³ Dipartimento di Agraria - Università degli Studi di Napoli Federico II, Via Università 100 I-80055 Portici (NA)

Abstract. I Consorzi di Bonifica ed Irrigazione gestiscono impianti collettivi per fornire l'acqua per l'irrigazione. Il calcolo del ruolo irriguo si basa, in mancanza di misure dirette, su una dichiarazione prodotta da ciascuna azienda agricola in cui sono riportate, per ciascuna particella catastale, la superficie irrigata e la relativa dotazione per ettaro. L'esame della veridicità di tali dichiarazioni rappresenta un'operazione dispendiosa, effettuata mediante ispezioni a campione. Tale controllo può essere effettuato utilizzando i dati satellitari per mappare le aree irrigate e i relativi volumi irrigui, riducendo le ispezioni a pochi casi dubbi. Inoltre i volumi irrigui utilizzati in agricoltura rappresentano una delle componenti principali del bilancio idrologico. La normativa comunitaria ha sancito l'obbligo di monitorare i fabbisogni irrigui (Direttiva Acqua n.60/2000) e, conseguentemente, anche il recente decreto MIPAAF, 31 luglio 2015 ha definito le "Linee guida per la quantificazione dei volumi irrigui, per l'irrigazione collettiva e l'autoconsumo". La norma, oltre a sancire gli obblighi di misura, consente agli Enti Gestori e alle amministrazioni regionali, di procedere, in assenza di misuratori, alla stima dei volumi irrigui, mediante metodologie che applicano l'approccio del quaderno FAO n.56. In questo lavoro viene riportata l'esperienza relativa alle stagioni irrigue 2019-2020 (aprile-ottobre) nei distretti irrigui del Consorzio di Bonifica 1 Trapani, il cui territorio irrigabile si estende per circa di 21 mila ettari. Una prima fase del lavoro ha riguardato la classificazione delle parcelle per le diverse colture presenti nei distretti irrigui sulla base di un'immagine satellitare ad alta risoluzione SPOT-6, acquisita il 29 luglio 2018. Una seconda fase ha riguardato il pre-processing dei dati satellitari multispettrale Sentinel-2 (S2) e dei dati agro-meteorologici di rianalisi ERA5. Per le applicazioni di osservazione della terra basate sull'approccio multi-temporale è indispensabile una calibrazione dei dati satellitari in riflettanza superficiale. Per i dati S2 la correzione atmosferica è stata condotta mediante il processore Sen2Cor (versione 2.5.5) che ha consentito la conversione del prodotto di livello 1C (TOA-Top of Atmosphere reflectance) nel prodotto di livello 2A (BoA - Bottom of Atmosphere

reflectance). L'individuazione delle aree irrigate è stata eseguita mediante segmentazione della mappa del grado di umidità del sistema suolo-vegetazione, derivata dall'applicazione del modello OPTRAM a dati S2, acquisiti nel periodo luglio-agosto, periodo in cui nell'area di studio le piogge totali erano pari a zero, ovvero le condizioni di umidità del sistema suolo-vegetazione erano influenzate dalle sole irrigazioni. La verifica delle prenotazioni irrigue è stata condotta intersecando l'insieme di tutte le particelle catastali prive di domanda irrigua con la mappa delle aree irrigate, derivata da dati S2, ed individuando le domande irrigue conformi e non conformi rispetto alle procedure consortili di prenotazioni irrigua. Il monitoraggio del prelievo difforme della risorsa idrica rispetto all'assegnazione consente di evidenziare i prelievi eccedenti il volume idrico prenotato, basato sul numero di ore di prenotazione e riguarda sia le particelle catastali con domanda irrigua non conforme che le particelle catastali con domanda. A tale scopo si è resa necessaria una calibrazione del modello di calcolo dei fabbisogni irrigui, stimati mediante procedura *irrisat*®. Dalle mappe di indice di area fogliare (*leaf area index*, LAI) e di albedo, derivate dai dati S2, combinate con dati agrometeorologici (ERA5) sono state ottenute mappe di evapotraspirazione potenziale (ET_p) da cui, al netto delle precipitazioni ridotte (P_n) mediante la copertura fogliare, è stato stimato il fabbisogno irriguo delle colture. I parametri colturali, quali altezza della coltura (h_c) e la resistenza stomatica (r_c), sono state derivate mediante inversione numerica dopo aver confrontato i volumi irrigui stimati da satellite e i volumi irrigui misurati su alcune particelle "pilota" (n° 3 ad oliveto e n° 5 a vigneto) mediante contatori, opportunamente collocati dai tecnici del Consorzio. Per le particelle catastali con domanda non conforme - risultando irrigate, ma prive di domanda irrigua e quindi privi di assegnazione in termini di volume di adacquamento - il prelievo difforme è stato valutato pari al fabbisogno irriguo calibrato, richiesto dalle colture irrigate illecitamente. Per le particelle catastali con domanda conforme, il prelievo difforme rispetto all'assegnazione è stato valutato considerando le sole classi di maggiore umidità della mappa del grado di umidità del sistema suolo-vegetazione in quanto indicative di un prelievo in surplus rispetto all'assegnazione. Il caso di studio analizzato hanno messo in evidenza l'efficacia nell'utilizzo di tecniche di osservazione della terra (OT) nell'individuazione dei volumi irrigui e delle aree irrigate. Queste informazioni, di fondamentale importanza per una corretta gestione delle risorse idriche, offre indiscutibili vantaggi rispetto alle tradizionali ispezioni di campo, consentendo alle amministrazioni dei Consorzi di recuperare risorse economiche dalle mancate esazioni. Oltre alla evidente maggiore economicità rispetto alle ispezioni in campo, i dati OT insieme all'utilizzo di tecniche GIS consentono di velocizzare le operazioni di verifica delle domande di fornitura di acqua a uso irriguo, delle istanze di riesame, oltre all'eventuale applicazione del ruolo irriguo anche nelle aziende prive di misuratori. Infine, si rende possibile un controllo della qualità dei dati di lettura e di eventuali malfunzionamenti dei misuratori.

1 Introduzione

L'individuazione ed il monitoraggio delle irrigazioni e del prelievo non autorizzato di acqua a scopo irriguo risulta ancora un'attività impegnativa per gli enti gestori delle

risorse idriche. La qualificazione dell'irrigazione come "non autorizzata" implica l'accesso a un database dei diritti al prelievo d'acqua dei singoli utenti e di informazioni indipendenti e georiferite per verificare, attraverso il controllo incrociato, la loro conformità. Di solito il monitoraggio e l'individuazione delle aree irrigate viene effettuato mediante ispezioni in loco e/o registrazioni del contatore dell'acqua, quando disponibili. In assenza di misuratori o in caso di malfunzionamenti, i volumi irrigui sono stimati indirettamente sulla base delle colture dichiarate dagli agricoltori all'inizio della stagione irrigua e di una tabella del fabbisogno irriguo medio per coltura. In genere si distinguono due tipi di "non conformità": l'irrigazione avviene senza autorizzazione oppure, in presenza di autorizzazione il consumo di acqua a scopo irriguo supera il volume consentito. In tale ambito i dati di Osservazione della Terra (OT) offrono un valido strumento di supporto in quanto dalle variazioni stagionali di parametri biofisici (es. Indice di aria fogliare, LAI) o di indici di vegetazione (es. *Normalized Difference Vegetation Index*, NDVI), consentono di stimare le aree potenzialmente irrigate ed il relativo fabbisogno irriguo. L'individuazione delle aree irrigate richiede un'analisi multi-temporale di dati di OT e si basa sul presupposto che in ambienti aridi e semi aridi, come le aree Mediterranee, l'andamento della crescita vegetativa è compatibile solo con l'irrigazione. La metodologia descritta beneficia di migliorate funzionalità operata in termini di risoluzione spettrale, spaziale e temporale dalla nuova costellazione di satelliti Sentinel-2 (S2).

2 Area di studio

Le aree oggetto di studio riguardano i distretti irrigui del Consorzio di Bonifica 1 Trapani, il cui territorio irrigabile si estende per circa di 21 mila ettari, caratterizzati da particelle colturali con dimensione media di 2 ettari, destinate principalmente a vigneto ed oliveto. Nel 2019, il Consorzio ha istituito un sistema di informazioni geografiche in supporto alla gestione dell'irrigazione. Il sistema, realizzato dallo Spin Off Accademico della Federico II Ariespace srl, consultabile e aggiornato via web, consente al Consorzio di integrare le informazioni relative alle aree irrigate (limiti catastali e dei distretti irrigui, reti di distribuzione) con dati forniti dagli agricoltori sulle colture presenti, il metodo irriguo, etc.

2.1 Ridefinizione dei limiti comprensoriali

Prima di eseguire la ridefinizione dei limiti comprensoriali è stata eseguita la georeferenziazione delle particelle catastali fornite dal Consorzio con un errore di posizionamento (medio stimato su punti random) di circa 1.5 m, rispetto al dato dell'Agenzia delle Entrate (AdE). La georeferenziazione delle particelle catastali è importante a fini di una precisa estrazione per suddetto strato informativo delle informazioni derivanti dai prodotti satellitari (georeferito). Il risultato di tale operazione è mostrato in figura 1.



Fig. 1. Georeferenziazione del dato catastale: dato dell'AdE (pannello A); dato georeferenziato (linea in verde), sovrapposto al dato dell'AdE (pannello B); dato prima della georeferenziazione (linea in rosso), sovrapposto al dato dell'AdE (pannello C).

Successivamente, con il supporto di informazioni in formato tabellare e in formato pdf fornite dai tecnici del Consorzio, si è proceduto ad una ridefinizione dei limiti comprensoriali. Una prima operazione ha riguardato la localizzazione di particelle catastali, appartenenti al catasto irriguo: a partire da un totale di 38 743 particelle fornite dal Consorzio in formato tabellare, è stata riscontrata una corrispondenza geografica con 20 345 particelle catastali (formato ESRI shapefile). Tale localizzazione ha permesso l'inclusione di nuove aree all'interno dei comprensori irrigui del Consorzio di Bonifica.

Successivamente, l'insieme dei distretti è stato sottoposto ad un'operazione di georeferenziazione, mediante fotointerpretazione di immagini ad altissima risoluzione spaziale, fornite da BING. Infine, sulla base dei limiti dei Comprensori presenti nel piano di classifica si è proceduto ad una accurata ridefinizione dei limiti dei comprensori, così come riportato in figura 2.

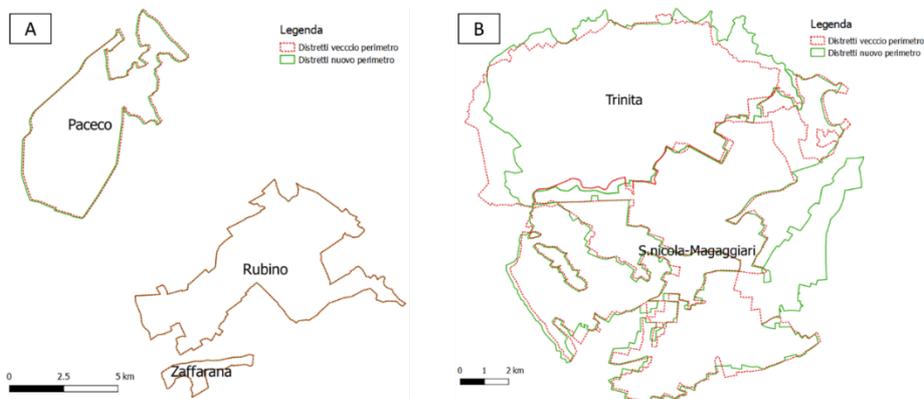


Fig. 2. Distretti irrigui del Consorzio di Bonifica 1 Trapani: nel pannello A sono riportati i distretti afferenti all'area nord (distretti di Paceco, Rubino e Zaffarana); nel pannello B sono riportati i distretti afferenti all'area sud (distretti di Trinità e San Nicola Magaggiari). In rosso ed in verde sono riportati i limiti dei distretti rispettivamente prima e dopo la georeferenziazione e la ri-perimetrazione.

Tabella 1. Distretti irrigui d'interesse, afferenti al Consorzio di Bonifica 1 Trapani, e riportati in figura 3: la superficie in ettari è riferita ai nuovi limiti ridefiniti nel corso del progetto.

Distretto	Superficie da elaborazione satellitare (ettari)
Paceco	3 107
Zaffarana	279
Rubino	3 743
S.Nicola-Magaggiari	7 356
Trinita	6 414
Totale	20899



Fig. 3. Distretti irrigui del Consorzio di Bonifica 1 Trapani. Sono riportati i distretti afferenti all'area nord (distretti di Paceco, Rubino e Zaffarana) ed i distretti afferenti all'area sud (distretti di Trinità e San Nicola Magaggiari).

