

POLITECNICO DI MILANO
Facoltà di Ingegneria Civile, Ambientale e Territoriale
Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile
Orientamento Idraulica



**IMMAGINI SATELLITARI DI
TEMPERATURA SUPERFICIALE E
STAZIONI EDDY COVARIANCE PER LA
CALIBRAZIONE DI UN MODELLO
IDROLOGICO DISTRIBUITO: IL CASO
STUDIO DEL CONSORZIO DELLA
CAPITANATA.**

Relatore: Prof.ssa Chiara Corbari

Tesi di laurea di:
Lorenzo De Pedrini Matr. 824244

Anno accademico 2015/2016

Ringraziamenti

Ringrazio sentitamente la Professoressa Chiara Corbari per avermi seguito e consigliato durante tutta la durata del lavoro e per la pazienza che ha dimostrato.

Vorrei inoltre ringraziare il Professor Marco Mancini per avermi dato la possibilità di sviluppare un lavoro di tesi molto interessante e legato a tematiche importanti ed attuali.

Sintesi

L'obiettivo di questa tesi è l'impegno di immagini satellitari di temperatura superficiale e dati acquisiti da stazioni Eddy Covariance, per la calibrazione di un modello idrologico distribuito FEST-EWB, applicato all'area del Consorzio di Bonifica della Capitanata di Foggia. Nella tesi sono stati raccolti i dati meteorologici provenienti da più di 30 stazioni di misura nella regione Puglia, per una durata complessiva di quasi 3 anni. Successivamente si è provveduto ad analizzarli effettuando una procedura di validazione che ha permesso di eliminare quelli che risultavano affetti da errori, quindi si è proceduto a inserire i dati così ottenuti nel modello FEST-EWB del Politecnico di Milano, assieme ad altri dati di input provenienti da immagini satellitari e da mappe del suolo.

Il modello è stato calibrato modificando pixel a pixel i parametri del suolo e della vegetazione tramite il confronto tra le immagini satellitari di LST e quelle modellate dal FEST-EWB. Inoltre sono stati confrontati i valori simulati con quelli misurati da quattro stazioni Eddy Covariance poste in campi sperimentali di asparagi, verze e pomodori.

Alla fine si è ottenuto un modello FEST-EWB calibrato per il consorzio in esame, in grado di simulare correttamente gli andamenti dei flussi energetici ed idrologici. Si è inoltre potuto procedere al calcolo dei fabbisogni irrigui, utile ad una futura implementazione con la metodologia Pre.G.I. o "Previsione e Gestione Irrigua", riguardante la previsione idro-metereologica finalizzata ad una più efficiente gestione irrigua.

Indice dei contenuti

RINGRAZIAMENTI	III
SINTESI	V
INDICE DEI CONTENUTI	VII
INDICE DELLE FIGURE	IX
INDICE DELLE TABELLE	XII
INTRODUZIONE	1
CAPITOLO 1 IL MODELLO IDROLOGICO FEST-EWB	5
CAPITOLO 2 INQUADRAMENTO TERRITORIALE, DATI METEOROLOGICI E IDROLOGICI	9
2.1 REPERIMENTO DATI: STAZIONI METEO	11
2.2 LA TECNICA EDDY COVARIANCE	14
2.2.1 <i>Stazione Eddy Covariance: dettagli tecnici</i>	15
2.3 PROBLEMATICHE RISCONTRATE E VALIDAZIONE	16
2.3.1 <i>Malfunzionamenti delle stazioni</i>	16
2.3.2 <i>Adeguamento nella frequenza delle misurazioni</i>	17
2.4 DURATA DEL PERIODO DI OSSERVAZIONE	18
CAPITOLO 3 DATI SPAZIALI IN INPUT AL MODELLO FEST-EWB	23
3.1 CARATTERISTICHE E PROPRIETÀ DEL SUOLO	23
3.2 RESISTENZA STOMATICA MINIMA	34
3.3 PROFONDITÀ DI SUOLO IDROLOGICAMENTE ATTIVO	35
3.4 DATI DA SATELLITE	35
3.4.1 <i>Albedo</i>	37
3.4.2 <i>NDVI</i>	38
3.4.3 <i>Indice di copertura fogliare LAI</i>	38
3.4.4 <i>Frazione vegetata FV</i>	38
3.5 DATI DI IRRIGAZIONE	38
3.5.1 <i>Irrigazione a scala di consorzio</i>	39

3.5.2 Irrigazione puntuale sui campi in esame	42
CAPITOLO 4 ANALISI ALLA SCALA PUNTUALE.....	51
4.1 STIMA DI ET TRAMITE IL METODO DI PRIESTLEY-TAYLOR.....	56
4.2 STIMA DI ET TRAMITE IL METODO FAO PENMAN-MONTEITH	58
4.3 CAMPO DI ASPARAGI.....	60
4.4 CAMPO DI VERZE	64
4.5 CAMPO DI POMODORI AZIENDA.....	66
4.6 CAMPO DI POMODORI CONSORZIO	70
CAPITOLO 5 FEST-EWB: IMPLEMENTAZIONE E RISULTATI.....	73
5.1.1 Calibrazione a scala di campo.....	74
5.1.2 Calibrazione a scala di bacino	74
5.2 RISULTATI DELLE SIMULAZIONI ALLA SCALA DELLE STAZIONI EDDY.....	77
5.2.1 Risultati Campo Asparagi	77
5.2.2 Risultati Campo Verze.....	84
5.2.3 Risultati Campo Pomodori Azienda	93
5.2.4 Risultati Campo Pomodori Consorzio.....	102
5.3 RISULTATI ALLA SCALA DI CONSORZIO	111
CAPITOLO 6 CONCLUSIONI.....	121
CAPITOLO 7 BIBLIOGRAFIA.....	123
APPENDICE A.....	125
A.1 DISPONIBILITÀ TEMPORALE DEI DATI DI INPUT FEST DALLE STAZIONI	125

Indice delle figure

Figura 1-1: Rappresentazione schematica del funzionamento del modello FEST-EWB	6
Figura 2-1: Inquadramento dell'area del Consorzio di Bonifica della Capitanata di Foggia	10
Figura 2-2: Regione Puglia, con evidenziate le stazioni di misura e il comprensorio esaminato	10
Figura 2-3: Superficie del comprensorio irriguo simulata	11
Figura 2-4: Durata periodo acquisizione dati delle stazioni	20
Figura 2-5: Disponibilità dati pluviometrici dalle 48 stazioni	21
Figura 3-1: DEM Puglia: modello digitale delle quote del terreno nella zona del Consorzio di Bonifica della Capitanata di Foggia	24
Figura 3-2: DEM dell'area del Consorzio di Bonifica della Capitanata di Foggia che è stata modellizzata in questa tesi tramite FEST-EWB.	24
Figura 3-3: Pendenza [°] del Consorzio di Bonifica della Capitanata	25
Figura 3-4: Aree contribuenti [m ²]. Per ogni cella viene calcolato quante celle a monte drenano acqua su di essa esprimendo tale numero in m ²	25
Figura 3-5: Orientamento [°]. Alla massima pendenza in direzione Nord viene assegnato il valore 0, mentre proseguendo in direzione oraria, si assegnano alle pendenze nelle altre direzioni valori via via crescenti fino a 360°	26
Figura 3-6: direzioni di deflusso del bacino considerato [-]. Per ogni cella del bacino, a seconda della direzione verso cui questa drena, si assegna il valore corrispondente seguendo lo schema riportato nella figura in basso a destra	26
Figura 3-7: Capacità di campo -. Dall'istogramma riportato si può notare come sul Consorzio in esame, la maggior parte dei terreni abbia valori compresi tra 0.317 e 0.395.	27
Figura 3-8: Bubbling Pressure [m]. Dall'istogramma riportato si può notare come sul Consorzio in esame, la maggior parte dei terreni abbia valori compresi tra 0.2581 e 0.3729.	27
Figura 3-9: Conduttività idraulica a saturazione Ksat [m/s]. Dall'istogramma riportato si può notare come sul Consorzio in esame, la maggior parte dei terreni abbia valori compresi tra 4.8627e-07 e 4.1574e-06.	28

Figura 3-10: Contenuto d'acqua residuo θ_{res} –. Dall'istogramma riportato si può notare come sul Consorzio in esame, la maggior parte dei terreni abbia valori compresi tra 0.074 e 0.09.	28
Figura 3-11: Contenuto d'acqua a saturazione θ_{sat} –. Dall'istogramma riportato si può notare come sul Consorzio in esame, la maggior parte dei terreni abbia valori compresi tra 0.463 e 0.474.	28
Figura 3-12: Distribuzione della dimensione dei vuoti (Brooks and Corey λ) –. Dall'istogramma riportato si può notare come sul Consorzio in esame, la maggior parte dei terreni abbia valori compresi tra 0.24 e 0.251.	29
Figura 3-13: Punto di appassimento (Wilting Point) –. Dall'istogramma riportato si può notare come sul Consorzio in esame, la maggior parte dei terreni abbia valori compresi tra 0.19 e 0.27.	29
Figura 3-14: Tessitura del terreno	30
Figura 3-15: Distribuzione del Curve Number sul Consorzio	30
Figura 3-16: Resistenza stomatica minima r_{smin} w/m2. Dall'istogramma riportato si può notare come sul Consorzio in esame, la maggior parte dei terreni abbia valori compresi tra 98.82 e 199.99.	34
Figura 3-17: Profondità media di suolo attivo m . Dall'istogramma riportato si può notare come sul Consorzio in esame, la maggior parte dei terreni abbia valori compresi tra 0.35 e 0.58m.	35
Figura 3-18: Acquedotto di Foggia	39
Figura 3-19: Raster irrigazione sul consorzio	40
Figura 3-20: Rappresentazione grafica di TAW, RAW, Fc e Wp	43
Figura 4-1: Stazioni Eddy Covariance in prossimità dei rispettivi campi	52
Figura 4-2: Evapotraspirazione colturale di riferimento E_{To} , (FAO)	54
Figura 4-3: Andamento del coefficiente di coltura K_c durante lo sviluppo della coltura	55
Figura 4-4: Evapotraspirazione di una coltura in condizioni standard	56
Figura 4-5: Evapotraspirazione della coltura aggiustata tenendo conto delle condizioni di irrigazione e ambientali	56
Figura 5-1: Immagine rappresentante la temperatura superficiale, scattata dal satellite Landsat 8 in data 1/06/2015 alle ore 11:00	76
Figura 5-2: Immagine rappresentante la temperatura superficiale, scattata dal satellite Landsat 7 in data 13/07/2016 alle ore 11:00	77
Figura 5-3: Mappa calibrata e istogrammi della conduttività idraulica a saturazione K_{sat} [m/s]. A sinistra vi è l'istogramma dei valori originali. A destra vi è l'istogramma dei valori calibrati.	113

- Figura 5-4: Mappa calibrata e istogrammi della profondità media di suolo attivo idrologicamente [m]. A sinistra vi è l'istogramma dei valori originali. A destra vi è l'istogramma dei valori calibrati. 113
- Figura 5-5: Mappa calibrata e istogrammi della resistenza stomatica minima $r_{s_{min}}$ [w/m^2]. A sinistra vi è l'istogramma dei valori originali. A destra vi è l'istogramma dei valori calibrati. 114
- Figura 5-6: Confronto fra le LST dalle immagini satellitari Landsat e quelle da modello FEST-EWB della simulazione originale (immagine centrale) e della simulazione finale (immagine a destra). 119

Indice delle tabelle

Tabella 2-1: Coordinate WGS 1984 UTM zone 33N delle stazioni Eddy Covariance e Meteo	13
Tabella 2-2: Riassunto frequenza di acquisizione dati dalle stazioni	18
Tabella 2-3: Disponibilità temporale dati raccolti dalle stazioni	20
Tabella 3-1: Proprietà dei suoli dei quattro campi Eddy	31
Tabella 3-2: Date con immagini satellitari di LAI, Albedo e Fv disponibili	37
Tabella 3-3: Aree irrigue dell'anno 2016	40
Tabella 3-4: Apertura e chiusura stagione irrigua	41
Tabella 3-5: Indici di interesse per le soglie di irrigazione	43
Tabella 3-6: Giorni irrigazione del Campo Verze	46
Tabella 3-7: Giorni irrigazione del campo di Pomodori Azienda	47
Tabella 3-8: Giorni irrigazione del campo di Pomodori Consorzio	49
Tabella 3-9: Giorni di irrigazione del campo di Asparagi Azienda	49
Tabella 4-1: Posizione delle stazioni Eddy Covariance	52
Tabella 4-2: valori dei termini nell'equazione di Priestley – Taylor	57
Tabella 4-3: Durata delle fasi di crescita e relativi valori di Kc proposti dalla FAO per la coltura asparagi	61
Tabella 4-4: Durata delle fasi di crescita e relativi valori di Kc proposti dalla FAO per la coltura verze	64
Tabella 4-5: Tabella dei valori di Kc proposta dalla FAO, per clima mediterraneo e coltura di pomodori.	67
Tabella 5-1: Acquisizione delle immagini satellitari dai satelliti Landsat	76
Tabella 5-2: Risultati analisi statistiche della simulazione originale a scala di campo, effettuati sul campo di asparagi	79
Tabella 5-3: Risultati analisi statistiche della simulazione finale a scala di campo, effettuati sul campo di asparagi	79
Tabella 5-4: Risultati analisi statistiche della simulazione originale a scala di campo, effettuati sul campo di verze	85
Tabella 5-5: Risultati analisi statistiche della simulazione finale a scala di campo, effettuati sul campo di verze	86

Tabella 5-6: Risultati analisi statistiche della simulazione originale a scala di campo, effettuati sul campo di pomodori Azienda	94
Tabella 5-7: Risultati analisi statistiche della simulazione finale a scala di campo, effettuati sul campo di pomodori Azienda	94
Tabella 5-8: Risultati analisi statistiche della simulazione originale a scala di campo, effettuati sul campo di pomodori Consorzio	104
Tabella 5-9: Risultati analisi statistiche della simulazione finale a scala di campo, effettuati sul campo di pomodori Consorzio	104

INTRODUZIONE

Sin dall'inizio della storia umana, l'acqua ha rivestito un ruolo di primaria importanza per la sopravvivenza e lo sviluppo della collettività, dai primi insediamenti che si formarono lungo i corsi d'acqua sfruttando la risorsa idrica a scopo potabile e irriguo, oltre che per la pesca e i commerci, sino ad arrivare ai moderni impianti idroelettrici e allo sfruttamento da parte delle industrie e servizi.

La crescente pressione dovuta allo sfruttamento sempre più intensivo della risorsa idrica, sommata all'effetto dei cambiamenti climatici in atto a scala locale e globale, ha portato allo studio di un utilizzo sempre più efficiente dell'acqua, in modo da massimizzarne la resa. Gli investimenti nell'acqua destinata all'agricoltura hanno contribuito positivamente alla crescita della popolazione, alla qualità del cibo e alla riduzione della povertà (Molden, 2007).

Durante la seconda metà del ventesimo secolo, la produzione di cibo ha sorpassato la crescita della popolazione, con il 78% della produzione cresciuta nel periodo tra il 1961 e 1999 derivante dall'aumento del rendimento (Bruinsma, 2003), in contrasto all'espansione dei terreni agricoli. Questo aumento di rendimento è stato raggiunto in parte tramite all'espansione delle aree irrigate e ai miglioramenti nella gestione dell'irrigazione stessa (Charlotte de Fraiture, 2010).

La popolazione mondiale ha raggiunto nel 2015 i 7,5 miliardi di individui e si prevede che nel 2050 raggiunga i 9,7 miliardi, secondo le più recenti stime (United Nations, 2015). Inoltre nel mondo 663 milioni di persone, cioè circa 1 ogni 10, non hanno accesso ad acque sicure ((JMP), 2015).

Il regime delle precipitazioni e di conseguenza la disponibilità di acqua sono strettamente legati al clima ed ai cambiamenti climatici. In particolare secondo le più recenti stime (The Core Writing Team, 2014), si prevede un aumento della temperatura globale media di 4 gradi alla fine del secolo. Questo porterebbe allo stravolgimento della distribuzione delle precipitazioni a scala globale, portando ad un aumento nella frequenza delle siccità. Il 2015 è

stato l'anno globalmente più caldo mai verificato dall'inizio delle registrazioni, nel 1880 (Northon, 2016).

Per questi motivi, ora più che mai è fondamentale cercare nuovi strumenti per la gestione ottimizzata delle acque.

Un settore che necessita di una notevole fornitura di acqua è quello agricolo, che assorbe mediamente circa il 60 per cento dell'acqua disponibile. Per questo è di estrema importanza lo studio dei meccanismi per una corretta gestione irrigua, affiancati a metodi sempre più accurati di previsione e mitigazione della siccità.

L'individuazione dei flussi che costituiscono i fattori chiave nel processo decisionale dell'irrigazione, nonché la loro quantificazione, saranno un passaggio chiave nell'elaborazione di questa tesi.

In questo elaborato di tesi si propone di applicare la metodologia Pre.G.I. ovvero "Previsione e Gestione Irrigua" (Ceppi et al.), riguardante la previsione idro-metereologica finalizzata alla gestione irrigua, che è stato sviluppato tra il 2010 e il 2012 come sistema di supporto decisionale basato sia su previsioni meteo a medio-lungo termine sia su simulazioni idrologiche del bilancio idrico per prevedere il contenuto di acqua nel suolo in un campo irrigato nel Lodigiano, all'interno del progetto europeo SIM (Smart irrigation from soil moisture forecast using satellite and hydro-meteorological modelling) (Waterworks 2016-2018).

La regione Lombardia ha recentemente avviato il progetto SEGUICI "Smart tecnologie per la Gestione delle risorse idriche ad Uso Irriguo e Civile", sviluppando una piattaforma informatica operativa a base territoriale regionale in grado di raccogliere, elaborare e organizzare la conoscenza sui diversi sistemi idrici (Ravazzani et al, 2016).

Le previsioni meteo vengono fornite da modelli metereologici, la cui attendibilità varia notevolmente con l'aumentare dell'orizzonte temporale.

Le simulazioni idrologiche sono eseguite tramite l'algoritmo FEST-EWB, dall'inglese "Flash-flood Event-based Spatially distributed rainfall-runoff Transformation-Energy Water Balance", sviluppato dal Politecnico di Milano a partire dal 1990 e successivamente implementato ed applicato a numerosi casi studio, sia in Italia che in altri contesti internazionali. Esso risolve i bilanci di energia e massa in funzione della temperatura rappresentativa di riferimento (Corbari et al, 2011) che è una caratteristica del suolo spazialmente distribuita, ottenuta attraverso l'analisi di immagini satellitari acquisite tramite il programma statunitense Landsat. Sono inoltre attualmente disponibili immagini termiche ad infrarossi ad elevata risoluzione, dell'ordine di qualche metro, ottenute tramite l'utilizzo di aerei dotati di sensori termici in grado di sorvolare l'area interessata e scattare immagini dettagliate del suolo (J. A. Sobrino, 2009).

L'acquisizione dei dati metereologici ed energetici è effettuata tramite un particolare tipo di stazione denominata "Eddy Covariance". Questa dispone di numerosi strumenti di rilevazione,

sia nello strato superficiale interessato dagli effetti in termini energetici della coltura, sia nel primo strato del suolo avente uno spessore uguale alla profondità delle radici, che forniscono misure di evapotraspirazione, umidità del suolo e gli altri flussi energetici.

Per quanto riguarda i sensori di superficie si hanno: anemometro sonico tridimensionale, gas analyzer, radiometro a quattro componenti, IRTIS, termo igrometro e il PAR. I sensori posizionati nel terreno sono invece: sonde di umidità, heat flux plate e termocoppie.

Esistono numerosi esempi di ricerche a livello internazionale, tra cui quelle effettuate tramite il programma CROPWAT, utilizzato per l'irrigazione pianificata e la gestione (Smith, 1992), EPIC-PHASE o Erosion Productivity Impact Calculator-phase, modello sviluppato nel centro di Tolosa (Cabelguenne, 1997), l'approccio in tempo reale per l'irrigazione programmata proposto da (Gowing, 2001), L'EWARNING che costituisce il sistema di allerta danese (Jensen, 2003), le previsioni in tempo reale dell'evapotraspirazione (Cai, 2007) ed il Canterbury Irrigation Scheduler (Brown, 2010).

Progetti per migliorare la protezione e gestione delle risorse idriche europee sono percepiti anche nella EU Water Framework Directive.

L'obiettivo di questa tesi è la raccolta, analisi e validazione dei dati disponibili nella zona del Consorzio di Bonifica della Capitanata di Foggia e il loro successivo impiego come dati di input nel modello FEST-EWB del Politecnico di Milano, al fine di ottenere risultati simulati e calibrati in merito ai quantitativi irrigui.

Nel Capitolo 1 si introdurrà il modello idrologico FEST-EWB utilizzato per le simulazioni.

Nel Capitolo 2 si descriverà l'inquadramento territoriale dell'area esaminata, le fonti da cui sono stati presi i dati e le problematiche affrontate.

Nel Capitolo 3 si parlerà e descriverà i dati di input utilizzati per la modellazione con FEST-EWB.

Nel Capitolo 4 verranno elencate le analisi effettuate alla scala di campo per una prima stima dell'evapotraspirazione.

Nel Capitolo 5 verranno mostrati i risultati della calibrazione del modello FEST-EWB a scala di campo e a scala di bacino.

Nel Capitolo 6 si riporteranno infine le conclusioni.

CAPITOLO 1

IL MODELLO IDROLOGICO FEST-EWB

Il modello utilizzato in questa tesi è il FEST-EWB (Mancini 1990, Ravazzani 2001, Corbari 2010), dall'inglese “Flash- flood Event-based Spatially distributed rainfall–runoff Transformation–Energy Water Balance”, sviluppato dal Politecnico di Milano a partire dal 1990 e successivamente implementato ed applicato a numerosi casi studio, sia in Italia che in altri contesti internazionali. Tale modello idrologico, si propone di stimare in modo integrato gli afflussi-deflussi basandosi sull'equazione di bilancio idrologico.

Il modello in questione è un modello dinamico, spazialmente distribuito, identificato da una griglia regolare. I modelli a parametri distribuiti tentano di riprodurre, con opportune semplificazioni, l'effettivo funzionamento del bacino nelle varie componenti elementari in cui viene discretizzato. I modelli distribuiti sono perciò definiti come quei modelli matematici che tengono conto della variabilità spaziale delle proprietà del bacino, considerando sia le variabili che i parametri come distribuiti su tutta l'area dello stesso. L'applicazione del modello richiede quindi una preliminare fase di acquisizione e pre-elaborazione dell'informazione che viene così importata nel formato raster, tramite il software ArcGis in questo caso.

L'uso di un modello di tipo distribuito richiede l'acquisizione di una grossa quantità di dati: il numero totale dei parametri in gioco è infatti dato dal numero delle grandezze utilizzate per descrivere la singola cella elementare. Il peso computazionale del modello è quindi gravoso: si deve simulare, per ogni step di calcolo, il funzionamento di tutte le celle presenti. Tale fatica viene ricompensata da una più accurata descrizione dei fenomeni, soprattutto dal momento che è stato evidenziato (v. Brath, 1995; Beven, 1985; Rosso et al., 1994) come la variabilità spaziale dei processi in gioco (assorbimento, propagazione, etc.) abbia grande influenza sulla risposta del bacino.

Gli input del sistema sono costituiti dalle misure meteorologiche (pioggia, temperatura, etc.) in step temporali fissati. In seguito il modello stima, sulla base degli afflussi lordi, gli afflussi

netti, implementando un modello di assorbimento del terreno (USDA-SCS Curve Number del Soil Conservation Service, 1986). La propagazione delle portate di ruscellamento, ottenute a valle del processo di depurazione degli afflussi lordi, avviene col metodo di Muskingum, nella forma proposta da Cunge (1969). Si ottiene, in questo modo, il dato di portata, allo scorrere del tempo, in punti fissati (solitamente alla chiusura del sottobacino di interesse), che costituisce l'output del sistema.

Di seguito viene rappresentata una descrizione schematica del modello FEST-EWB.

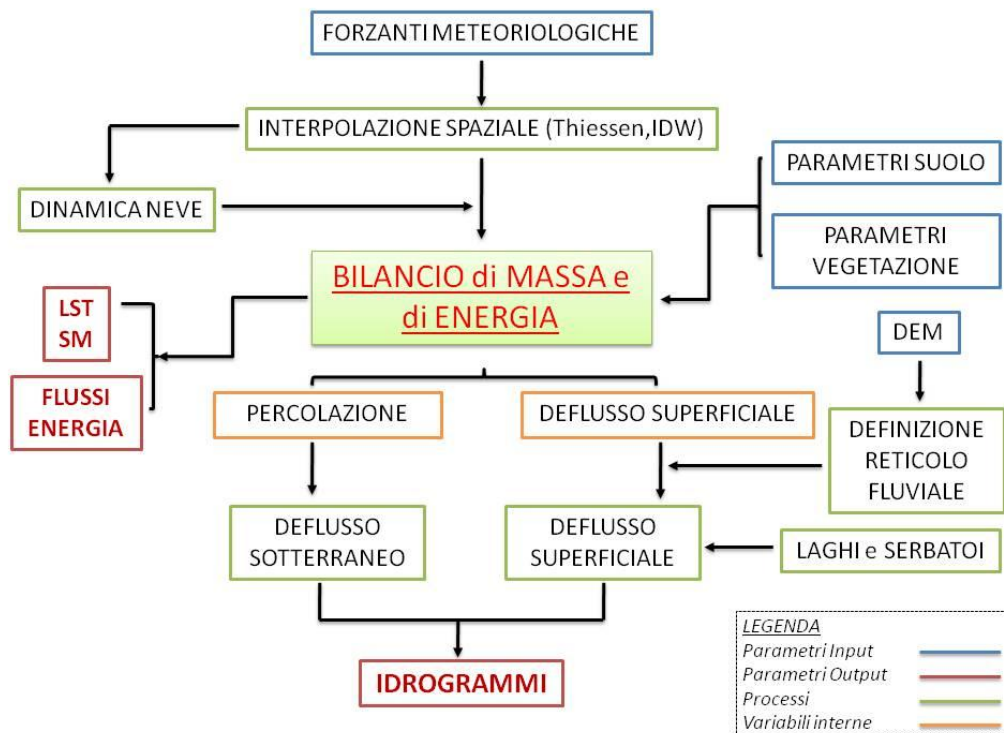


Figura 1-1: Rappresentazione schematica del funzionamento del modello FEST-EWB

Nella versione utilizzata in questa tesi, il modello FEST-EWB calcola l'evapotraspirazione e quindi la dinamica dell'umidità del suolo, accoppiando il bilancio idrico a quello energetico. La parte relativa alla formazione e propagazione delle portate non viene quindi utilizzata.

Il modello FEST-EWB attua il calcolo del bilancio energetico e idrologico e in particolare risolve il budget energetico tra la superficie del suolo e gli strati inferiori dell'atmosfera, cercando il valore di LST ("Land Surface Temperature" o temperatura del suolo superficiale) che chiude l'equazione del bilancio energetico in ogni pixel della superficie del bacino. Tale valore di LST viene indicato come RET (Representative Equilibrium Temperature). L'applicazione del modello a scala di bacino o di distretto irriguo, fornisce un valido contributo alla corretta e più efficiente gestione delle risorse idriche ai fini dell'irrigazione.

Il modello FEST-EWB nasce dallo sviluppo, ai fini del calcolo dell'evapotraspirazione, del modello a parametri distribuiti FEST-WB (Flash-flood-Event-based Spatially distributed

rainfall-runoff Transformation-including Water Balance) (Corbari et al, 2011), ideato come strumento di calcolo dell'idrogramma di piena alla sezione di chiusura di un bacino idrografico a partire da dati di precipitazione e dalle caratteristiche idro-morfologiche del bacino in questione.

CAPITOLO 2

INQUADRAMENTO TERRITORIALE, DATI METEOROLOGICI E IDROLOGICI

L'area in esame è una cospicua parte del Consorzio di Bonifica della Capitanata oggetto di studio è situato in sud Italia, nella regione Puglia, vicino a Foggia.

Il Consorzio per la Bonifica della Capitanata opera su un comprensorio di 441.000 ettari (dal torrente Saccione, che segna il confine con il Molise al fiume Ofanto che delimita la provincia di Foggia da quella di Bari). Per trasformare l'agricoltura e renderla irrigua agli inizi degli anni '60 il Consorzio, con il sostegno finanziario della Cassa per il Mezzogiorno, ha programmato ed in parte realizzato tre schemi idrici: Fortore, Sinistra Ofanto e Carapelle, su una superficie di 200.000 ettari. Nei decenni successivi, per rispondere alle esigenze ed alle richieste di acqua per usi potabili, civili e industriali, le dotazioni e le ripartizioni intersettoriali sono state riviste ed adeguate alla domanda, penalizzando, inevitabilmente, il settore primario unico ed originario destinatario delle risorse immagazzinate.

Tenuto conto che da un lato la domanda di acqua potabile è in costante aumento e che dall'altro il settore industriale sollecita a questo Ente cospicui incrementi di erogazione a suo servizio, si avverte, pressante, la drammaticità dei ritardi in termini di approvvigionamento (Consorzio di Bonifica della Capitanata, 2017).

In questo scenario si colloca l'importanza del lavoro svolto in questa tesi, che si è concentrato sulla parte più estesa: il Comprensorio di Fortore.

Esso è riportato in azzurro nella Figura 2-1, dove lo si può riconoscere nei dintorni di Foggia. L'area è prevalentemente pianeggiante, ad una quota di 80 m.s.l.m., utilizzata prevalentemente a scopo agricolo di ortaggi e grano.

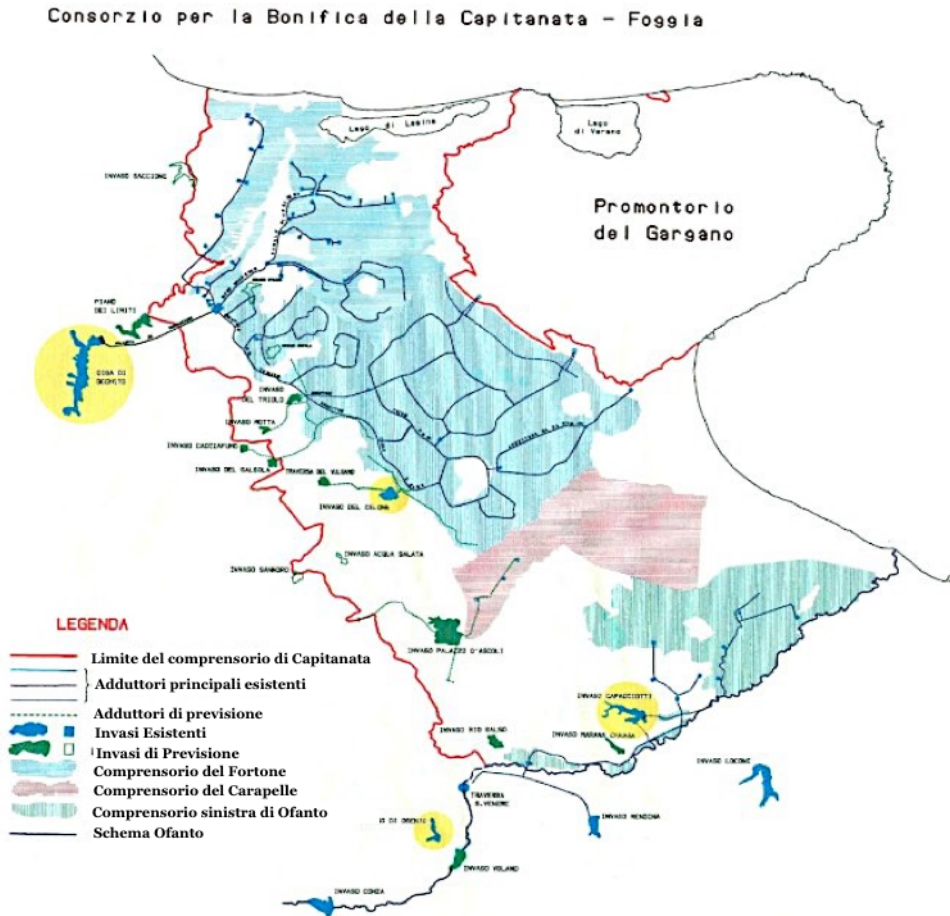


Figura 2-1: Inquadramento dell'area del Consorzio di Bonifica della Capitanata di Foggia

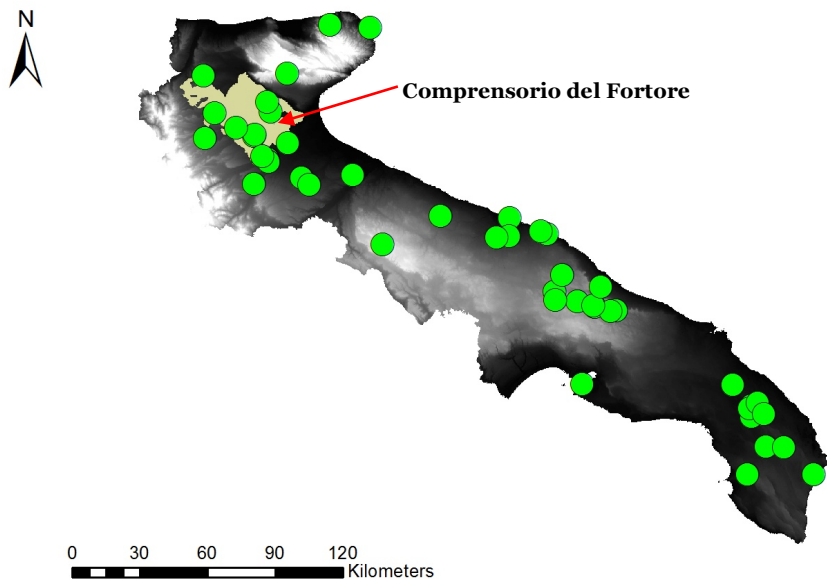


Figura 2-2: Regione Puglia, con evidenziate le stazioni di misura e il comprensorio esaminato

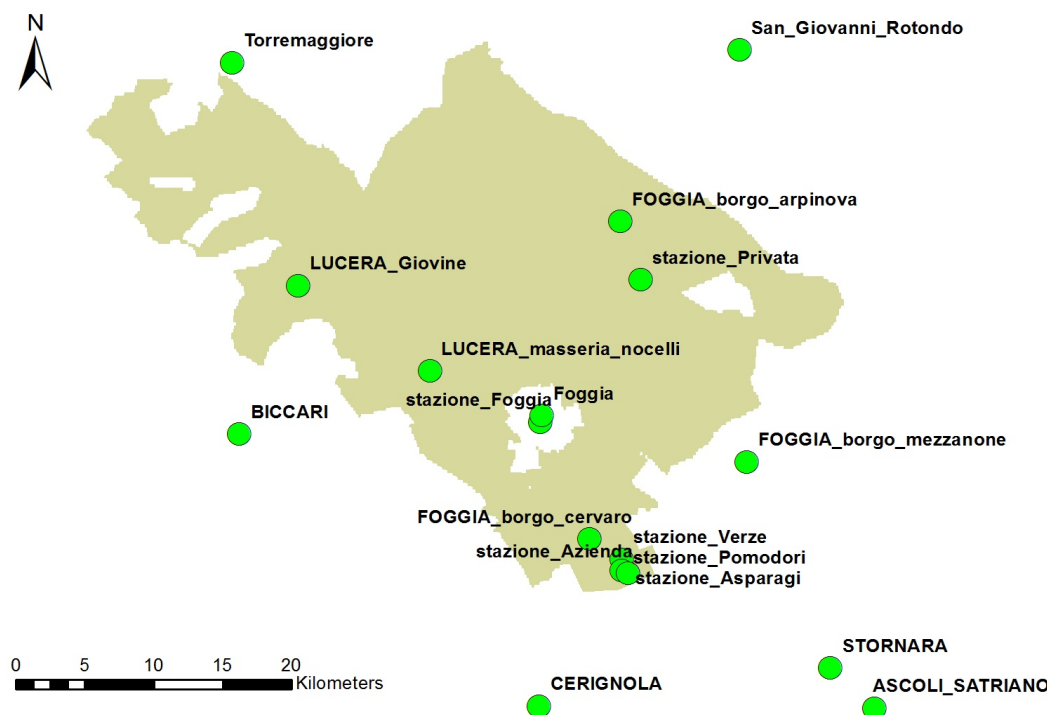


Figura 2-3: Superficie del comprensorio irriguo simulata

2.1 Reperimento dati: stazioni meteo

Nella prima parte del lavoro di tesi, ci si è concentrati sulla raccolta dei dati disponibili dalle stazioni meteorologiche per la misura di pioggia, temperatura dell'aria, radiazione incidente, umidità relativa e vento, necessarie alla modellazione idrologica.

In particolare si sono considerate da un minimo di 39 ad un massimo di 48 stazioni sparse attorno al comprensorio oggetto di studio. In particolare l'utilizzo delle 48 stazioni è stato utile nel reperimento di valori di precipitazione a causa della natura estremamente localizzata del fenomeno. L'elenco delle stazioni con le relative coordinate proiettate secondo il sistema di riferimento **WGS 1984 UTM zone 33N**, è riportato nella Figura 2-2 e Figura 2-3.

I dati rilevati dalle stazioni di Bari e Foggia sono stati forniti da ARPA, mentre quelli relativi ai campi di asparagi, verze e pomodori provengono da stazioni Eddy Covariance installate dal Politecnico di Milano. Le 9 stazioni supplementari considerate per la precipitazione sono state rese disponibili dal Consorzio per la Bonifica della Capitana Foggia.

Meteo Network è un'associazione privata che collabora con il Politecnico di Milano, che ha fornito i dati provenienti da stazioni di misura private che rispettano standard di affidabilità, al fine di incrementare la densità della rete di misura.

L'elenco di tutte le stazioni di misura utilizzate in questo elaborato di tesi, è disponibile in Tabella 2-1.

Questa raccolta di dati provenienti da una serie di stazioni di misura, si è resa necessaria per colmare i dati mancanti durante alcuni periodi e per validare ulteriormente i dati dalle altre stazioni. E' strettamente necessario che si abbia almeno un valore per ogni istante della simulazione, altrimenti il programma si bloccherebbe.

ENTE GESTORE	STAZIONE	X (EST)	Y (NORD)	TIPOLOGIA STAZIONI
ARPA PUGLIA	stazione_Foggia	545819	4589475	Meteo
	stazione_Bari	658989.44	4553466.85	Meteo
POLITECNICO DI MILANO	Stazione Azienda Asparagi	551926.26	4578481.39	Eddy Covariance
	Stazione Azienda Verze	551747.1	4579289.68	Eddy Covariance
	Stazione Azienda Pomodori	551754.43	4578473.33	Eddy Covariance
AZIENDA PRIVATA	stazione_Azienda	552224	4578223.5	Meteo
POLITECNICO DI MILANO	Stazione Consorzio Pomodori	553133	4600073	Eddy Covariance
STAZIONI PRIVATE METEO NETWORK	Terlizzi	628424.3	4554316.5	Meteo
	Locorotondo	696550.9	4514127.9	Meteo
	Foggia	545932.8	4589969.4	Meteo
	Putignano	678785.4	4520938.3	Meteo
	Cisternino	706056.2	4512619.9	Meteo
	Cisternino	703666.2	4512488.8	Meteo
	Lecce	766031.2	4470775.3	Meteo
	Soletto	772456.5	4452647.4	Meteo
	Squinzano	757877.9	4479923.7	Meteo
	Alberobello	688960.3	4516782.8	Meteo
	Mola_di_Bari	675564.2	4546478.6	Meteo
	Lecce	793608.1	4440416.2	Meteo
	Lequile	766024.8	4465757.5	Meteo
	Bari	602573.9	4541694.1	Meteo
	Tuglie	764277.8	4440536.3	Meteo
	Taranto	691155.1	4480265.9	Meteo
	Vieste	597079.2	4637114.6	Meteo
Noci	679159	4517192.3	Meteo	
San_Giovanni_Rotondo	560301.5	4617165.2	Meteo	

	Castrignano_de_Greci	780612.9	4452278.7	Meteo
	Valenzano	658560.8	4545341.7	Meteo
	Lecce	765116.8	4469483.2	Meteo
	Lecce	768769.1	4472094.4	Meteo
	Locorotondo	696153.6	4514923.2	Meteo
	Fasano	699299.5	4523020.1	Meteo
	Cavallino	771523.5	4467076.6	Meteo
	Castellana_Grotte	682288.2	4528395.8	Meteo
	Bitritto	653259.8	4544777.6	Meteo
	Vico_del_Gargano	579319.2	4638563.2	Meteo
	Torremaggiore	523442	4616210.8	Meteo
	San_Ferdinando_di_Puglia	589587.9	4572515.4	Meteo
	Mola_di_Bari	672837.2	4547650.4	Meteo
CONSORZIO PER LA BONIFICA DELLA CAPITANATA FOGGIA	FOGGIA_borgo_arpinova	551629.25	4604410.45	Meteo
	LUCERA_masseria_nocelli	537818.98	4593283.93	Meteo
	LUCERA_Giovine	528240.66	4599623.84	Meteo
	BICCARI	523944.91	4588598.75	Meteo
	FOGGIA_borgo_mezzanone	560832.94	4586532.81	Meteo
	FOGGIA_borgo_cervaro	549382.71	4580771.07	Meteo
	STORNARA	566916.54	4571196.91	Meteo
	CERIGNOLA	545744.23	4568349.88	Meteo
	ASCOLI_SATRIANO	570108.94	4568204.6	Meteo

Tabella 2-1: Coordinate WGS 1984 UTM zone 33N delle stazioni Eddy Covariance e Meteo

I tipi di flussi misurati cambiano a seconda del tipo di stazione disponibile e sono riferiti ai principali fattori del bilancio idrologico.

Per le stazioni meteo si sono resi disponibili i seguenti parametri:

- Temperatura dell'aria
- Umidità relativa
- Precipitazione
- Velocità del vento
- Direzione del vento
- Pressione atmosferica
- Radiazione solare globale

I dati puntuali raccolti dalle stazioni verranno georeferenziati e inseriti nel programma FEST e permetteranno di effettuare i calcoli sull'intero bacino di interesse.

L'utilizzo di molte stazioni è giustificato dall'aumento di accuratezza dei risultati ottenuti.

Tuttavia è importante specificare che si è resa necessaria un'accurata analisi di tutti i dati disponibili per eliminare i valori impossibili o quelli non attendibili, come si parlerà nel capitolo 2.3.

2.2 La tecnica Eddy Covariance

La stazione Eddy Covariance consente di misurare i flussi turbolenti di calore latente e sensibile, radiazione netta e flusso di calore nel suolo riguardanti un qualunque ecosistema. Tale tecnologia ha iniziato a svilupparsi negli anni '80 esclusivamente a fini micrometeorologici ossia lo studio dettagliato degli strati atmosferici immediatamente al di sopra del suolo e la loro interazione con esso; attualmente, grazie a un continuo sviluppo tecnologico che ha garantito un miglioramento della strumentazione e una metodologia più rigorosa, il metodo viene applicato in varie discipline come il monitoraggio ambientale, l'idrologia e l'agronomia.

Gli strumenti principali, che poi danno il nome alla tecnica Eddy Covariance, sono il gas analyzer e l'anemometro sonico che accoppiati forniscono le stime dei flussi turbolenti all'interno dello strato limite superficiale, grazie alle covarianze tra la velocità verticale del vento e la concentrazione di vapore acqueo per il calore latente e tra la velocità verticale del vento e la temperatura dell'aria per il calore sensibile (C Corbari, 2012). Dall'analisi dei flussi turbolenti è possibile determinare gli scambi gassosi e idrici che avvengono tra ecosistema, suolo e atmosfera, potendo così determinare essenzialmente due importanti aspetti di un ecosistema:

1. i flussi idrici che caratterizzano l'ecosistema in esame
2. lo sviluppo nel tempo di tale ecosistema.

L'importanza della valutazione dei flussi idrici di un ecosistema è assai evidente in campo agricolo in quanto consente di determinare i quantitativi di acqua in ingresso e in uscita e quindi un'eventuale quantitativo di risorsa idrica da introdurre all'interno dell'ecosistema mediante l'irrigazione. Questo aspetto risulta molto importante soprattutto in quelle zone caratterizzate da clima piuttosto siccitoso in cui, come nel caso in esame, è necessario più che altrove evitare sprechi di acqua.

Il vantaggio della tecnica di Eddy Covariance è sicuramente quella di consentire tale monitoraggio senza interferire con l'ecosistema e di disporre di dati praticamente in tempo reale. Essa calcola i flussi esclusivamente di tipo turbolento attraverso una serie di strumenti high tech di seguito illustrati, e necessita una complessa analisi dei dati acquisiti.

2.2.1 Stazione Eddy Covariance: dettagli tecnici

Attraverso la stazione Eddy Covariance è possibile rilevare le grandezze da cui calcolare i flussi turbolenti e anche altri parametri fisici di interesse.

Per questa tipologia di stazioni, sono stati misurati e resi disponibili i seguenti parametri:

- Velocità del vento
- Umidità relativa RH
- Temperatura dell'aria T_a
- Temperatura superficiale del suolo LST
- Radiazione netta R_n
- Calore sensibile H
- Calore latente LE
- CO_2
- Flusso di calore nel terreno G
- Radiazione in ingresso R_{IN}
- Radiazione in uscita R_{OUT}
- Umidità nel terreno SM (a tot. centimetri di profondità, in genere 20)
- Temperatura del terreno (a tot. centimetri di profondità)

La stazione è dotata di vari strumenti che si possono suddividere in due categorie: sensori di aria e sensori di suolo. Fanno parte dei sensori di aria:

- l'anemometro sonico tridimensionale per la misura delle tre componenti cartesiane della velocità del vento e la temperatura sonica;
- il gas analyzer per la misura della concentrazione di vapore acqueo e anidride carbonica nell'atmosfera;
- il radiometro a quattro componenti per la misurazione della radiazione ad onde corte e lunghe incidente proveniente dal sole e dall'atmosfera, la radiazione a onde corte e lunghe riflessa e/o emessa dalla superficie del suolo;
- L'IRTS (Infra Red Temperature Skin) per la misura della temperatura della superficie del suolo;
- il termo igrometro per la misura dell'umidità relativa dell'aria e della temperatura dell'aria.

Fanno parte dei sensori del suolo:

- le sonde TDR (Time domain reflectometer) per la misura dell'umidità nel suolo; l'heat flux plate per la misura dei flussi di calore nel suolo;
- le termocoppie per la misura della temperatura del suolo al di sotto della superficie.

La strumentazione è alimentata da un pannello fotovoltaico di cui la stazione è dotata. Ciò da un lato permette alla stazione di non dipendere dalla rete elettrica, dall'altro lato, invece, in caso di prolungati periodi di scarso irraggiamento solare, tipicamente durante le notti nei mesi invernali, si potrebbe verificare lo spegnimento temporaneo della stazione e quindi la mancata acquisizione dei dati per alcuni periodi. In effetti questo è avvenuto più volte nell'arco temporale scelto per l'analisi.

2.3 Problematiche riscontrate e validazione

Durante la fase di pre-processing delle informazioni raccolte dalle stazioni meteorologiche e Eddy Covariance, sono stati affrontati diversi aspetti problematici, dovuti principalmente a:

- Malfunzionamenti delle stazioni
- Adeguamento nella frequenza delle misurazioni
- Durata di raccolta delle informazioni

Ogni punto è stato analizzato in dettaglio nei capitoli che seguono.

2.3.1 Malfunzionamenti delle stazioni

Durante l'acquisizione dei dati, sono state riscontrate alcune problematiche dovute ad una serie di malfunzionamenti delle stazioni di misura.

In certi periodi i dati risultano non affidabili o del tutto mancanti, creando dei buchi temporali in cui si è avuta totale o parziale assenza di informazioni. Questo è il motivo per cui si è scelto di procedere acquisendo i dati dal maggior numero di stazioni possibile, aumentando di conseguenza l'affidabilità dei dati utilizzati e colmando così i periodi mancanti.

Per rendere i dati robusti, si è reso necessario sottoporli ad una procedura di validazione, che ha permesso di eliminarne gli incongruenti e fuori soglia. I criteri per la validazione sono stati in alcuni casi definiti direttamente dall'ente che ha effettuato le misurazioni, ovvero ARPA Puglia, mentre negli altri casi sono stati dettati dall'esperienza maturata.

Un metodo efficace utilizzato per determinare rapidamente i valori anomali è stato di graficarli e confrontarli con gli andamenti attesi.

Per le grandezze di cui si conosceva fisicamente il range possibile, si è provveduto in maniera diretta all'eliminazione dei valori impossibili. Lo stesso vale per i dati che sono stati acquisiti al di fuori della scala di misura dello strumento stesso.

Nei casi di assenza totale del dato, dopo essere stato individuato precisamente il periodo mancante, si è operato imponendo il valore "-9999", che rappresenta per il codice FEST l'assenza di valore.

Lo scopo di ciò è ottenere files che possano essere elaborati senza discontinuità temporali, garantendo per ogni momento nel periodo di analisi, almeno un dato effettivamente misurato e validato. Infatti, nel caso in cui il programma ricevesse tutti dati nulli in un certo istante temporale, esso si bloccherebbe. Per questo motivo è necessario avere una continuità dei dati in tutto l'arco temporale analizzato.

2.3.2 Adeguamento nella frequenza delle misurazioni

Le misurazioni raccolte dalle stazioni ARPA di Bari e Foggia sono disponibili per una cadenza semioraria, ovvero di 30 minuti, periodo di tempo considerato sufficientemente piccolo da cogliere le variazioni dei fenomeni.

Non è stato così invece per le stazioni private facenti parte di Meteo Network, per le quali la cadenza era oraria.

Per rendere congruenti i valori orari a quelli con cadenza semioraria, si sono mediati tramite Matlab i due valori orari successivi fra loro, aggiungendo il valore intermedio così ottenuto in modo tale da non compromettere il risultato complessivo ma da rendere la cadenza congrua agli altri dati di input disponibili.

Un'altra conversione è stata attuata per i dati ottenuti dalla stazione posta in azienda, denominata "stazione_Azienda", disponibili con una frequenza di 5 minuti. Per poter adattare questi ultimi dati agli altri, si è reso necessario effettuare un'operazione di media dei valori ogni 30 minuti. Si è potuto fare ciò per tutte le forzanti, ad eccezione della precipitazione, che è stata sommata per ogni intervallo temporale di 30 minuti.

Infine, per i dati pluviometrici reperiti dalle stazioni del Consorzio per la Bonifica della Capitanata di Foggia, essendo queste a cadenza giornaliera, si è deciso di suddividere il dato disponibile per avere una precipitazione uniforme durante l'intero arco della giornata.

Nella Tabella 2-2 è riassunto quanto sopra descritto.

ENTE GESTORE	STAZIONE	CADENZA DELLE MISURAZIONI
ARPA PUGLIA	Foggia	semioraria
	Bari	semioraria
POLITECNICO DI MILANO	Stazione Azienda Asparagi	semioraria
	Stazione Azienda Verze	semioraria
	Stazione Azienda Pomodori	semioraria

AZIENDA PRIVATA	Azienda	ogni 5 minuti
POLITECNICO DI MILANO	Stazione Consorzio Pomodori	semioraria
STAZIONI PRIVATE METEO NETWORK	Tutte le stazioni MN	oraria
CONSORZIO PER LA BONIFICA DELLA CAPITANATA FOGGIA	Tutte le 9 stazioni utilizzate	giornaliera

Tabella 2-2: Riassunto frequenza di acquisizione dati dalle stazioni

2.4 Durata del periodo di osservazione

Il periodo scelto per la raccolta dei valori è dal 7 novembre 2013 al 25 settembre 2016, che si è considerato essere sufficientemente lungo per una buona analisi del caso. Inoltre in questo periodo ricadono pienamente le fasi della semina, crescita e raccolta per tutte e tre le colture. Le misurazioni sono intrinsecamente affette da lacune, errori di misurazione e valori anomali di cui abbiamo già parlato nel capitolo 2.3.1.

Nella Tabella 2-3 sono elencati i periodi di acquisizione dei dati per ognuna delle stazioni utilizzate. Come si può vedere chiaramente nella rappresentazione grafica proposta in Figura 2-4, le disponibilità di dati non sono omogenee per i 4 campi. Risulta infatti che per il periodo occupato dalla piantagione di asparagi, i dati disponibili sono limitati alla Stazione Azienda Asparagi e Stazione Bari.

ENTE GESTORE	STAZIONE	DISPONIBILITA' DATI RACCOLTI
ARPA PUGLIA	Foggia	dal 16/04/2015 ore 8:30, al 30/06/2015 ore 23:30
	Bari	dal 1/01/2014 ore 0:00, al 31/03/2016 ore 23:30
POLITECNICO DI MILANO	Stazione Azienda Asparagi	dal 7/11/2013 ore 13:30, al 11/06/2015 ore 6:00
	Stazione Azienda Verze	dal 25/08/2015 ore 10:30, al 11/05/2016 ore 14:00
	Stazione	dal 11/05/2016 ore 17:00, al 25/09/2016 ore 18:00
AZIENDA	Azienda	dal 29/07/2015 ore 23:00, al 19/07/2016 ore 12:30

POLITECNICO DI MILANO	Stazione Consorzio Pomodori	dal 12/05/2016 ore 10:30, al 25/09/2016 ore 18:00
STAZIONI PRIVATE METEO NETWORK	Terlizzi	dal 11/01/2015 ore 0:00, al 25/09/2016 ore 23:30
	Locorotondo	
	Foggia	
	Putignano	
	Cisternino	
	Cisternino	
	Lecce	
	Soletto	
	Squinzano	
	Alberobello	
	Mola di Bari	
	Lecce	
	Lequile	
	Bari	
	Tuglie	
	Taranto	
	Vieste	
	Noci	
	San Giovanni	
	Rotondo	
	Castrignano de	
	Greci	
	Valenzano	
	Lecce	
	Lecce	
	Locorotondo	
	Fasano	
	Cavallino	
Castellana		
Grotte		
Bitritto		
Vico del		
Gargano		

	Torremaggiore	
	San Ferdinando di Puglia	
	Mola di Bari	

Tabella 2-3: Disponibilità temporale dati raccolti dalle stazioni



Figura 2-4: Durata periodo acquisizione dati delle stazioni

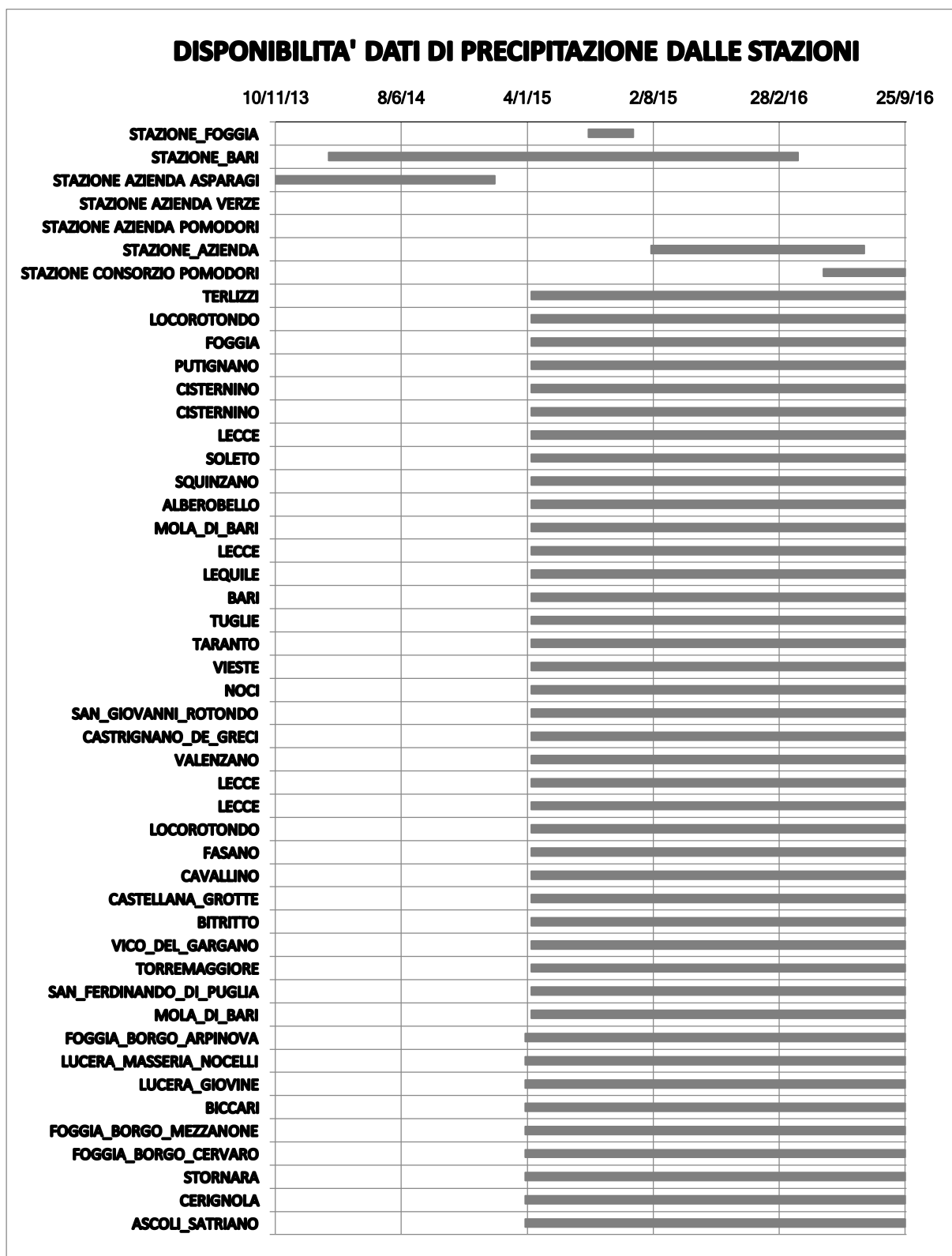


Figura 2-5: Disponibilità dati pluviometrici dalle 48 stazioni

CAPITOLO 3

DATI SPAZIALI IN INPUT AL MODELLO

FEST-EWB

Per il funzionamento del modello FEST-EWB applicato al caso in esame, è stato necessario creare delle matrici rappresentanti le caratteristiche del Consorzio di Bonifica della Capitanata di Foggia. Si è dunque resa necessaria un'analisi ed elaborazione dei dati con il software ARCGIS, modellando aspetti del consorzio in base alle caratteristiche altimetriche e idrografiche e alle proprietà del terreno, tramite la sua tessitura e copertura del suolo. Alcune di queste proprietà sono state modificate durante la fase di calibrazione del modello, in modo da ottenere una migliore corrispondenza tra i valori osservati localmente nei quattro punti in cui ho le stazioni Eddy Covariance e i valori calcolati negli stessi punti tramite il programma FEST-EWB.

3.1 Caratteristiche e proprietà del suolo

Come introdotto all'inizio del capitolo, una parte importante della modellazione riguarda la raccolta e l'analisi dei dati relativi alle caratteristiche e alle proprietà del suolo tramite il software ArcGis. Di seguito vengono riportate in dettaglio le elaborazioni prodotte.

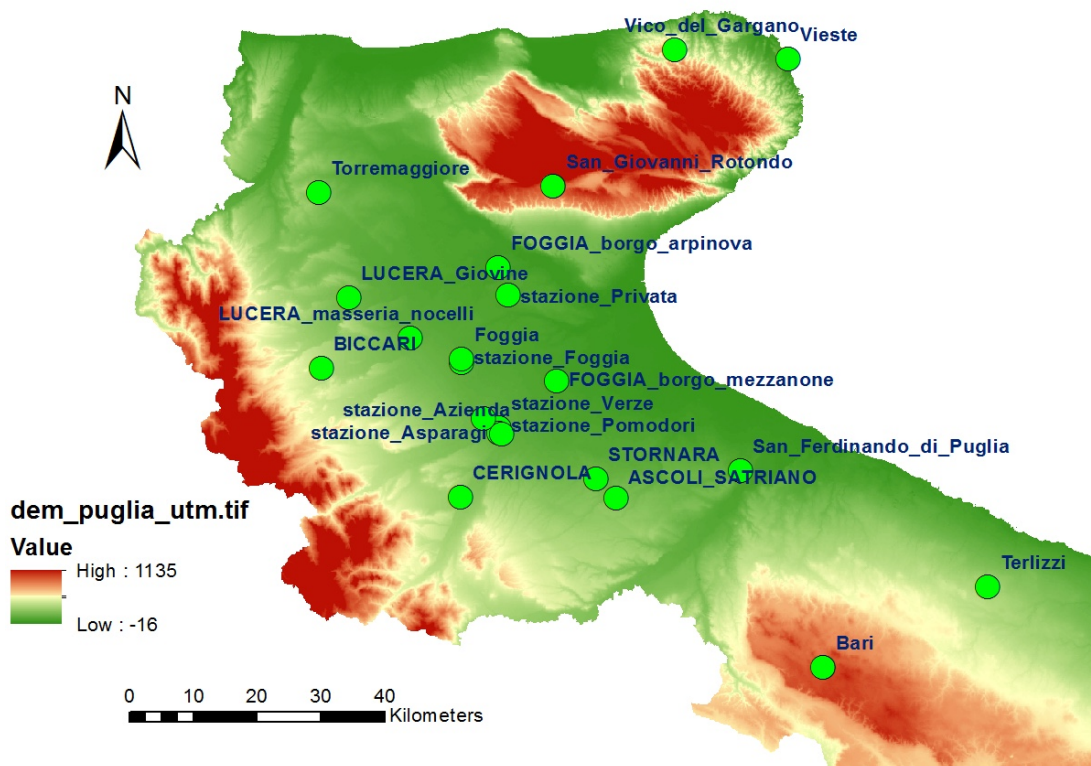


Figura 3-1: DEM Puglia: modello digitale delle quote del terreno nella zona del Consorzio di Bonifica della Capitanata di Foggia

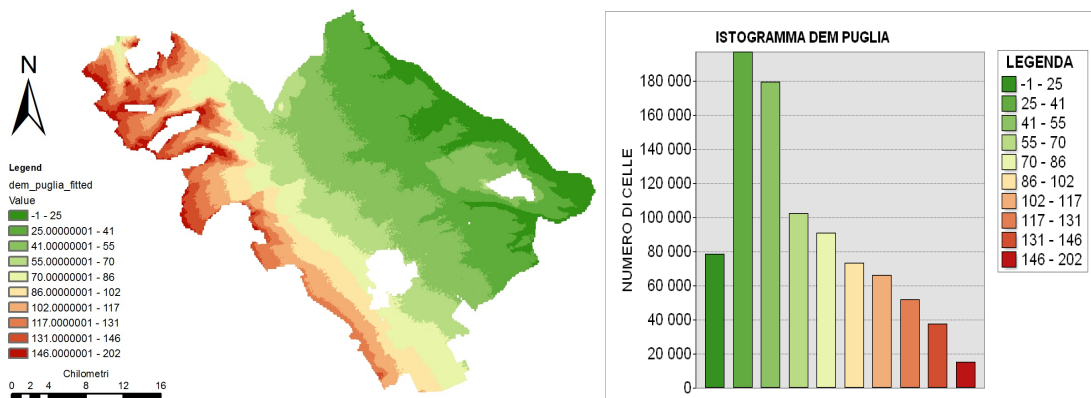


Figura 3-2: DEM dell'area del Consorzio di Bonifica della Capitanata di Foggia che è stata modellizzata in questa tesi tramite FEST-EWB.

Le matrici relative alle caratteristiche idrografiche ricavate a partire dal modello digitale delle quote del terreno, o "DEM", visibili in Figura 3-1 e Figura 3-2, sono:

- Pendenza (slope)
- Aree contribuenti (flow accumulation)

- Orientamento (aspect)
- Direzioni di deflusso del bacino considerato (flow direction)

Nelle figure seguenti sono riportate le caratteristiche sopracitate, ricavate con ArcGis partendo dal DEM della regione Puglia. Si può riconoscere che la zona analizzata è prevalentemente pianeggiante, con valori intorno ai 100 m. s. l. m.

A conferma di ciò, analizzando l'istogramma riportato in Figura 3-3, si può vedere come la pendenza predominante nel consorzio sia compresa tra 0 e 1°, quindi pianeggiante.

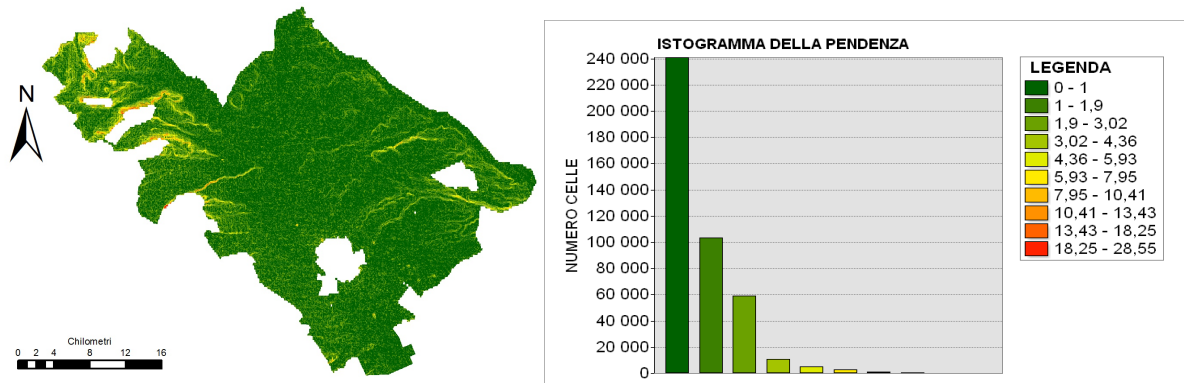


Figura 3-3: Pendenza [°] del Consorzio di Bonifica della Capitanata

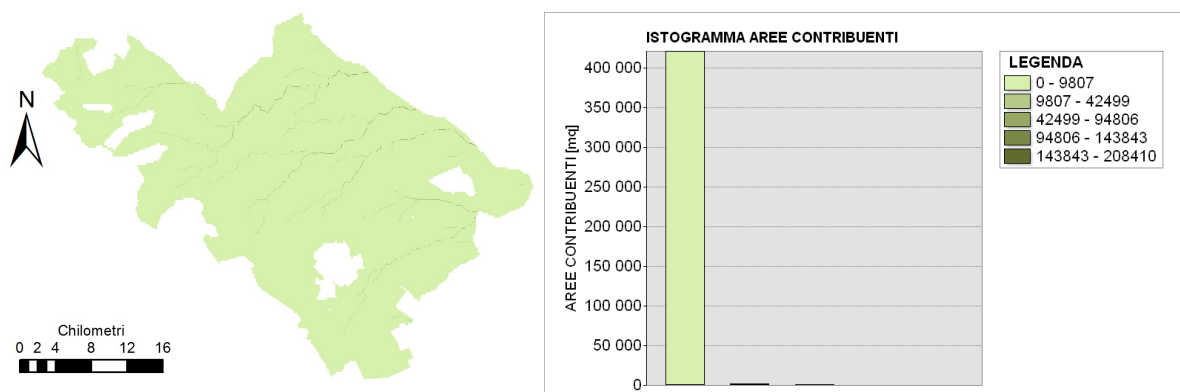


Figura 3-4: Aree contribuenti [m²]. Per ogni cella viene calcolato quante celle a monte drenano acqua su di essa esprimendo tale numero in m²

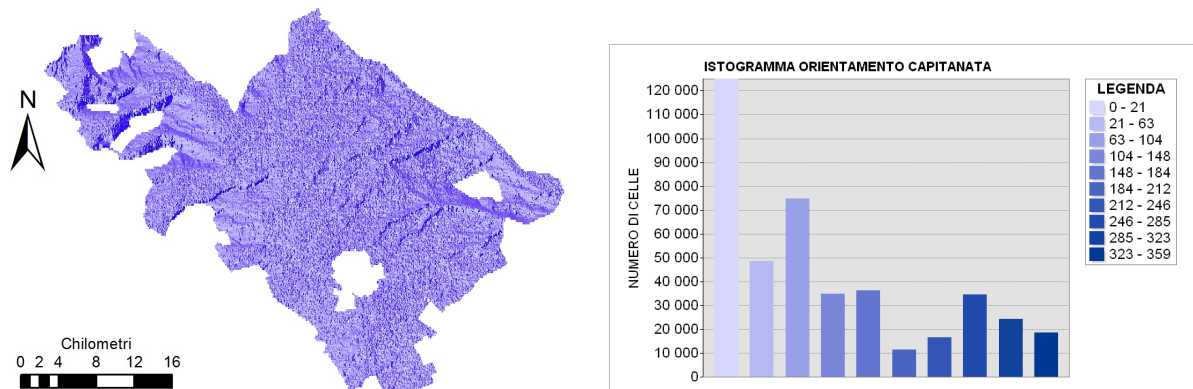


Figura 3-5: Orientamento [°]. Alla massima pendenza in direzione Nord viene assegnato il valore 0, mentre proseguendo in direzione oraria, si assegnano alle pendenze nelle altre direzioni valori via via crescenti fino a 360°

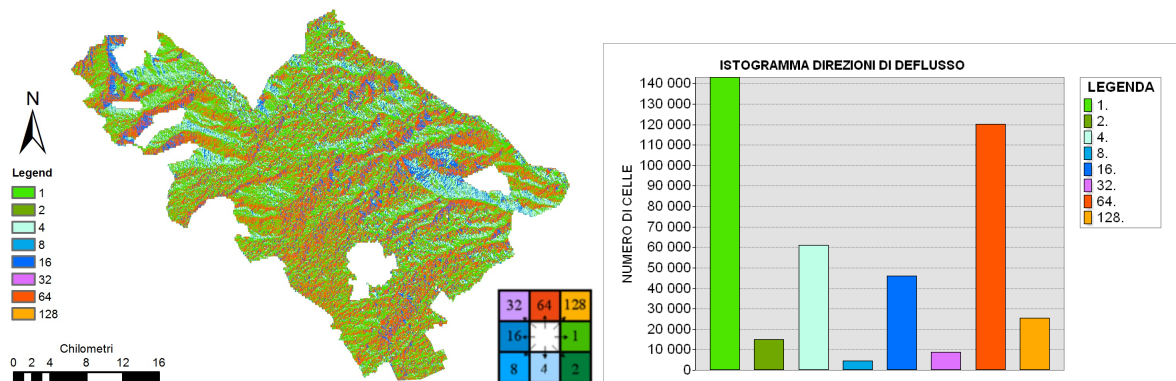


Figura 3-6: direzioni di deflusso del bacino considerato [-]. Per ogni cella del bacino, a seconda della direzione verso cui questa drena, si assegna il valore corrispondente seguendo lo schema riportato nella figura in basso a destra

Successivamente ci si è concentrati sulle proprietà del suolo e sono state create altre matrici in relazione alla tessitura del terreno, ovvero alla sua distribuzione granulometrica.