2.2 Mappa di uso del suolo

Una delle attività più cospicua e impegnativa, ha riguardato la digitalizzazione delle parcelle per le diverse colture presenti nei distretti irrigui di S.Nicola Magaggiari-Trinità, Paceco, Rubino e Zaffarana. La digitalizzazione è avvenuta mediante fotointerpretazione del dato satellitare ad alta risoluzione SPOT-6, acquisto il 29 luglio 2018, relativamente ai distretti di S.Nicola Magaggiari-Trinità e mediante ed acquisto

il 30 luglio 2019 per i distretti di Paceco, Rubino e Zaffarana. Complessivamente sono stati digitalizzati 13 461 parcelle, per un'estensione complessiva di 19 020.91 ettari, come riportato in Tabella 2 e Figura 4.

Tabella 2. Tipologia di coltura ed estensione per le parcelle digitalizzate nei diversi comuni ricadenti nei distretti di S.Nicola Magaggiari-Trinità, Paceco, Rubino e Zaffarana.

Comune	Uso del suolo	Estensione (ha)
Campobello di Mazara	Altro	210.14
	Oliveto	1937.51
	Seminativi	13.95
	Serra	15.04
	Suolo nudo	1247.6
	Vigneto	316.7
	Altro	42.28
Castelvetrano	Oliveto	422.13
	Seminativi	5.15
	Serra	0.32
	Suolo nudo	256.63
	Vigneto	37.89
Mazara del Vallo	Altro	279.67
	Oliveto	1017.69
	Seminativi	19.66
	Serra	13.25
	Suolo nudo	3344.93
	Vigneto	3568.44
Paceco	Altro	130.64
	Oliveto	1285.66
	Suolo nudo	587.16
Rubino	Vigneto	609.93
	Altro	49.63
	Oliveto	83.09
Zaffarana	Suolo nudo	1277.91
	Vigneto	1996.14
	Oliveto	1.74
Totale	Suolo nudo	94.09
	Vigneto	155.94
Totale		19020.91

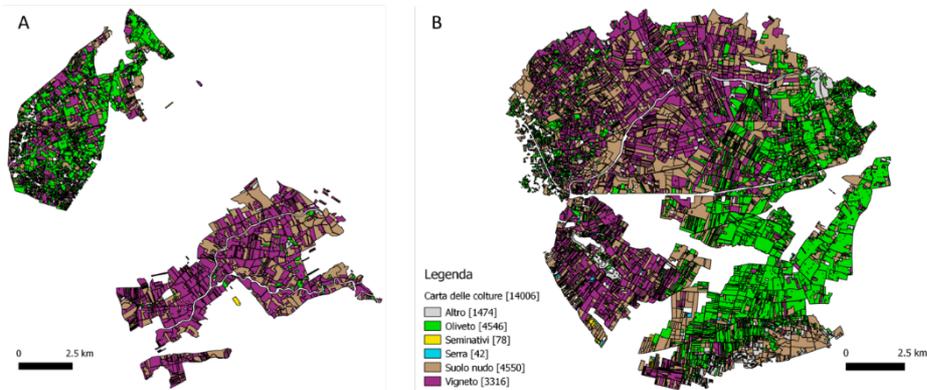


Fig. 4. Carta delle colture per i distretti irrigui del Consorzio di Bonifica 1 Trapani: nel pannello A sono riportate le colture presenti nei distretti afferenti all'area nord (distretti di Paceco, Rubino e Zaffarana); nel pannello B sono riportate le colture presenti nei distretti afferenti all'area sud (distretti di Trinità e San Nicola Magaggiari). Nella legenda sono riportate, per ciascuna classe culturale, il numero di particelle digitalizzate per l'insieme dei distretti (area nord ed area sud).

3 Materiali e metodi

3.1 Dati satellitari

Lanciato il 23 giugno 2015 da Vega da Kourou (Guiana francese), il satellite Sentinel-2A (S2A) è posizionato a un'altitudine di 786 km, la sua orbita, sincronizzata al sole, ha un'inclinazione di $98,62^\circ$ [1]. La frequenza di rivisitazione di S2A è di 10 giorni, ma con il Sentinel-2B (S2B), lanciato il 7 marzo 2017, raggiunge i cinque giorni. Il sensore multispettrale (MSI) a bordo della piattaforma Sentinel-2, con una *swath* di 290 km, permette di acquisire in 13 bande spettrali (443-2190 nm), con una risoluzione radiometrica di 12 bit e una risoluzione spaziale di 10 m, 20 e 60 m (Tabella 3) [2]. Considerando queste caratteristiche tecniche, gli strumenti S2 consentono di sviluppare un'ampia gamma di studi e applicazioni del territorio come agricoltura, foreste, cambiamenti nell'uso del suolo, cambio di copertura del suolo e così via, e offrono continuità alle missioni SPOT e Landsat [3]. Per gli anni 2019 e 2020 sono state processate, compatibilmente con la disponibilità di immagini con bassa copertura nuvolosa (inferiore al 20%), le acquisizioni Sentinel-2 da gennaio a dicembre.

Tabella 3. Dati S2A/B: lunghezza d'onda del centro di banda, ampiezza di banda e risoluzione spaziale per le 13 bande spettrali dell'MSI.

Banda (n°)	Risoluzione spaziale (m)	S2A		S2B		
		Centro di banda (nm)	Ampiezza di banda (nm)	Centro di banda (nm)	Ampiezza di banda (nm)	
1	60	443.9		27	442.3	45
2	10	496.6		98	492.1	98
3	10	560		45	559	46
4	10	664.5		38	665	39
5	20	703.9		19	703.8	20
6	20	740.2		18	739.1	18
7	20	782.5		28	779.7	28
8	10	835.1		145	833	133
8a	20	864.8		33	864	32
9	60	945		26	943.2	27
10	60	1373.5		75	1376.9	76
11	20	1613.7		143	1610.4	141
12	20	2202.4		242	2185.7	238

3.2 Correzione atmosferica

Per le applicazioni che prendono in conto dati OT e basate sull'approccio multi-temporale (es. *change detection*, fenologia della superficie terrestre, classificazione della copertura del suolo, ecc.) la correzione atmosferica è uno dei passaggi più importanti. L'obiettivo è convertire i dati digitali originali, generalmente *digital number* (DN), nelle grandezze fisiche specifiche [4]. In altre parole per ciascun dato di input considerato è richiesta la riflettanza superficiale. Le correzioni atmosferiche e topografiche possono essere applicate alle immagini satellitari al fine di normalizzare i valori di radianza [5]. La correzione atmosferica mira a determinare i veri valori di riflettanza superficiale, rimuovendo gli effetti atmosferici risultanti dalla diffusione e dall'assorbimento della radiazione elettromagnetica da parte di gas e aerosol nel passaggio attraverso l'atmosfera prima di raggiungere il sensore satellitare [6]. Precedenti studi hanno dimostrato che la correzione atmosferica è una delle correzioni più importanti, specialmente quando si lavora con più scene a diverse scale temporali [7], [8]. La correzione topografica è il processo di riduzione della variazione dei valori dell'immagine risultante dalle differenze nell'illuminazione della superficie terrestre e dalle ombre proiettate durante l'acquisizione satellitare [8]; questi effetti sono

particolarmente comuni nelle aree accidentate o montuose. Gli studi hanno riportato vari effetti della correzione topografica. Ad esempio, [8] hanno riportato che la correzione topografica ha migliorato l'accuratezza della classificazione dal 78 all'89% nelle aree montuose, mentre altri studi hanno mostrato che la correzione topografica potrebbe non migliorare significativamente l'accuratezza nelle routine di classificazione della copertura del suolo [9], [10], [11], [12]. In questa applicazione, i dati corretti atmosfericamente sono derivati dalla conversione delle immagini S2 dal Level-1C (L1C) (*ToA-Top of Atmosphere reflectance*) in prodotti Level-2A (L2A) (*BoA – Bottom of Atmosphere reflectance*), eseguita utilizzando il processore Sen2Cor [13]. Sen2Cor è implementato dall'ESA come plug-in di terze parti per Sentinel-2 toolbox e può essere eseguito in ESA Sentinel Application Platform (SNAP) [14] o direttamente dalla riga di comando. Da tale processo sono inoltre disponibili altri livelli di output come *Scene Classification (SCL)*, *Aerosol Optical Thickness (AOT)*, *Water Vapor (WV)* e diversi indicatori di qualità (QI) [15].

3.3 Smoothing e gap filling

Al fine di garantire una significativa riduzione del rumore e di artefatti derivanti da nuvole non rilevate e condizioni atmosferiche sfavorevoli, i parametri biofisici LAI ed albedo sono stati sottoposti a un processo di *smoothing e gap-filling*. I calcoli sono stati eseguiti utilizzando la funzione *Whittaker smoother (WS)* [16], disponibile nel pacchetto MODIS [17] nell'ambiente R [18]. Il processo di filtraggio con WS implica l'impostazione di alcuni parametri: numero di iterazioni, fissato a 1 (corrispondente a 2 cicli in esecuzione); lambda (parametro di *smoothing*), impostato su 2; numero di giorni, inteso come intervallo temporale di salvataggio dei dati di output (filtrati), è stato fissato pari al valore dei dati di input. Dopo il processo di filtraggio è stato applicato uno *shape constraint*, basato su un'analisi statistica della serie di input non filtrate, con l'obiettivo di minimizzare gli effetti di bordo. Il prodotto finale di questa fase è una serie di LAI ed albedo multi-temporale filtrata (senza nuvole), a cui è stata applicata una interpolazione lineare. A titolo di esempio i risultati dello *smoothing* e del *gap-filling* a scala di punto (id=27) sono riportati nelle figure 5 e 6 mentre il risultato dell'interpolazione lineare è riportato nelle figure 7 ed 8.

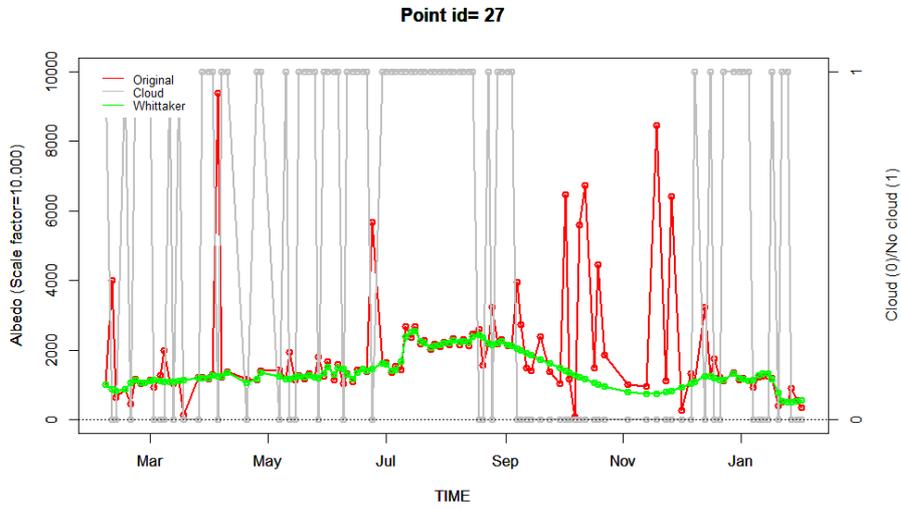


Fig. 5. Smoothing e gap-filling per il parametro biofisico albedo (r).

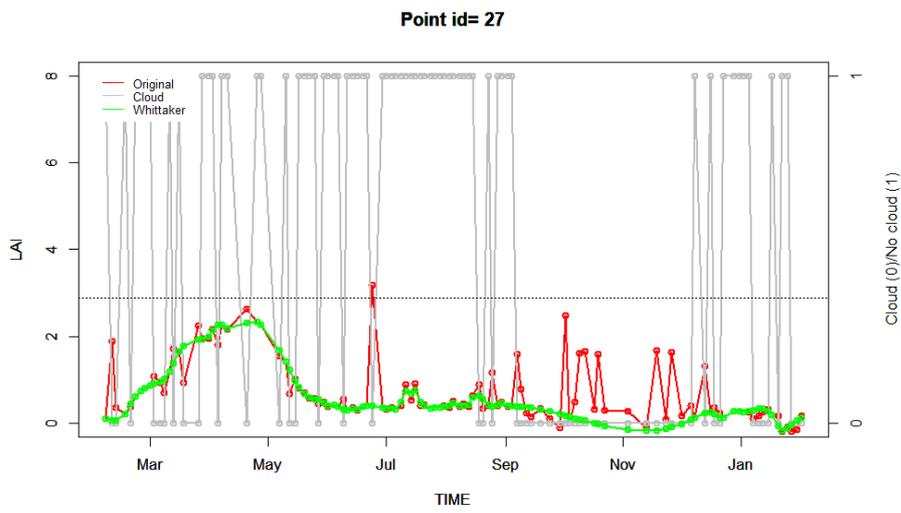


Fig. 6. Smoothing e gap-filling per il parametro biofisico LAI.