In particolare queste matrici sono:

- Capacità di campo (Field Capacity) [-]
- K saturazione [m/s]
- Distribuzione della dimensione dei vuoti (Brooks and Corey λ) [-]
- Bubbling Pressure [m]
- Punto di appassimento (Wilting Point) [-]
- Contenuto d'acqua residuo θ_{res} [-]
- Contenuto d'acqua a saturazione θ_{sat} [-]

La Capacità di campo (o Field Capacity) è il contenuto d'acqua a suzione pari a 33 kPa. Contenuti di acqua superiori alla capacità di campo fanno sì che l'acqua in eccesso percoli in profondità rapidamente senza poter essere assorbita dalle radici delle piante.

La conduttività idraulica a saturazione (o K_{sat}) misura la facilità con cui l'acqua percola all'interno del mezzo poroso. Essa ha la dimensione di una velocità. Rispetto al concetto di permeabilità, questa differisce in quanto considera non solo il volume occupato dai vuoti ma anche il loro grado di interconnessione, caratteristica essenziale perché possa avvenire il flusso. Più dei terreni sono argillosi e più sono difficili da attraversare, presentando dunque una conduttività idraulica minore.

La distribuzione della dimensione dei vuoti descrive l'infiltrazione all'interno del terreno e viene detta anche Indice di Brooks & Corey.

Il punto di entrata dell'aria (o bubbling pressure) è la pressione dell'aria (misurata in cm) necessaria a iniziare l'espulsione di acqua dalla matrice porosa inizialmente satura.

Il punto di appassimento (o Wilting Point) è il contenuto d'acqua a suzione pari a 1500 kPa. Al di sotto di tale valore di contenuto d'acqua le radici delle piante non riescono più a estrarre acqua dal terreno e la vegetazione muore.

Di seguito vengono riportate le mappe riferite alle matrici dei parametri appena descritti.

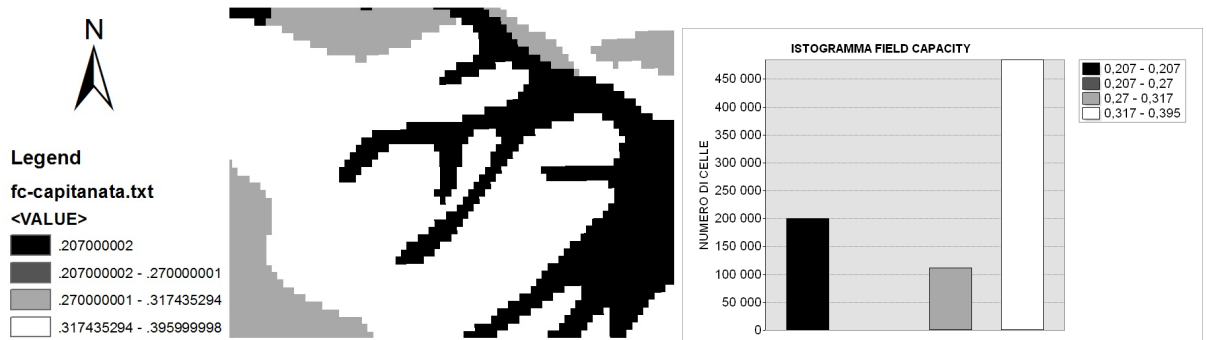


Figura 3-7: Capacità di campo [-]. Dall'istogramma riportato si può notare come sul Consorzio in esame, la maggior parte dei terreni abbia valori compresi tra 0.317 e 0.395.

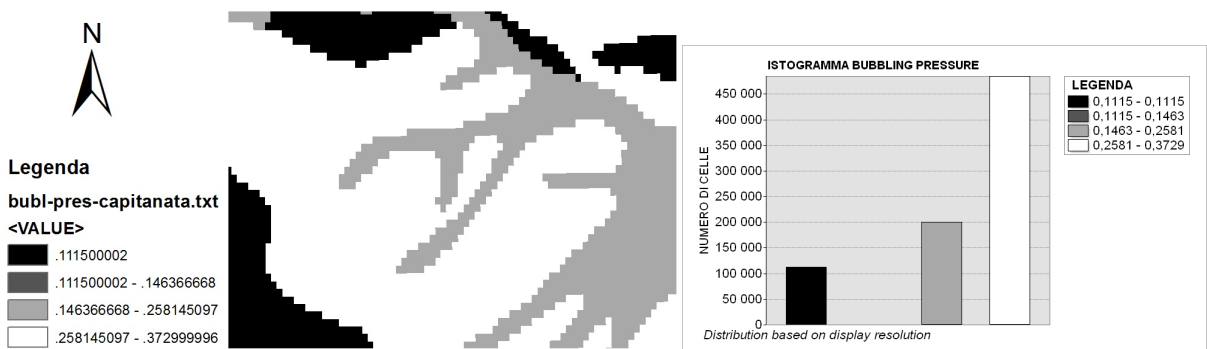


Figura 3-8: Bubbling Pressure [m]. Dall'istogramma riportato si può notare come sul Consorzio in esame, la maggior parte dei terreni abbia valori compresi tra 0.2581 e 0.3729.

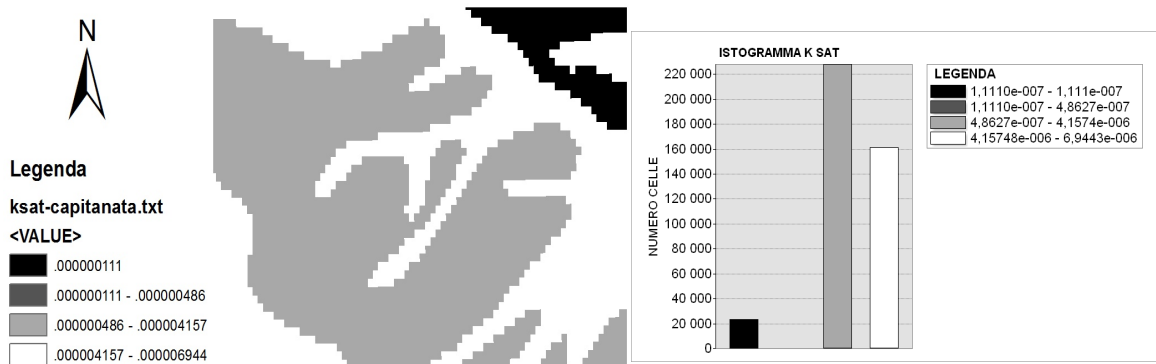


Figura 3-9: Conduttività idraulica a saturazione K_{sat} [m/s]. Dall'istogramma riportato si può notare come sul Consorzio in esame, la maggior parte dei terreni abbia valori compresi tra $4.8627e-07$ e $4.1574e-06$.

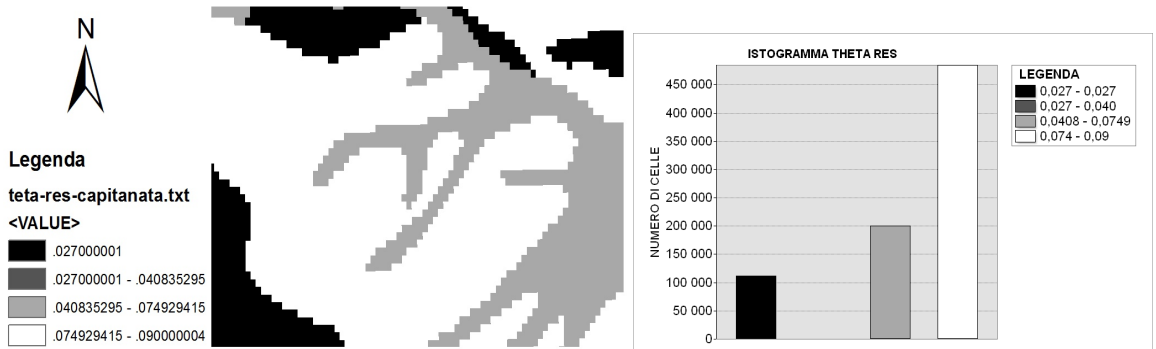


Figura 3-10: Contenuto d'acqua residuo θ_{res} [-]. Dall'istogramma riportato si può notare come sul Consorzio in esame, la maggior parte dei terreni abbia valori compresi tra 0.074 e 0.09.

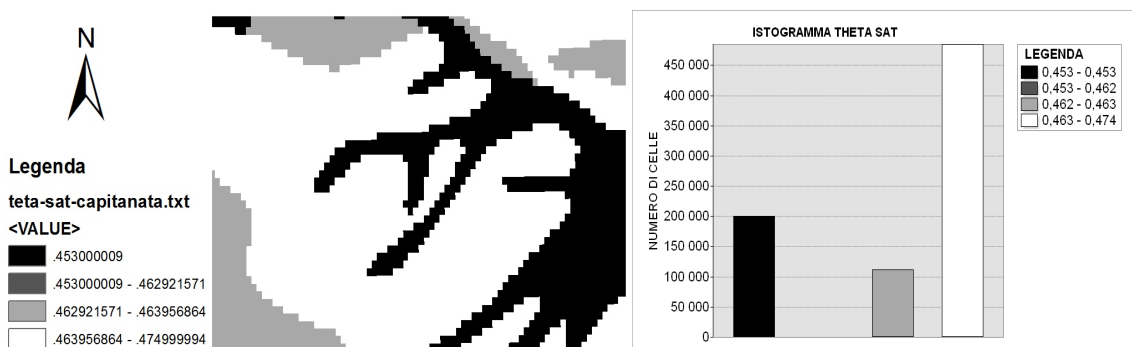


Figura 3-11: Contenuto d'acqua a saturazione θ_{sat} [-]. Dall'istogramma riportato si può notare come sul Consorzio in esame, la maggior parte dei terreni abbia valori compresi tra 0.463 e 0.474.

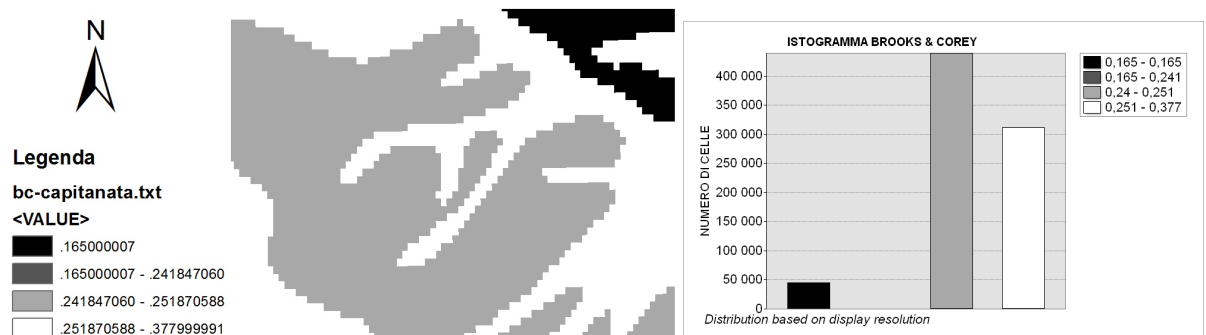


Figura 3-12: Distribuzione della dimensione dei vuoti (Brooks and Corey λ) [-]. Dall'istogramma riportato si può notare come sul Consorzio in esame, la maggior parte dei terreni abbia valori compresi tra 0.24 e 0.251.

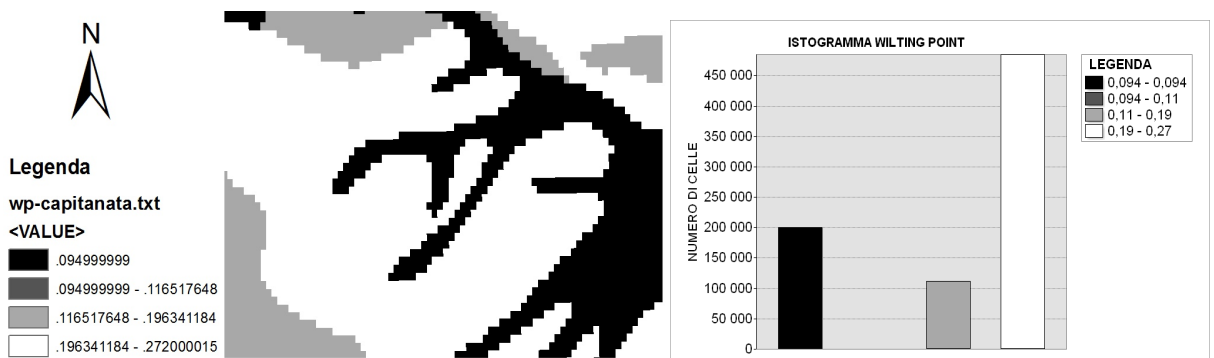


Figura 3-13: Punto di appassimento (Wilting Point) [-]. Dall'istogramma riportato si può notare come sul Consorzio in esame, la maggior parte dei terreni abbia valori compresi tra 0.19 e 0.27.

Il consorzio oggetto di studio è risultato essere composto prevalentemente da terreno franco-argilloso, franco-sabbioso, franco e argilloso. In Figura 3-14 sono riportate le classi definite in base alle percentuali di sabbia, limo e argilla presenti nel terreno e rappresentate dal triangolo di tessitura del suolo.

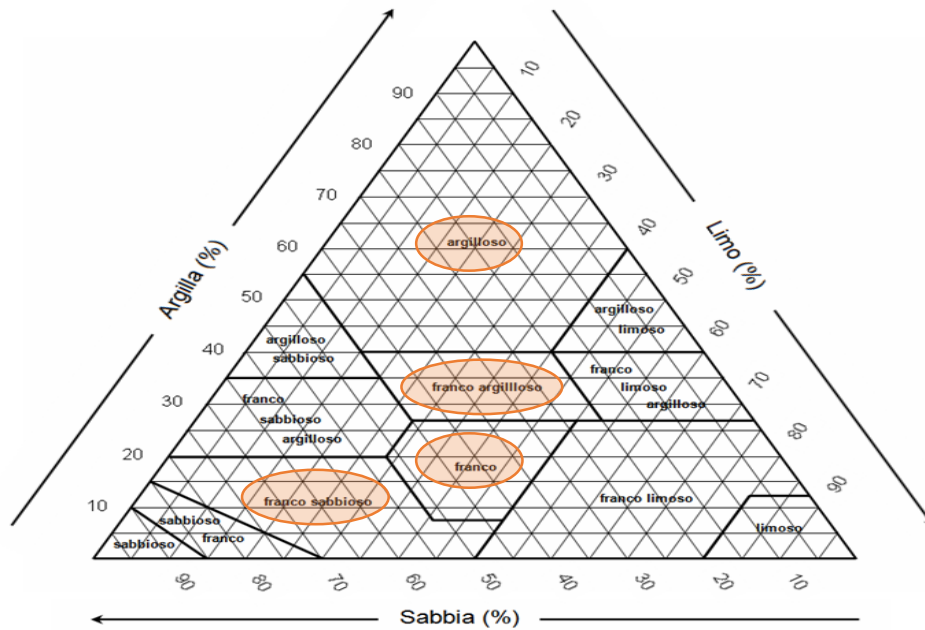


Figura 3-14: Tessitura del terreno

In base al tipo di utilizzo del terreno, è stata creata una matrice relativa al Curve Number CN. Il Curve Number (abbreviato CN) è un parametro che esprime il grado di permeabilità della superficie del suolo ed è proprio del metodo SCS-CN per il calcolo del ruscellamento superficiale. Varia da 0 (suolo completamente permeabile) a 100 (suolo totalmente impermeabile). La rappresentazione grafica del CN a scala di bacino è riportata nella Figura 3-15.

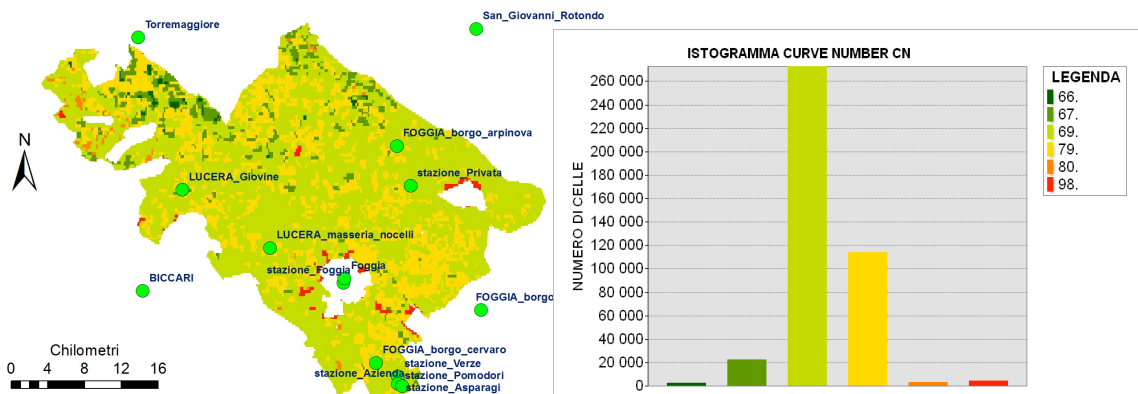


Figura 3-15: Distribuzione del Curve Number sul Consorzio

Da tabelle fornite e note da letteratura, è stato possibile determinare i valori dei parametri di interesse (valore medio e range di variazione), come mostrato in Tabella 3-1, che sono uguali

per tutti e 4 i campi in cui ho stazioni Eddy Covariance. Tali parametri sono stati calibrati nella fase successiva di calibrazione del modello FEST-EWB.

Parametro	Valore medio	range di variazione per la calibrazione
<i>Ksat</i> [m/s]	5.00E-07	-
<i>bubbling pressure</i> [m]	0.2589	0.058-1.157
θ_{RES} [-]	0.075	-0.024-0.174
θ_{SAT} [-]	0.464	0.409-0.519
<i>Brooks-Corey</i> [-]	0.242	0.070-0.414
<i>Wilting Point</i> [-]	0.197	0.115-0.279
<i>Field Capacity</i> [-]	0.318	0.25-0.386

Tabella 3-1: Proprietà dei suoli dei quattro campi Eddy

Nella Figura 3-15, i colori della legenda rappresentano i valori di Curve Number che sono descritti nella seguente tabella:

CURVE NUMBER	Descrizione
66	Zone boschive, colture permanenti
	<u>Boschi di latifoglie</u> : formazioni vegetali, costituite principalmente da alberi ma anche da cespugli e arbusti, nelle quali dominano le specie forestali e latifoglie. La superficie a latifoglie deve coprire almeno il 75% dell'unità, altrimenti è da classificare come bosco misto.
	<u>Colture arboree di specie a rapido accrescimento (pioppeti ecc.)</u>
	<u>Altri boschi di latifoglie</u>
	<u>Boschi di conifere</u> : formazioni vegetali costituite principalmente da alberi ma anche da cespugli e arbusti, nelle quali dominano le specie forestali conifere. La superficie a conifere deve coprire almeno il 75% dell'unità, altrimenti è da classificare come bosco misto. N.B. non vi sono comprese le conifere a rapido accrescimento
	<u>Boschi misti</u> : formazioni vegetali costituite principalmente da alberi ma anche da cespugli e arbusti. dove non dominano né le latifoglie né le conifere
	<u>Castagneti da frutto</u>

<p style="text-align: center; font-size: 24pt; font-weight: bold;">67</p>	<p>Zone caratterizzate da vegetazione arbustiva e/o erbacea</p> <p><u>“Brughiere e cespuglieti:</u> formazioni vegetali basse e chiuse, composte principalmente da cespugli, arbusti e piante erbacee (eriche, rovi, ginestre dei vari tipi ecc.). Vi sono comprese le formazioni a pino mungo.</p> <p><u>Aree a vegetazione sclerofilla:</u> ne fanno parte macchie e garighe. Le macchie sono associazioni di vegetali dense, composte da numerose specie arbustive miste, su terreni silicei acidi in ambiente mediterraneo. Le garighe sono associazioni cespugliose discontinue delle piattaforme calcaree mediterranee. Sono spesso composte da quercia coccifera, corbezzolo, lavanda timo, cisto bianco, ecc. Possono essere presenti rari alberi isolati.</p> <p><u>Aeree a vegetazione boschiva e arbustiva in evoluzione:</u> vegetazione arbustiva o erbacea con alberi sparsi. Formazioni che possono derivare dalla degradazione della foresta o da una rinnovazione della stessa per la ricolonizzazione di aree non forestali.”</p>
<p style="text-align: center; font-size: 24pt; font-weight: bold;">69</p>	<p>Seminativi, superfici coltivate regolarmente, arate e generalmente sottoposte ad un sistema di rotazione. Zone agricole eterogenee</p> <p><u>“Seminativi in aree non irrigue:</u> sono da considerare perimetri irrigui solo quelli individuabili per foto interpretazione, satellitare o aerea, per la presenza di canali e impianti di pompaggio. Cereali, leguminose in pieno campo, colture foraggiere, coltivazioni industriali, radici commestibili e maggesi. Vi sono compresi i vivai e le colture orticole, in pieno campo, in sella p sotto plastica, come anche gli impianti per la produzione di piante medicinali, aromatiche e culinarie. Vi sono comprese le colture foraggiere (prati artificiali) ma non i prati stabili.</p> <p><u>Seminativi in aree irrigue:</u> colture irrigate stabilmente e periodicamente grazie a un'infrastruttura permanente (canale di irrigazione, rete di drenaggio). La maggior parte di queste colture non potrebbe realizzarsi senza l'apporto artificiale dell'acqua. Non vi sono comprese le superfici irrigate sporadicamente.</p> <p><u>Risaie:</u> superfici utilizzate per la coltura del riso. Terreni terrazzati e dotati di canali di irrigazione.</p> <p><u>Colture annuali associate a colture permanenti:</u> colture temporanee come seminativi o prati in associazione con colture permanenti sulla stessa superficie, quando le particelle a frutteto(o altro) comprese nelle colture annuali non associate, rappresentano meno del 25% della superficie totale.</p> <p><u>Sistemi colturali e particelle complesse:</u> mosaico di piccoli appezzamenti con varie colture annuali, prati stabili e colture permanenti, occupanti ciascuno meno del 75% della superficie totale dell'unità. Vi sono compresi gli "orti per pensionati" e simili. Eventuali lotti superanti 25 ha sono da</p>

	<p>includere nelle zone agricole. <u>Aree agroforestali</u>: colture annuali o pascolo sotto copertura arborea composta da specie forestali.”</p>
<p style="text-align: center; font-size: 24pt;">79</p>	<p>Zone estrattive, discariche e cimiteri. Zone aperte con vegetazione rada o assente. Acque marittime.</p> <p>“<u>Aree estrattive</u>: estrazione di materiali inerti a cielo aperto (cava di sabbia o di pietre) o di altri materiali (miniere a cielo aperto). Ne fanno parte le cave di ghiaia, eccezion fatta, in ogni caso, per le estrazioni nei letti dei fiumi. Sono qui compresi edifici e le installazioni industriali associate. Rimangono escluse le cave sommerse, mentre sono comprese le superfici abbandonate o sommerse, ma non recuperate, comprese in aree estrattive. Le rovine archeologiche e non sono da includere nelle aree ricreative.</p> <p><u>Discariche</u>: discariche e depositi di miniere, industrie collettività pubbliche.</p> <p><u>Cantieri</u>: spazi in costruzione, scavi e suoli rimaneggiati.</p> <p><u>Spiagge dune e sabbie</u>: le spiagge, le dune e le distese di ambienti litorali e continentali (più larghe di 100 metri), compresi iletto sassosi dei corsi d'acqua a regime torrentizio.</p> <p><u>Rocce nude</u>: falesie, rupi, affioramenti</p> <p><u>Aree con vegetazione rada</u>: comprende steppe xerofile, le steppe alofile, le tundre e le aree calanchive in senso lato</p> <p><u>Aree percorse da incendi</u>: superfici interessate da incendi recenti. I materiali carbonizzati sono ancora presenti.</p> <p><u>Ghiacciai e nevi perenni</u>: superfici coperte da ghiacciai o da nevi perenni</p> <p><u>Lagune</u>: aree coperte da acque salate o salmastre, separate dal mare da barre di terra o altri elementi topografici simili. Queste superfici idriche possono essere messe in comunicazione con il mare in certi punti particolari, permanentemente o periodicamente</p> <p><u>Estuari</u>: parte terminale dei fiumi, alla foce, che subisce l'influenza delle acque</p> <p><u>Mari e oceani</u>: aree al di là del limite delle maree più basse”</p>
<p style="text-align: center; font-size: 24pt;">80</p>	<p>Zone verdi artificiali non agricole e prati stabili</p> <p>“<u>Aree verdi urbane</u>: spazi ricoperti di vegetazione compresi nel tessuto urbano. Ne fanno parte i cimiteri con abbondante vegetazione e parchi urbani.</p> <p><u>Aree sportive e ricreative</u>: aree utilizzate per camping, attività sportive, parchi di divertimento, campi di golf, ippodromi, rovine archeologiche e non ecc. Ne fanno parte i parchi attrezzati (aree dotate intensamente di attrezzature ricreative, da picnic etc, compresi nel tessuto urbano.</p> <p><u>Prati stabili</u>: superfici a copertura erbacea densa a composizione floristica rappresentata principalmente da graminacee, non soggette a rotazione,</p>

	sono per lo più pascolate ma il foraggio può essere raccolto meccanicamente. Ne fanno parte i prati permanenti, temporanei e le marcite. Sono comprese le aree con siepi. Le colture foraggere (prati artificiali inclusi) sono da classificare come seminativi."
98	<p>Zone urbanizzate, tessuto urbano continuo:</p> <p>"Spazi strutturati dagli edifici e dalla viabilità: gli edifici, la viabilità e le superfici ricoperte artificialmente occupano più dell'80% della superficie totale. La vegetazione non lineare e il suolo nudo rappresentano l'eccezione. Sono qui compresi i cimiteri senza vegetazione. Problema particolare degli abitati a sviluppo lineare: anche se la larghezza delle costruzioni che costeggiano la strada, compresa la strada stessa, raggiunge solo 75 m, a condizione che la superficie totale superi i 25 ha, queste aree saranno classificate come tessuto urbano continuo (o discontinuo se le aree sono discontinue)"</p>

3.2 Resistenza stomatica minima

Altro parametro importante è la resistenza stomatica (minima) rs_{min} , che è la resistenza imposta dagli stomi presenti sulla superficie delle foglie all'evaporazione dell'acqua verso l'atmosfera. Le piante infatti riescono a controllare la traspirazione dalle foglie aprendo o chiudendo gli stomi, che sono delle aperture microscopiche presenti sulla superficie fogliare, in modo da favorire la traspirazione della coltura. Questo parametro ha le dimensioni di una radiazione per unità di superficie.

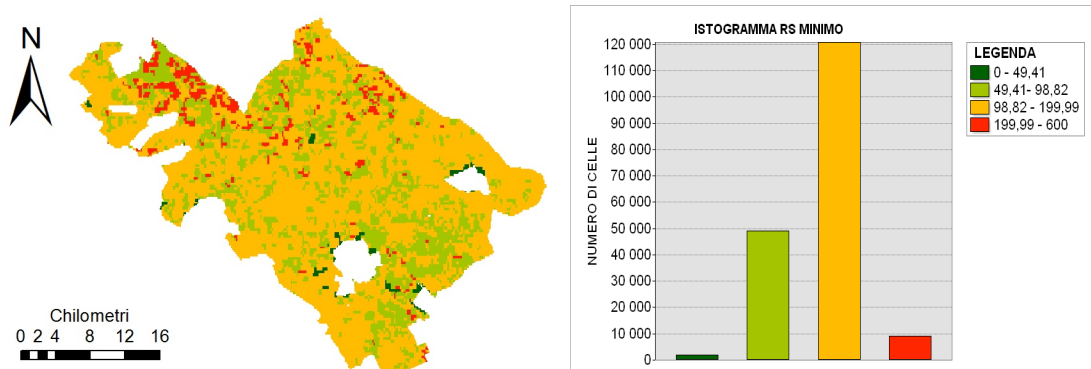


Figura 3-16: Resistenza stomatica minima rs_{min} [w/m^2]. Dall'istogramma riportato si può notare come sul Consorzio in esame, la maggior parte dei terreni abbia valori compresi tra 98.82 e 199.99.

3.3 Profondità di suolo idrologicamente attivo

Il dominio su cui opera il modello FEST-EWB non è a priori definito inferiormente e pertanto è necessario imporre un limite in questa direzione. Lo spessore di questo strato è denominato “profondità di suolo attivo”. Da un punto di vista modellistico funge da serbatoio che contiene l’acqua presente nei pori del terreno la quale può fuoriuscirne a causa sia della percolazione profonda sia dell’evapotraspirazione che agisce direttamente sull’interfaccia suolo-aria o attraverso il trasporto di acqua agli stomi fogliari tramite le radici delle piante che qui si sviluppano. Il criterio per definire la profondità di suolo attivo consiste nell’individuare la profondità entro la quale si sviluppano le radici della coltivazione in analisi facendo coincidere quest’ultima profondità con la profondità di suolo attivo.

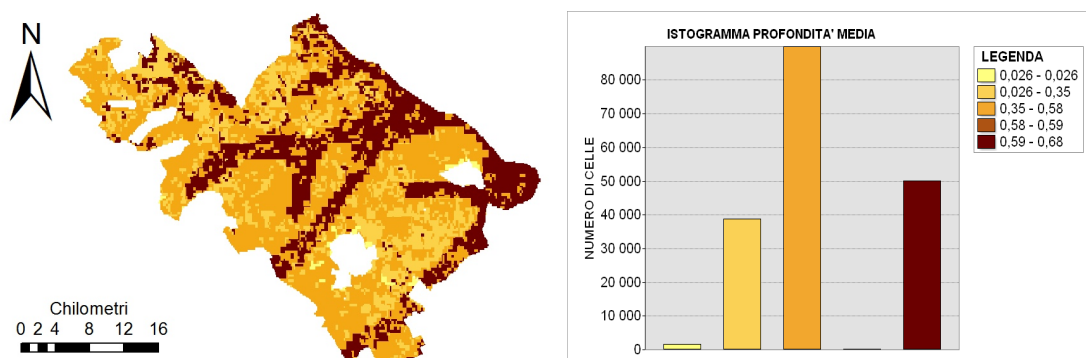


Figura 3-17: Profondità media di suolo attivo [m]. Dall’istogramma riportato si può notare come sul Consorzio in esame, la maggior parte dei terreni abbia valori compresi tra 0.35 e 0.58m.

3.4 Dati da satellite

All’interno del modello FEST-EWB rientrano anche parametri distribuiti propri della superficie, i quali sono ricavati dall’analisi di immagini satellitari. Questa parte è stata svolta in un altro elaborato di tesi (Stanganelli, 2016) e qui utilizzata come dato di input. Verrà dunque a titolo informativo proposta una breve descrizione del lavoro precedentemente svolto.

Le immagini satellitari provengono dal programma satellitare statunitense denominato Landsat, attivo dagli anni ’70 e in continuo sviluppo e aggiornamento. Tale programma è composto da un totale di otto satelliti, numerati da 1 a 8 e mandati in orbita nel corso degli anni, di cui a oggi restano in funzione i due più recenti: Landsat 7 e Landsat 8. Scopo del programma Landsat è il monitoraggio da satellite delle risorse naturali presenti sulla superficie del pianeta.

Le immagini satellitari acquisite dai satelliti Landsat 7 e Landsat 8 utilizzate in questo studio sono state reperite dal sito EarthExplorer 2 dell'USGS. Gli spettrometri, di cui i satelliti Landsat sono dotati, acquisiscono immagini della superficie terrestre con una risoluzione pari a 30 metri. Le immagini sono acquisite dagli spettrometri in diverse bande cromatiche, ciascuna caratterizzata da un particolare range di lunghezze d'onda. Esistono otto bande di acquisizione per Landsat 7 e undici per il più avanzato Landsat 8.

I satelliti Landsat 7 e 8 effettuano passaggi su una data porzione della superficie terrestre ogni due settimane circa e pertanto si dispone di immagini satellitari con cadenza circa bisettimanale, per un totale di circa 140 immagini acquisite tra il 7 novembre 2013 e il 25 settembre 2016. Lo spettrometro a bordo del satellite Landsat 7 risulta danneggiato così che l'immagine da satellite risulta attraversata da una serie di bande nere all'interno delle quali manca la rilevazione del dato per tutte le otto bande di acquisizione.

Gli spettrometri a bordo dei satelliti, essendo strumenti ottici, consentono l'acquisizione corretta di immagini della superficie terrestre solo se la zona di interesse risulta completamente priva di nuvole. Anche un'eccessiva quantità di vapore acqueo in atmosfera, ad esempio dovuta a nebbie e foschie o più spesso, per quanto riguarda il foggiano, alla presenza di perturbazioni non troppo lontane all'area in esame, causa un'errata acquisizione del dato da parte del satellite.

Sulla base di queste considerazioni, le immagini satellitari effettivamente utilizzabili durante l'arco di tempo considerato sono quelle acquisite nelle date riportate in Tabella 3-2.

<i>data</i>	<i>satellite</i>	parametri misurati
25/10/2016	Landsat 8	LAI, FV, Albedo
30/08/2016	Landsat 7	
14/08/2016	Landsat 7	
21/07/2016	Landsat 8	
13/07/2016	Landsat 7	
05/07/2016	Landsat 8	
26/05/2016	Landsat 7	
18/05/2016	Landsat 8	
10/05/2016	Landsat 7	
31/03/2016	Landsat 8	
21/09/2015	Landsat 8	
04/08/2015	Landsat 8	
19/07/2015	Landsat 8	
03/07/2015	Landsat 8	
01/06/2015	Landsat 8	

14/04/2015	Landsat 8		
23/12/2014	Landsat 8		
21/11/2014	Landsat 8		
20/10/2014	Landsat 8		
18/09/2014	Landsat 8		
16/07/2014	Landsat 8		
21/05/2014	Landsat 7		
05/05/2014	Landsat 7		
20/12/2013	Landsat 8		
04/12/2013	Landsat 8		
02/11/2013	Landsat 8		
29/07/2013	Landsat 8		
09/08/2014	Landsat 8		Albedo

Tabella 3-2: Date con immagini satellitari di LAI, Albedo e Fv disponibili

La più importante tra le procedure di analisi di un'immagine satellitare è la correzione atmosferica per ridurre il più possibile lo scattering atmosferico prodotto dalle particelle comunque presenti in atmosfera. La metodologia più semplice è la "Dark subtraction" (Chavez, 1988) che consiste nel rimuovere dalla banda di acquisizione un valore corrispondente al disturbo ottico dato dallo scattering atmosferico, ovvero si basa sull'ipotesi che un oggetto nero abbia riflettanza nulla. (Stanganelli, 2016)

I parametri distribuiti forniti dalle analisi delle immagini satellitari in lavori precedenti, sono i seguenti:

- albedo
- normalized difference vegetation index (NDVI)
- leaf area index (LAI)
- frazione vegetata (FV)

3.4.1 Albedo

L'albedo è definito come il rapporto tra la radiazione incidente e quella riflessa da una qualunque superficie. Si tratta di un valore adimensionale compreso tra 0 (nessuna riflessione da parte della superficie) e 1 (totale riflessione da parte della superficie).

3.4.2 NDVI

Il Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) è un valore adimensionale compreso tra -1 e 1 che consente di quantificare la presenza di vegetazione viva presente al suolo da osservazioni a distanza, in questo caso satellitari.

3.4.3 Indice di copertura fogliare LAI

L'indice di area fogliare è un indice adimensionale definito come il rapporto tra la superficie fogliare totale e la superficie del suolo su cui le foglie si proiettano. Per superficie fogliare si intende quella relativa al solo lato superiore della foglia, quello illuminato e che quindi contribuisce agli scambi superficiali di calore e vapore.

Il valore minimo del LAI è 0 (suolo nudo) e può assumere arbitrari valori positivi, dal momento che le foglie, specie per vegetazione fitta, possono sovrapporsi e superare l'area del suolo sottostante la pianta: valori tipici sono di 3-5 per raccolto maturo, ma la variabilità è elevata al variare della specie vegetale considerata. Per una specie prefissata il LAI varia nel tempo e normalmente raggiunge il suo valore massimo prima o durante la fioritura.

E' possibile determinare il LAI tramite misure dirette oppure, specie se il dato è richiesto per vaste aree, tramite il telerilevamento, come nel caso di questa tesi.

3.4.4 Frazione vegetata FV

La frazione vegetata (FV) esprime il quantitativo di vegetazione presente su un suolo. FV infatti è definito come il rapporto tra la superficie vegetata in una determinata area e l'area stessa. Si tratta quindi di un numero compreso tra 0 (suolo nudo) e 1 (suolo interamente coperto da vegetazione).

3.5 Dati di irrigazione

L'irrigazione è un parametro estremamente importante per i risultati della modellazione, così come lo è la precipitazione. Per questo motivo si è deciso di riprodurre l'irrigazione non limitandosi ai soli 4 campi di cui abbiamo già parlato nei capitoli precedenti, ma bensì riferendosi alla intera scala del consorzio.

Si è dunque deciso di considerare l'irrigazione effettivamente avvenuta sull'area dei campi Eddy di asparagi, verze e pomodori, e un'irrigazione distribuita a scala di consorzio.

3.5.1 Irrigazione a scala di consorzio

Nella zona del comprensorio analizzato, esiste una tipologia di acquedotto con funzionamento in pressione, che convoglia l'acqua da 3 principali sorgenti:

- Vasca Tavoliere
- Diga di Capaccio
- Vasca S3

L'area totale del consorzio, così come l'area irrigua e quella specifica coltivata a pomodori, sono riportate nella Tabella 3-3.

Nella Figura 3-18 si trova la mappa dell'acquedotto che fornisce l'acqua sull'area considerata.

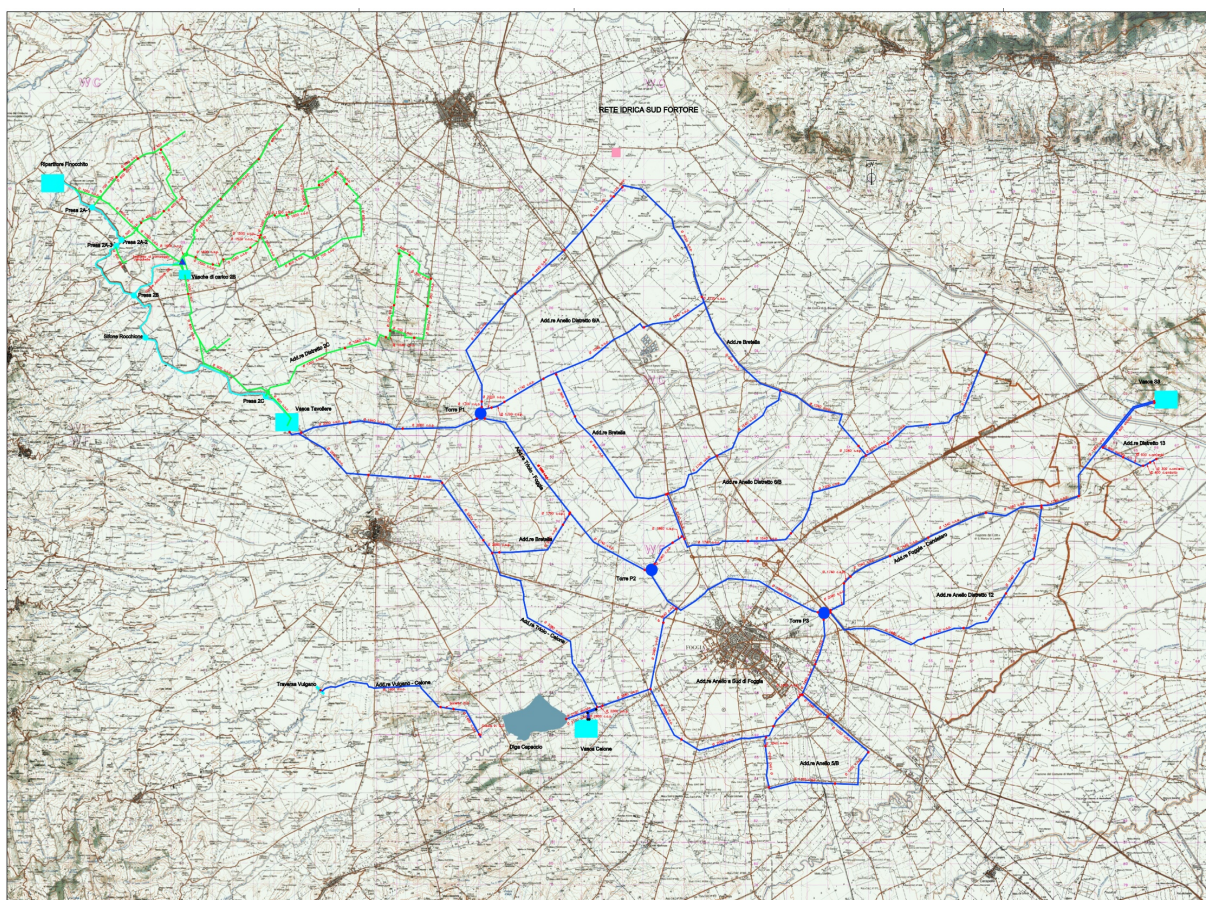


Figura 3-18: Acquedotto di Foggia

All'interno dell'area totale vi sono svariate tipologie di utilizzo del suolo, che è prevalentemente agrario. Le coltivazioni predominanti sono quelle di pomodori durante il periodo prevalentemente estivo, e quelle di grano. Nella legenda in Figura 3-19, si possono notare diversi valori, che identificano le tipologie di utilizzo del terreno per l'anno 2016.

AREA TOTALE COMPRESORIO [m ²]	985'992'000
AREA IRRIGUA [m ²]	642'460'000
AREA POMODORI [m ²]	366'939'000
PERCENTUALE AREA POMODORI E AREA IRRIGUA	57%
PERCENTUALE AREA POMODORI E AREA TOTALE	37%

Tabella 3-3: Aree irrigue dell'anno 2016

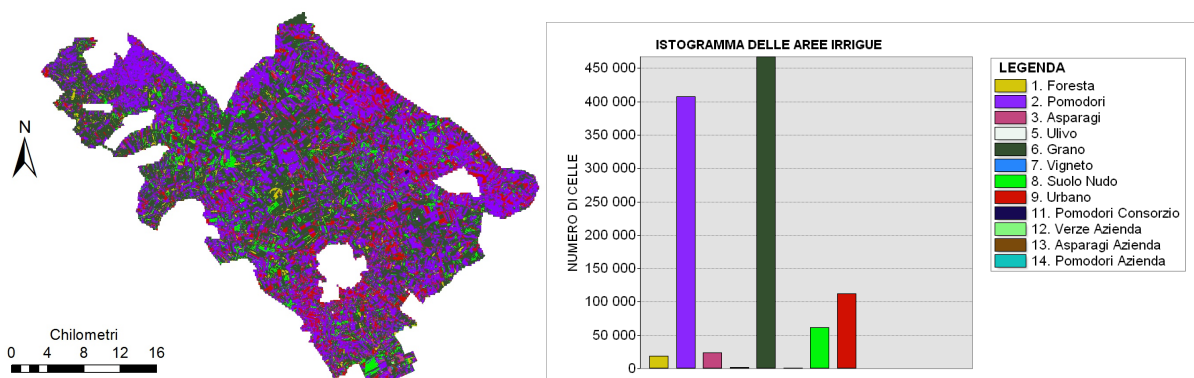


Figura 3-19: Raster irrigazione sul consorzio

L'area destinata alla coltivazione di pomodori è il 37% di quella totale, mentre è il 57% di quella effettivamente irrigata.

I numeri 11, 12, 13 e 14 nella legenda dell'istogramma di Figura 3-19 rappresentano le stazioni Eddy Covariance situate in corrispondenza dei campi analizzati, facenti parte dell'Azienda e del Consorzio.

A scala di consorzio si è provveduto ad irrigare tutte le aree occupate da pomodori e grano, essendo queste la percentuale di gran lunga più rilevante dell'area totale, come visibile nel Grafico 3-1.

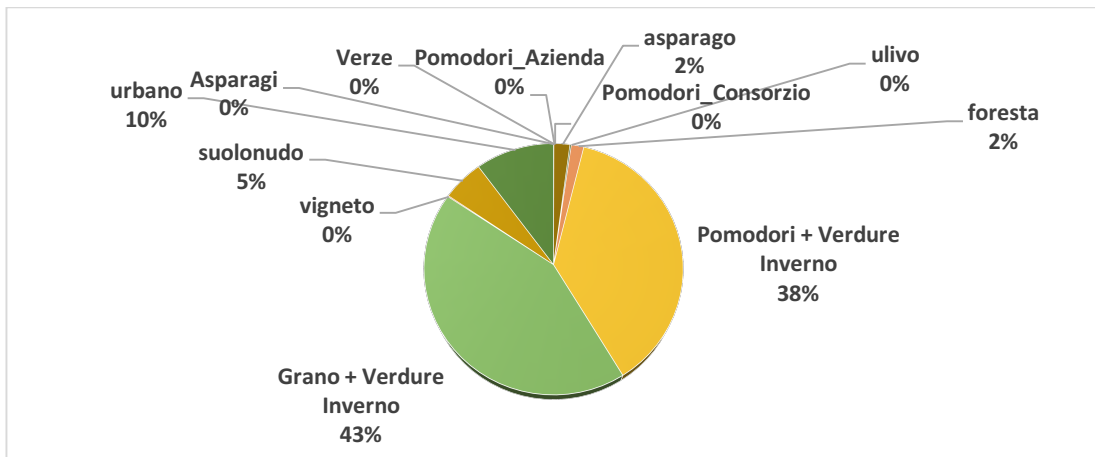


Grafico 3-1: Suddivisione percentuale delle aree in base all'utilizzo

Dal Consorzio di Bonifica della Capitanata sono stati forniti i volumi giornalieri transitanti ai diversi nodi, destinati all'irrigazione e per gli altri usi. Questi volumi destinati all'uso agricolo sono stati distribuiti uniformemente su tutte le aree d'interesse, come riportato nel Grafico 3-2, dove si può notare come i dati siano raggruppati in tre periodi, separati l'uno dall'altro da valori nulli. Questo è dovuto al fatto che la stagione irrigua non prevede che si irrigi per tutto l'anno ma tipicamente da inizio aprile fino a fine novembre, in base alla disponibilità di acqua. Le date di inizio della stagione irrigua sono riportate schematicamente in Tabella 3-4.

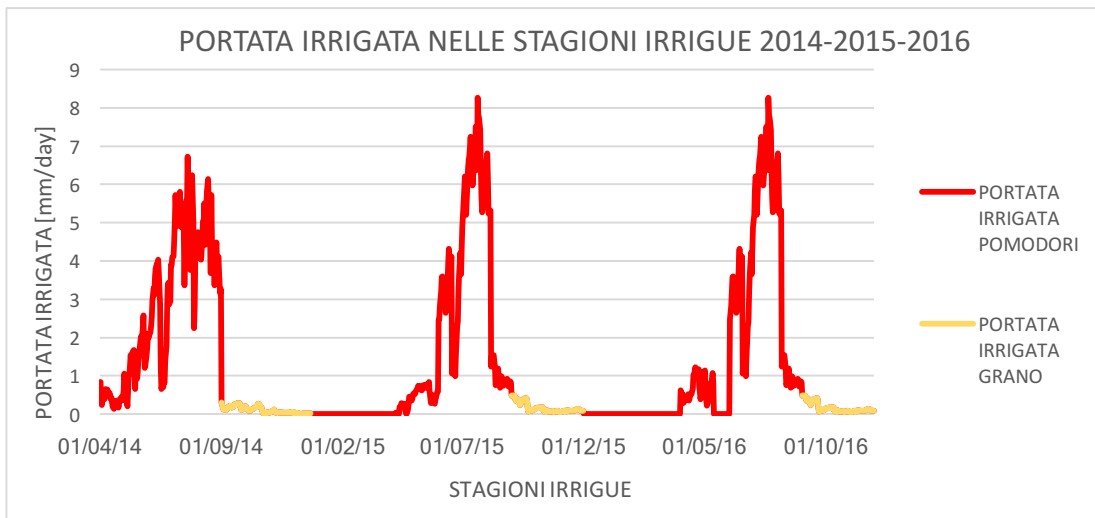


Grafico 3-2: Portata irrigata durante le stagioni irrigue dal 2014 al 2016

ANNO	Apertura Stagione	Chiusura Stagione
2014	01/04/2014	31/12/2014
2015	23/03/2015	01/12/2015
2016	01/04/2016	01/12/2016

Tabella 3-4: Apertura e chiusura stagione irrigua

3.5.2 Irrigazione puntuale sui campi in esame

Per quanto riguarda i campi in esame, non si sono resi disponibili i periodi di irrigazione e per questo motivo si è optato per la loro determinazione tramite l'osservazione dell'andamento dell'umidità nel terreno. Infatti, in corrispondenza a significativi aumenti di umidità, non giustificati dalla presenza fenomeni di pioggia, si è dedotto che ci fosse irrigazione. La rappresentazione di ciò è riportata nel Grafico 3-3, per il campo di asparagi, e nei successivi per verze e pomodori. All'interno dei grafici si possono riconoscere due tipi di serie temporali: quella dell'umidità e quelle delle precipitazioni, oltre all'irrigazione che è già stata inserita per completezza.

Per una più efficace determinazione dei momenti in cui si è irrigato, sono state calcolate delle soglie di umidità nel terreno proposte dalla FAO per ciascun tipo di coltura. L'acqua nel terreno è infatti essenziale per la sopravvivenza di qualunque specie vegetale, tuttavia, per le sue proprietà fisiche, la vegetazione è in grado di utilizzare per la sua sopravvivenza solo una parte dell'acqua immagazzinata nel terreno, denominata Total available water (TAW) (Allen *et al.*, 1998). Essa rappresenta l'acqua trattenuta tra la capacità di campo F_c e il punto di appassimento W_p . Nella pratica si comincia ad irrigare quando l'umidità del suolo non raggiunge la soglia W_p , ma una soglia ad essa superiore in modo da non causare uno stress idrico alla pianta con conseguente diminuzione della resa agraria. In questo modo, l'umidità del suolo viene mantenuta nel range ottimale compreso tra tale soglia e la capacità di campo, denominato Readly available water (RAW) (Allen *et al.*, 1998). RAW viene definito come una frazione di TAW. E' quindi possibile esprimere matematicamente TAW secondo l'equazione:

$$TAW = F_c \cdot W_p$$

Equazione 3-1

RAW è invece definito:

$$RAW = p \cdot TAW$$

Equazione 3-2

RAW risulta dunque essere una frazione di TAW, mentre p è un numero compreso tra 0 e 1, definito come:

$$p = p^* + 0.04 \cdot (5 - ETc)$$

Equazione 3-3

dove p^* risulta essere un valore fornito dalla FAO.

Dunque la soglia è calcolata semplicemente come:

$$\text{SOGLIA IRRIGAZIONE} = F_c - \text{RAW}$$

Equazione 3-4

I valori ricavati con questo metodo sono riportati in Tabella 3-6. Una rappresentazione grafica degli indici di interesse è riportata in Figura 3-20, mentre nella Tabella 3-5 si trovano i valori calcolati per ognuno dei 4 campi.

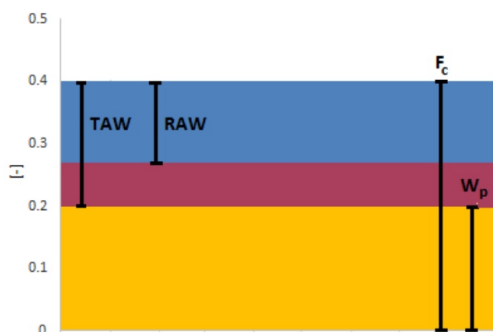


Figura 3-20: Rappresentazione grafica di TAW, RAW, Fc e Wp

INDICI	CAMPO	CAMPI	CAMPO	CAMPO
	ASPARAGI	VERZE	POMODORI AZIENDA	POMODORI CONSORZIO
Fc	0.318	0.318	0.4	0.318
Wp	0.197	0.197	0.272	0.197
p FAO	0.45	0.45	0.4	0.4
TAW	0.121	0.121	0.128	0.121
RAW	0.054	0.054	0.05	0.048

Tabella 3-5: Indici di interesse per le soglie di irrigazione

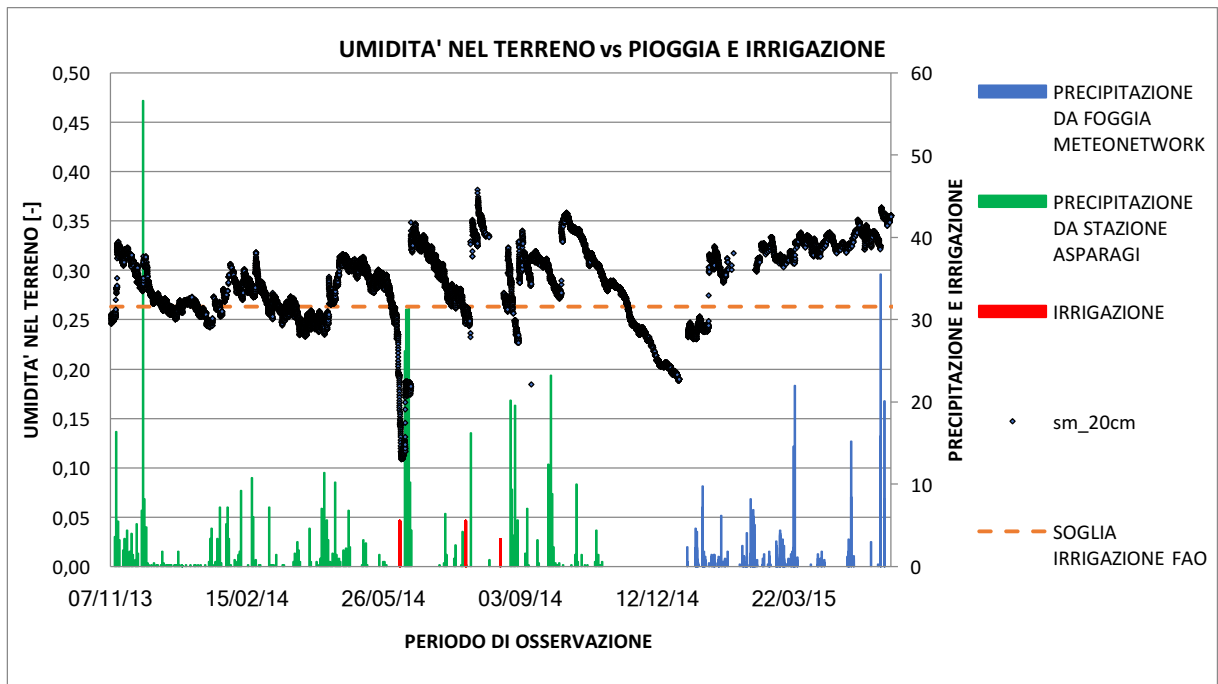


Grafico 3-3: Confronto fra umidità nel terreno, pioggia e irrigazione nel campo Asparagi

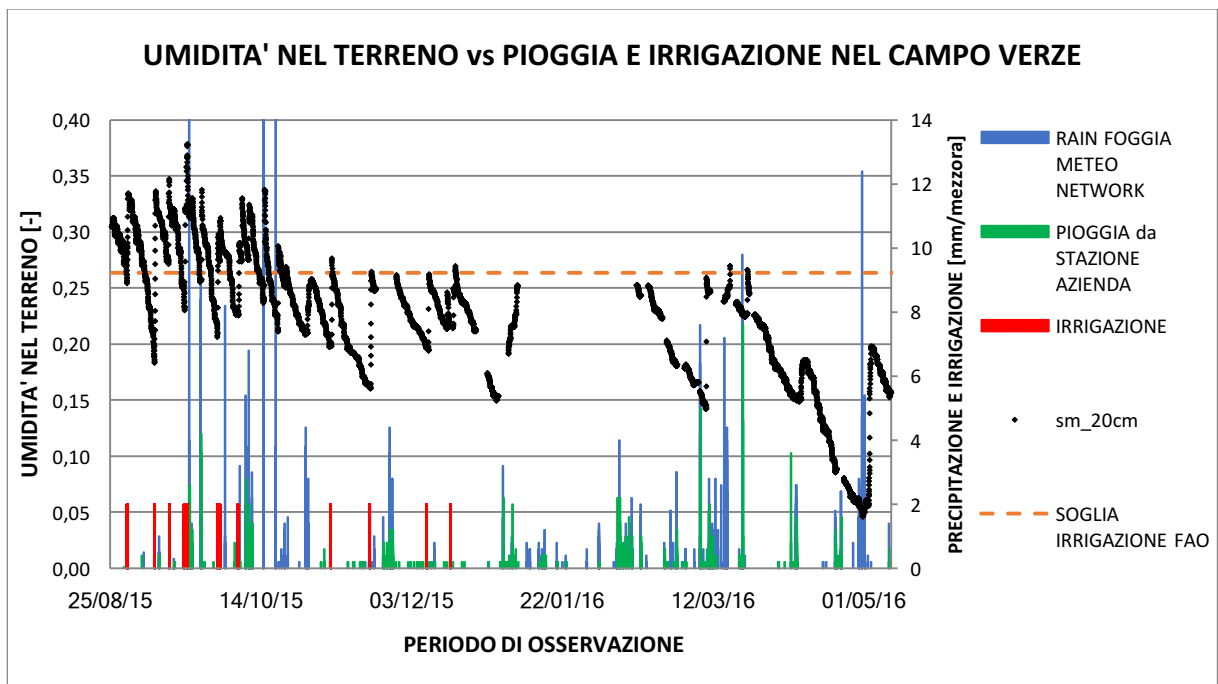


Grafico 3-4: Confronto fra umidità nel terreno, pioggia e irrigazione nel campo Verze

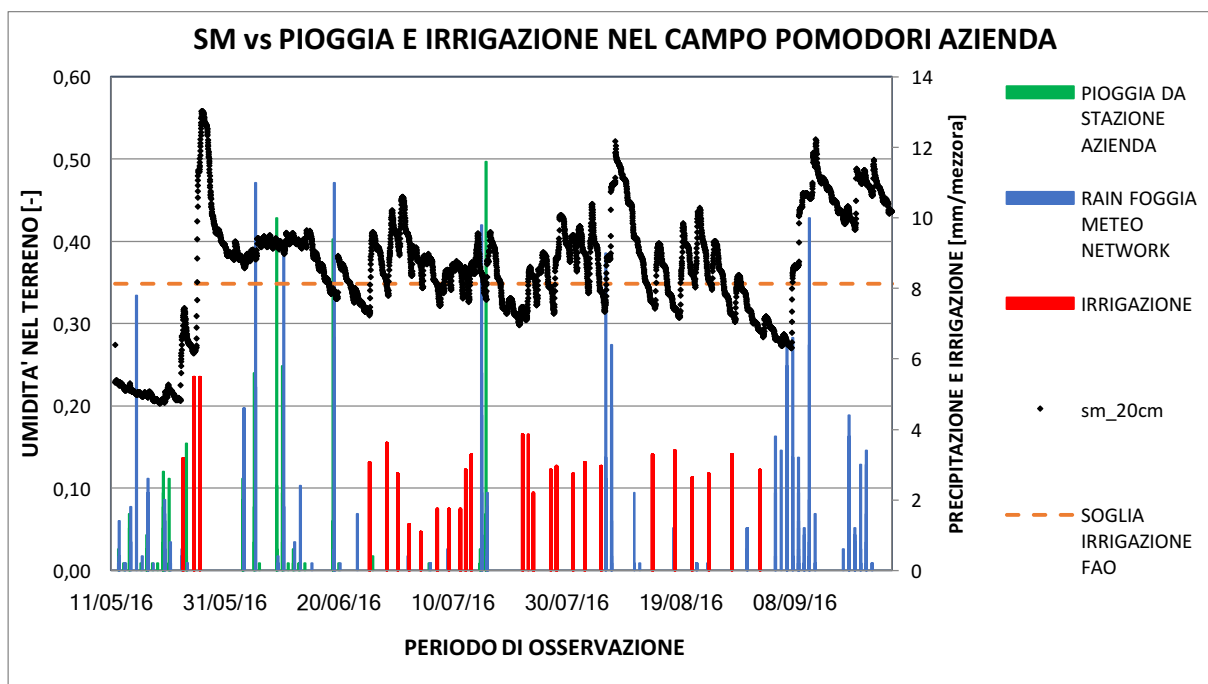


Grafico 3-5: Confronto fra umidità nel terreno, pioggia e irrigazione nel campo Pomodori Azienda

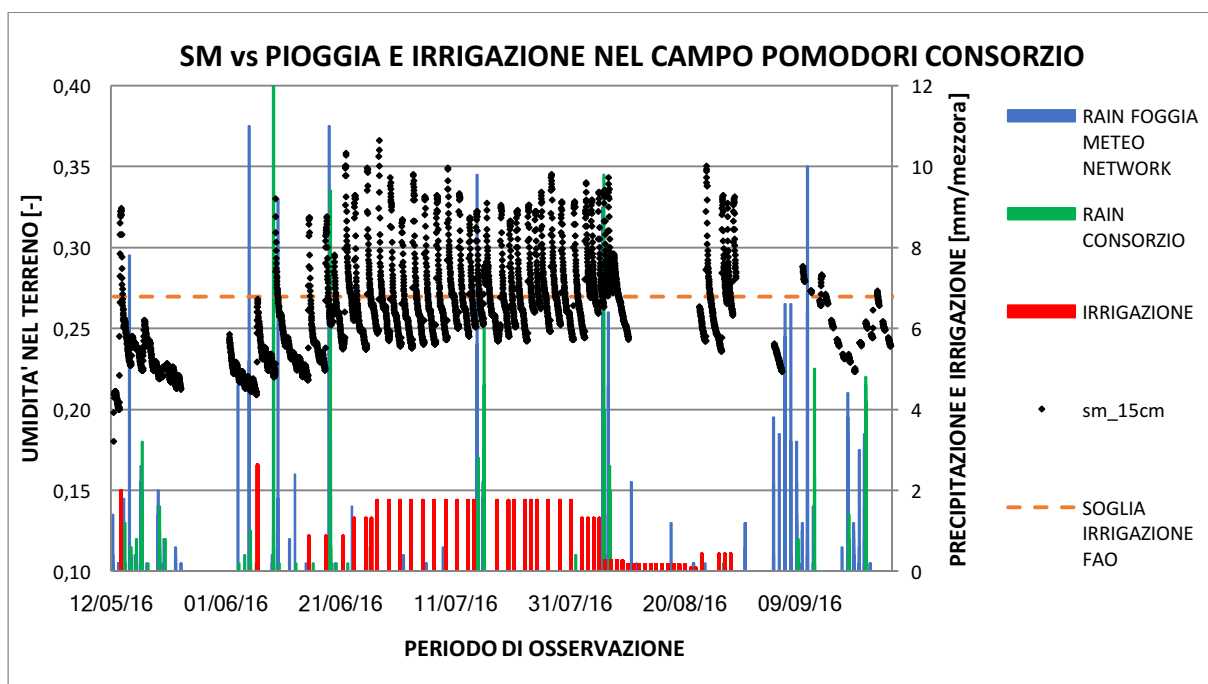


Grafico 3-6: Confronto fra umidità nel terreno, pioggia e irrigazione nel campo Pomodori Consorzio

I dati forniti dall'azienda sono riportati per gli asparagi in Tabella 3-9, per i pomodori azienda in Tabella 3-7. Infine in Tabella 3-8 sono riportati i dati di irrigazione disponibili dal consorzio per il campo di pomodori.

I volumi irrigati sono noti, essendo nota la portata degli irrigatori a goccia usati in tutti e 4 i campi, oltre alla durata dell'irrigazione che è in media di circa 5 ore.

Di particolare interesse è il confronto fra le due colture di pomodoro. Infatti queste sono state seminate ad un solo giorno di distanza ma le irrigazioni sono state gestite in modo totalmente diverso. A fine stagione i volumi irrigui sono risultati molto simili (6756 m³/ha per campo Azienda e 7095 m³/ha per campo Consorzio) ma nel campo Azienda le irrigazioni sono state solo 25, mentre nel campo consorzio 51. Questo è giustificato dalla diversità dei due terreni in cui si trovano i campi, in cui il primo è di tipo argilloso, che tende a trattenere l'acqua, mentre il secondo è più sabbioso.

ELENCO GIORNI IRRIGAZIONE VERZE	IRRIGAZIONE [mm]	DURATA IRRIGAZIONE
30/08/2015 11:30	20	SI È PROCEDUTO OGNI VOLTA AD IRRIGARE SU UN TEMPO DI 5 ORE
08/09/2015 13:00	20	
13/09/2015 06:30	20	
18/09/2015 13:30	20	
19/09/2015 04:30	20	
29/09/2015 12:30	20	
30/09/2015 06:00	20	
06/10/2015 11:00	20	
06/11/2015 06:30	20	
19/11/2015 07:30	20	
08/12/2015 12:00	20	
16/12/2015 14:00	20	

Tabella 3-6: Giorni irrigazione del Campo Verze

ELENCO GIORNI IRRIGAZIONE POMODORI AZIENDA	mm IRRIGAZIONE	DURATA IRRIGAZIONE
23/05/2016 04:00	31.9	LA DURATA DELL'IRRIGAZIONE E' VARIABILE E DATA
25/05/2016 22:00	55	
25/06/2016 08:00	30.8	
28/06/2016 15:30	36.3	
30/06/2016 14:00	27.5	
02/07/2016 19:00	13.2	
04/07/2016 13:30	11	

07/07/2016 17:00	17.6	
09/07/2016 13:00	17.6	
11/07/2016 16:00	17.6	
12/07/2016 18:30	28.6	
13/07/2016 17:00	33	
22/07/2016 21:00	38.5	
24/07/2016 17:00	22	
27/07/2016 17:00	28.6	
28/07/2016 09:00	29.7	
31/07/2016 18:00	27.5	
02/08/2016 19:00	30.8	
05/08/2016 15:00	29.7	
14/08/2016 11:00	33	
18/08/2016 19:00	34.1	
21/08/2016 12:00	26.4	
24/08/2016 10:00	27.5	
28/08/2016 12:00	33	
02/09/2016 12:00	28.6	

Tabella 3-7: Giorni irrigazione del campo di Pomodori Azienda

ELENCO GIORNI IRRIGAZIONE POMODORI CONSORZIO	QUANTITATIVO IRRIGATO [mm]	Note:
13/05/2016 09:30	20	LA DURATA DELL'IRRIGAZIONE E' VARIABILE E DATA
06/06/2016 07:30	26.4	
15/06/2016 07:00	8.8	
18/06/2016 06:30	8.8	
21/06/2016 08:30	8.8	
23/06/2016 06:30	13.2	
25/06/2016 10:00	13.2	
26/06/2016 14:30	13.2	
27/06/2016 09:00	17.6	
29/06/2016 09:00	17.6	
01/07/2016 09:30	17.6	
03/07/2016 09:30	17.6	

05/07/2016 11:00	17.6	
07/07/2016 10:30	17.6	
09/07/2016 11:00	17.6	
11/07/2016 11:00	17.6	
13/07/2016 07:00	17.6	
14/07/2016 12:30	17.6	
18/07/2016 10:00	17.6	
20/07/2016 07:30	17.6	
21/07/2016 11:00	17.6	
23/07/2016 10:30	17.6	
24/07/2016 18:30	17.6	
25/07/2016 18:30	17.6	
27/07/2016 12:30	17.6	
29/07/2016 06:30	17.6	
31/07/2016 12:00	17.6	
02/08/2016 12:00	13.2	
03/08/2016 13:00	13.2	
04/08/2016 20:00	13.2	
05/08/2016 19:30	13.2	
06/08/2016	13.2	
07/08/2016	13.2	
08/08/2016	13.2	
09/08/2016	13.2	
10/08/2016	8.8	
11/08/2016	8.8	
12/08/2016	8.8	
13/08/2016	8.8	
14/08/2016	8.8	
15/08/2016	8.8	
16/08/2016	8.8	
17/08/2016	8.8	
18/08/2016	8.8	
19/08/2016	8.8	
20/08/2016	8.8	
21/08/2016	4.4	
22/08/2016	4.4	

23/08/2016 14:00	4.4	LA DURATA DELL'IRRIGAZIONE E' VARIABILE E DATA
26/08/2016 08:00	4.4	
27/08/2016 07:00	4.4	
28/08/2016 07:30	4.4	

Tabella 3-8: Giorni irrigazione del campo di Pomodori Consorzio

Nel campo di asparagi l'irrigazione è avvenuta ogni volta innaffiando per un tempo di 5 ore una quantità di acqua totale di 50 mm.