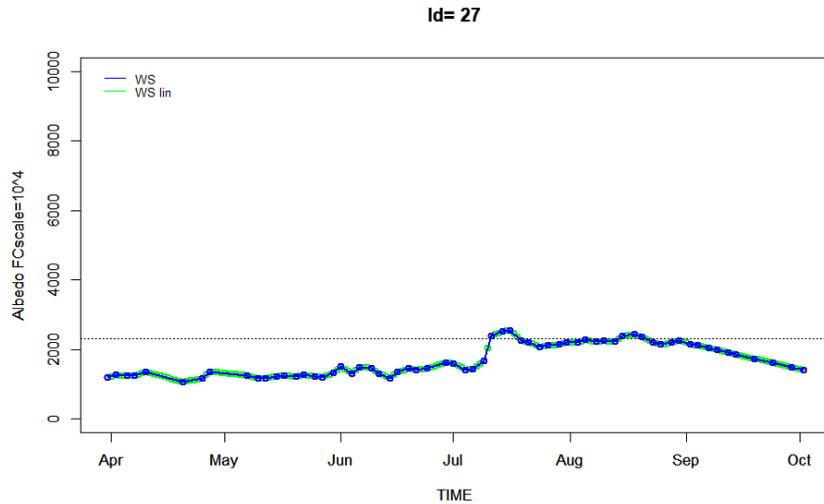


Fig. 7. Interpolazione lineare per il parametro biofisico albedo (r).

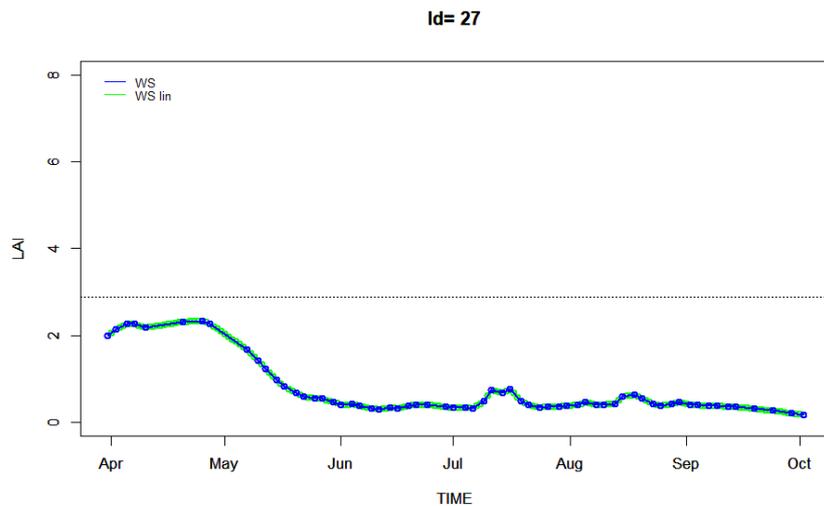


Fig. 8. Interpolazione lineare per il parametro biofisico LAI.

3.4 Modello OPTRAM

La significativa correlazione tra risposta spettrale nel dominio dell'infrarosso ad onde corte e il contenuto idrico nel suolo è stata documentata di recente in [19] nel quale è stato proposto un approccio per valutare lo stato idrico del sistema suolo-vegetazione, basato sulla relazione esistente tra NDVI e l'indice STR, "*SWIR transformed reflectance*" [20]. Per seguire nel tempo, pixel per pixel, lo sviluppo delle colture attraverso un indice che ne misuri il vigore, per ciascuna acquisizione Sentinel-2 è stato

derivato l'indice di vegetazione NDVI (*Normalized Differential Vegetation Index*), come definito da [21], mediante l'equazione a seguire:

$$NDVI = \frac{(NIR - RED)}{(NIR + RED)} \quad (1)$$

Per il dato Satellite Sentinel-2 è stata selezionata la banda del rosso (B04) (0,650 μm - 0,680 μm) e del vicino infrarosso (B08) (0,785 μm - 0,899 μm).

L'NDVI rappresenta la quantità di biomassa verde che varia in risposta ai cambiamenti nelle condizioni della vegetazione. Maggiore è il suo valore, maggiore è la quantità di biomassa (vegetazione) attiva.

L'indice STR è la riflettanza trasformata da SWIR (infrarosso ad onde corte) - banda sensibile al contenuto di acqua nel sistema suolo-vegetazione - ed è espresso come segue:

$$STR = \frac{(1 - \rho_{SWIR})^2}{2 \rho_{SWIR}} \quad (2)$$

dove ρ_{SWIR} è la riflettanza, corretta atmosfericamente, rilevata dalla banda12 Sentinel-2. All'aumentare del contenuto di acqua nel sistema suolo-vegetazione, diminuisce la riflettanza nel dominio dell'infrarosso ad onde corte (SWIR) e quindi aumenta il valore dell'indice STR. Lo scatter plot NDVI-STR per una data immagine (o insieme di immagini per la stessa area) è confinata da due bordi corrispondenti alle condizioni del sistema suolo-vegetazione molto umido (wet-edge) e molto secco (dry-edge), come riportato nella figura a seguire.

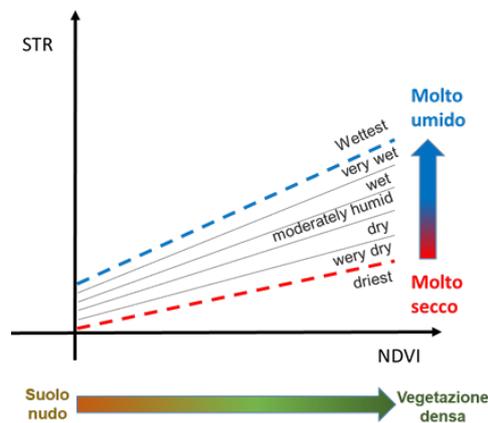


Fig. 9. Spazio NDVI-STR del modello OPTRAM.

I confini di questo dominio sono definiti tracciando i valori dei pixel di NDVI e STR per diverse date (cioè diverse condizioni climatiche e di stato del complesso suolo-vegetazione) sulla stessa area. Si possono quindi determinare la pendenza e le intercette per le rette dry edge (s_d, i_d) e wet edge (s_w, i_w) e definire i due limiti nel dominio (STR, NDVI) mediante le seguenti equazioni:

$$STR_d = i_d + s_d NDVI \quad (3)$$

$$STR_w = i_w + s_w NDVI \quad (4)$$

$$W = \frac{STR - STR_d}{STR_w - STR_d} \quad (5)$$

È stato dimostrato che l'indice w , essendo un *proxy* del grado di saturazione dell'acqua nel suolo, è fortemente correlato al contenuto di acqua misurato nel suolo ($R^2 > 0.8$), specialmente quando si utilizza la banda 12 di Sentinel-2 [20].

3.5 Dati agrometeorologici

Al fine di utilizzare un dato spazializzato e coerente nel tempo, difficilmente reperibile dal dato di stazione, per lo studio in oggetto è stato utilizzato il dato di ri-analisi ERA5 *hourly estimates of variables on single levels*. ERA5 è la rianalisi atmosferica ECMWF del clima globale di quinta generazione. La rianalisi combina, utilizzando le leggi della fisica, i dati di modello con le osservazioni globali in un set di dati completo e coerente a livello globale. Questo principio, chiamato assimilazione dei dati, è il metodo utilizzato dai centri di previsione meteorologica numerica, dove con un certo intervallo temporale (ogni 12 ore all'ECMWF) una previsione precedente viene combinata in modo ottimale con le nuove osservazioni disponibili per produrre una nuova migliore stima dello stato dell'atmosfera, chiamato analisi, da cui viene emessa una previsione aggiornata e migliorata.

L'utilizzo dei dati di ri-analisi ERA5, forniti da ECMWF, è da preferirsi ai dati di stazione soprattutto in analisi di precisione come per lo studio in oggetto. Infatti, i dati puntuali di stazione non sempre sono acquisiti secondo lo standard WMO [23] e spesso sono affetti da assenza di dati, causati da fuori servizio delle stazioni agrometeorologiche. Inoltre, la spazializzazione dei dati agrometeorologici a scala giornaliera risulta poco affidabile se eseguita solo su base geostatistica, senza l'utilizzo quindi di un modello di circolazione atmosferica. Infine, la bontà dei dati da modello in

luogo dei dati di stazione, è stata dimostrata in diversi studi condotti a livello territoriale regionale [22].

A titolo dimostrativo della qualità dei dati utilizzati, si riportano nelle figure seguenti, alcune comparazioni a scala giornaliera per un intervallo di 2 anni (2017-2018) tra dati da modello (ERA5 *hourly estimates of variables on single levels*) e dati acquisiti dalla stazione agrometeorologica SIAS di Mazara del Vallo che acquisisce dati con standard WMO.

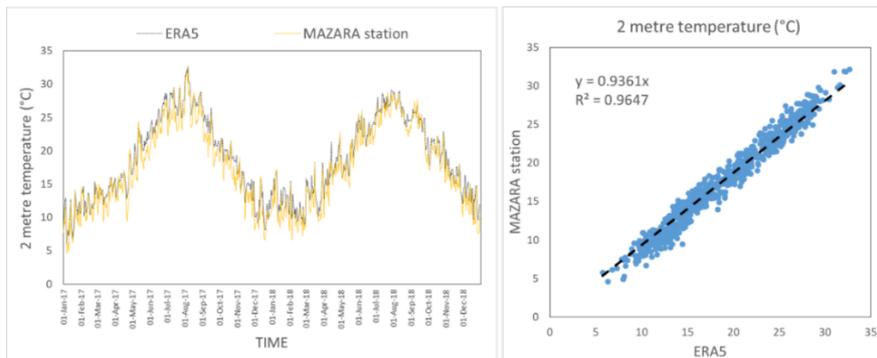


Fig. 10. Confronto a scala di punto tra dato da modello (ECMWF-ERA5 hourly estimates of variables on single levels) e dato misurato (stazione agrometeorologica SIAS di Mazara del Vallo) per la grandezza “Temperatura media giornaliera a 2 m dal suolo” nel periodo 2017-2018.

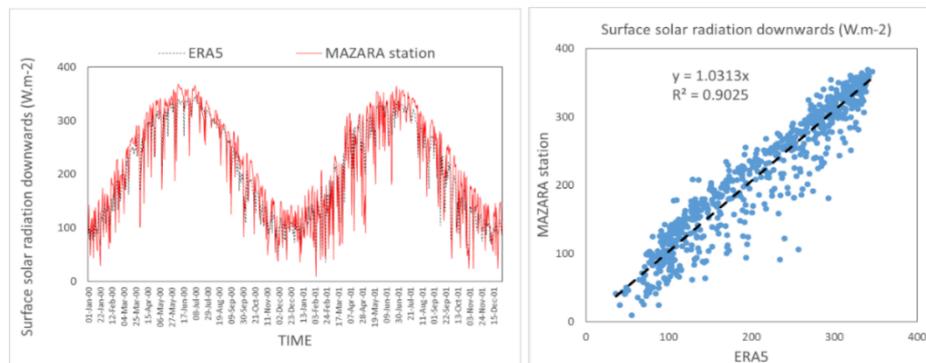


Fig. 11. Confronto a scala di punto tra dato da modello (ECMWF-ERA5 hourly estimates of variables on single levels) e dato misurato (stazione agrometeorologica SIAS di Mazara del Vallo) per la grandezza “Radiazione solare incidente a 2 m dal suolo” nel periodo 2017-2018.

In questo studio, i dati ERA5 sono stati utilizzati per la produzione di mappe raster delle grandezze climatiche necessarie al calcolo dell’evapotraspirazione e delle piogge, derivate a scala giornaliera sulla base di dati con frequenza di 1 ora (UTC). La

risoluzione spaziale dei dati prodotti è di circa 25 km. La tipologia e le caratteristiche delle grandezze agrometeorologiche derivate sono riportate in Tabella 4.

Tabella 4. Grandezze agrometeorologiche, derivate dai dati ERA5, per le stagioni irrigue 2019-2020 (aprile-ottobre) in esame.