IRRIGAZIONE ASPARAGI	IRRIGAZIONE [mm]	Note:
10/06/2014 09:00	50	PER OGNI VOLTA HO IRRIGAZIONE DISTRIBUITA PER UNA DURATA DI 5 ORE
29/07/2014 14:00	50	
24/08/2014 10:00	30	

Tabella 3-9: Giorni di irrigazione del campo di Asparagi Azienda

CAPITOLO 4

ANALISI ALLA SCALA PUNTUALE

Le colture analizzate con la tecnica Eddy Covariance sono di 3 tipi:

- verze
- asparagi
- pomodori

Ciascuna coltura presenta caratteristiche differenti in termini di periodi di semina, crescita, raccolta e fabbisogno irriguo. Il periodo più critico per la disponibilità di acqua è quello estivo, in cui è più facile avere condizioni di siccità. I pomodori sono la coltura più problematica in quanto hanno un periodo di sviluppo che coincide ai mesi estivi di deficit idrico.

Come già accennato nei capitoli precedenti, i campi studiati sono stati 4: uno di asparagi, uno di verze e due di pomodori, come riportati in Tabella 4-1.

I campi analizzati si trovano nella regione Puglia, sotto la città di Foggia. In Figura 4-1 sono riportate le immagini dei campi, con le relative stazioni Eddy evidenziate dai punti verdi.

ENTE GESTORE	STAZIONE	X(EST)	Y(NORD)	TIPOLOGIA STAZIONI
POLITECNICO DI MILANO	Stazione Asparagi	551926.26	4578481.39	Eddy Covariance
	Stazione Verze	551747.1	4579289.68	Eddy Covariance
	Stazione Pomodori	551754.43	4578473.33	Eddy Covariance
	Eddy Consorzio	553133	4600073	Eddy Covariance

Tabella 4-1: Posizione delle stazioni Eddy Covariance

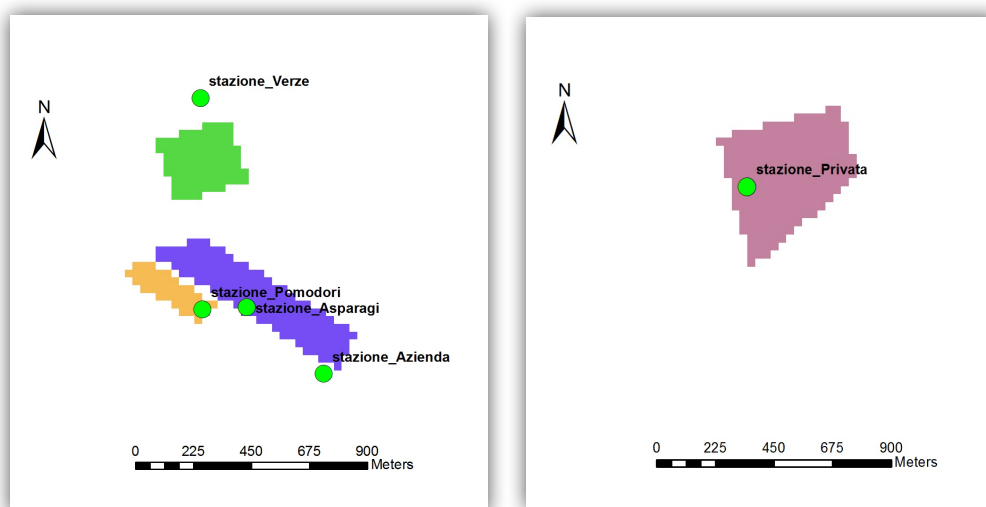


Figura 4-1: Stazioni Eddy Covariance in prossimità dei rispettivi campi

Un primo obiettivo dell'analisi puntuale effettuata è la stima dell'evapotraspirazione culturale di riferimento ET_0 nei 4 campi di studio in cui si sono piazzate le stazioni Eddy Covariance.

L'evapotraspirazione non è facilmente misurabile. Dispositivi specifici e misure accurate di diversi parametri fisici o il bilancio idrico del suolo in lisimetri sono necessari per determinare l'evapotraspirazione. I metodi sono spesso costosi, esigenti in termini di precisione di misura e possono essere pienamente sfruttati solo da personale di ricerca ben addestrato.

Sebbene i metodi siano inappropriati per misurazioni di routine, rimangono importanti per la valutazione delle stime di ET ottenuta con metodi più indiretti.

Il tasso di evapotraspirazione può essere calcolato secondo i seguenti metodi (FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1998):

- Bilancio energetico
- Bilancio idrico nel terreno
- Utilizzando Lisimetri
- Partendo da dati meteorologici
- Utilizzando una vasca evaporimetrica¹

In questa tesi si è scelto di calcolare l'evapotraspirazione partendo dai dati meteorologici ricavati dalle stazioni Eddy Covariance.

Gli unici fattori che influenzano ET_0 sono i parametri climatici

Per fare ciò ci si è avvalsi di due tipi di approcci:

o—————

¹ La vasca evaporimetrica stima l'evapotraspirazione di riferimento osservando la perdita di evaporazione da una superficie d'acqua e applicando dei coefficienti empirici per il calcolo di ET_0

1. Metodo proposto da Priestley e Taylor
2. Metodo di Penman-Monteith, raccomandato dalla FAO

In ciascun campo si sono resi disponibili i valori delle grandezze richieste che sono state utilizzate solo dopo un'accurata procedura di validazione.

In particolare si è proceduto al controllo dei seguenti parametri:

- Umidità relativa
- Vento
- Temperatura dell'aria
- Umidità

Un secondo obiettivo dell'analisi puntuale è stato quello di confrontare i valori di evapotraspirazione di riferimento ET_0 , calcolati tramite i due metodi sopra citati e dipendenti esclusivamente dalle condizioni climatiche e non dal terreno, con i valori di calore latente LE misurati, che rappresentano la frazione di evapotraspirazione nel bilancio di energia. Questo è importante ai fini della valutazione del coefficiente colturale (o Crop Coefficient K_c) che può essere confrontato con i valori tabulati disponibili dalla FAO per bacini localizzati in clima mediterraneo, con coltura del medesimo tipo e con caratteristiche il più possibile simili ai casi in esame. Sul sito della FAO, sono disponibili informazioni riguardanti anche le durate generalmente attese delle fasi di crescita e del periodo totale di sviluppo per vari tipi di clima e luoghi.

Per definizione, l'evapotraspirazione effettiva misurata dalla stazione Eddy $ET_{MISURATA}$ coincide con l'evapotraspirazione calcolata ET_C quando l'umidità del terreno è maggiore o uguale alla capacità di campo.

La Capacità di Campo (o Field Capacity) è per definizione la quantità massima di acqua che il terreno è in grado di ritenere dopo essersi drenato. E' infatti l'acqua in grado di resistere alle forze gravitazionali e che rimane intrappolata nei pori del terreno, disponibile dunque ad essere assorbita dall'apparato radicale della coltura.

I parametri meteorologici principali che influenzano l'evapotraspirazione sono:

- Radiazione solare
- Temperatura dell'aria
- Umidità
- Velocità del vento.

Diverse procedure sono state sviluppate per valutare il tasso di evaporazione da questi parametri. La potenza di evaporazione è espressa dalla **evapotraspirazione della coltura di riferimento ET_0** . Essa rappresenta la evapotraspirazione da una superficie vegetata standardizzata, come schematizzato in Figura 4-2.

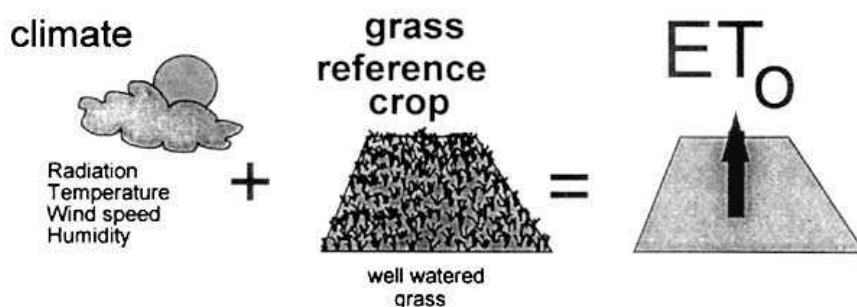


Figura 4-2: Evapotraspirazione colturale di riferimento ET₀, (FAO)

La FAO, tramite una consultazione di esperti ha accettato la seguente definizione univoca per la superficie di riferimento:

"Un'ipotetica coltura di riferimento con un'altezza di 0,12 m, una resistenza superficiale fissa di 70 s/m⁻¹ e un albedo di 0,23." (FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1998)

La superficie di riferimento ricorda da vicino una vasta superficie di erba verde di altezza uniforme, in fase di crescita, completamente ombreggiante il terreno e con acqua sufficiente. I requisiti che la superficie erbacea debba essere estesa ed uniforme, risultano dal presupposto che tutti i flussi siano monodimensionali verso l'alto.

Il concetto di evapotraspirazione di riferimento ET₀ è stato introdotto per studiare la domanda evaporativa dell'atmosfera indipendentemente dal tipo di coltura, dallo sviluppo delle colture e pratiche di gestione.

Poiché l'acqua è disponibile in abbondanza in superficie, i fattori del suolo non influiscono ET₀.

Relazionando ET ad una superficie specifica, si fornisce un riferimento correlare la ET da altre superfici. Si elimina la necessità di definire un livello di ET separato per ogni coltura e la fase di crescita.

I valori ET₀ misurati o calcolati in luoghi diversi o in diverse stagioni sono comparabili in quanto si riferiscono alla ET dalla stessa superficie di riferimento.

Gli unici fattori che influenzano ET₀ sono i parametri climatici. Di conseguenza, ET₀ è un parametro climatico e può essere calcolato dai dati meteo.

"ET₀ esprime la potenza di evaporazione in un luogo e periodo dell'anno specifici e non considera le caratteristiche delle colture e dei fattori del suolo." (FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1998)

Si parla di **evapotraspirazione di colture in condizioni standard ET_C** quando si considera il tipo di coltura, varietà e stadio di sviluppo nella valutazione della evapotraspirazione da colture specifiche coltivate in grandi campi e ben gestite.

Infatti si hanno diversi livelli di ET se vi sono differenti colture, dato che esistono differenze nella resistenza alla traspirazione, altezza delle colture stesse, rugosità, riflessione e copertura del suolo, in condizioni ambientali identiche.

Riassumendo, si può dire che ET_c è l'evapotraspirazione da colture che si trovano sotto le seguenti ipotesi (FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1998):

- Campi ben concimati
- Colture libere da malattie
- Cresciute in grandi campi
- Condizioni di acqua del terreno ottimali
- Realizzazione della piena produzione alle date condizioni climatiche.

Sperimentalmente sono utilizzati determinati rapporti tra ET_o ed ET_c per valutare la differenza fra le due, chiamati coefficienti colturali K_c , come rappresentato nell'equazione Equazione 4-1.

$$K_c = \frac{ET_c}{ET_o}$$

Equazione 4-1

Le differenze di anatomia nelle foglie, caratteristiche stomatiche, le proprietà aerodinamiche e anche l'albedo causano che la evapotraspirazione differisca da quella di riferimento, alle stesse condizioni climatiche.

A causa di variazioni nelle caratteristiche delle colture durante la loro stagione di crescita, K_c per una data coltura cambia dalla semina fino alla raccolta, come visibile nella figura Figura 4-3.

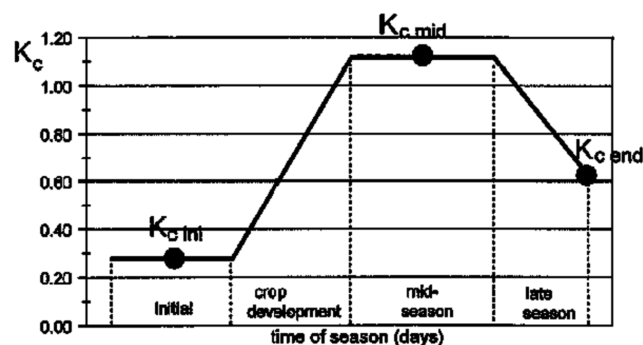


Figura 4-3: Andamento del coefficiente di coltura K_c durante lo sviluppo della coltura

Si possono distinguere quattro fasi: iniziale, di sviluppo della coltura, stagione intermedia e tarda stagione.

L'evapotraspirazione di colture in condizioni standard ET_c si riferisce alla domanda di evaporazione da colture che vengono coltivate sotto le seguenti ipotesi:

- condizioni di suolo bagnato in modo ottimale
- ottima gestione e condizioni ambientali

- grande estensione dei campi
- raggiunta della piena produzione in base alle date condizioni climatiche.

Quanto detto è schematizzato nella Figura 4-4 proposta da FAO.

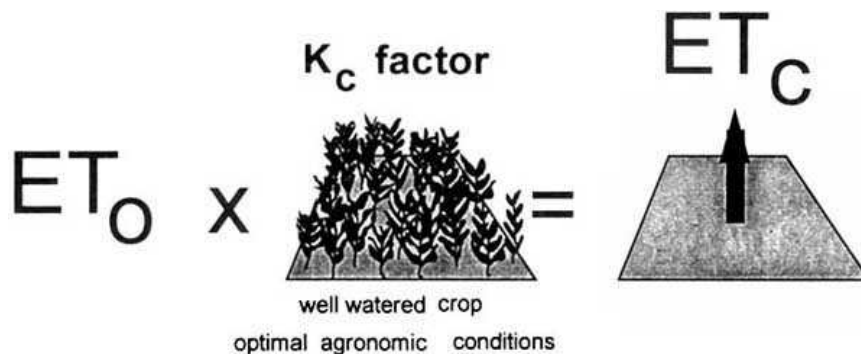


Figura 4-4: Evapotraspirazione di una coltura in condizioni standard

Qualora le condizioni del campo siano diverse dalle condizioni standard sopra introdotte, cosa che avviene spesso nella pratica in quanto è difficile garantire le condizioni ottimali per tutta la durata dello sviluppo della coltura, fattori di correzione ($K_{c,ADJUSTED}$ e K_s) sono necessari per regolare ET_c .

La rettifica riflette l'effetto delle condizioni ambientali e di gestione sulla evapotraspirazione, che può essere rinominata come **evapotraspirazione in condizioni non standard** $ET_{c,ADJUSTED}$, come schematizzato in Figura 4-5.

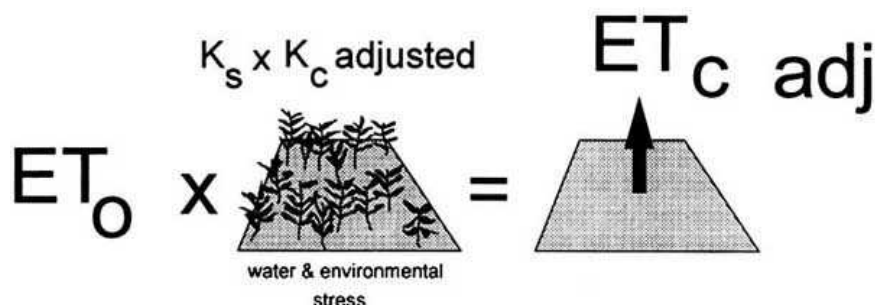


Figura 4-5: Evapotraspirazione della coltura aggiustata tenendo conto delle condizioni di irrigazione e ambientali

4.1 Stima di ET tramite il metodo di Priestley-Taylor

Il metodo Priestley-Taylor per il calcolo di dell'evapotraspirazione di riferimento ET_0 giornaliera (mm d^{-1}) sostituisce il termine aerodinamico dell'equazione di Penman-Monteith con un moltiplicatore empirico adimensionale a , detto coefficiente Priestley-Taylor:

$$ET_0 = \frac{a \cdot s \cdot (R_n - G)}{\lambda \cdot (s + \gamma)}$$

Equazione 4-2

Dove:

- ET_0 (mm d⁻¹) è l'evapotraspirazione di riferimento giornaliera,
- λ (MJ kg⁻¹) è il calore latente di vaporizzazione,
- R_n (MJ m⁻² d⁻¹) è la radiazione netta,
- G (MJ m⁻² d⁻¹) è il flusso di calore terreno,
- s (kPa °C⁻¹) è la pendenza della relazione pressione-temperatura del vapore di saturazione,
- γ (kPa °C⁻¹) è la costante psicrometrica,
- a è il coefficiente Priestley-Taylor.

Nei calcoli effettuati si è deciso di non inserire il termine G del flusso di calore nel suolo, in quanto risulta spesso essere affetto da errori di misurazione.

L'equazione Priestley-Taylor è utile per il calcolo di ET_0 giornaliera per le condizioni in cui i dati in ingresso meteorologici per il termine aerodinamico (umidità relativa, velocità del vento) non sono disponibili. L'equazione data di default è ottenuta in base ai termini indicati nella Tabella 4-2. (CRA-CIN, 2009)

termine	valore
Coefficiente di Priestley-Taylor a	1.26
Pressione di vapore effettiva (kPa)	Temperatura dell'aria al punto di rugiada
Calore latente di vaporizzazione λ (MJ kg⁻¹)	2.45

Tabella 4-2: valori dei termini nell'equazione di Priestley – Taylor

La pendenza della relazione pressione-temperatura del vapore di saturazione s espressa in (kPa °C⁻¹) è calcolata mediante l'equazione:

$$s = \frac{4098 \cdot \left[0.6108 \cdot \exp\left(\frac{17.27 \cdot T}{T + 237.3}\right) \right]}{(T + 237.3)^2}$$

Equazione 4-3

dove T è la temperatura dell'aria espressa in °C.

La costante psicrometrica γ (kPa °C⁻¹) è calcolata invece considerando l'equazione:

$$\gamma = \frac{c_p \cdot P}{\varepsilon \cdot \lambda} = 0.665 \cdot 10^{-3} \cdot P$$

Equazione 4-4

dove:

- γ costante psicrometrica [kPa ° C⁻¹],
- P pressione atmosferica [kPa],
- λ calore latente di vaporizzazione, 2.45 [MJ kg⁻¹],
- c_p calore specifico a pressione costante, 1.013 10⁻³ [MJ kg⁻¹ ° C⁻¹],
- ε rapporto tra il peso molecolare di vapore acqueo e aria secca = 0,622.

L'evaporazione con il metodo di Priestley-Taylor è stata calcolata esclusivamente nei momenti in cui era disponibile il dato della radiazione netta R_n e del calore latente LE.

4.2 Stima di ET tramite il metodo FAO Penman-Monteith

Il passo temporale utilizzato per l'acquisizione dei dati disponibili è di una rilevazione ogni 30 minuti, quindi cadenza semi-oraria.

Con l'avvento di stazioni meteorologiche elettroniche e automatizzate, i dati meteorologici sono sempre riportati per fasce orarie o più brevi. Pertanto, in situazioni in cui i calcoli sono informatizzati, come quello in esame, l'equazione FAO Penman-Monteith può essere applicata su base oraria con buoni risultati. Quando si applica l'equazione FAO Penman-Monteith su una scala temporale oraria o più breve, l'equazione e alcune delle modalità di calcolo dei dati meteorologici deve essere regolata per la fase di tempo più piccolo.

L'equazione FAO Penman-Monteith per un passo orario esatta è:

$$ET_0 = \frac{0.408 \cdot \Delta \cdot (R_n - G) + \gamma \cdot \frac{37}{T_{hr} + 273} \cdot u_2 \cdot (e^\circ(T_{hr}) - e_a)}{\Delta + \gamma \cdot (1 + 0.34 \cdot u_2)}$$

Equazione 4-5

dove:

- ET_0 evapotraspirazione di riferimento [mm ora⁻¹]
- R_n radiazione netta sulla superficie [MJ m⁻² hour⁻¹]
- G flusso di calore nel terreno [MJ m⁻² ora⁻¹]
- T_{hr} temperatura dell'aria media oraria [°C]
- Δ pendenza della curva di tensione di vapore saturo a T_{hr} [kPa °C⁻¹]
- γ costante psicrometrica [kPa °C⁻¹]
- $e^\circ(T_{hr})$ saturazione tensione di vapore alla temperatura dell'aria a T_{hr} [kPa]
- e_a media oraria pressione di vapore effettiva [kPa]

- u_2 media oraria della velocità del vento [$m s^{-1}$]

Nei calcoli effettuati si è deciso di non inserire il termine G del flusso di calore nel suolo, in quanto risulta spesso essere affetto da errori di misurazione.

Date le misurazioni di umidità relativa, la tensione di vapore effettiva viene determinata come:

$$e_a = e^{\circ}(T_{hr}) \cdot \frac{RH_{hr}}{100}$$

Equazione 4-6

dove:

- e_a tensione di vapore media oraria effettiva [kPa],
- $e^{\circ}(T_{hr})$ tensione di vapore a saturazione alla temperatura dell'aria T_{hr} [kPa]
- RH_{hr} umidità relativa media oraria [%]

Il flusso di calore nel suolo G è particolarmente importante per il calcolo orario. Esistono delle formule proposte da FAO, che si basano sulla radiazione netta moltiplicata per dei coefficienti, tuttavia nel nostro caso, avendo già disponibili dei valori misurati del flusso di calore nel terreno, si è ritenuto opportuno utilizzare questi ultimi.

I dati meteorologici richiesti per la determinazione della evapotraspirazione sono costituiti da:

- Temperatura dell'aria: temperatura media oraria (T_{hr}).
- Umidità dell'aria: media oraria di umidità relativa (RH_{hr}).
- Velocità del vento: i dati medi orari di velocità del vento misurata a 2 m di altezza (U_2).
- Radiazioni: totale oraria solari (R_s) o radiazione netta (R_n).

La costante psicrometrica γ , è data da:

$$\gamma = \frac{c_p \cdot P}{\varepsilon \cdot \lambda} = 0.665 \cdot 10^{-3} \cdot P$$

Equazione 4-7

dove:

- γ costante psicrometrica [$kPa^{\circ} C^{-1}$],
- P pressione atmosferica [kPa],
- λ calore latente di vaporizzazione, 2.45 [$MJ kg^{-1}$],
- c_p calore specifico a pressione costante, $1.013 \cdot 10^{-3}$ [$MJ kg^{-1}^{\circ} C^{-1}$],
- ε rapporto tra il peso molecolare di vapore acqueo / aria secca = 0,622.

Il calore specifico a pressione costante è la quantità di energia necessaria per aumentare la temperatura di una massa unitaria di aria di $1^{\circ}C$ a pressione costante. Il suo valore dipende

dalla composizione dell'aria, cioè dalla sua umidità. Per le condizioni atmosferiche medie valore $c_p = 1.013 \cdot 10^{-3} \text{ MJ kg}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ può essere utilizzato. Dato che per ogni posizione viene utilizzata una pressione atmosferica media, la costante psicrometrica viene mantenuta costante per ogni posizione. Valori per la costante psicrometrico in funzione dell'altitudine sono riportati nell'allegato 2 (tabella 2.2).

$$P = 101.3 \cdot \left(\frac{293 - 0.0065 \cdot z}{293} \right)^{5.26}$$

Equazione 4-8

dove

- P pressione atmosferica [kPa]
- z quota sul livello del mare [m]

4.3 Campo di asparagi

Il campo di asparagi è quello frai 4 analizzati che presenta il periodo più lungo di raccolta dei dati. Infatti si è partiti dal 7/11/2013 alle 10:30, fino all'11/06/2015 alle ore 6:00, con una durata di ben 581 giorni, in cui la coltura ha avuto modo di raggiungere il pieno sviluppo ed essere raccolta per due volte, come mostrato il Grafico 4-1.

In particolare la prima raccolta è stata fatta il 15/01/2014 mentre la seconda a distanza di circa un anno, ovvero il 10/01/2015. Il vantaggio di disporre di un così lungo periodo è la disponibilità di dati per l'intera vita della coltura, dalla semina al raccolto.

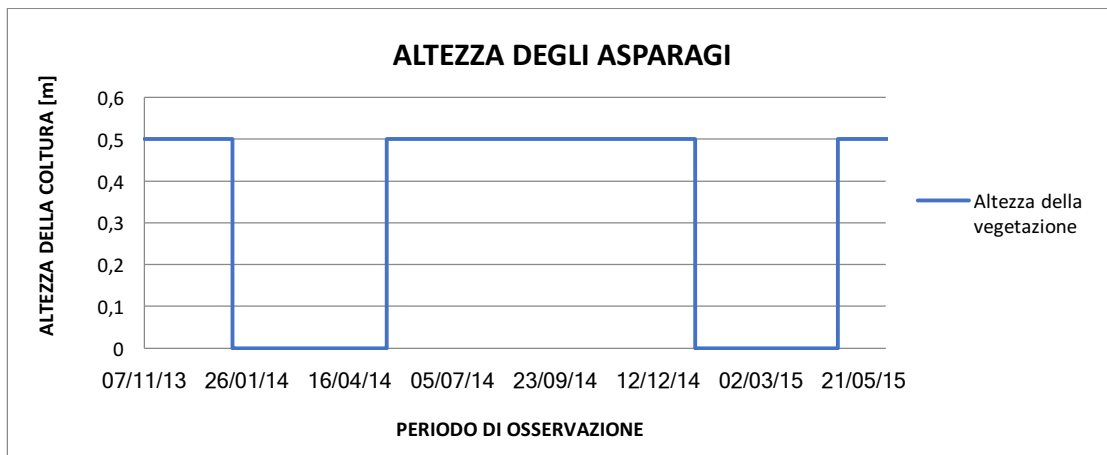


Grafico 4-1: Altezza della coltura asparagi durante il periodo di acquisizione dei dati.

Nella Tabella 4-3 sono riportate le lunghezze in giorni delle fasi di crescita della coltura, con associati i valori del coefficiente culturale che come abbiamo descritto nel paragrafo precedente, identifica la differenza tra l'evapotraspirazione di riferimento e quella della coltura, di asparagi in questo caso.

<i>FASI DI CRESCITA</i>	DURATA SUGGERITA DA FAO [giorni] SEMINA: FEBBRAIO CLIMA: MEDITERRANEO	Kc
<i>INIZIALE</i>	90	0.5
<i>SVILUPPO DELLA COLTURA</i>	30	-
<i>STAGIONE INTERMEDIA</i>	200	0.95
<i>TARDA STAGIONE</i>	45	0.3

Tabella 4-3: Durata delle fasi di crescita e relativi valori di Kc proposti dalla FAO per la coltura asparagi

Nel Grafico 4-4 è possibile vedere l'andamento della umidità nel terreno misurata ad una profondità di 20 cm rispetto agli apporti idrici forniti dalla precipitazione e dall'irrigazione. I dati relativi alla precipitazione, che è un fenomeno di sua natura fortemente locale, sono stati resi disponibili dalla stazione Eddy Asparagi, direttamente posta nel campo di asparagi quindi di massima attendibilità e dalla Stazione di Foggia Meteo-network, che risulta essere la più vicina avente dati pluviometrici disponibili. La distanza è dell'ordine di meno di 10 km.

Osservando l'andamento dell'umidità nel terreno, si può notare come ci siano alcuni periodi in cui compaiono delle interruzioni nei dati e questo è dovuto a malfunzionamenti nelle sonde di misurazione. Si nota inoltre come in corrispondenza del mese di giugno 2014 ci sia un picco negativo estremamente pronunciato, che arriva a valori di umidità sino a 0.1. Questo periodo è sicuramente da scartare nella modellazione, in quanto è molto probabile che si siano formate delle Mud Cracks, che hanno compromesso l'attendibilità della misurazione. Le sonde sono infatti poste ad una profondità di circa 20 cm nel terreno, e possono quindi essere esposte a questo genere di problemi, qualora l'umidità fosse già bassa.

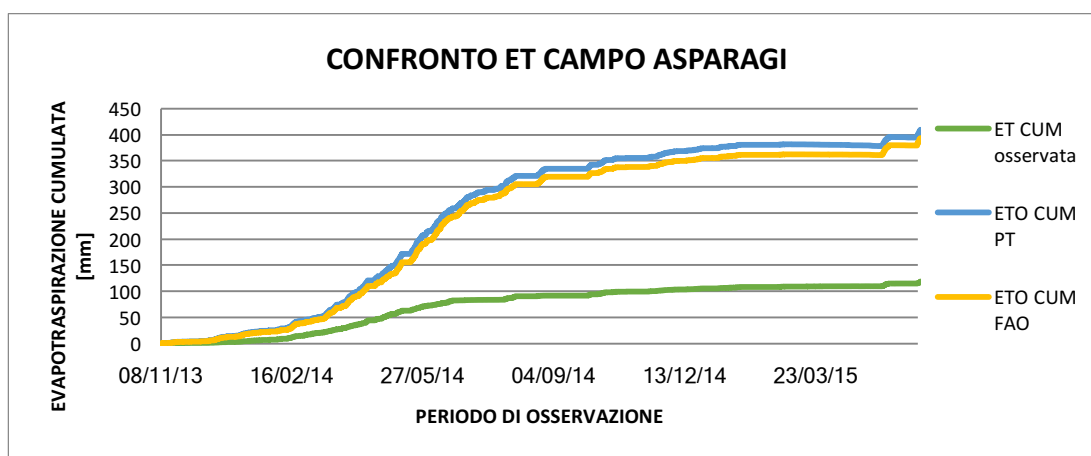


Grafico 4-2: Confronto tra evapotraspirazione di riferimento calcolata con Priestley-Taylor, FAO Penman Monteith ed evapotraspirazione misurata dalla stazione Eddy Asparagi

Il Grafico 4-2 rappresenta il confronto delle 3 curve cumulate di evapotraspirazione calcolate secondo il metodo di Penman-Monteith, quello di Priestley & Taylor e infine quella osservata sul campo dalla “Stazione Eddy Asparagi”. Per far sì che il confronto fosse corretto, è stato necessario calcolare le cumulate per i soli valori disponibili nello stesso momento in tutte e tre le serie. Per questo motivo, i valori di evapotraspirazione raffigurati non rappresentano la quantità effettiva di acqua evapotraspirata nel periodo in esame, ma bensì una frazione minore, dettata dalla scarsità di dati disponibili. Questi risultati saranno dunque esclusivamente una frazione del totale di Evapotraspirazione effettivamente avvenuta.

Si nota inoltre che c'è una notevole differenza tra i due metodi analizzati e la stima della evapotraspirazione di riferimento, come è giusto aspettarsi che sia. Infatti la ETo, essendo potenziale, non tiene conto del tipo di coltura e delle scelte di irrigazione e in generale delle caratteristiche proprie del terreno.

Come già discusso nel capitolo precedente, la evapotraspirazione di una coltura è considerabile in condizioni standard ET_c quando, tra le altre ipotesi, le condizioni del contenuto di acqua nel terreno sono ottimali ovvero il livello di umidità è maggiore o uguale alla capacità di campo. Analizzando i dati disponibili, questa è stata fissata costante su tutto il terreno del campo e pari a 0,318. L'umidità nel terreno è stata registrata superiore per il 16% del tempo di acquisizione delle informazioni, come visibile nel Grafico 4-3 e Grafico 4-4. Questo significa che per il restante 84% del tempo, si presume che la coltura non si possa considerare in condizioni ottimali, per quanto riguarda la quantità di acqua disponibile per l'apparato radicale. Questo si traduce inevitabilmente in una resa minore della coltura, anche se essa non si trova necessariamente in condizioni di sofferenza.

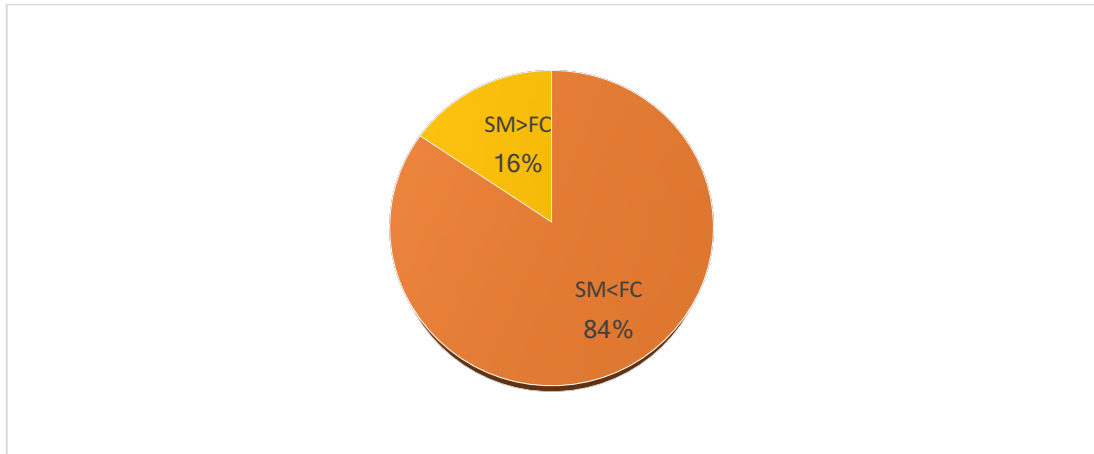


Grafico 4-3: Percentuali dei valori che soddisfano la condizione $SM > Fc$. Campo Asparagi.

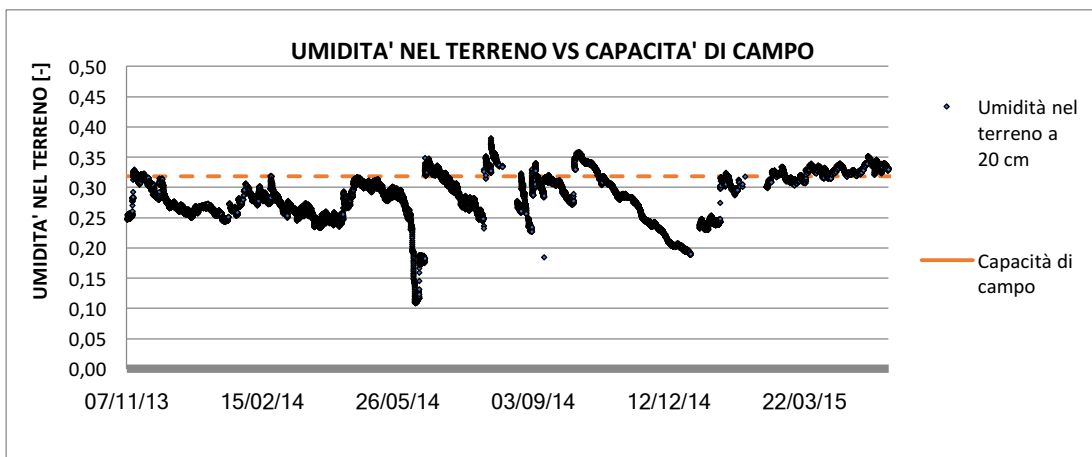


Grafico 4-4: Confronto fra l'umidità nel terreno e la soglia della Field Capacity, utile alla rappresentazione dei momenti in cui è possibile calcolare K_c . Campo Asparagi.

E' stato dunque possibile calcolare i valori del coefficiente colturale K_c in corrispondenza del 16% del totale dei valori misurati. Questo tipo di operazione però necessita che vi siano disponibili anche dati di calore latente, che corrispondono alla frazione di evapotraspirazione del bilancio di energia. Per questo motivo i dati finali a disposizione per il calcolo di K_c si sono ridotti ulteriormente sino al 2%.

Per ottenere valori di K_c confrontabili con quelli tabulati proposti dalla FAO, in Tabella 4-3, essendo questi ultimi dei valori medi, è necessario calcolare i valori di K_c tramite i valori cumulati di ogni singolo giorno. Questo presuppone tuttavia che siano disponibili i valori per tutta la durata giornaliera, con SM al di sopra della capacità di campo. Quest'ultima condizione non si è verificata un sufficiente numero di volte durante il periodo considerato, dunque non è stato possibile calcolare i valori di K_c .

4.4 Campo di verze

Il campo di verze è il secondo campo analizzato in ordine temporale. L'osservazione dei dati è partita il 25/08/2015 alle 10:30 e terminata il 11/05/2016 alle 14:00, per una durata totale di circa 260 giorni, in cui la coltura ha avuto sufficiente tempo per raggiungere il pieno sviluppo.

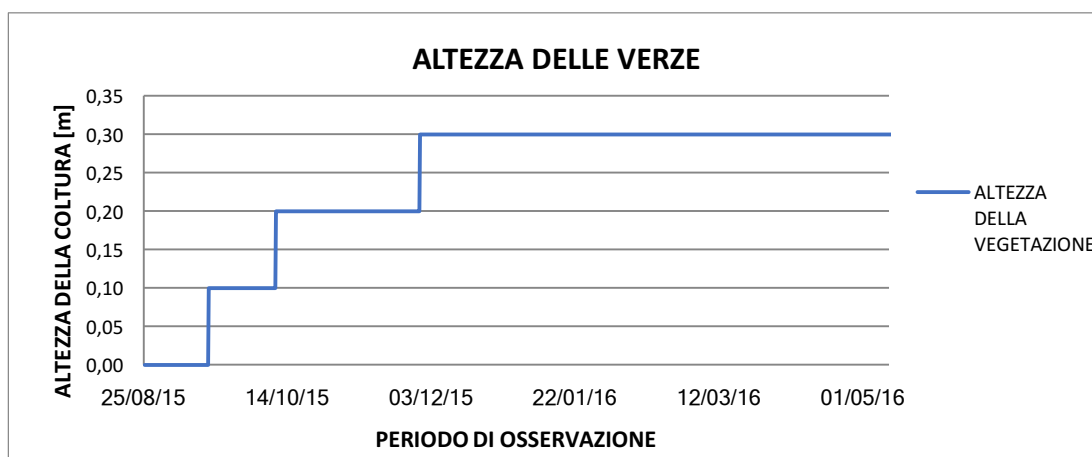


Grafico 4-5: Altezza della coltura verze durante il periodo di acquisizione dei dati

La FAO ha proposto una serie di valori medi riferiti alle verze coltivate in clima desertico californiano, simile a quello mediterraneo in quanto ad irraggiamento. Questi valori sono riassunti in Tabella 4-4.

<i>FASI DI CRESCITA</i>	DURATA SUGGERITA DA FAO [giorni] SEMINA: SETTEMBRE CLIMA: DESERTICO CALIFORNIA	Kc
<i>INIZIALE</i>	40	0.7
<i>SVILUPPO DELLA COLTURA</i>	60	-
<i>STAGIONE INTERMEDIA</i>	50	1.05
<i>TARDA STAGIONE</i>	15	0.95

Tabella 4-4: Durata delle fasi di crescita e relativi valori di Kc proposti dalla FAO per la coltura verze

Osservando l'andamento dell'umidità nel terreno riportato nel Grafico 4-8, si nota come ci siano alcuni periodi in cui compaiono delle interruzioni nei dati, in particolare tra la fine di dicembre 2015 e la metà di febbraio 2016. Si riscontra questo genere di mancanza anche in tutti gli altri dati, segno che la stazione ha smesso di funzionare per tutto il periodo.

Infine si nota come in corrispondenza di maggio 2016, ci sia un picco negativo estremamente pronunciato, da inputare molto probabilmente alla formazione delle cosiddette Mud Cracks,

ovvero di fessure nella parte più superficiale del suolo, che interessano la profondità in cui sono poste le sonde, di circa 20 cm.

Il Grafico 4-6 rappresenta il confronto delle 3 curve cumulate di evapotraspirazione potenziale calcolate secondo il metodo di Penman-Monteith, quello di Priestley & Taylor e infine quella osservata sul campo dalla “Stazione Eddy Verze”. Esse sono state calcolate come nel caso precedente, solo per i soli valori disponibili nello stesso momento in tutte e tre le serie. Per questo motivo, i valori di evapotraspirazione raffigurati non rappresentano la quantità effettiva di acqua evapotraspirata nel periodo in esame, ma bensì una frazione minore, dettata dalla scarsità di dati disponibili.

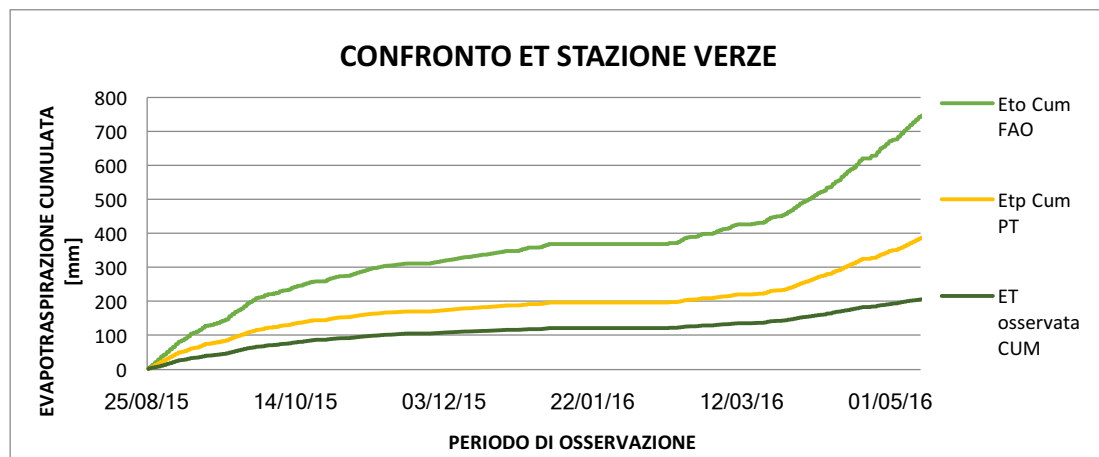


Grafico 4-6: Confronto fra ET osservata e calcolata mediante i metodi di Priestley & Taylor e FAO Penman-Monteith

Si nota inoltre che c'è una notevole differenza tra i due metodi analizzati e la stima della evapotraspirazione di riferimento, come è giusto aspettarsi che sia. Infatti la ETo, essendo potenziale, non tiene conto del tipo di coltura e delle scelte di irrigazione e in generale delle caratteristiche proprie del terreno.

Come già discusso nel capitolo precedente, la evapotraspirazione di una coltura è considerabile in condizioni standard ET_c quando, tra le altre ipotesi, le condizioni del contenuto di acqua nel terreno sono ottimali ovvero il livello di umidità è maggiore o uguale alla capacità di campo. Osservando l'andamento dell'umidità nel terreno nel Grafico 4-8, si può notare come ci siano alcuni periodi in cui compaiono delle interruzioni nei dati e questo è dovuto a malfunzionamenti nelle sonde di misurazione.

Come riportato nel Grafico 4-8 le volte in cui è stata osservata una umidità nel terreno superiore alla capacità di campo sono estremamente rare. Analizzando i dati si è ottenuto che solamente nel 3% del tempo questa condizione risulta soddisfatta.

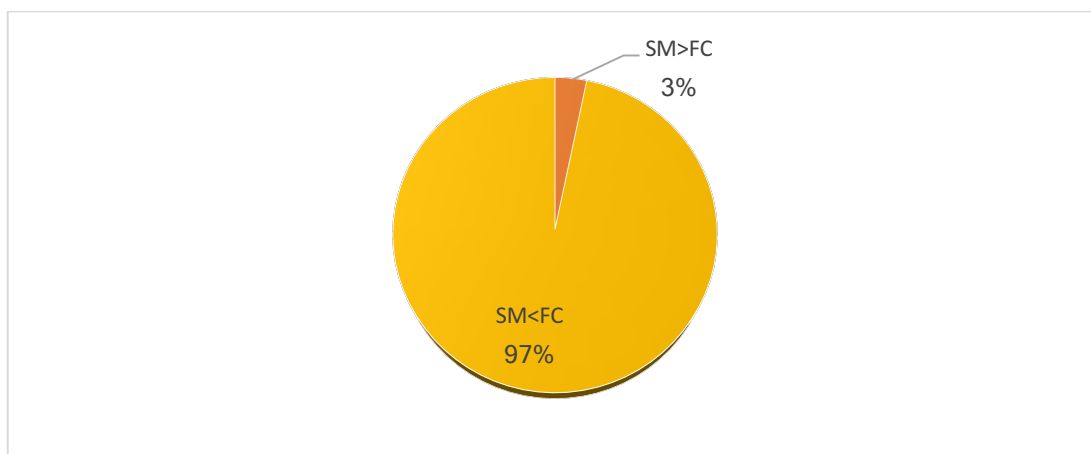


Grafico 4-7: Percentuali dei valori che soddisfano la condizione $SM > Fc$. Campo Verze.

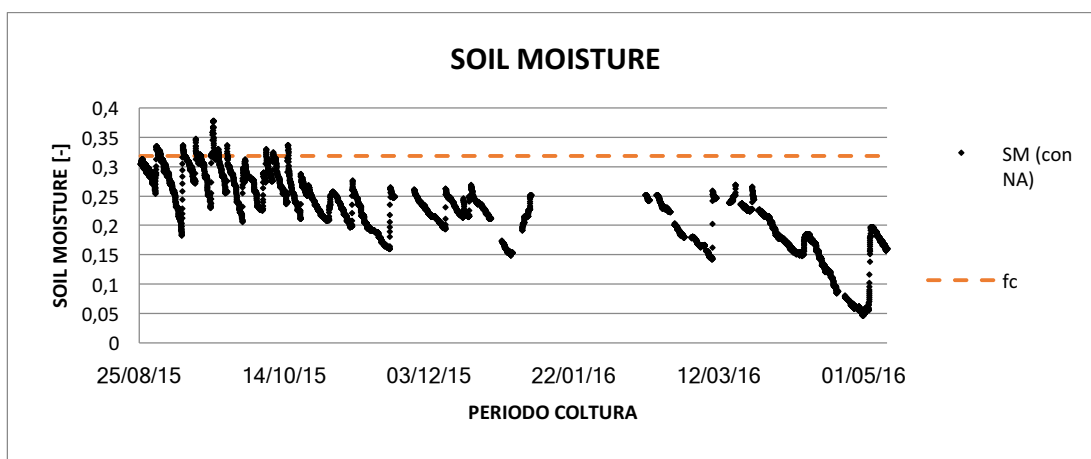


Grafico 4-8: Confronto fra l'umidità nel terreno e la soglia della Field Capacity, utile alla rappresentazione dei momenti in cui è possibile calcolare K_c . Campo Verze.

Come nel caso precedente, non si hanno avuto sufficienti dati per il calcolo del coefficiente culturale K_c .

4.5 Campo di Pomodori Azienda

Il periodo di acquisizione dei dati dal campo "Pomodori Azienda" è durato 137 giorni, dall'11/05/2016, sino al 25/09/2016. Il raccolto di pomodori ha avuto modo di crescere e raggiungere il pieno sviluppo, prima di essere raccolto il 22/09/2016, come mostra il Grafico 4-9.

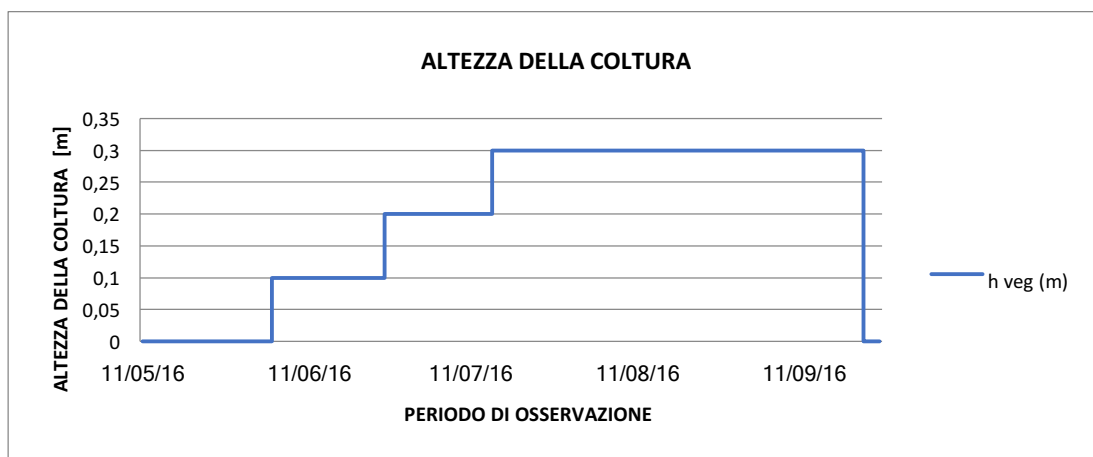


Grafico 4-9: Altezza della coltura pomodori Azienda durante il periodo di acquisizione dei dati

Nella Tabella 4-5 sono riportate le lunghezze in giorni delle fasi di crescita della coltura, con associati i valori del coefficiente colturale che come abbiamo descritto nel paragrafo precedente, identifica la differenza tra l'evapotraspirazione di riferimento e quella della coltura, di pomodori in questo caso.

<i>FASI DI CRESCITA</i>	DURATA SUGGERITA DA FAO [giorni] SEMINA: APRILE/MAGGIO CLIMA: MEDITERRANEO	Kc
<i>INIZIALE</i>	30	0.6
<i>SVILUPPO DELLA COLTURA</i>	40	-
<i>STAGIONE INTERMEDIA</i>	45	1.15
<i>TARDA STAGIONE</i>	30	0.7-0.9

Tabella 4-5: Tabella dei valori di Kc proposta dalla FAO, per clima mediterraneo e coltura di pomodori.

Osservando l'andamento dell'umidità nel terreno nel Grafico 4-10, si nota come la serie sia completa, senza interruzioni nelle misurazioni, cosa che si è manifestata spesso nei due campi precedenti. Inoltre non ci sono valori apparentemente anormali, che potrebbero indurre a pensare ad errori. La serie si mostra con valori di SM nell'insieme molto elevati, rispetto ai casi precedenti. Questo potrebbe essere fisicamente spiegato dal tipo di terreno che potrebbe contenere una frazione di argilla maggiore degli altri campi, in modo da trattenere più acqua. I picchi registrati sono spiegati dalla presenza di fenomeni meteorici intensi, come visibile nel Grafico 3-5. Confrontando la SM con il valore di Field Capacity, si osserva subito come questa serie si dimostri per la maggior parte del tempo con valori al di sopra della soglia. Questo è un ottimo presupposto per la stima del valore di Kc.

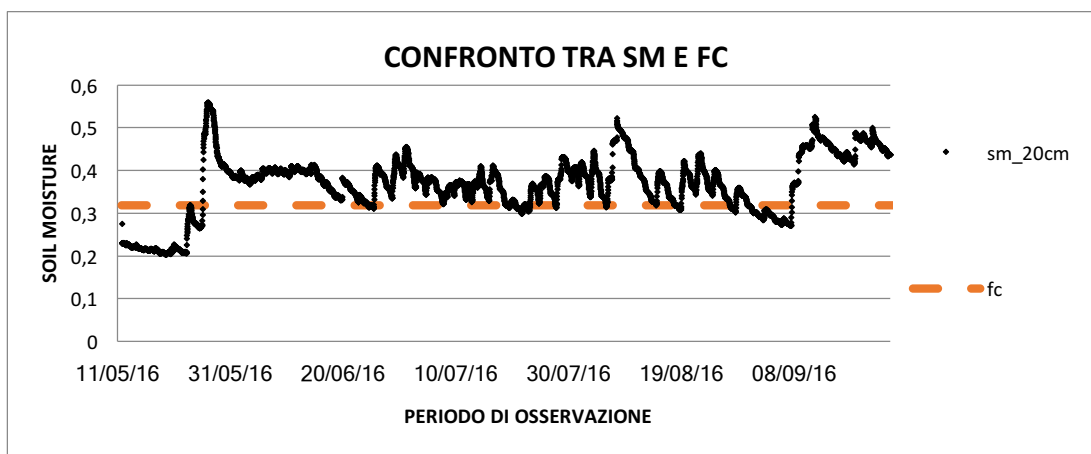


Grafico 4-10: Confronto fra l'umidità nel terreno e la soglia della Field Capacity, utile alla rappresentazione dei momenti in cui è possibile calcolare Kc. Campo Pomodori Azienda.

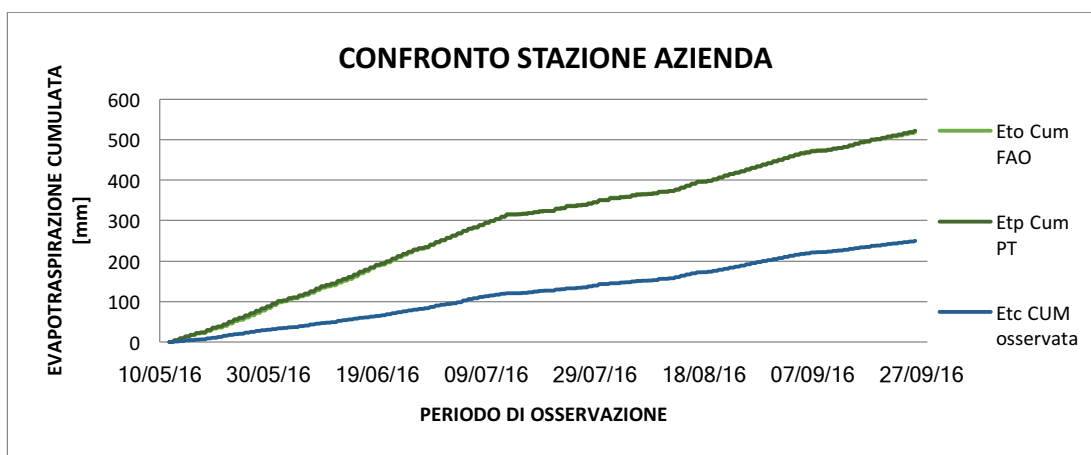


Grafico 4-11: Confronto fra ET osservata e calcolata mediante i metodi di Priestley & Taylor e FAO Penman-Monteith. Campo di pomodori Azienda

Il Grafico 4-11 rappresenta il confronto delle 3 curve cumulate di evapotraspirazione calcolate secondo il metodo di Penman-Monteith, quello di Priestley & Taylor e infine quella osservata sul campo dalla “Stazione Eddy Asparagi”. Per far sì che il confronto fosse corretto, è stato necessario calcolare le cumulate per i soli valori disponibili nello stesso momento in tutte e tre le serie. Per questo motivo, i valori di evapotraspirazione raffigurati non rappresentano la quantità effettiva di acqua evapotraspirata nel periodo in esame, ma bensì una frazione minore, dettata dalla scarsità di dati disponibili. Questi risultati saranno dunque esclusivamente una frazione del totale di Evapotraspirazione effettivamente avvenuta.

Si nota inoltre che c'è una notevole differenza tra i due metodi analizzati e la stima della evapotraspirazione di riferimento, come è giusto aspettarsi che sia. Infatti la ETo, essendo

potenziale, non tiene conto del tipo di coltura e delle scelte di irrigazione e in generale delle caratteristiche proprie del terreno.

Come già discusso nel capitolo precedente, la evapotraspirazione di una coltura è considerabile in condizioni standard ET_c quando, tra le altre ipotesi, le condizioni del contenuto di acqua nel terreno sono ottimali ovvero il livello di umidità è maggiore o uguale alla capacità di campo. Analizzando i dati disponibili, questa è stata fissata costante su tutto il terreno del campo e pari a 0,318.

L'umidità nel terreno è stata registrata superiore per ben l'80% del tempo e per più giorni interi consecutivi. Per questo motivo è stato possibile calcolare i valori di K_c medio giornaliero, che sono riportati nel Grafico 4-13, dove si può osservare il confronto tra i K_c calcolati partendo da ET calcolata tramite Priestley & Taylor e quelli da FAO Penman Monteith.

La linea spezzata identifica i valori proposti dalla FAO.

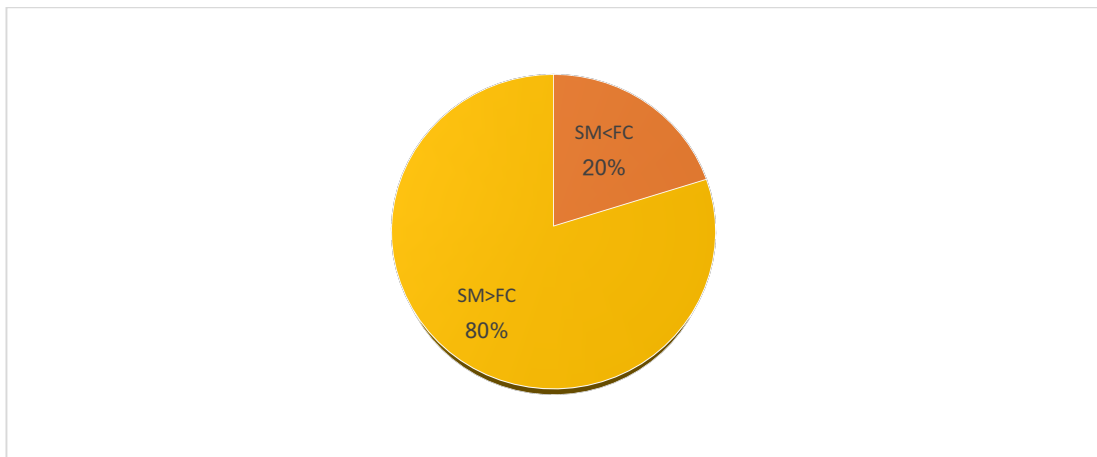


Grafico 4-12: Percentuali dei valori che soddisfano la condizione $SM > Fc$. Campo Pomodori Azienda.

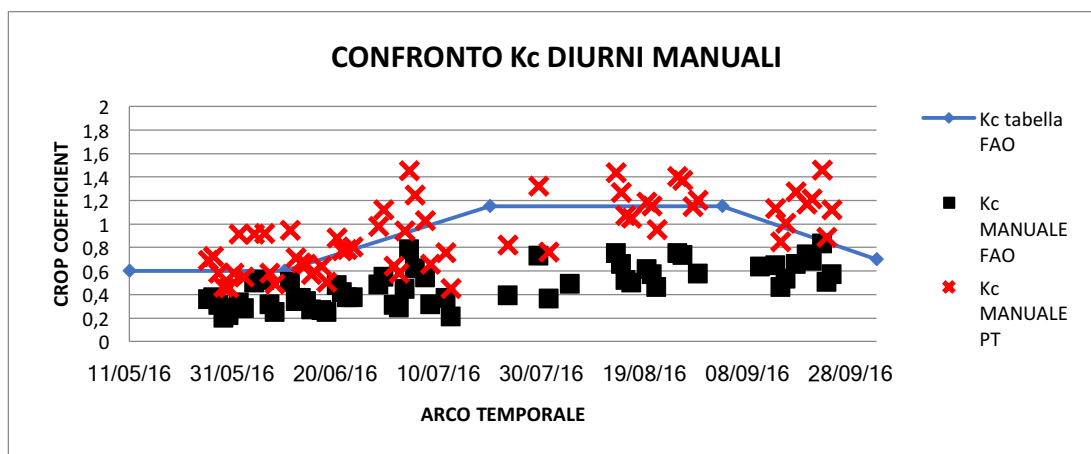


Grafico 4-13: Confronto fra Kc calcolati con ET da Priestley & Taylor e FAO Penman Monteith, con i valori tabulati proposti dalla FAO per clima mediterraneo e condizioni simili.

Si nota come i valori calcolati partendo da ET di Priestley & Taylor siano più vicini all'andamento del coefficiente culturale proposto dalla FAO. E' interessante notare come ci sia un effettivo aumento di Kc al progredire dello sviluppo della coltura.

4.6 Campo di Pomodori Consorzio

L'ultimo campo analizzato è stato quello relativo alla "Stazione Pomodori Consorzio", i cui dati sono stati acquisiti per 136 giorni, dal 12/05/2016 al 25/09/2016. Anche in questo caso la coltura ha avuto modo di svilupparsi completamente prima di essere raccolta, come mostrato nel Grafico 4-14. Si può notare che rispetto al caso del campo Pomodori Azienda, il raccolto è stato effettuato più di un mese prima, in data 2/08/2016.

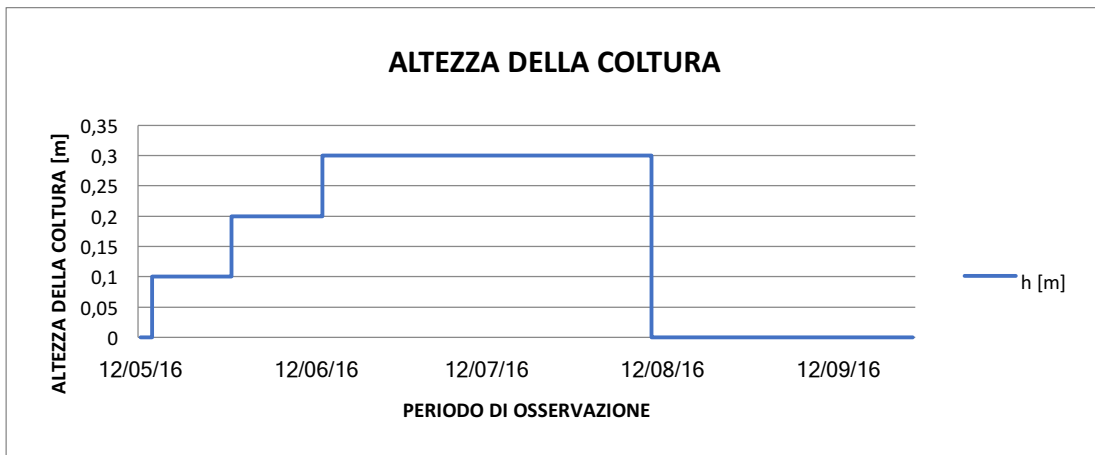


Grafico 4-14: Altezza della coltura pomodori Consorzio durante il periodo di acquisizione dei dati.

Nella Tabella 4-5, proposta nel caso precedente di Pomodori Azienda, sono riportate le lunghezze in giorni delle fasi di crescita della coltura, che sono le stesse anche per questo caso. Osservando l'andamento dell'umidità nel terreno nel Grafico 4-15, si può constatare come ci siano alcune mancanze di dato e i dati nella parte finale siano tendenzialmente di scarsa qualità. Inoltre è possibile osservare come i valori siano tendenzialmente inferiori rispetto alla soglia della Field Capacity. Questo significa che non è possibile calcolare valori di Kc significativi. Infatti, dal Grafico 4-17, si evidenzia come solamente il 6% dei valori rispettino la condizione per il calcolo del Kc.

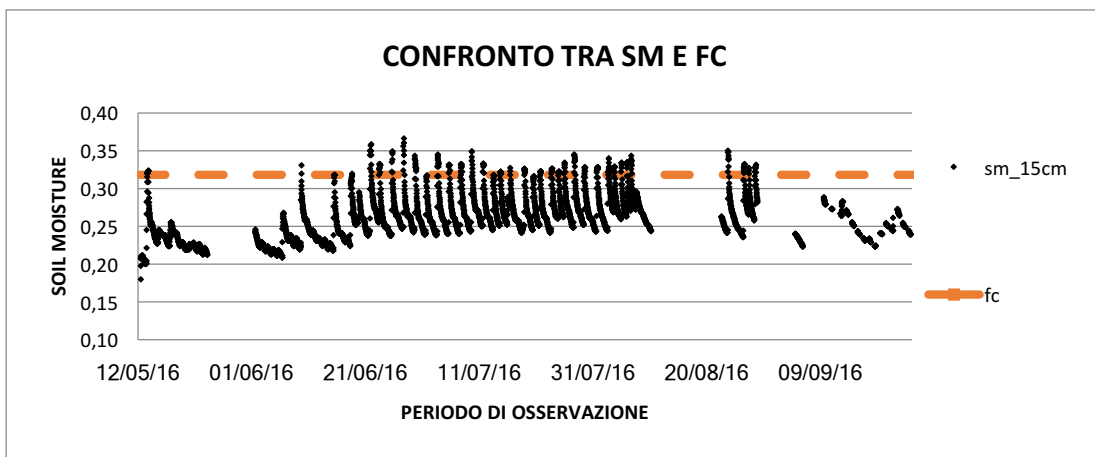


Grafico 4-15: Confronto fra l'umidità nel terreno e la soglia della Field Capacity, utile alla rappresentazione dei momenti in cui è possibile calcolare Kc. Campo Pomodori Consorzio.

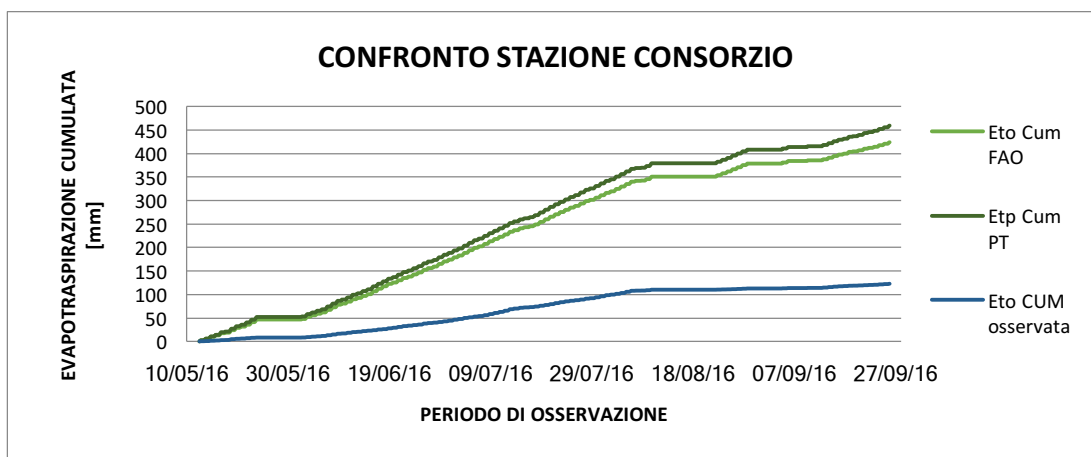


Grafico 4-16: Confronto fra ET osservata e calcolata mediante i metodi di Priestley & Taylor e FAO Penman-Monteith. Campo di pomodori Consorzio.

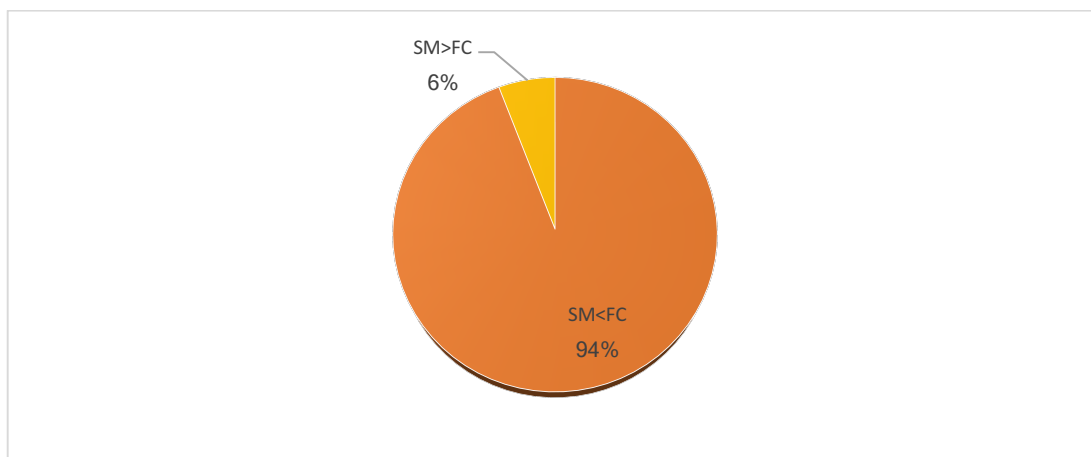


Grafico 4-17: Percentuali dei valori che soddisfano la condizione $SM > Fc$. Campo Pomodori Consorzio.

Dato che questi valori non sono consecutivi, non è possibile determinare valori del coefficiente culturale che siano significativi per il campo in esame.

CAPITOLO 5

FEST-EWB: IMPLEMENTAZIONE E RISULTATI

La fase più importante, successiva alla raccolta dei dati, è quella di processing in cui questi vengono combinati tra loro dal programma FEST-EWB per generare gli output.

Sono state realizzate numerose simulazioni al fine di ottenere risultati più precisi e valutare l'aggiunta di ulteriori dati o correzioni di quelli già esistenti. Le matrici e i dati di input sono state spiegate in dettaglio nel Capitolo 3.