Variabile	Unità di misura
Temperatura media a 2 m dal suolo	(°C)
Modulo della velocità del vento a 10 m dal suolo	(m·s ⁻¹)
Umidità relativa a 2 m dal suolo	(%)
Radiazione solare totale incidente a 2 m dal suolo	(W·m ⁻²)
Pressione atmosferica al suolo	(KPa)
Pioggia totale	(mm·giorno ⁻¹)

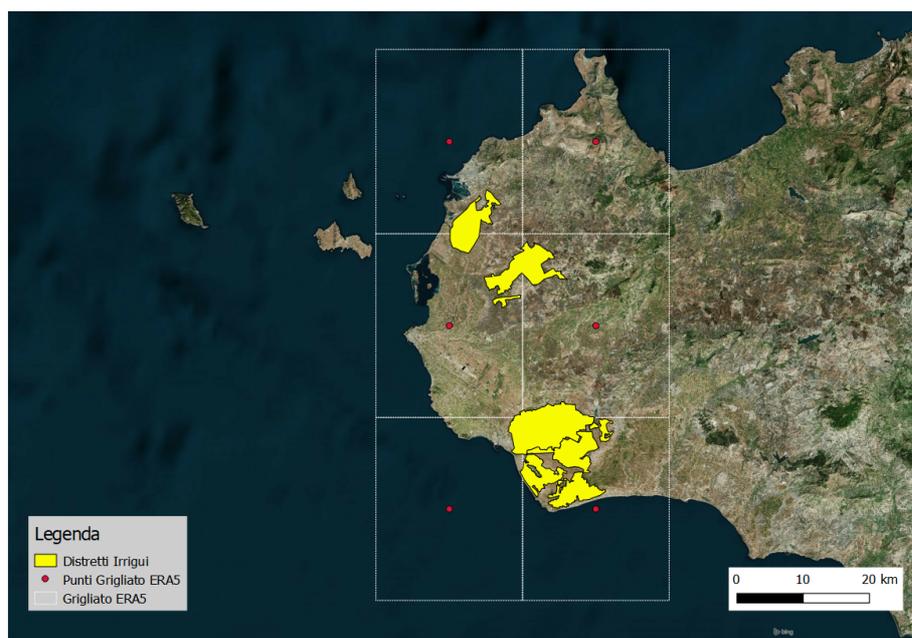


Fig. 12. Grigliato con centroidi (punti in rosso) dei dati agrometeorologici derivati da analisi atmosferica ERA5T (risoluzione spaziale 25 km) dell'ECMWF, rispetto alla dislocazione dei comprensori irrigui oggetto di studio.

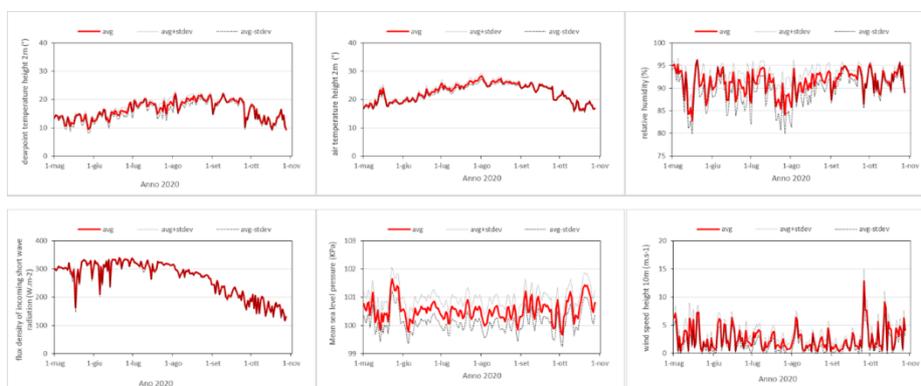


Fig. 13. Dati agrometeorologici: variabilità (valori medi, riportati con linea continua in rosso e deviazioni standard, riportate con linea tratteggiata in grigio) delle principali grandezze utili al calcolo dell'evapotraspirazione potenziale mediante metodologia *irrisat*®. I valori sono estratti in corrispondenza dei punti del grigliato ERA5T, riportati in Figura 12. Si osserva che la maggiore variabilità si ha per le grandezze agrometeorologiche umidità relativa (“*relative humidity*”, %) e pressione atmosferica (“*mean sea level pressure*”, KPa).

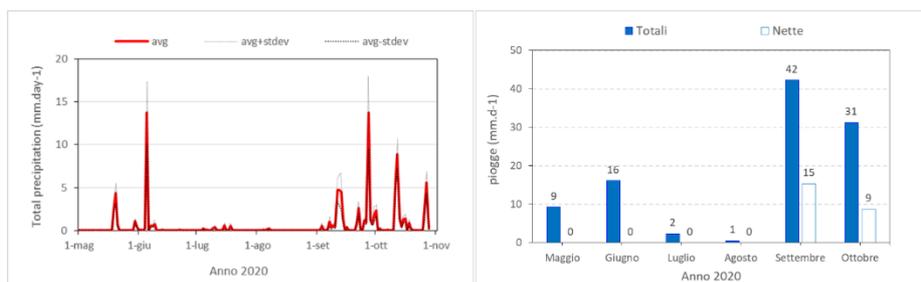


Fig. 14. Dati agrometeorologici: variabilità (valori medi, riportati con linea continua in rosso e deviazioni standard, riportate con linea tratteggiata in grigio) delle grandezze pioggia giornaliera (a destra) e cumulata mensile (totale e netta) utili al calcolo dei fabbisogni irrigui mediante metodologia *irrisat*®, in corrispondenza dei punti del grigliato ERA5T, riportati in figura 12. Si osserva che per i mesi da maggio ad agosto il fabbisogno irriguo coincide con l'evapotraspirazione potenziale, essendo le piogge nette nulle.

3.6 Stima dei volumi irrigui applicati

Attualmente, in un contesto operativo, i volumi irrigui prelevati in agricoltura sono solitamente monitorati: i) Direttamente, attraverso la misura in situ (i.e. flussimetri nel caso di pozzi sotterranei (l'energia elettrica utilizzata per il pompaggio può talvolta essere utilizzata come *proxy*), una serie di contatori in caso di rilascio di acque superficiali da dighe, invasi, reti di canali o singoli dispositivi di pompaggio). ii)

Indirettamente, attraverso la registrazione delle ore di funzionamento e della portata di mandata del canale, nelle aree con canali irrigui. iii) Calcolando un bilancio idrico, tenendo conto dell'accumulo e dell'esaurimento dell'acqua del suolo (ed eventualmente della risalita capillare), dell'evapotraspirazione potenziale delle colture (ET_p) e delle precipitazioni, come indicato dalle procedure standard del documento FAO 56 [24]. Nell'ipotesi che ogni agricoltore prelevi un volume di acqua di irrigazione non inferiore al fabbisogno idrico delle colture, la stima del prelievo di acqua può essere ottenuta calcolando il fabbisogno irriguo netto (Net Irrigation Water Requirement, NIWR) della coltura. In letteratura, NIWR viene definita come l'acqua che deve essere fornita a scopo irriguo per soddisfare l'evapotraspirazione, la lisciviazione e l'approvvigionamento idrico vario che non è fornito dall'acqua immagazzinata nel suolo e dalle precipitazioni che entrano nel suolo [25]. Si esprime in millimetri o in $m^3 \cdot ha^{-1}$ ($1 \text{ mm} = 10 \text{ m}^3 \cdot ha^{-1}$) nel periodo d'interesse. In generale, NIWR può essere calcolato come segue:

$$NIWR = ET_p - P_n \quad (1)$$

dove ET_p è l'evapotraspirazione potenziale della coltura in mm; P_n è la precipitazione netta (mm), in quanto prende in conto l'intercettazione fogliare. L'evapotraspirazione potenziale delle colture in condizioni standard, secondo il documento FAO-56 [24] è stimata combinando variabili meteorologiche osservate, LAI ed albedo derivanti da dati OT, all'interno dell'approccio "one-step", implementato in *irrisat*®, secondo le seguenti equazioni:

$$ET_{p-PM} = \frac{86400}{\lambda} \left[\frac{\Delta(R_n - G) + \rho_a c_p \frac{(e_s - e_a)}{r_a}}{\Delta + \gamma(1 + \frac{r_s}{r_a})} \right] \quad (6)$$

dove λ è il calore latente di vaporizzazione dell'acqua ($2454 \cdot 10^3 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$), R_n è la radiazione netta, G è il flusso di calore del suolo, $(e_s - e_a)$ rappresenta il deficit di tensione di vapore dell'aria, ρ_a ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$) è la densità media dell'aria a pressione costante, c_p ($\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{C}^{-1}$) è il calore specifico dell'aria, Δ rappresenta la pendenza della relazione tra pressione di vapore di saturazione e temperatura, γ è la costante psicrometrica e r_s e r_a sono le resistenze di superficie e aerodinamiche ($\text{s} \cdot \text{m}^{-1}$). Modellando la chioma come una "grande foglia", i parametri della chioma necessari per l'applicazione [26] possono essere recuperati elaborando le immagini multispettrali disponibili: l'indice di area fogliare (LAI), l'altezza colturale (h_c) e l'albedo emisfericamente integrato (r). Il toolbox SNAP fornisce uno strumento scientifico denominato "biophysical processor" per il recupero di LAI da osservazioni S2, utilizzando un approccio di rete neurale artificiale (ANN), addestrato con un insieme rappresentativo a livello globale di simulazioni da modelli di trasferimento radiativo a livello di chioma (PROSAIL: PROSPECT [27] + SAIL [28]). L'algoritmo ANN richiede come input le otto bande

spettrali S2 (B3-B7, B8A, B11 e B12) derivate dal prodotto L2A (tabella 3) e la configurazione geometrica dell'illuminazione e dell'osservazione (cioè gli angoli zenitali e azimutali sia per il sole che per la vista), derivata dalle caratteristiche dell'orbita del satellite e della *swath* [29]. A questi prodotti biofisici SNAP sono allegati ulteriori indicatori di qualità [29]. LAI e h_c sono usati per calcolare le resistenze aerodinamiche e di superficie come segue:

$$r_a = \frac{\ln \left[\frac{2 - 2/3h_c}{0.123h_c} \right] \ln \left[\frac{2 - 2/3h_c}{0.0123h_c} \right]}{(0.41)^2 U} \quad (6)$$

$$r_s = \begin{cases} \frac{200}{LAI} & \forall LAI \leq 4 \\ 50 & \forall LAI > 4 \end{cases} \quad (7)$$

$$r_s = 50 \quad \forall LAI > 4$$

Il parametro albedo è stimato come l'integrazione della riflettanza S2 attraverso lo spettro delle onde corte (Equazione 8) e viene utilizzato per stimare la frazione di radiazione a onde corte in entrata che contribuisce alla radiazione netta R_n

$$r = \sum_{bi} |\rho_{bi} * \omega_{bi}| \quad (8)$$

dove ρ_{bi} è la riflettanza superficiale per le bande bi riferite ai prodotti L2A, ω_{bi} sono i coefficienti che rappresenta la frazione di radiazione solare derivata dallo spettro di irraggiamento solare all'interno dell'intervallo spettrale per le bande bi . I coefficienti per il calcolo dell'albedo sono riassunti in [30]. I valori di P_n sono stati ottenuti riducendo la precipitazione potale (T_p) ($\text{mm} \cdot \text{giorno}^{-1}$), tenendo conto dello sviluppo della chioma descritto utilizzando il LAI e la frazione di copertura vegetale (f_c) calcolati dai dati S2 [31].

$$P_n = T_p - aLAI \left(1 - \frac{1}{1 + \frac{f_c \cdot T_p}{aLAI}} \right) \quad (9)$$

dove T_p ($\text{cm}\cdot\text{giorno}^{-1}$) è la piovosità effettiva e a ($\text{cm}\cdot\text{giorno}^{-1}$) è un parametro empirico che rappresenta la saturazione delle colture per unità di superficie fogliare ($\sim 0,28$ per la maggior parte delle colture). I valori T_p e le altre variabili agrometeorologiche, riportate nell'equazione 9, sono acquisiti dal set di dati di rianalisi ERA5. I parametri colturali altezza della coltura (h_c) e resistenza stomatica (r_c), riportate nelle equazioni 6 e 7, sono state derivate mediante inversione numerica dopo aver confrontato i volumi irrigui stimati da satellite e i volumi irrigui misurati su alcune particelle “pilota”.

3.7 Mappa del grado di umidità del sistema suolo pianta

La mappa del grado di umidità consente di valutare lo stato idrico del sistema suolo-vegetazione, a partire dalla relazione esistente tra gli indici NDVI ed STR. Tale relazione e quindi il prodotto da esso derivato, nell'ambito di ciascuna delle aree di studio (nord e sud) è stata normalizzata rispetto alle tipologie colturali in quanto valutata separatamente per ciascuna classe colturale (vigneto, oliveto, etc.), e normalizzata per gli effetti direzionali in quanto valutata separatamente per le acquisizioni Sentinel-2 derivanti dall'orbita 79 e 122 (*relative orbit*, RO). La mappa del grado di umidità è stata derivata per ciascuna classe colturale, mappata all'interno dei comprensori irrigui, in quanto il grado di umidità del sistema suolo-vegetazione è funzione del management irriguo, differenziato per tipologia colturale. Nell'ambito di ciascuna classe colturale sono state separate le acquisizioni Sentinel-2, in base alle orbite (79 e 122). Infatti l'osservazione di una stessa area da diverse orbite o equivalentemente da diversi angoli di visualizzazione, produce riflettanza diversa e quindi aggiunge rumore indesiderato (o almeno variazioni) alle serie temporali ed ai prodotti da queste derivati.

In figura 15 si osserva come varia la relazione esistente tra NDVI e l'indice STR, su cui si basa la mappa del grado di umidità del sistema suolo-vegetazione, in funzione delle diverse classi colturali (vigneto ed oliveto) e nell'ambito di una stessa orbita di acquisizione Sentinel-2 (RO 79).

In figura 16 si osserva come varia la relazione esistente tra NDVI e l'indice STR, nell'ambito di ciascuna classe colturale (vigneto ed oliveto), al variare dell'orbita di acquisizione (RO 79 e 122) del satellite Sentinel-2. In figura 17 sono riportate le orbite di acquisizione del satellite Sentinel-2 rispetto all'area di studio.

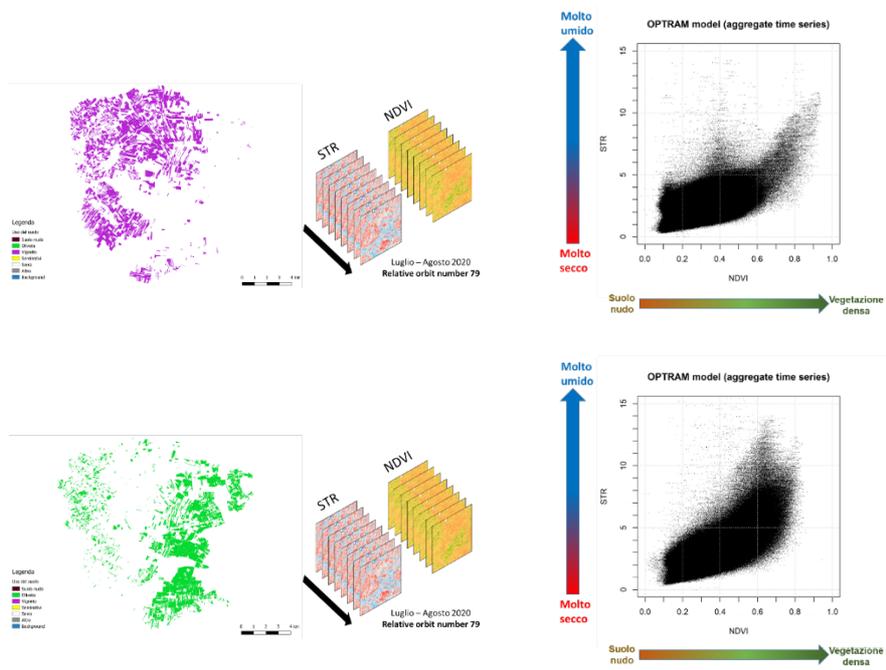


Fig. 15. Relazione esistente tra NDVI e l'indice STR (modello OPTRAM), suddiviso per tipologia colturale, fissata l'orbita (79) di acquisizione Sentinel-2: in alto a sinistra la classe vigneto (in viola) per l'area Sud con serie temporale degli indici (NDVI ed STR), caratterizzanti lo scatter plot OPTRAM (immagine in alto a destra). In basso a sinistra la classe oliveto (in verde) per l'area Sud con serie temporale degli indici (NDVI ed STR), caratterizzanti lo scatter plot OPTRAM (immagine in alto a destra).

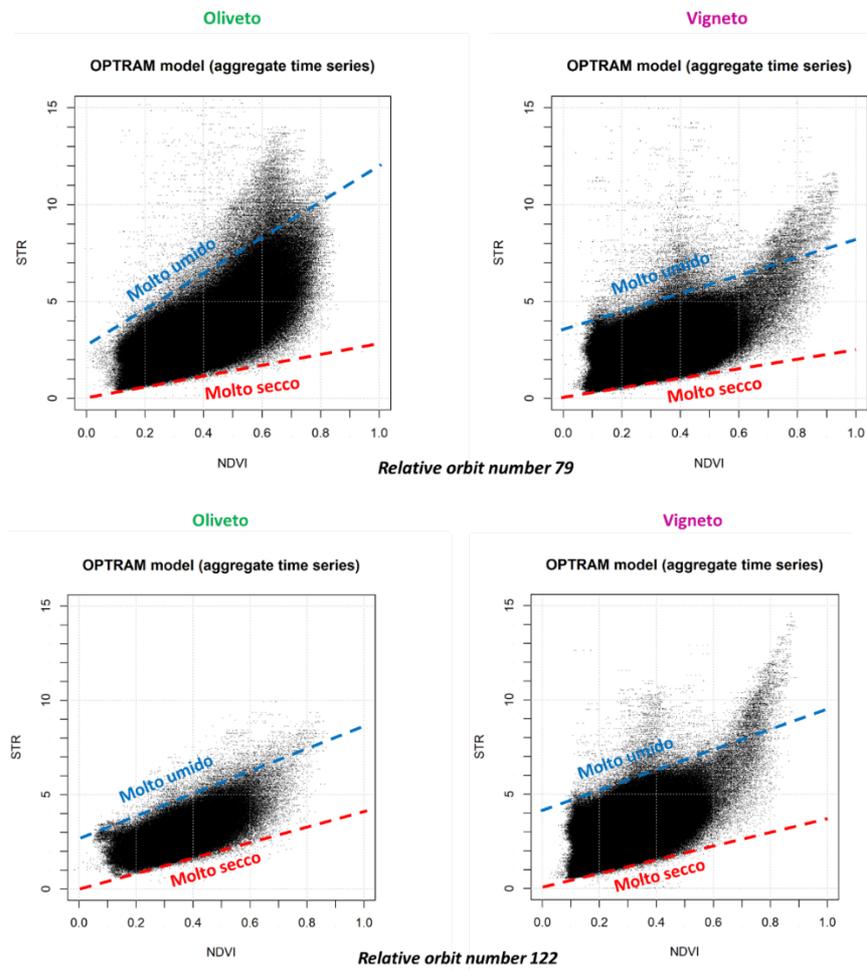


Fig. 16. Scatter plot per la classe oliveto (figure a sinistra) e per la classe vigneto (figure a destra) al variare dell'orbita di acquisizione Sentinel-2 (79, nelle figure il alto e 122, nelle figure in basso).

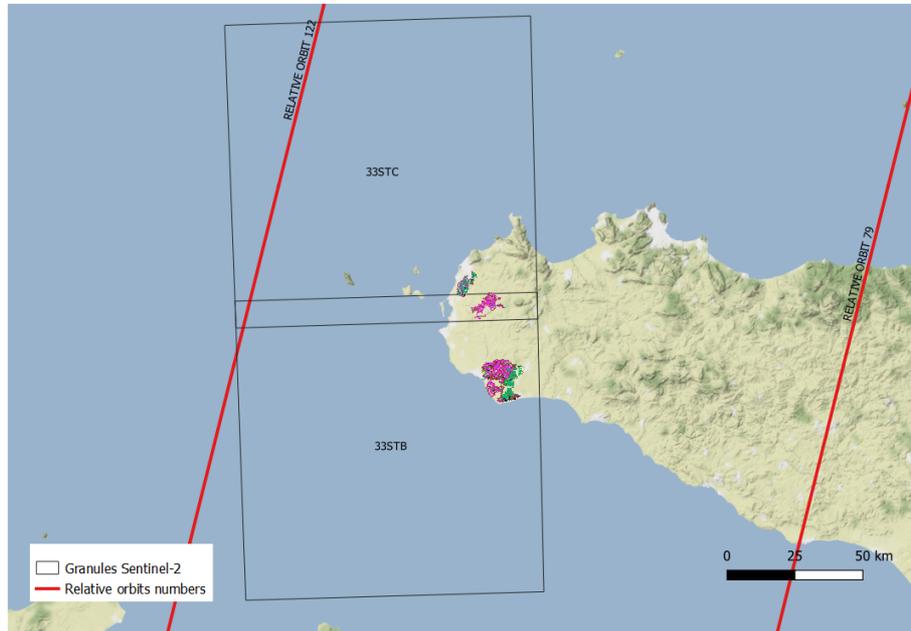


Fig. 17. Granuli ed orbite di acquisizione Sentinel-2 in rapporto all'area di studio, evidenziata dalla mappa delle colture.

La produzione della mappa del grado di umidità del sistema suolo-vegetazione si basa su acquisizioni Sentinel-2 prive di copertura nuvolosa nel periodo in cui vi è assenza di pioggia sull'area di studio, ovvero le condizioni di umidità del sistema suolo-vegetazione sono influenzate dalle sole irrigazioni. L'elenco completo delle acquisizioni è riportato in tabella 5.

Tabella 5. Dati Sentinel-2 acquisiti durante le stagioni irrigue 2019-2020 per la derivazione della mappa del grado di umidità del sistema suolo-vegetazione.

Area Nord	Relative orbit Sentinel-2	Area Sud	Relative orbit Sentinel-2
2019-07-02	79	2019-07-02	79
2019-07-05	122	2019-07-05	122
2019-07-22	79	2019-07-12	79
2019-07-25	122	2019-07-20	122
2019-07-27	79	2019-07-22	79
2019-07-30	122	2019-07-25	122
2019-08-01	79	2019-07-30	122
2019-08-04	122	2019-08-01	79
2019-08-06	79	2019-08-04	122

2019-08-09	122	2019-08-06	79
2019-08-11	79	2019-08-09	122
2019-08-14	122	2019-08-11	79
2019-08-16	79	2019-08-14	122
2019-08-19	122	2019-08-16	79
2020-07-01	79	2019-08-19	122
2020-07-06	79	2019-08-26	79
2020-07-21	79	2020-07-01	79
2020-07-24	122	2020-07-09	122
2020-07-26	79	2020-07-11	79
2020-07-29	122	2020-07-24	122
2020-07-31	79	2020-07-26	79
2020-08-13	122	2020-07-31	79
2020-08-15	79	2020-08-13	122
2020-08-20	79	2020-08-15	79
2020-08-28	122	2020-08-18	122
		2020-08-20	79
		2020-08-23	122

Definiti i limi dello scatter plot del modello OPTRAM (separatamente per tipologia colturale, per area di studio e per orbita di acquisizione Sentinel-2), per ciascuna acquisizione satellitare si è proceduto al calcolo dell'indice w e ad una segmentazione in base ai diversi gradi di umidità, definiti nel piano OPTRAM (NDVI, STR). In figura 18 è riportato un esempio di tale segmentazione.

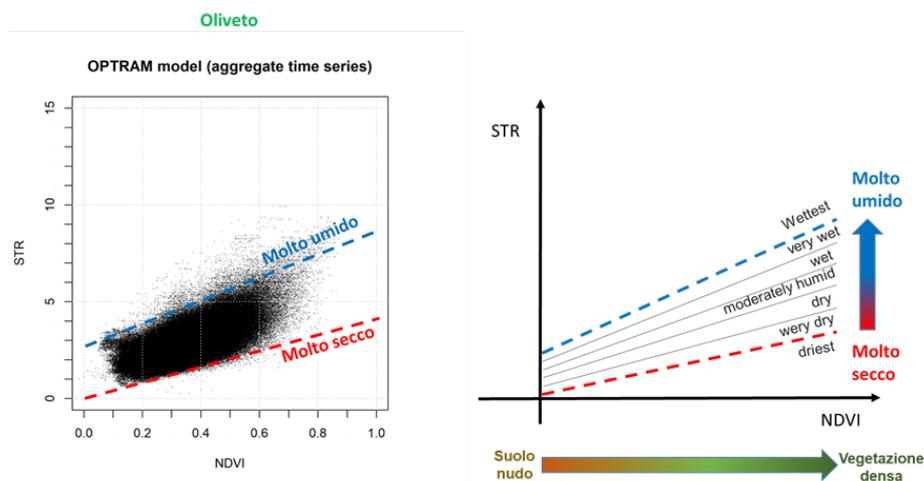


Fig. 18. Piano OPTRAM (NDVI, STR) con limiti (a sinistra) e relativa segmentazione per gradi di umidità del sistema suolo-vegetazione (figura a destra) sulla base dei valori di NDVI ed STR nel piano OPTRAM, per la classe arborea oliveto ed orbita 79 di acquisizione satellitare.

4 Risultati

4.1 Calibrazione dei fabbisogni irrigui per la stagione 2020 (Maggio-Ottobre) per la coltura arborea vigneto

Per il monitoraggio del prelievo difforme della risorsa idrica rispetto all'assegnazione che è tra i principali obiettivi di tale studio, si è resa necessaria una calibrazione del modello di calcolo dei fabbisogni irrigui – condotto mediante procedura *irrisat*[®] - per le colture arboree predominanti (oliveto e vigneto), presenti all'interno del Consorzio di Bonifica. Per tale ragione sono state considerate particelle “pilota” (n° 3 ad oliveto e n° 5 a vigneto), per le quali erano disponibili volumi irrigui applicati, misurati mediante contatori all'uopo collocati le cui misurazioni sono state effettuate dai tecnici del consorzio durante le fasi di irrigazione. Le aree catastali, validate con le aree irrigate stimate da satellite: in figura 19 sono riportati alcuni esempi di area irrigata per le particelle pilota, afferenti alla coltura arborea vigneto.



Fig. 19. Le particelle pilota, utili alla calibrazione del modello di calcolo dei fabbisogni irrigui, condotto mediante procedura *irrisat*®: la perimetrazione in giallo rappresenta l'area effettivamente irrigata, validata con dato satellitare.