Ogni simulazione ha richiesto molto tempo di calcolo essendo relativa ad un'area di circa 98'600 ha, o 986 km². Nei calcoli si sono utilizzate delle matrici rettangolari aventi 1365 righe x 1835 colonne, in cui ogni cella di calcolo ha una dimensione di 30 m x 30 m. Questo livello di dettaglio è considerato più che sufficiente per garantire un'ottima rappresentazione dei campi di colture di cui il comprensorio fa parte.

Il programma FEST-EWB ha dunque calcolato i bilanci energetici e idrologici in ogni cella del dominio, per ogni giorno della simulazione. In totale la simulazione ha una durata di 1052 giorni, iniziando infatti dall' 8/11/2013 e finendo il 25/09/2016.

Le simulazioni sono state eseguite sul server del Politecnico di Milano, tramite protocollo SSH per l'accesso remoto, ed hanno richiesto 7 giorni di calcolo ciascuna.

Una volta disponibili i dati di Output, si è proceduto ad analizzarli mediante due approcci:

- calibrazione a scala di campo tra i dati calcolati mediante la simulazione e quelli misurati nelle stazioni Eddy Covariance
- calibrazione a scala di bacino tra i valori di temperatura superficiale calcolati con la simulazione e quelli registrati mediante i satelliti Landsat 7 e Landsat 8.

5.1.1 Calibrazione a scala di campo

Questa prima calibrazione si basa sul confronto tra i dati calcolati mediante la simulazione in FEST-EWB e quelli misurati nelle stazioni Eddy Covariance. E' una calibrazione puntuale effettuata in quattro punti, per i periodi di disponibilità dei dati Eddy. Una rappresentazione del periodo temporale in cui si sono impiegate le stazioni Eddy è già stata proposta in Figura 2-4.

Sono stati confrontati i grafici degli andamenti temporali delle variabili più importanti:

- Umidità nel terreno SM
- Radiazione netta Rn
- Calore sensibile H
- Calore latente LE
- Flusso di calore nel terreno G
- Temperatura superficiale Ts

I termini di Rn, H, LE, e G sono le componenti del bilancio energetico.

Le analisi statistiche effettuate riguardano la determinazione di:

- RMSE (Root Mean Square Error), calcolato secondo l'equazione

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (OSS_i - SIM_i)^2}{n}}$$

- coefficiente angolare della regressione lineare tra valori simulati e osservati m
- coefficiente di correlazione della regressione lineare tra valori osservati e simulati R^2

Per ogni coltura si è dunque fatto il confronto fra i dati calcolati e misurati, verificando poi gli indici sopra descritti con l'obiettivo di capire quali parametri cambiare e di quanto, al fine di ottenere simulazioni che generino dati di output il più fedeli possibili ai dati misurati dalle stazioni Eddy.

5.1.2 Calibrazione a scala di bacino

La calibrazione a scala di bacino è stata effettuata sull'intera area del consorzio, confrontando i valori di temperatura superficiale LST calcolata mediante il software FEST-EWB e quelli misurati dai satelliti Landsat 7 e Landsat 8.

I confronti sono stati eseguiti in Matlab, tra i valori calcolati dal programma e quelli rilevati dai satelliti Landsat 7 e 8 nelle stesse giornate e agli stessi orari, essendo il parametro della temperatura superficiale estremamente variabile di ora in ora e in base al giorno.

Il confronto tra le differenze dei valori osservati e simulati, prevede il calcolo di:

- Media assoluta

- Media
- Deviazione standard
- RMSE (Root mean square error).

Sono stati inoltre calcolati anche la media e deviazione standard dei valori di temperatura misurati dai satelliti Landsat e quelli simulati dal FEST. Infine si è proceduto a calcolare il numero dei pixel aventi valori non nulli, indice questo della qualità dell'immagine confrontata. Le analisi statistiche ci consentono di capire quanto la simulazione sia valida a rappresentare la situazione reale del bacino idrografico ed identificare i parametri del suolo da modificare al fine di ottenere una migliore accuratezza del modello.

Il Landsat sono satelliti polari che forniscono immagini ogni circa 16 giorni alle ore 11:00, ora locale, sull'area in esame. Le immagini satellitari sono state elaborate e georeferire in un precedente lavoro. (Stanganelli, 2016)

Le date su cui si è applicato il confronto sono riportate in Tabella 5-1 e sono state scelte in relazione alla disponibilità di immagini satellitare con una qualità sufficientemente elevata in modo da garantire un confronto soddisfacente.

DATA ACQUISIZIONE DELL'IMMAGINE		SATELLITE	QUALITA' DELL'IMMAGINE
28/12/2013	11:00	Landsat 7	BUONA, SENZA NUVOLE
18/03/2014	11:00	Landsat 7	BUONA, SENZA NUVOLE
05/05/2014	11:00	Landsat 7	BUONA, SENZA NUVOLE
16/07/2014	11:00	Landsat 8	BUONA, SENZA NUVOLE
09/08/2014	11:00	Landsat 7	BUONA, SENZA NUVOLE
18/09/2014	11:00	Landsat 8	BUONA, SENZA NUVOLE
20/10/2014	11:00	Landsat 8	BUONA, SENZA NUVOLE
21/11/2014	11:00	Landsat 8	BUONA, SENZA NUVOLE
23/12/2014	11:00	Landsat 8	BUONA, SENZA NUVOLE
01/06/2015	11:00	Landsat 8	BUONA, SENZA NUVOLE
03/07/2015	11:00	Landsat 8	BUONA, SENZA NUVOLE
19/07/2015	11:00	Landsat 8	BUONA, SENZA NUVOLE
04/08/2015	11:00	Landsat 8	BUONA, SENZA NUVOLE
21/09/2015	11:00	Landsat 8	BUONA, SENZA NUVOLE
31/03/2016	11:00	Landsat 8	BUONA, SENZA NUVOLE
10/05/2016	11:00	Landsat 7	BUONA, SENZA NUVOLE
18/05/2016	11:00	Landsat 8	BUONA, SENZA NUVOLE
26/05/2016	11:00	Landsat 7	BUONA, SENZA NUVOLE
05/07/2016	11:00	Landsat 8	BUONA, SENZA NUVOLE
13/07/2016	11:00	Landsat 7	BUONA, SENZA NUVOLE
21/07/2016	11:00	Landsat 8	BUONA, SENZA NUVOLE

14/08/2016 11:00	Landsat 7	BUONA, SENZA NUVOLE
30/08/2016 11:00	Landsat 7	BUONA, SENZA NUVOLE

Tabella 5-1: Acquisizione delle immagini satellitari dai satelliti Landsat

La calibrazione è stata fatta cella per cella, garantendo risultati migliori rispetto al caso precedente in cui veniva effettuata esclusivamente sull'area dei quattro campi in cui vi sono le stazioni Eddy, che è decisamente ridotta rispetto all'intera superficie del consorzio.

Esempi di immagini scattate dai satelliti Landsat sono riportati in

Figura 5-1 e Figura 5-2, che rappresentano le temperature superficiali registrate sul Consorzio della Capitanata di Foggia nelle date del 1/06/2015 e 13/07/2016.

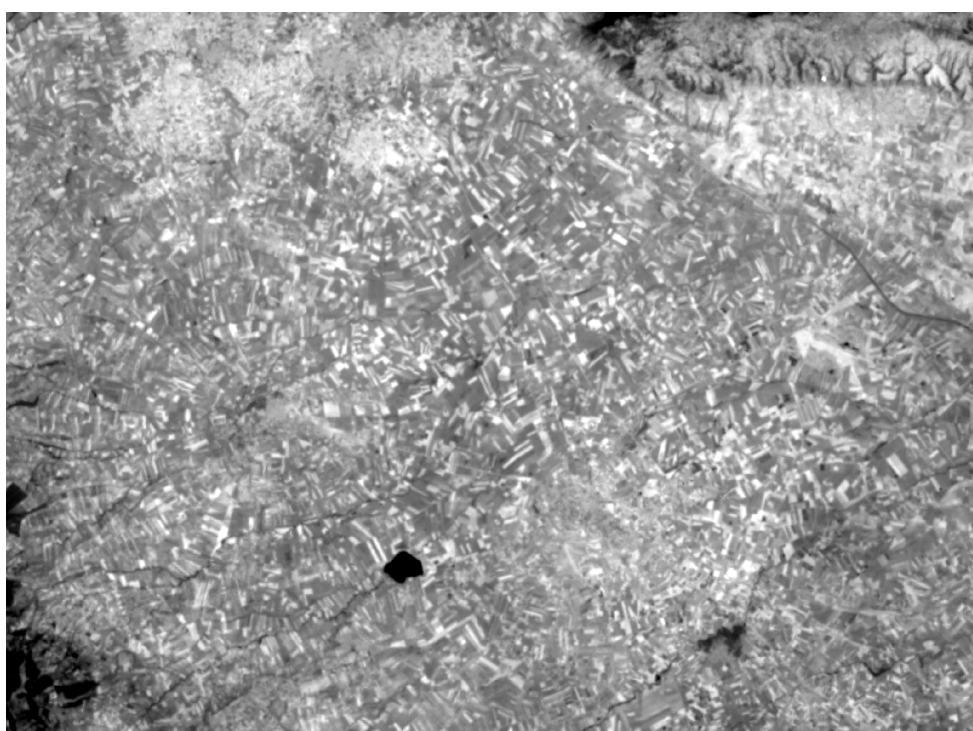


Figura 5-1: Immagine rappresentante la temperatura superficiale, scattata dal satellite Landsat 8 in data 1/06/2015 alle ore 11:00

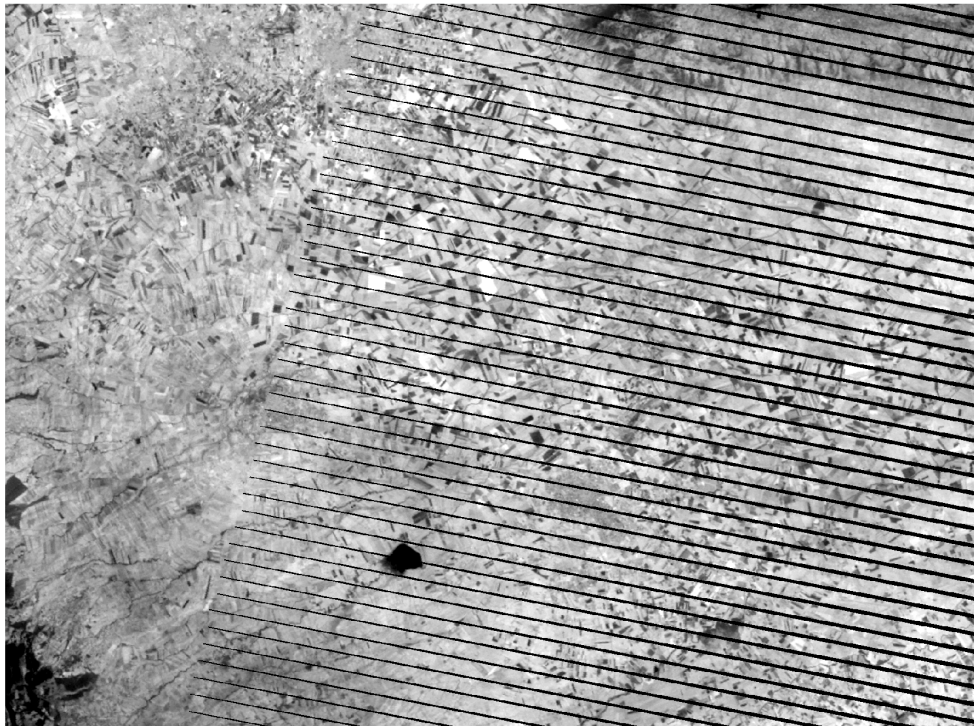


Figura 5-2: Immagine rappresentante la temperatura superficiale, scattata dal satellite Landsat 7 in data 13/07/2016 alle ore 11:00

Le immagini scattate dal satellite Landsat 7 hanno una qualità inferiore a causa di un malfunzionamento dell'apparecchio di rilevamento della temperatura superficiale di quest'ultimo. Risultano infatti essere disturbate da delle linee oblique, come chiaramente visibile in Figura 5-2.

5.2 Risultati delle simulazioni alla scala delle stazioni Eddy

Le analisi dei dati di output delle simulazioni, come già detto, sono state realizzate tramite il confronto con i dati osservati dalle stazioni Eddy.

5.2.1 Risultati Campo Asparagi

A conclusione della fase di calibrazione del modello, si riportano nelle pagine seguenti gli andamenti temporali osservati dalla “Stazione Azienda Asparagi” delle variabili SM, Rn, LE, H, G, LST, per il periodo simulato riguardante al campo di asparagi, confrontate con i valori calcolati con i parametri della prima simulazione (chiamata simulazione ORIGINALE) e con quelli calcolati alla fine del processo di calibrazione.

Nella Tabella 5-2 sono riportati i valori dei parametri riferiti alla simulazione originale, con indicati gli errori quadratici medi RMSE, il coefficiente angolare della regressione lineare tra valori osservati e simulati m , ed infine il coefficiente di correlazione lineare R^2 , delle variabili rappresentati nei grafici. Vengono inoltre riportati i volumi di acqua ceduta per evapotraspirazione che costituisce il fabbisogno irriguo della coltura. Nonostante la calibrazione abbia influito positivamente sull'umidità nel suolo, non si è riusciti a simulare efficacemente i valori di LE. Infatti l'errore è aumentato dal 15.5 al 40.8%. Questo è dovuto molto probabilmente ad errori nella misurazione del dato di LE, che sono chiaramente visibili nel Grafico 5-7, in cui tra il 24/06/2014 e il 24/07/2014 si identifica una serie di valori nettamente troppo bassi rispetto a quelli attesi per quel periodo.

Nella Tabella 5-3 sono invece riportati i parametri e indici statistici dei valori riferiti alla simulazione calibrata finale.

Nel Grafico 5-1 sono riportati i confronti tra i dati relativi all'umidità nel terreno osservata e calcolata tramite le simulazioni. Si può notare chiaramente l'effetto della calibrazione, infatti i valori della simulazione originaria risultano notevolmente discostanti rispetto a quelli osservati. Nella parte centrale della serie, in corrispondenza del periodo estivo, l'andamento dei valori di SM osservata sono piuttosto discostanti rispetto a quelli simulati. In questa zona infatti è probabile che si siano verificate delle letture errate da parte delle sonde nel terreno, dovuta alla formazione di crepe nel primo strato di suolo. Per questo motivo i dati misurati in quella zona sono da considerarsi poco attendibili.

I benefici della calibrazione sono estremamente visibili anche nei grafici successivi, in particolare in quello della R_n , H , G e LST .

Nel Grafico 5-3 del calore latente LE, si nota una leggera sovrastima dei valori simulati.

PARAMETRI IN INPUT	RMSE	m	R²
SIMULAZIONE ORIGINALE			
	SM [-]	0.07	
	LST [°C]	4.02	LST 0.82 LST 0.94
$\theta_{sat} = 0.464$	LE [w/m²]	79.64	LE 1.12 LE -0.05
$\theta_{res} = 0.075$	G [w/m²]	62.80	G 0.45 G 0.15
$F_c = 0.318$	Rn [w/m²]	83.27	Rn 0.66 Rn 0.80
$W_p = 0.197$	H [w/m²]	100.39	H 0.35 H 0.24
$k_{sat} = 5 \cdot 10^{-7} \text{ m/s}$	Volume finale ET osservata [m³/ha]		950
$bc = 0.242$	Volume finale ET simulata [m³/ha]		1098
$bubbling\ pressure = 0.2589m$	Errore assoluto finale volumi di ET [%]		15.5
$Initial\ saturation = 0.6$			

Tabella 5-2: Risultati analisi statistiche della simulazione originale a scala di campo, effettuati sul campo di asparagi

PARAMETRI IN INPUT SIMULAZIONE FINALE	RMSE	m	R²
	SM [-]	0.09	
	LST [°C]	2.26	LST 0.94 LST 0.95
	LE [w/m²]	69.38	LE 1.02 LE -0.16
	G [w/m²]	51.01	G 0.65 G 0.54
	Rn [w/m²]	39.38	Rn 0.96 Rn 0.94
	H [w/m²]	53.45	H 0.82 H 0.59
	Volume finale ET osservata [m³/ha]		1338
	Volume finale ET simulata [m³/ha]		950
	Errore assoluto finale volumi di ET [%]		40.8

Tabella 5-3: Risultati analisi statistiche della simulazione finale a scala di campo, effettuati sul campo di asparagi

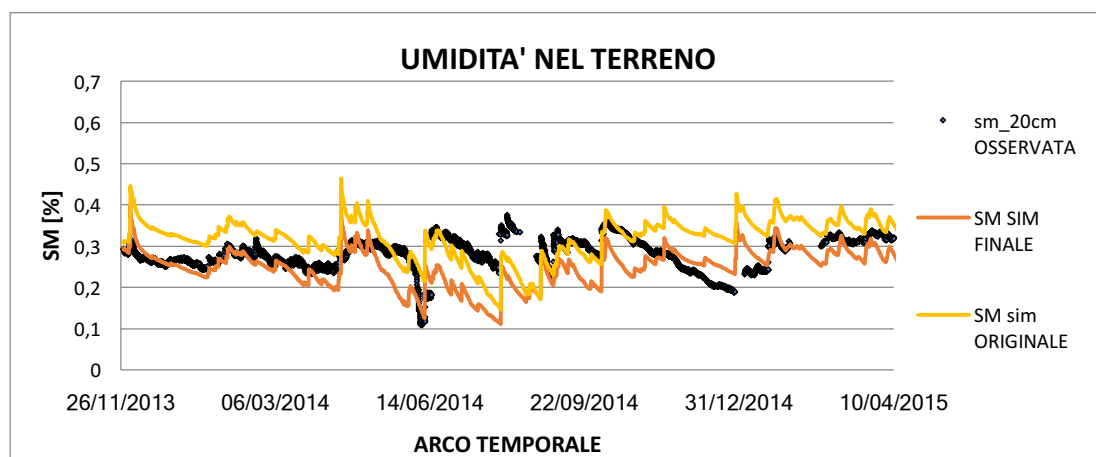


Grafico 5-1: Confronto tra l'andamento dell'umidità nel terreno osservata, simulata con i parametri originali e calibrata dopo 10 simulazioni. Campo Asparagi.

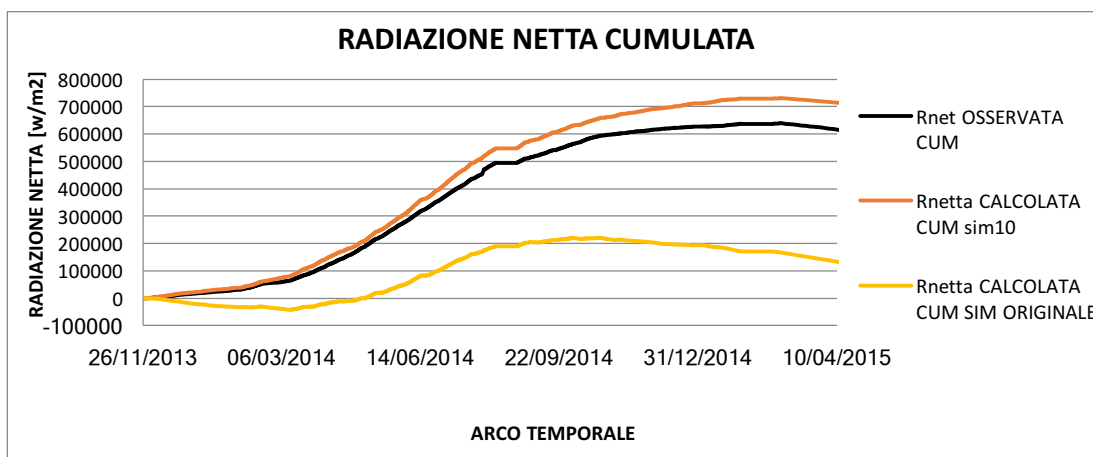


Grafico 5-2: Confronto tra la radiazione netta cumulata osservata, simulata con i parametri originali e calibrata dopo 10 simulazioni. Campo Asparagi.

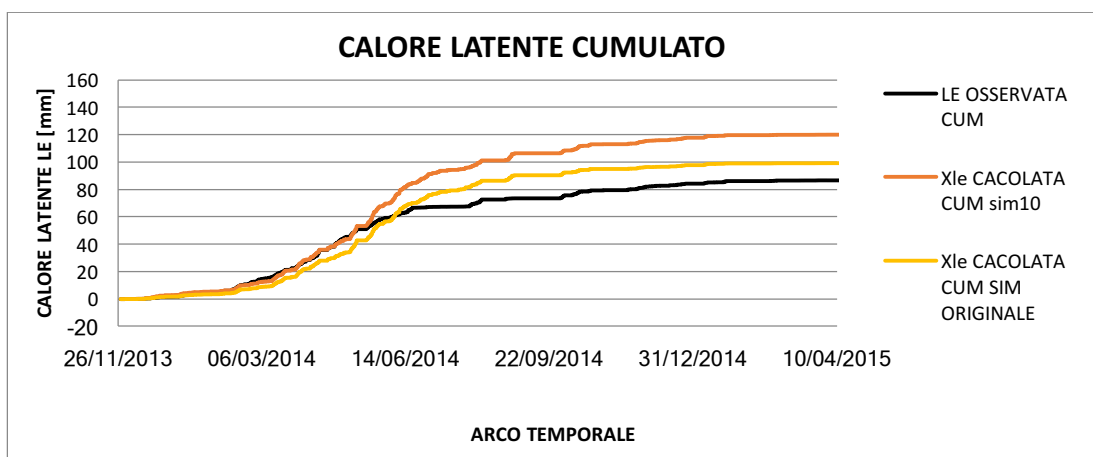


Grafico 5-3: Confronto tra il calore latente cumulato osservato, simulato con i parametri originali e calibrato dopo 10 simulazioni. Campo Asparagi.

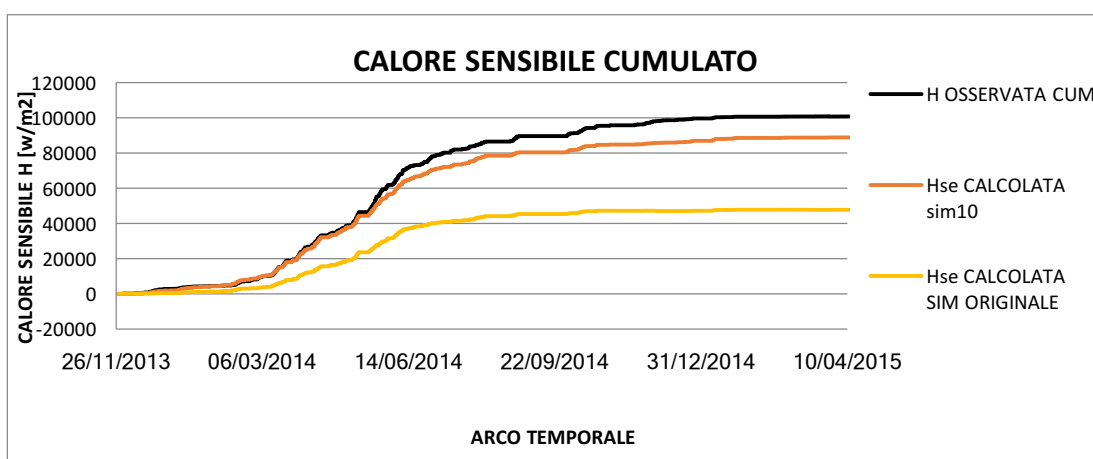


Grafico 5-4: Confronto tra il calore sensibile cumulato osservato, simulato con i parametri originali e calibrato dopo 10 simulazioni. Campo Asparagi.

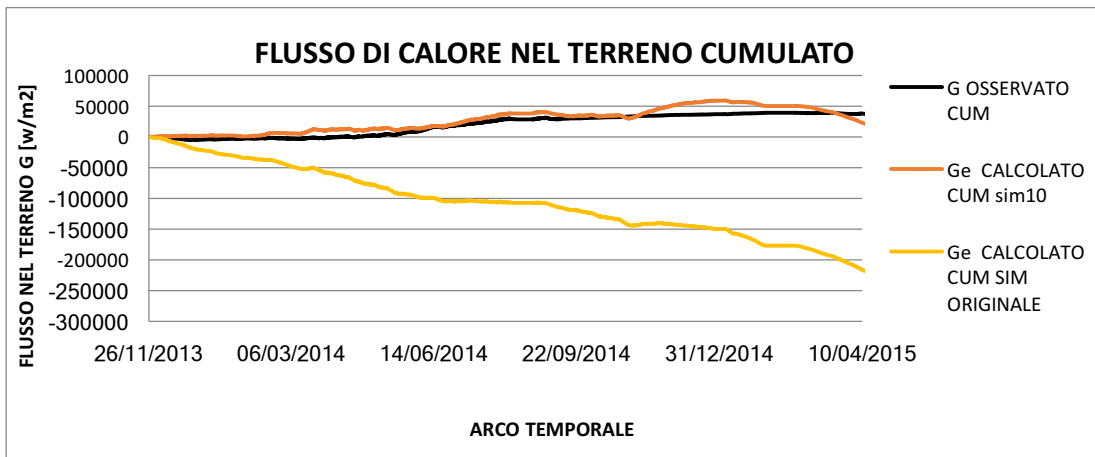


Grafico 5-5: Confronto tra il flusso di calore nel terreno cumulato osservato, simulato con i parametri originali e calibrato dopo 10 simulazioni. Campo Asparagi.

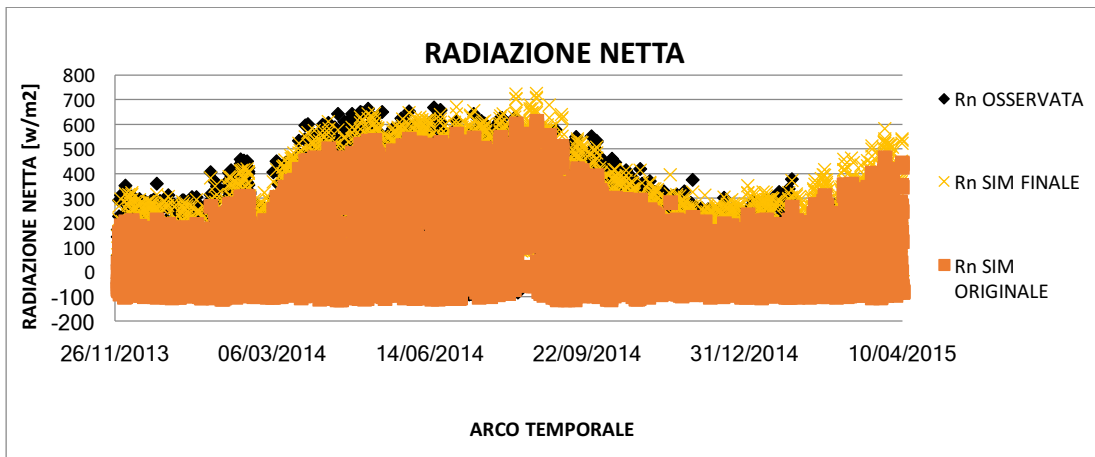


Grafico 5-6: Confronto tra la radiazione netta osservata, simulata con i parametri originali e calibrata dopo 10 simulazioni. Campo Asparagi.

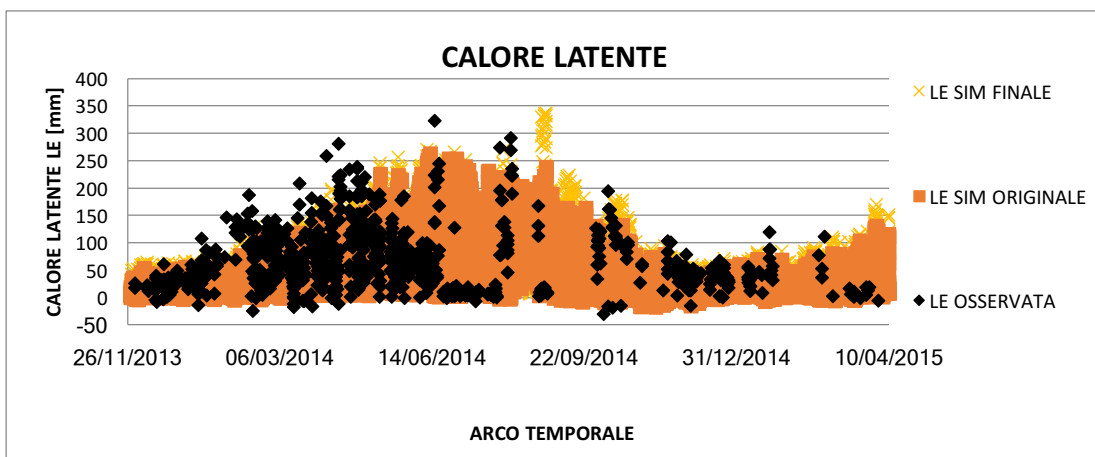


Grafico 5-7: Confronto tra il calore latente osservato, simulato con i parametri originali e calibrato dopo 10 simulazioni. Campo Asparagi.

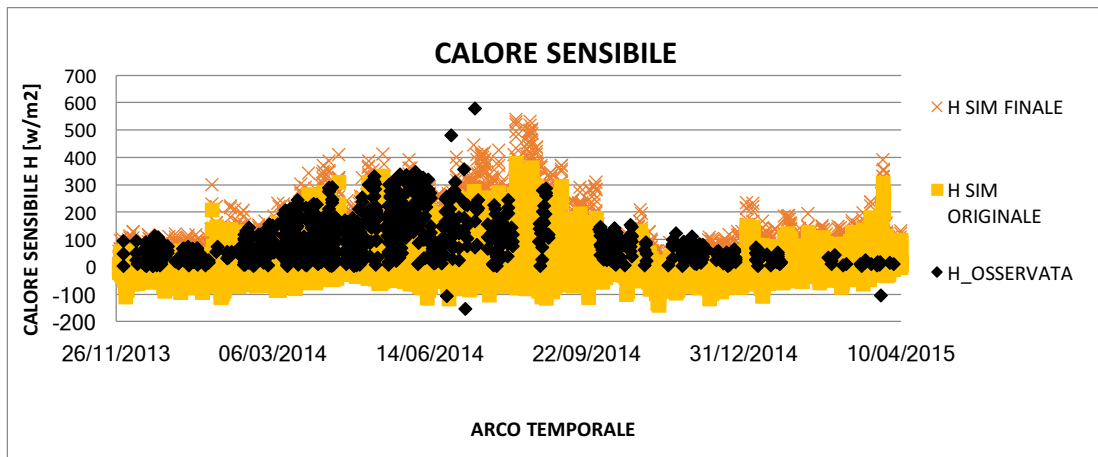


Grafico 5-8: Confronto tra il calore sensibile osservato, simulato con i parametri originali e calibrato dopo 10 simulazioni. Campo Asparagi.

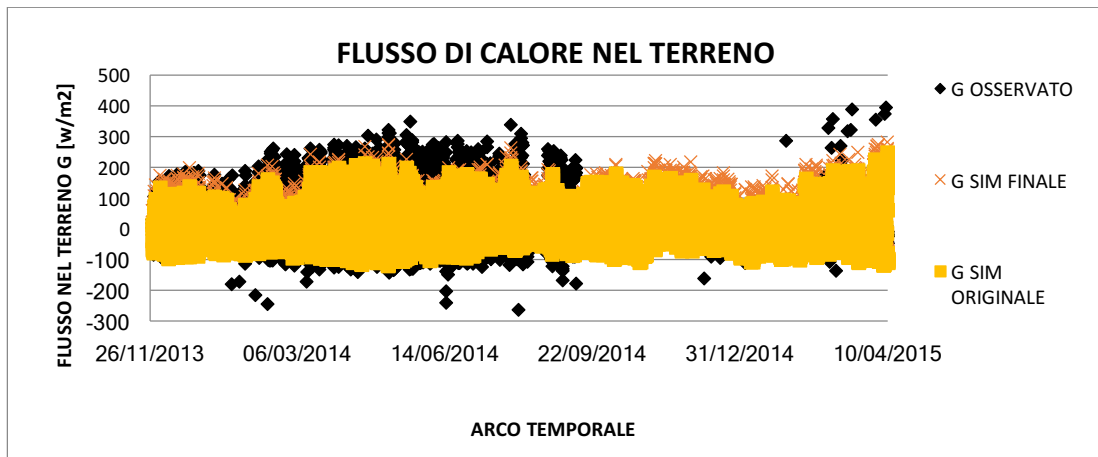


Grafico 5-9: Confronto tra il flusso di calore nel terreno osservato, simulato con i parametri originali e calibrato dopo 10 simulazioni. Campo Asparagi.

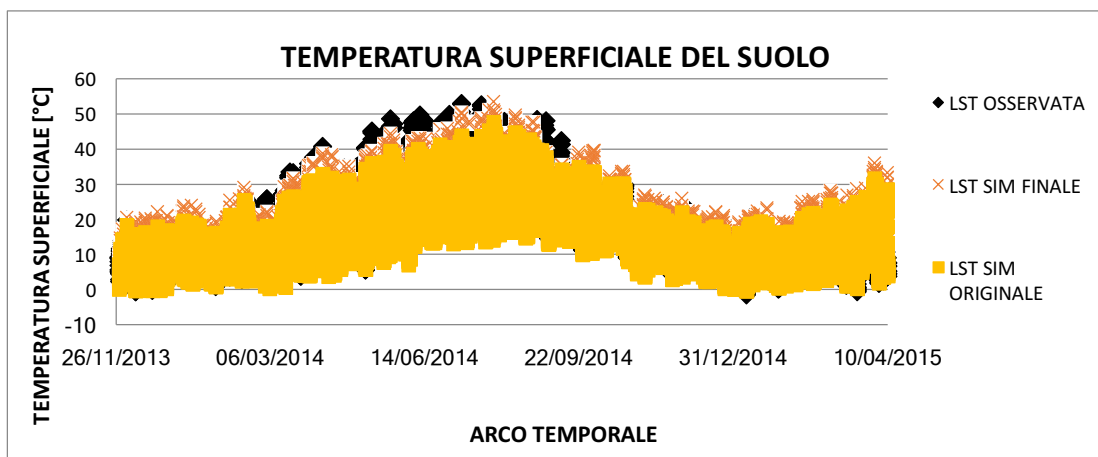


Grafico 5-10: Confronto tra la temperatura superficiale del suolo osservata, simulata con i parametri originali e calibrata dopo 10 simulazioni. Campo Asparagi.