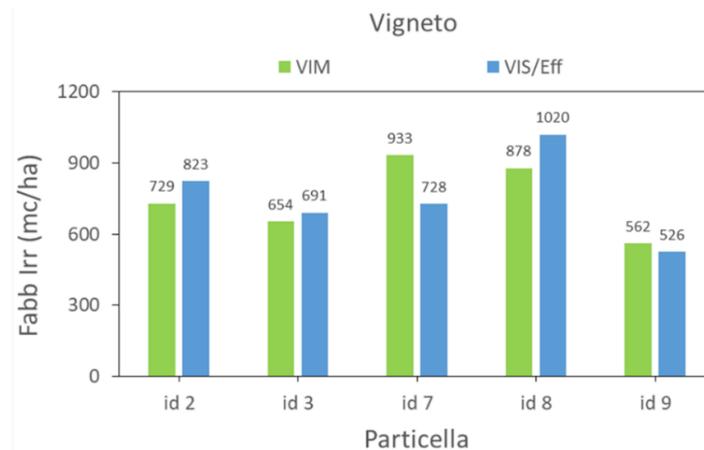


Fig. 20. Risultati della calibrazione dei fabbisogni irrigui per la stagione 2020 (Maggio-Ottobre) per la coltura arborea vigneto. VIS = volumi irrigui stimati da satellite, VIM = volumi irrigui misurati nelle particelle e relative all'area catastale effettivamente irrigata. Eff= efficienza del sistema di distribuzione (posto pari a 0.7, sulla base delle informazioni fornite dai tecnici del Consorzio).

E' stata applicata un'efficienza, funzione del sistema di irrigazione aziendale, in quanto il volume stimato da satellite è un volume al campo; infatti attraverso i dati satellitari è possibile stimare il volume irriguo di cui la coltura necessita, ma tale volume irriguo prima di arrivare alla coltura dovrà passare per un sistema di distribuzione di cui si dovrà considerare l'efficienza.

4.2 Mappa del grado di umidità del sistema suolo pianta per la stagione irrigua 2019-2020.

Sulla base delle singole mappe di contenuto di umidità del sistema suolo-vegetazione, è stata derivata una mappa di sintesi del grado di umidità, per ciascuna

area di studio (nord e sud) per le stagioni irrigue in esame (2019-2020), come mostrato in figura 21.

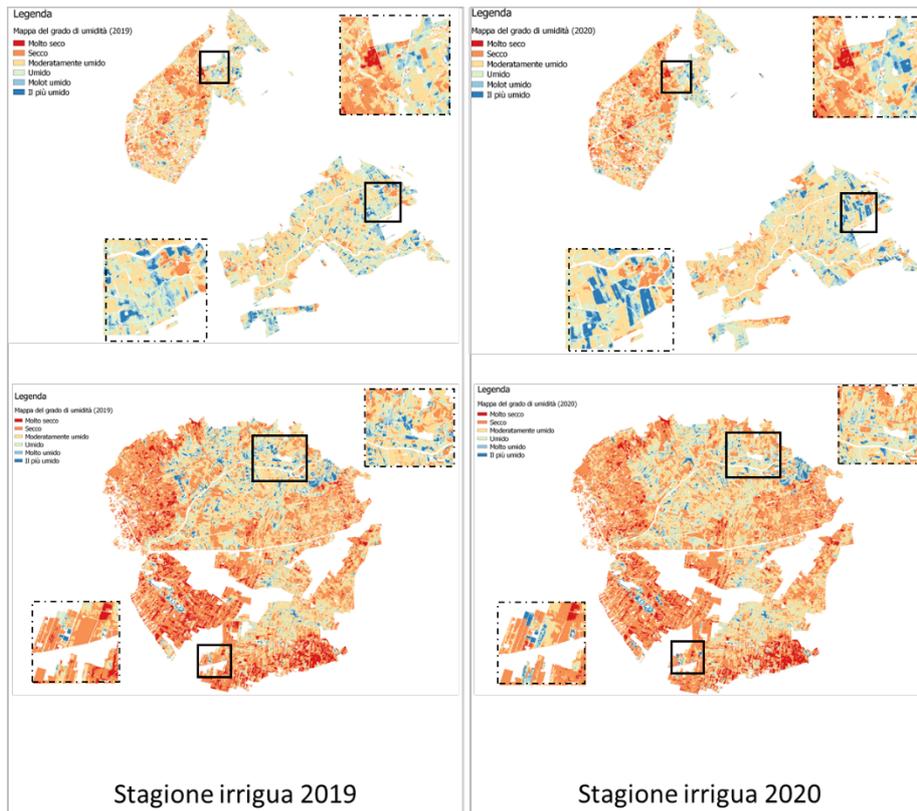


Fig. 21. Mappa del grado di umidità, stimata da satellite mediante segmentazione dello scatter plot OPTRAM per i distretti afferenti all'area nord (distretti di Paceco, Rubino e Zaffarana) e per i distretti afferenti all'area sud (distretti di Trinità e San Nicola Magaggiari) durante le stagioni irrigue 2019 e 2020.

4.3 Aree irrigate per la stagione irrigua 2019-2020.

Le aree irrigate sono state derivate mediante binarizzazione della mappa del grado di umidità, ovvero la classe con grado di umidità “molto secco” è stata definita come non irrigua, le restanti come irrigue. La mappa delle aree irrigate così definita, per i distretti afferenti all'area Nord (distretti di Paceco, Rubino e Zaffarana) e per i distretti afferenti

all'area sud (distretti di Trinità e San Nicola Magaggiari) durante le stagioni irrigue 2019 e 2020, è riportata in figura 22.

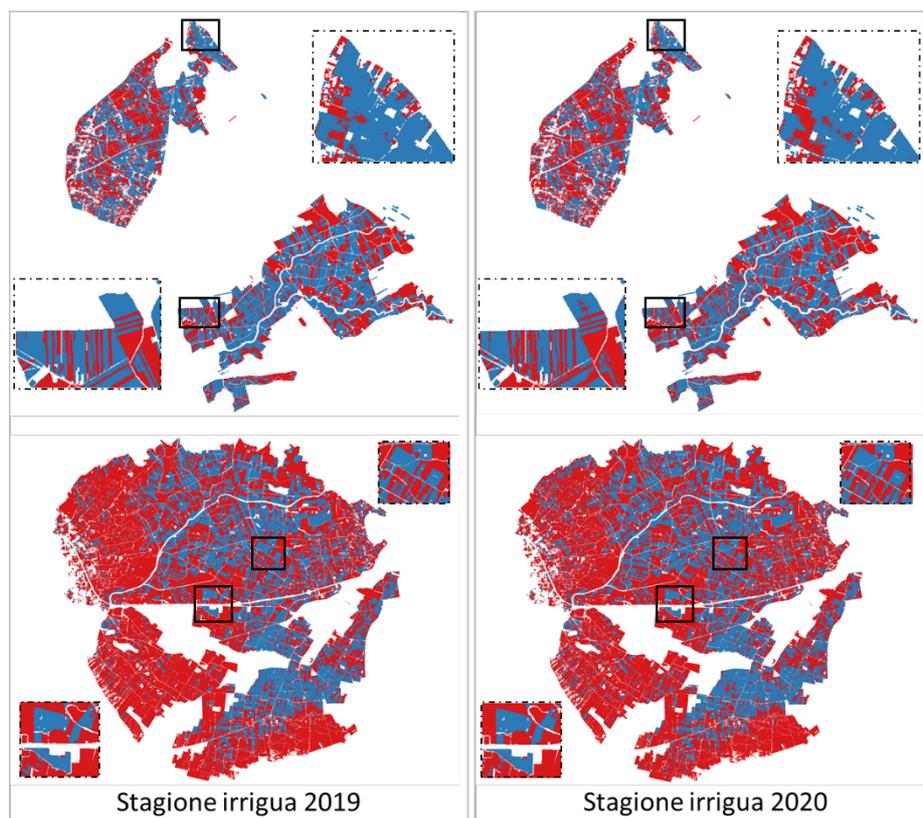


Fig. 22. Mappa delle aree irrigate: aree non irrigate (in rosso) ed aree irrigate In blu per i distretti afferenti all'area Nord (distretti di Paceco, Rubino e Zaffarana) e per i distretti afferenti all'area sud (distretti di Trinità e San Nicola Magaggiari) durante le stagioni irrigue 2019 e 2020.

4.4 Verifica delle prenotazioni irrigue

La verifica delle prenotazioni irrigue è stata condotta per la sola stagione irrigua 2020, per la stagione irrigua 2019 è in corso la riorganizzazione dei dati delle prenotazioni da parte dei tecnici del Consorzio, inoltre a oggi all'interno del Consorzio di Bonifica è stata avviata la stagione irrigua 2021 e quindi è risultato naturale soffermarci su questa stagionalità (2020) più prossima. La verifica delle prenotazioni irrigue si basa sui seguenti prodotti (dati vettoriali e raster):

- Particelle catastali georeferite: si è considerato l'insieme di tutte le particelle catastali (con e senza domanda irrigua), escludendo le particelle catastali con domanda.

- Limite dei distretti irrigui nei quali sono state mappate le classi di copertura del suolo;
- Mappa delle aree irrigate.

In tale analisi ci si è posti in una condizione “conservativa” per la quale una particella catastale è con domanda irrigua non conforme se la sua superficie è irrigata più del 90% o in altre parole se la superficie irrigata stimata da satellite che ricade al suo interno è maggiore del 90% della superficie catastale.

Quindi per la stagione irrigua 2020 sono state individuate le domande irrigue conformi e non conformi rispetto alle procedure consorziali di prenotazioni irrigue ovvero, nell'ambito delle particelle catastali delle ditte che non hanno prodotto alcuna prenotazione 2020, sono state individuate, mediante analisi con dati satellitari, le particelle catastali non irrigate e le particelle catastali irrigate con domanda irrigua non conforme, come riportato in figure 23 e figura 24.

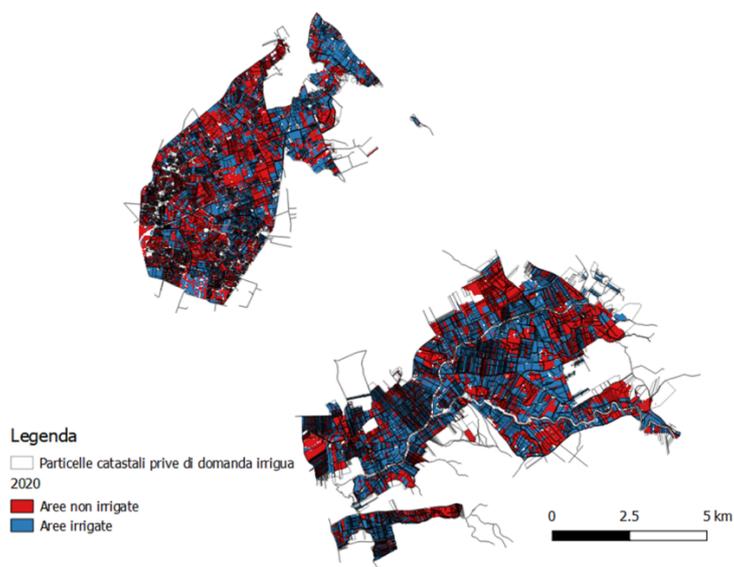


Fig. 23. Area nord: aree irrigate (in blu) e non-irrigate (in rosso), stimate da satellite in un periodo in cui vi è assenza di pioggia (luglio-agosto) per particelle prive di domanda irrigua (reticolo in nero).

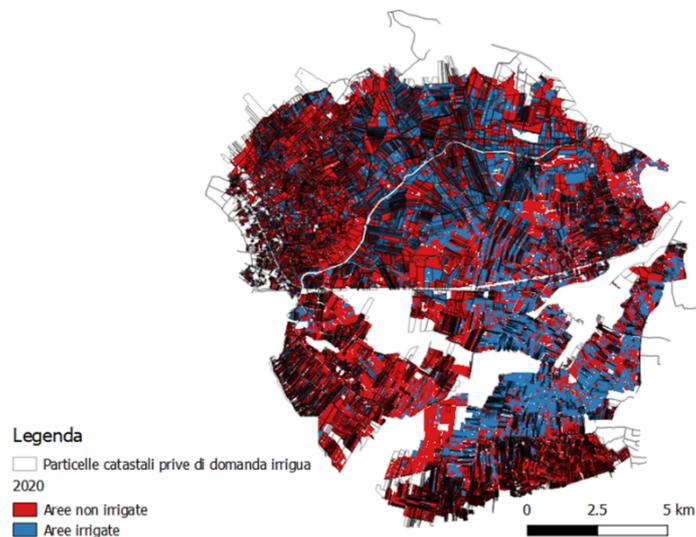


Fig. 24. Area sud: aree irrigate (in blu) e non-irrigate (in rosso), stimate da satellite in un periodo in cui vi è assenza di pioggia (luglio-agosto) per particelle prive di domanda irrigua (reticolo in nero).

Si osserva come il reticolo delle particelle catastali, sovrapposto alla mappa delle aree irrigate, può dar vita ad una molteplicità di scenari ovvero possiamo avere il caso in cui la particella catastale ricada completamente in un'area non irrigata, oppure interamente in un'area irrigata oppure si può verificare il caso in cui la particella catastale ricada in quota parte in entrambe le aree (irrigate e non irrigate). E' facile capire che per stabilire quando una particella catastale è irrigata o meno occorre introdurre delle ipotesi.

Un'ipotesi molto "conservativa" è quella in cui una particella catastale senza domanda irrigua è irrigata al 100% (e quindi con domanda non conforme) se la sua superficie è irrigata più del 90% o in altre parole se la superficie irrigata stimata da satellite che ricade al suo interno è maggiore del 90% della superficie catastale. In tale ipotesi una particella catastale senza domanda irrigua sarà non irrigata al 100% se la sua superficie è irrigata fino al 90%. In tale ipotesi, i risultati in termini di estensione in ettari delle particelle catastali prive di domande ma non irrigate e delle particelle catastali prive di domanda ma irrigate (quindi con domanda non conforme) sono riportati nella figura a seguire.

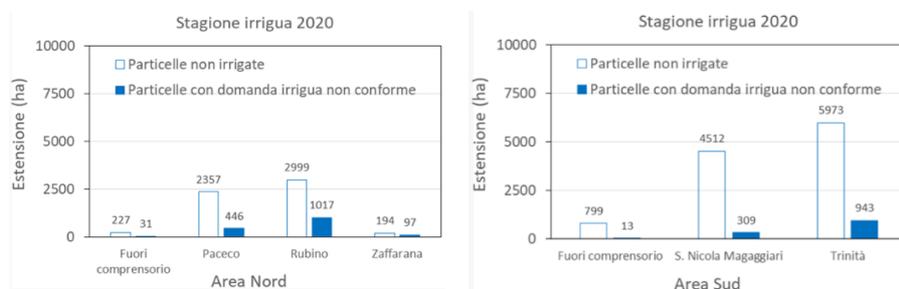


Fig. 25. Analisi con dati satellitari sulle particelle catastali prive di domanda irrigua durante la stagione irrigua 2020 per l'area nord (pannello a sinistra) e per l'area sud (pannello a destra). Per "particella con domanda irrigua non conforme" è indicata una particella con superficie irrigata, stimata da satellite, maggiore del 90% della superficie catastale. Per l'area nord osserviamo che le maggiori criticità in termini di particelle con domanda irrigua non conforme si hanno nel distretto di Rubino con 1017 ettari; mentre nell'area sud le maggiori criticità, in termini di illeciti irrigui, si registrano per il distretto di Trinità con 943 ettari.

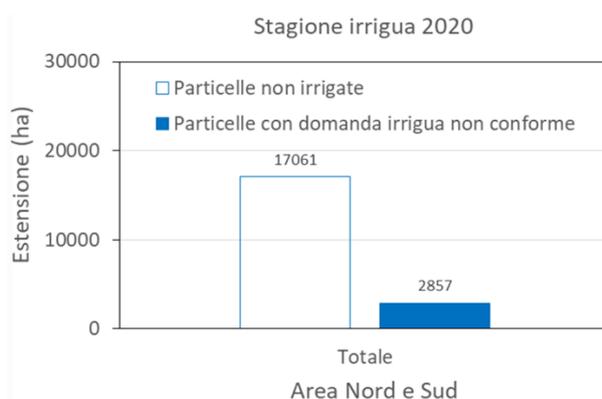


Fig. 26. Analisi complessiva (area nord ed area sud) con dati satellitari sulle particelle catastali prive di domanda irrigua per l'anno 2020.

4.5 Monitoraggio del prelievo difforme della risorsa idrica rispetto all'assegnazione.

Il monitoraggio del prelievo difforme della risorsa idrica, rispetto all'assegnazione, per ciascuna stagione irrigua è avvenuto mediante l'utilizzo di dati satellitari, evidenziando i prelievi eccedenti il volume idrico prenotato in base al numero di ore di prenotazione. Tale operazione ha richiesto l'ausilio dei seguenti prodotti e ha riguardato, per i motivi precedentemente esposti, la stagione irrigua 2020.

- Particelle catastali georeferite: considerando questa volta l'insieme di tutte le particelle catastali (con e senza domanda irrigua);
- Limite dei distretti irrigui nei quali sono state mappate le classi di copertura del suolo;
- Mappa del grado di umidità del sistema suolo-vegetazione;
- Fabbisogni irrigui (calibrati), stimati per le aree irrigate ricadenti nei comprensori irrigui.

Il prelievo difforme rispetto all'assegnazione come detto, ha riguardato sia le particelle catastali con domanda irrigua non conforme che le particelle catastali con domanda. Per le particelle catastali con domanda non conforme, risultando irrigate senza domande e quindi privi di assegnazione in termini di volume di adacquamento, il prelievo difforme sarà pari al fabbisogno irriguo calibrato richiesto dalle colture irrigate illecitamente.

In figura 27 è riportato il fabbisogno irriguo stimato da satellite (calibrato), relativo alle aree con domanda non conforme (irrigate, ma senza domanda) nel periodo di esercizio 2020 (Aprile-Ottobre) per l'insieme dei distretti dell'area Nord e dell'area Sud.

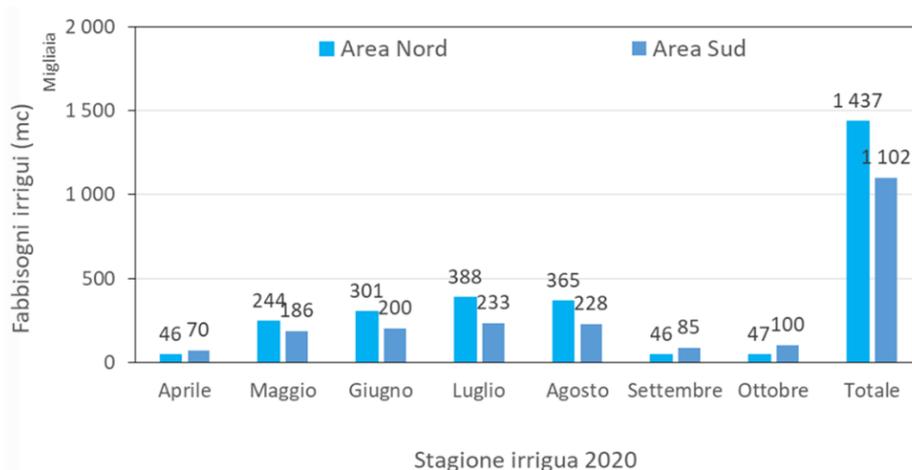


Fig. 27. Fabbisogno irriguo stimato da satellite (calibrato), relativo alle aree con domanda non conforme (irrigate, ma senza domanda) nel periodo di esercizio 2020 (aprile-ottobre) per l'insieme dei distretti dell'area nord e dell'area sud.

Per le particelle catastali con domanda conforme, il prelievo difforme rispetto all'assegnazione sarà valutato prendendo in conto le sole classi "molto umido" e "il più umido" della mappa del grado di umidità, in quanto indicative di un prelievo in surplus rispetto all'assegnazione. Ancora una volta c'è da dire che tali classi, derivando dalla mappa del grado di umidità (dato raster), andranno rapportate al reticolo catastale e quindi occorrerà valutare delle regole per l'assegnazione dell'intera particella catastale alla classe "molto umido" anziché alla classe "il più umido".

Semplificando e allo stesso tempo a vantaggio di precisione è possibile valutare le effettive estensione, in ettari, delle due classi relative al maggiore grado di umidità

(classe “molto umido” e classe “il più umido”), sia per le particelle catastali con domanda non conforme (irrigate, ma prive di domanda) che per le particelle catastali irrigate con domanda. I risultati sono riportati nella figura a seguire.

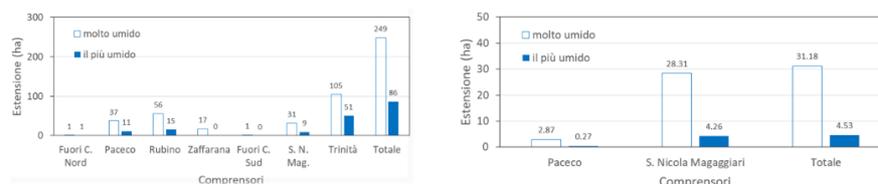


Fig. 28. Estensione delle due classi relative al maggiore grado di umidità (classe “molto umido” e classe “il più umido”) per le particelle catastali con domanda non conforme (irrigate, ma prive di domanda), riportata nel pannello a sinistra, e per le particelle catastali irrigate con domanda, riportata nel pannello a destra.

4.6 Volumi irrigui complessivi per le stagioni 2019-2020

Sulla scorta della calibrazione operata sulle particelle pilota, durante la stagione irrigua 2020, si è proceduto al calcolo dei fabbisogni irrigui per tutte le aree irrigate (con domanda non conforme e con domanda conforme). I risultati sono riportati in figura 24 e figura 25.

I volumi stimati, comprensivi di estrazione da pozzo e da corpi idrici superficiali, sono “valori al campo” (efficienza = 1) in quanto attraverso i dati satellitari si è stimato il volume irriguo di cui le colture irrigate necessitano, ma tale volume irriguo prima di arrivare alla coltura dovrà passare per un sistema di distribuzione che avrà una efficienza di distribuzione (inferiore ad 1).

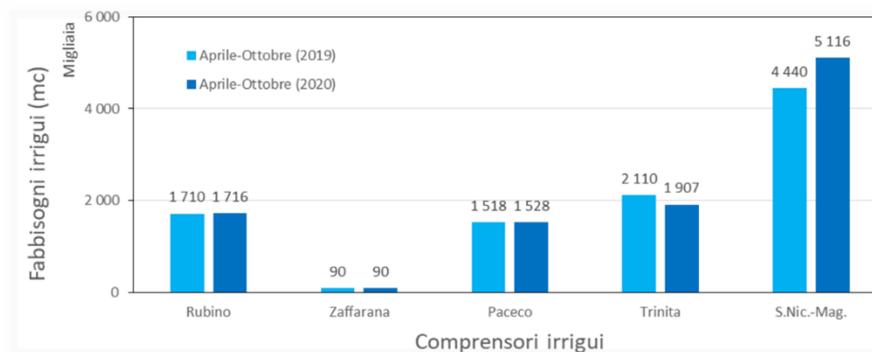


Fig. 24. Fabbisogni irrigui al campo (efficienza=1), per le stagioni 2019-2020 per i diversi comprensori irrigui.

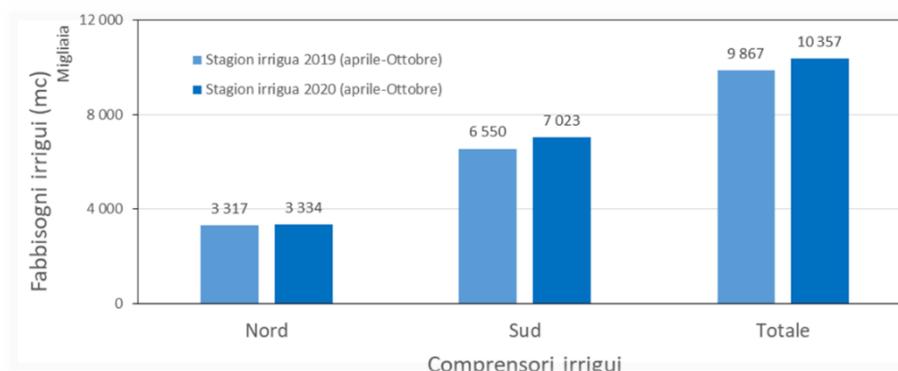


Fig. 25. Fabbisogni irrigui al campo (efficienza=1), per le stagioni 2019-2020 per i distretti afferenti all'area nord (distretti di Paceco, Rubino e Zaffarana), per i distretti afferenti all'area sud (distretti di Trinità e San Nicola Magaggiari) e totali (cumulati per le due aree, nord e sud).

5 Discussioni

I valori riportati in figura 20 sono valori specifici del fabbisogno irriguo ($\text{mc}\cdot\text{ha}^{-1}$), pertanto osserviamo subito che li dove i regolamenti irrigui forniscono fabbisogni irrigui di riferimento costanti per coltura e indipendenti dalle condizioni meteo delle diverse stagioni irrigue, con la metodologia irrisat® è possibile osservare anche nell'ambito di una stessa classe colturale (in questo caso vigneto) una certa variabilità. Tale variabilità deriva dall'approccio irrisat® che utilizza dati meteo (che catturano la variabilità climatica nel periodo in esame) e dati satellitari che osservano le reali condizioni della vegetazione (ovvero le variabilità derivanti da diverse condizioni della copertura fogliare, dal sesto d'impianto, dalle condizioni di stress derivanti da attacchi fitopatogeni, etc.).

Per la stagione irrigua 2020 il totale in termini di estensione, riferito alle particelle catastali con domanda irrigua non conforme sia per l'area Sud che per l'area Nord, corrisponde a circa tremila ettari (figura 26). Questi risultati, come già evidenziato, riguardano una condizione cautelativa per cui abbassando il rapporto tra area irrigata e area catastale per il quale si possa definire "particella con domanda irrigua non conforme" dal 90% al 70% le estensione in ettari di superficie relativa alle particelle con domande irrigua non conforme andrebbero ad aumentare. In effetti è possibile considerare, per ciascuna particella catastale, le percentuali della superficie catastale irrigate e non irrigate. Da questi primi risultati deriva un'ipotesi recupero ruoli stagione irrigua 2020 che oscilla tra i 300 mila e i 380 mila euro, come riportato in dettaglio in tabella 6.

Tabella 6. Ipotesi recupero ruoli stagione irrigua 2020, riferito alle domande irrigue non conformi rispetto alle procedure consortili di prenotazioni irrigua.

Termine	Denominazione	Valore
A	Irriguo non conforme (irrigato, senza domanda)	2 857 ha
B	Dotazione idrica consortile	600-700 mc/ha; (val. med. pond. 550 mc/ha)
C	Costo unitario volume irriguo fornito dal consorzio	0.19 euro/mc

1. *Ipotesi recupero ruoli stagione irrigua 2020= $A*B*C = 326\ 000 - 380\ 000$ euro;*
2. *Ipotesi recupero ruoli stagione irrigua 2020= $A*B*C = A*B*C=300\ 000$ euro.*

Dal prelievo difforme rispetto all'assegnazione che per le sole particelle con domanda non conforme è pari a 2 538 271 mc per la stagione irrigua 2020, deriva un ipotesi di recupero ruoli intorno ai 490 mila euro, come riportato in dettaglio in tabella 7.

Tabella 7. Ipotesi recupero ruoli stagione irrigua 2020, riferito al prelievo difforme rispetto all'assegnazione per le particelle con domanda non conforme.

Termine	Denominazione	Valore
A	Fabbisogno irriguo relativo alle aree irrigate (nord e sud) non conformi (irrigate, ma prive di domanda) stagione 2020	2 538 271 ha
B	Costo unitario volume irriguo fornito dal consorzio	0.19 euro/mc

Ipotesi recupero ruoli stagione irrigua 2020= $A*B = 482\ 271$ euro;

Dalla figura 28 si osserva che mentre le particelle catastali con domanda non conforme (irrigate, ma prive di domanda) - ricadenti nelle due classi relative al maggiore grado di umidità - sono rappresentate in tutti i distretti irrigui oltre che fuori comprensorio (asse delle ascisse, pannello a sinistra di figura 28), le particelle catastali irrigate con domanda sono presenti solo nei distretti irrigui di Paceco, San Nicola Magaggiari e Trinità (asse delle ascisse, pannello a destra di figura 28). Inoltre c'è da sottolineare che l'irrigazione con prelievo difforme rispetto all'assegnazione (individuata mediante le classi "molto umido e "il più umido" della mappa del grado di umidità), ha una maggiore estensione in ettari per le particelle catastali con domanda non conforme (irrigate, ma prive di domanda) rispetto alle particelle catastali irrigate con domanda.

In altre parole chi irriga con domanda non conforme preleva molto di più di chi irriga con domanda. In base ai risultati raggiunti in merito al prelievo di forme rispetto all'assegnazione, si potrebbe operare un'ipotesi di recupero ruoli, basata sulle due classi relative al maggiore grado di umidità per le particelle catastali con domanda non conforme (irrigate, ma prive di domanda) e per le particelle catastali irrigate con domanda. Tale ipotesi potrebbe prendere in conto il recupero monetario derivante dal volume irriguo utilizzato in eccedenza rispetto alla stima da satellite, ovvero sulla base dell'incremento percentuale rispetto alla dotazione media stimata da satellite.

6 Conclusioni

Il caso di studio analizzato hanno messo in evidenza l'efficacia nell'utilizzo di tecniche di osservazione della terra (OT) nell'individuazione dei volumi irrigui e delle aree irrigate. Queste informazioni, di fondamentale importanza per una corretta gestione delle risorse idriche, offre indiscutibili vantaggi rispetto alle tradizionali ispezioni di campo, consentendo alle amministrazioni dei Consorzi di recuperare risorse economiche dalle mancate esazioni. Oltre alla evidente maggiore economicità rispetto alle ispezioni in campo, i dati OT insieme all'utilizzo di tecniche GIS consentono di velocizzare le operazioni di verifica delle domande di fornitura di acqua a uso irriguo, delle istanze di riesame, oltre all'eventuale applicazione del ruolo irriguo anche nelle aziende prive di misuratori. Infine, si rende possibile un controllo della qualità dei dati di lettura e di eventuali malfunzionamenti dei misuratori.

7 Ringraziamenti

Si ringraziano il Direttore dell'Ente Dott. Giovanni Tomasino e i Dirigenti Dott. Ignazio Marino e l'Ing. Fabio Sardo per la fattiva collaborazione resa in tutte le fasi di questo progetto.

Riferimenti bibliografici

1. ESA multimedia – ESA Bulletin. (http://esamultimedia.esa.int/docs/EarthObservation/Sentinel-2_ESA_Bulletin161.pdf). (accesso 23 maggio 2022).
2. ESA Earth Online – User Guide. (<https://earth.esa.int/web/sentinel/user-guides/sentinel-2-msi/resolutions/spatial>). (accesso 23 maggio 2022).
3. ESA Sentinel Online-Documents. (https://sentinel.esa.int/documents/247904/349490/S2_SP-1322_2.pdf). (accesso 23 maggio 2022).
4. Caselles, V., Lopez Garcia, M. J. 1989. An alternative simple approach to estimate atmospheric correction in multitemporal studies. *International Journal of Remote Sensing*, 10(6), 1127–1134. <http://doi.org/10.1080/01431168908903951>

5. Young, N.E., Anderson, R.S., Chignell, S.M., Vorster, A.G., Lawrence, R., Evangelista, P.H. 2017. A survival guide to Landsat preprocessing. *Ecology* 98 (4), 920–932. <http://dx.doi.org/10.1002/ecy.1730>
6. Hadjimitsis, D. G., Papadavid, G., Agapiou, A., Themistocleous, K., Hadjimitsis, M., Retalis, A., Michaelides, S., Chrysoulakis, N., Toullos, L., Clayton, C. R. I. 2010. Atmospheric correction for satellite remotely sensed data intended for agricultural applications: impact on vegetation indices. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 10 (1), 89–95. <http://dx.doi.org/10.5194/nhess-10-89-2010>.
7. Song, C., Woodcock, C.E., Seto, K.C., Lenney, M.P., Macomber, S.A. 2001). Classification and change detection using Landsat TM data: when and how to correct atmospheric effects? *Remote Sens Environ.* 75 (2), 230–244. [http://dx.doi.org/10.1016/S0034-4257\(00\)00169-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0034-4257(00)00169-3).
8. Vanonckelen, S., Lhermitte, S., Van Rompaey, A. 2013. The effect of atmospheric and topographic correction methods on land cover classification accuracy. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinform.* 24, 9–21. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jag.2013.02.003>.
9. Carpenter, G.A., Gopal, S., Macomber, S., Martens, S., Woodcock, C.E. 1999. A neural network method for mixture estimation for vegetation mapping. *Remote Sens. Environ.* 70 (2), 138–152. [http://dx.doi.org/10.1016/S0034-4257\(99\)00027-9](http://dx.doi.org/10.1016/S0034-4257(99)00027-9).
10. Goslee, S.C. 2012. Topographic corrections of satellite data for regional monitoring. *Photogramm. Eng. Remote Sens.* 78 (9), 973–981. <http://dx.doi.org/10.14358/PERS.78.9.973>.
11. Mitri, G., Gitas, I. 2004. A performance evaluation of a burned area object-based classification model when applied to topographically and non-topographically corrected TM imagery. *Int. J. Remote Sens.* 25 (14), 2863–2870. <http://dx.doi.org/10.1080/01431160410001688321>.
12. Zhang, Z., De Wulf, R. R., Van Coillie, F. M., Verbeke, L. P., De Clercq, E. M., Ou, X. 2011. Influence of different topographic correction strategies on mountain vegetation classification accuracy in the Lancang Watershed, China. *J. Appl. Remote Sens.* 5 (1), 053512. <http://dx.doi.org/10.1117/1.3569124>. T.N. Carlson, R.R. Gillies, E.M. Perry.
13. Müller-Wilm, U., Devignot, O., Pessiot, L. 2017. Sen2Cor software release note. Available online: <http://step.esa.int/thirdparties/sen2cor/2.5.5/docs/S2-PDGS-MPC-L2A-SRN-V2.5.5.pdf> (accesso 23 maggio 2022).
14. ESA Sentinel Online- The Sentinel-2 Toolbox. (<https://sentinel.esa.int/web/sentinel/toolboxes/sentinel-2>). (accesso 23 maggio 2022).
15. ESA Sentinel Online- Level-2A Algorithm Overview. (<https://sentinel.esa.int/web/sentinel/technical-guides/sentinel-2-msi/level-2a/algorithm>). (accesso 23 maggio 2022).
16. Eilers, P. H. C. 2003. A perfect smoother. *Analytical Chemistry*. <http://doi.org/10.1021/ac034173t>
17. Mattiuzzi, M., Verbesselt, J., Hengl, T., Klisch, A., Evans, B., Lobo, A., 2012. Modis: Modis download and processing package. processing functionalities for (multi-temporal) MODIS grid data. First International Workshop on “Temporal Analysis of Satellite Images” Mykonos Island, Greece, May 23-25, 2012
18. R Core Team. R: A Language and Environment for Statistical Computing; R Core Team: Vienna, Austria, 2013.
19. The optical trapezoid model: A novel approach to remote sensing of soil moisture applied to Sentinel-2 and Landsat-8 observations. M Sadeghi, E Babaeian, M Tuller, SB Jones - Remote sensing of environment, 2017.
20. A linear physically-based model for remote sensing of soil moisture using short wave infrared bands M Sadeghi, SB Jones, WD Philpot - Remote Sensing of Environment, 2015

21. Rouse, J. W., Jr.; Haas, R. H.; Schell, J. A.; Deering, D. W. 1973. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. In: Third Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium- Volume I: Technical Presentations. NASA SP-351, compiled and edited by Stanley C. Freden, Enrico P. Mercanti, Margaret A. Becker, 1994 pages, published by NASA, Washington, D.C., 1974, pp.309-317.
22. Probabilistic forecasting of reference evapotranspiration with a limited area ensemble prediction system. A Pelosi, H Medina, P Villani, G D'Urso, GB Chirico - Agricultural water management, 2016.
23. <https://www.wmo.int/pages/prog/www/manuals.html>
24. Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M. (1998). Crop Evapotranspiration - Guidelines for Computing Crop Water Requirements, Irrigation and Drain - FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56. Rome, Italy., 1998.
25. Jensen, M. E., Burman, R. D., Allen, R. G. 1990. Evapotranspiration and irrigation water requirements. ASCE.
26. Calera A., Campos, I., Osann, A, D'Urso, G., Menenti, M. 2017. Remote Sensing for Crop Water Management: From ET Modelling to Services for the End Users”, Sensors, 17, 1104-1129, 2017.
27. Jacquemoud, S., Baret, F., 1990. PROSPECT: a model of leaf optical properties spectra. Remote Sens. Environ. 34, 75–91. [http://dx.doi.org/10.1016/0034-4257\(90\)90100-Z](http://dx.doi.org/10.1016/0034-4257(90)90100-Z).
28. Verhoef, W., 1984. Light scattering by leaf layers with application to canopy reflectance modelling. The SAIL model. Remote Sens. Environ. 16, 125–141. [http://dx.doi.org/10.1016/0034-4257\(84\)90057-9](http://dx.doi.org/10.1016/0034-4257(84)90057-9).
29. Weiss, M., Baret, F., 2016. S2 ToolBox level 2 products: LAI, FAPAR, FCOVER version 1.1. Available from: http://step.esa.int/docs/extra/ATBD_S2ToolBox_L2B_V1.1.pdf, (accessed on October 2019).
30. Vanino, S., Nino, P., De Michele, C., Falanga Bolognesi, S., D'Urso, G., Di Bene, C., Pennelli, B., Vuolo, F., Farina, R., Pulighe, G., Napoli, R. 2018. Capability of Sentinel-2 data for estimating maximum evapotranspiration and irrigation requirements for tomato crop in Central Italy, Remote Sensing of Environment, 215, 452-470, 2018.
31. Braden, H. 1985. Ein Energiehaushalts- und Verdunstungsmodell for Wasser und Stoffhaushaltsuntersuchungen landwirtschaftlich genutzter Einzugsgebiete. M. Dtsch. Bodenk. Gesellschaft 1985, 42, 294–299.