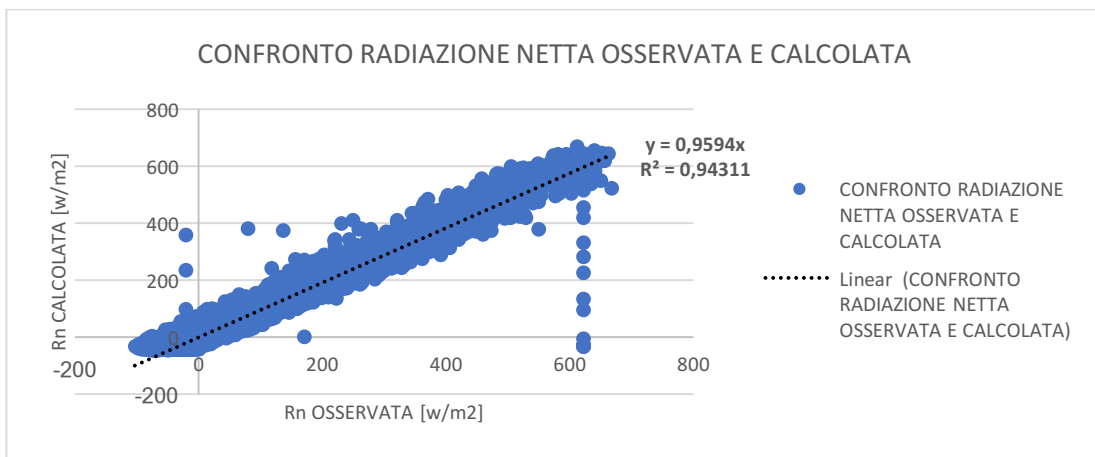


Grafico 5-11: Diagramma di correlazione tra la radiazione netta osservata e quella calcolata dopo la fase di calibrazione. Campo di asparagi.

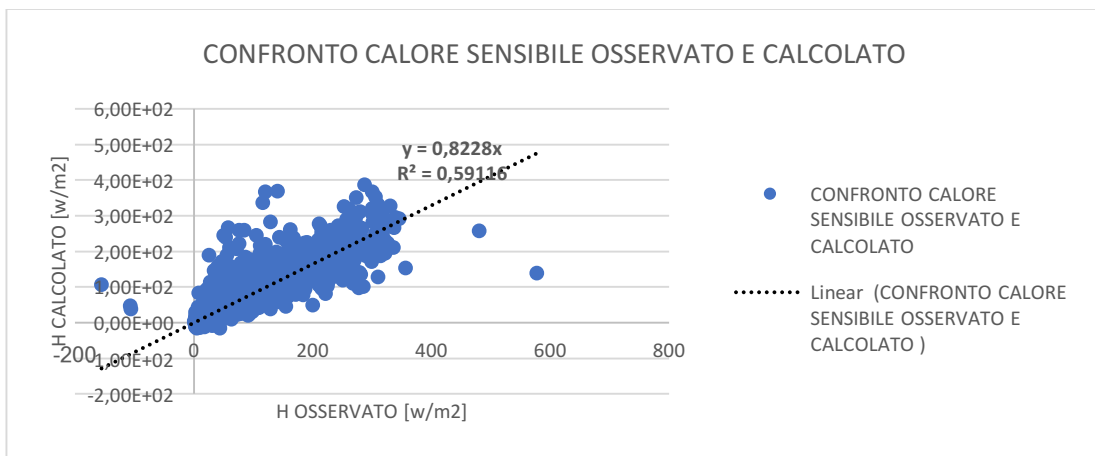


Grafico 5-12: Diagramma di correlazione tra il calore sensibile osservato e quello calcolato dopo la fase di calibrazione. Campo di asparagi.

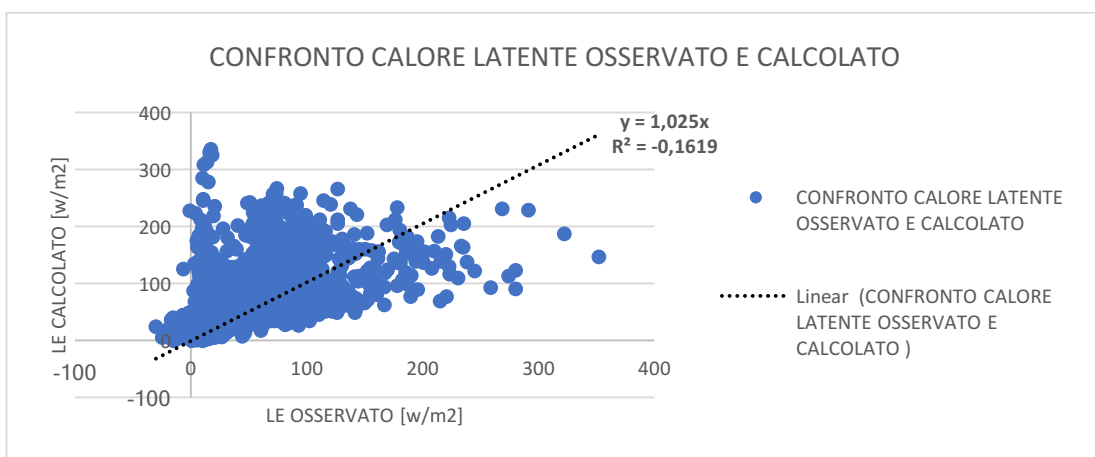


Grafico 5-13: Diagramma di correlazione tra il calore latente osservato e quello calcolato dopo la fase di calibrazione. Campo di asparagi.

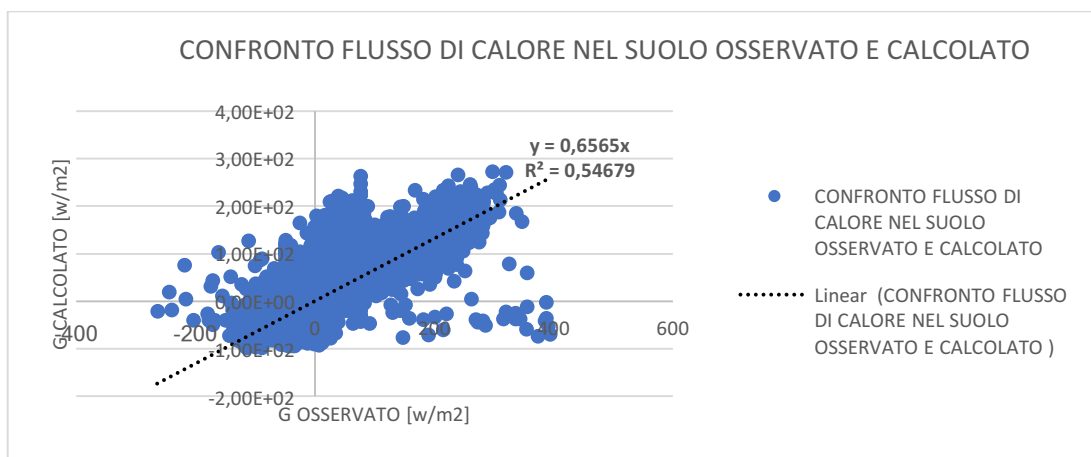


Grafico 5-14: Diagramma di correlazione tra il calore nel suolo osservato e quello calcolato dopo la fase di calibrazione. Campo di asparagi.

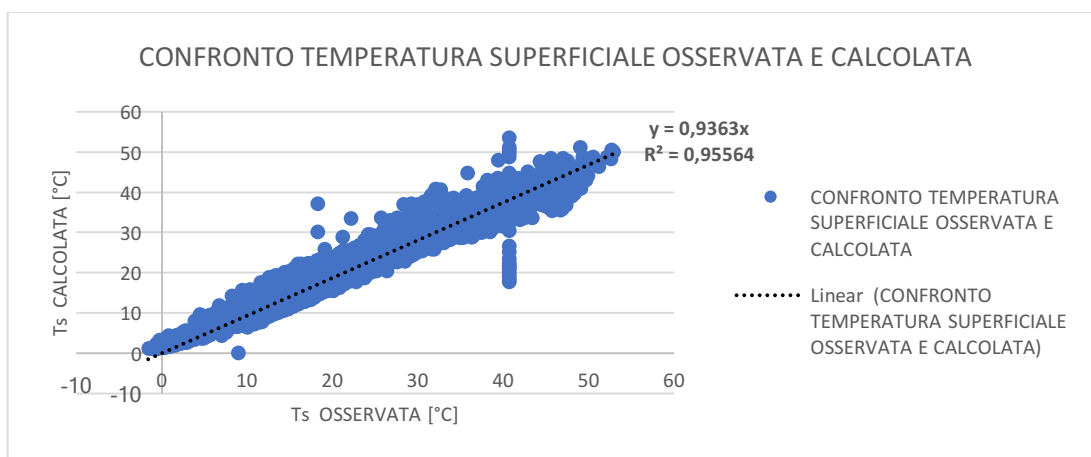


Grafico 5-15: Diagramma di correlazione tra la temperatura del suolo osservata e quella calcolata dopo la fase di calibrazione. Campo di asparagi.

5.2.2 Risultati Campo Verze

A conclusione della fase di calibrazione del modello, si riportano nelle pagine seguenti gli andamenti temporali osservati dalla “Stazione Azienda Verze” delle variabili SM, Rn, LE, H, G, LST, per il periodo simulato riguardante al campo di verze, confrontate con i valori calcolati con i parametri della prima simulazione (chiamata simulazione ORIGINALE) e con quelli calcolati alla fine del processo di calibrazione.

Nella Tabella 5-4 sono riportati i valori dei parametri riferiti alla simulazione originale, con indicati gli errori quadratici medi RMSE, il coefficiente angolare della regressione lineare tra valori osservati e simulati m , ed infine il coefficiente di correlazione lineare R^2 , delle variabili rappresentati nei grafici. Vengono inoltre riportati i volumi di acqua ceduta per

evapotraspirazione che costituisce il fabbisogno irriguo della coltura. Gli effetti della calibrazione sono evidenti, in quanto l'errore assoluto tra valori osservati e simulati si abbassa dal 41.1 al 2.7%.

Nella Tabella 5-5 sono invece riportati i parametri e indici statistici dei valori riferiti alla simulazione calibrata finale.

Nel Grafico 5-16 sono riportati i confronti tra i dati relativi all'umidità nel terreno osservata e calcolata tramite le simulazioni. L'effetto della calibrazione è chiaramente visibile, anche se nella parte iniziale in corrispondenza dei mesi di agosto e settembre, si nota un marcato discostamento. Dai mesi di dicembre 2015 a febbraio 2016, si può osservare una completa mancanza di dati osservati dalla stazione. Questo è reputabile ad un malfunzionamento generale della stazione Eddy, in quanto nessun dato risulta disponibile. Trai mesi di aprile e maggio 2016 si riscontrano inoltre dei valori di umidità estremamente bassi, arrivando a 0.05, che non sono attendibili per la rappresentazione dello stato del campo. In questa parte infatti, si ritiene si siano create delle fessure all'interno del primo strato di suolo, che hanno compromesso le misurazioni effettuate.

I benefici della calibrazione sono estremamente visibili anche nei grafici successivi, in particolare in quello della Rn, LE, G e LST. Anche per queste variabili, si riconosce nei grafici il periodo tra dicembre 2015 e febbraio 2016 in cui la stazione Eddy ha smesso di funzionare. Nel Grafico 5-19 del calore sensibile H, si nota una generale sovrastima dei valori simulati.

PARAMETRI IN INPUT	RMSE	m		R²		
$\theta_{sat} = 0.464$ $\theta_{res} = 0.075$ $F_c = 0.318$ $W_p = 0.197$ $k_{sat} = 5.0000e-07$ m/s $bc = 0.242$ $bubbling\ pressure = 0.2589m$ $initial\ saturation = 0.6$	SM [-]	0.07				
	LST [°C]	5.30	LST	0.92	LST 0.93	
	LE [w/m²]	143.45	LE	0.56	LE 0.55	
	G [w/m²]	52.79	G	2.16	G 0.42	
	Rn [w/m²]	67.08	Rn	0.64	Rn 0.83	
	H [w/m²]	114.00	H	0.65	H 0.35	
	Volume finale ET osservata [m³/ha]					1900
	Volume finale ET simulata [m³/ha]					1118
	Errore assoluto finale volumi di ET [%]					41.1

Tabella 5-4: Risultati analisi statistiche della simulazione originale a scala di campo, effettuati sul campo di verze

PARAMETRI IN INPUT	RMSE	m		R²	
$\theta_{sat} = 0.437$ $\theta_{res} = 0.020$ $F_c = 0.091$ $W_p = 0.033$ $k_{sat} = 6.9444e-05$ m/s $bc = 0.694$	SM [-]	0.23			
	LST [°C]	17.41	LST	0.99	LST 0.89
	LE [w/m²]	122.55	LE	0.93	LE 0.57
	G [w/m²]	22.54	G	1.80	G 0.50

bubbling pressure = 0.0726m
initial saturation = 0.65

Rn [w/m²]	181.25	Rn	0.91	Rn	0.93
H [w/m²]	78.84	H	1.15	H	0.16
Volume finale ET osservata [m³/ha]					1900
Volume finale ET simulata [m³/ha]					1848
Errore assoluto finale volumi di ET [%]					2.7

Tabella 5-5: Risultati analisi statistiche della simulazione finale a scala di campo, effettuati sul campo di verze

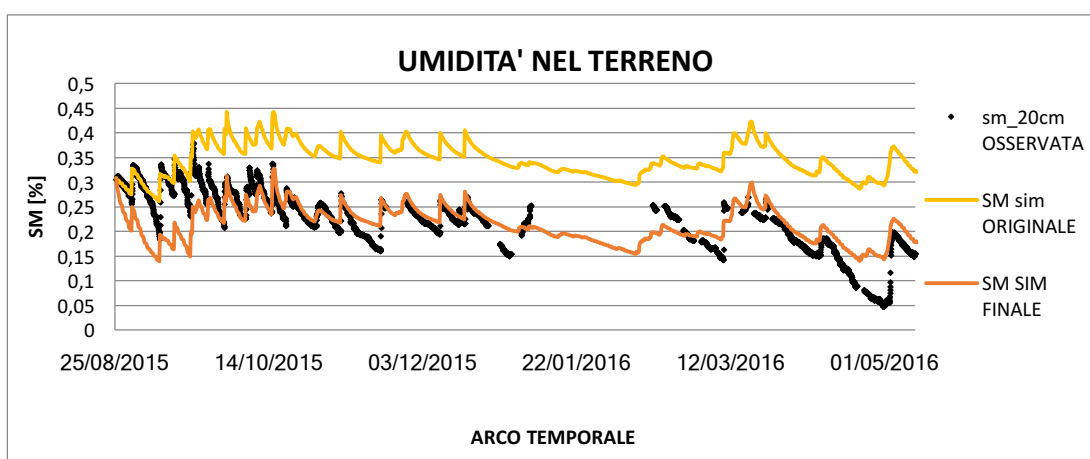


Grafico 5-16: Confronto tra l'umidità nel terreno osservata, simulata con i parametri originali e calibrata dopo 10 simulazioni. Campo Verze.

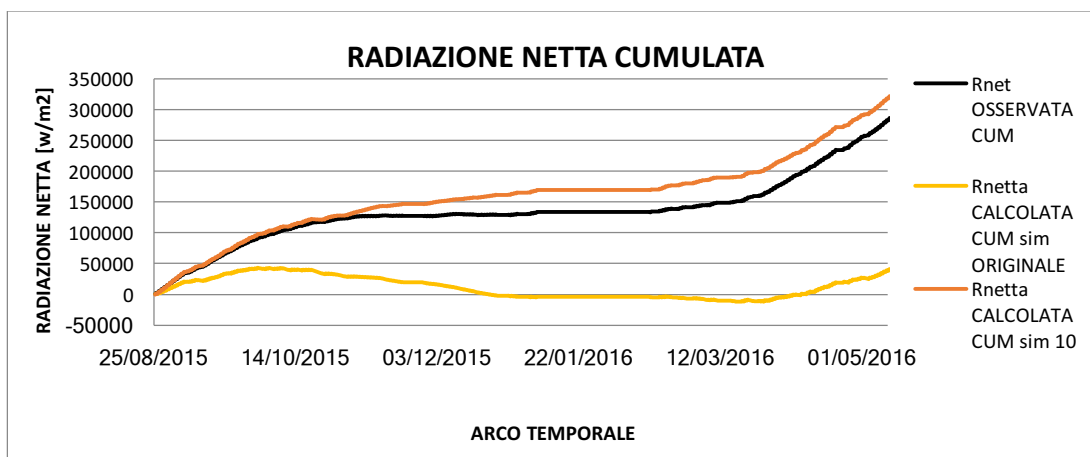


Grafico 5-17: Confronto tra la radiazione netta cumulata osservata, simulata con i parametri originali e calibrata dopo 10 simulazioni. Campo Verze.

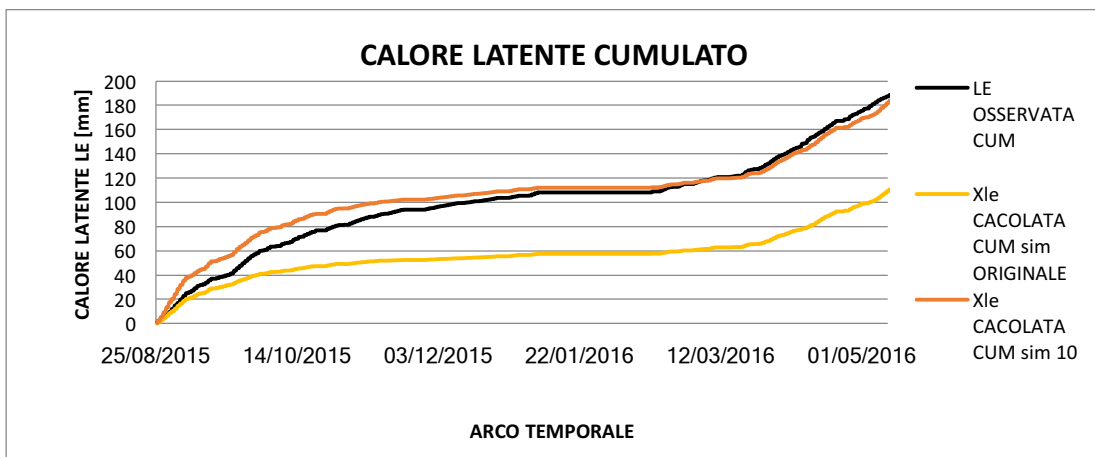


Grafico 5-18: Confronto tra il calore latente cumulato osservato, simulato con i parametri originali e calibrato dopo 10 simulazioni. Campo Verze.

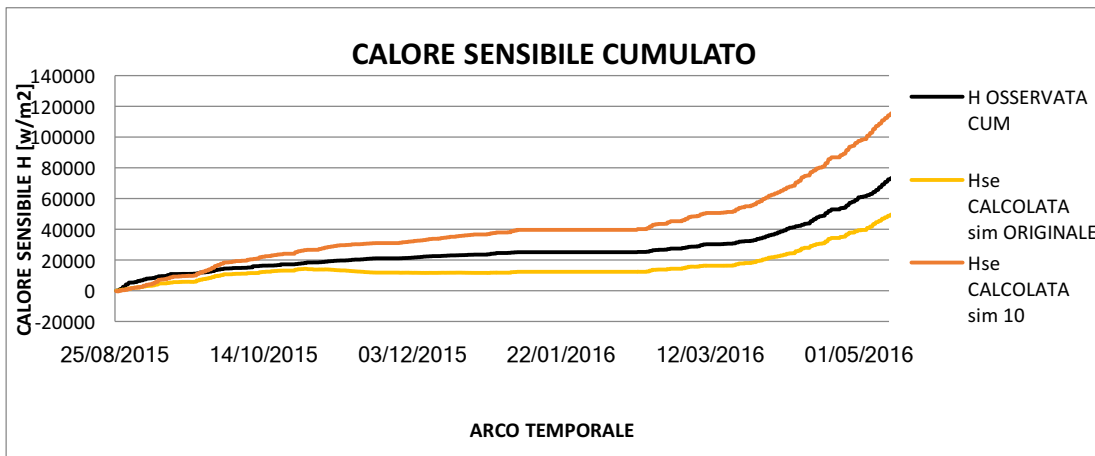


Grafico 5-19: Confronto tra il calore sensibile cumulato osservato, simulato con i parametri originali e calibrato dopo 10 simulazioni. Campo Verze.

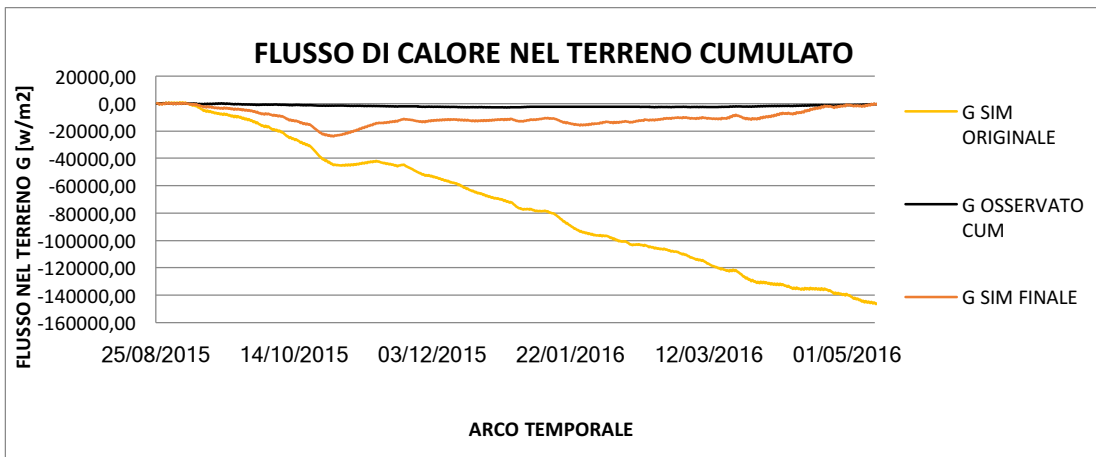


Grafico 5-20: Confronto tra il flusso di calore cumulato nel terreno osservato, simulato con i parametri originali e calibrato dopo 10 simulazioni. Campo Verze.

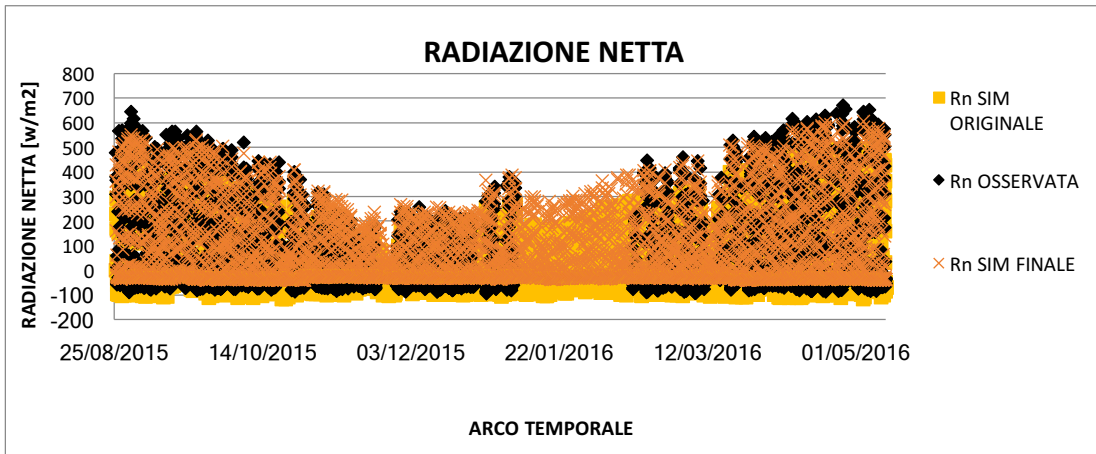


Grafico 5-21: Confronto tra la radiazione netta osservata, simulata con i parametri originali e calibrata dopo 10 simulazioni. Campo Verze.

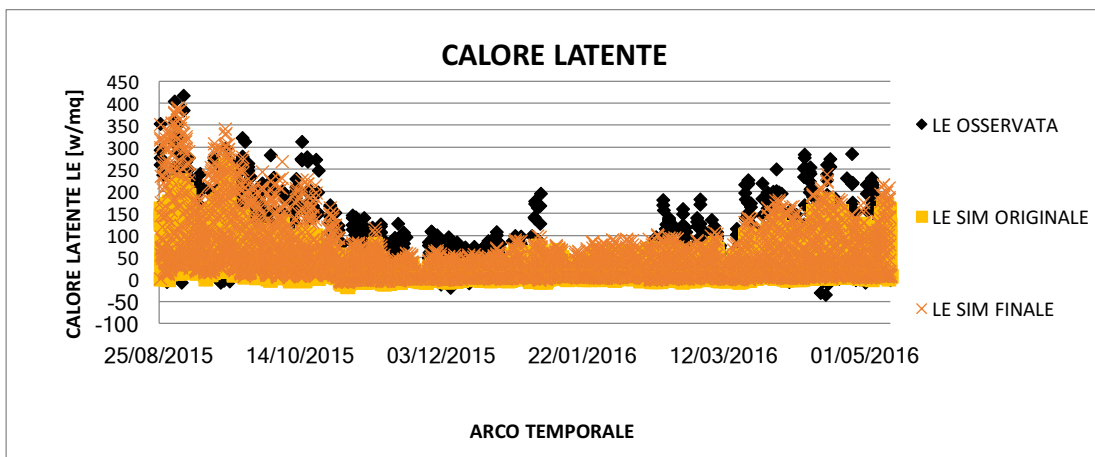


Grafico 5-22: Confronto tra il calore latente osservato, simulato con i parametri originali e calibrato dopo 10 simulazioni. Campo Verze.

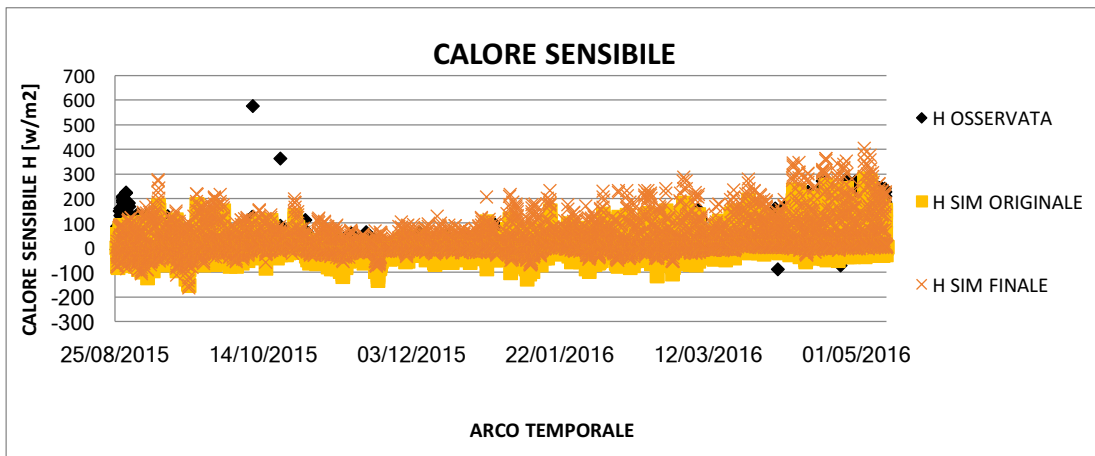


Grafico 5-23: Confronto tra il calore sensibile osservato, simulato con i parametri originali e calibrato dopo 10 simulazioni. Campo Verze.

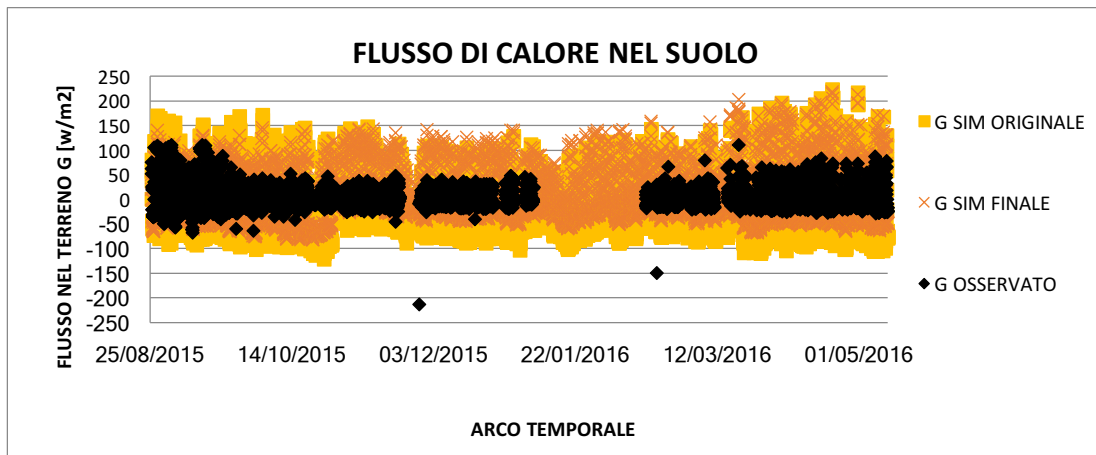


Grafico 5-24: Confronto tra il flusso di calore osservato, simulato con i parametri originali e calibrato dopo 10 simulazioni. Campo Verze.

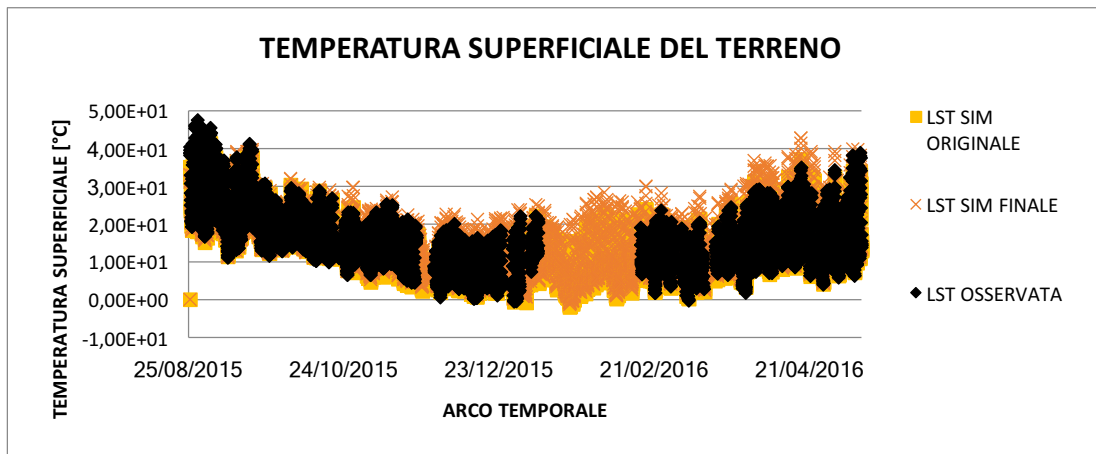


Grafico 5-25: Confronto tra la temperatura superficiale del terreno osservata, simulata con i parametri originali e calibrata dopo 10 simulazioni. Campo Verze.

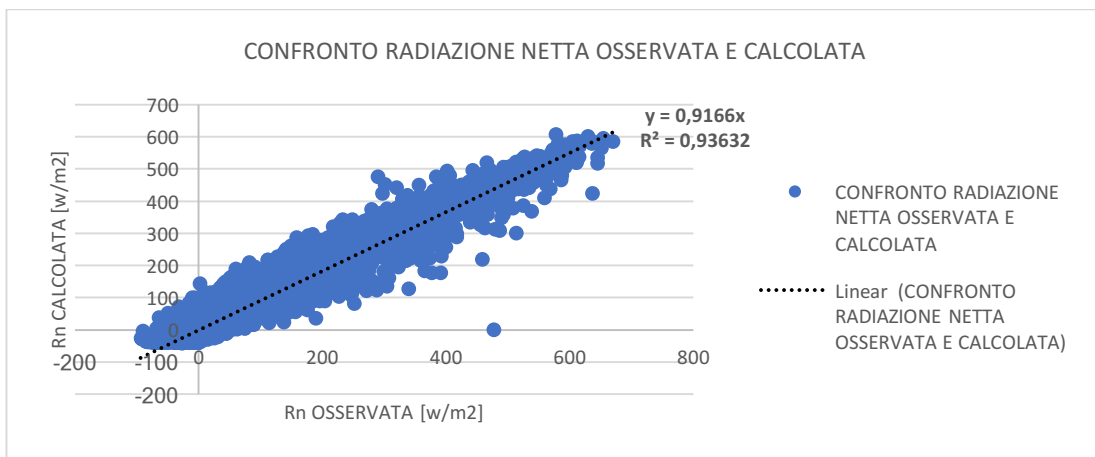


Grafico 5-26: Diagramma di correlazione tra la radiazione netta osservata e quella calcolata dopo la fase di calibrazione. Campo di verze.

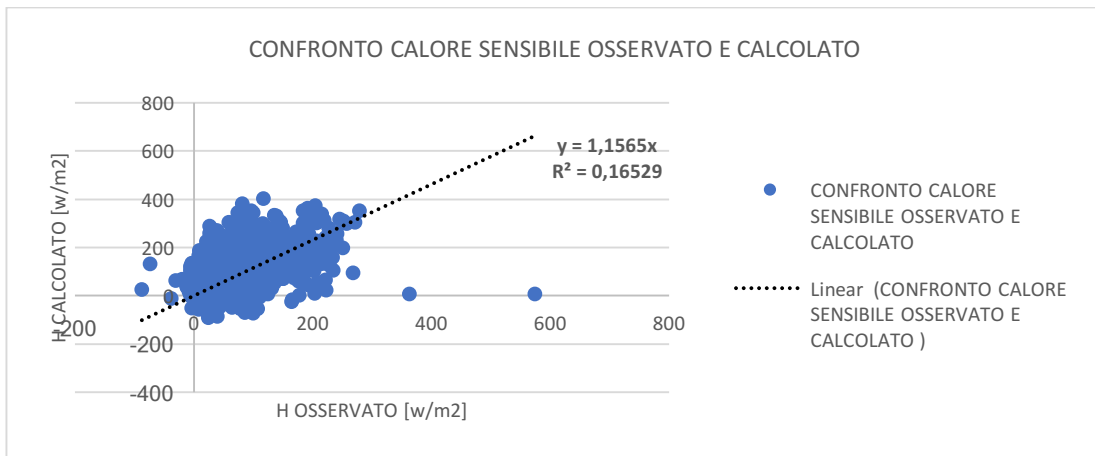


Grafico 5-27: Diagramma di correlazione tra il calore sensibile osservato e quella calcolata dopo la fase di calibrazione. Campo di verze.

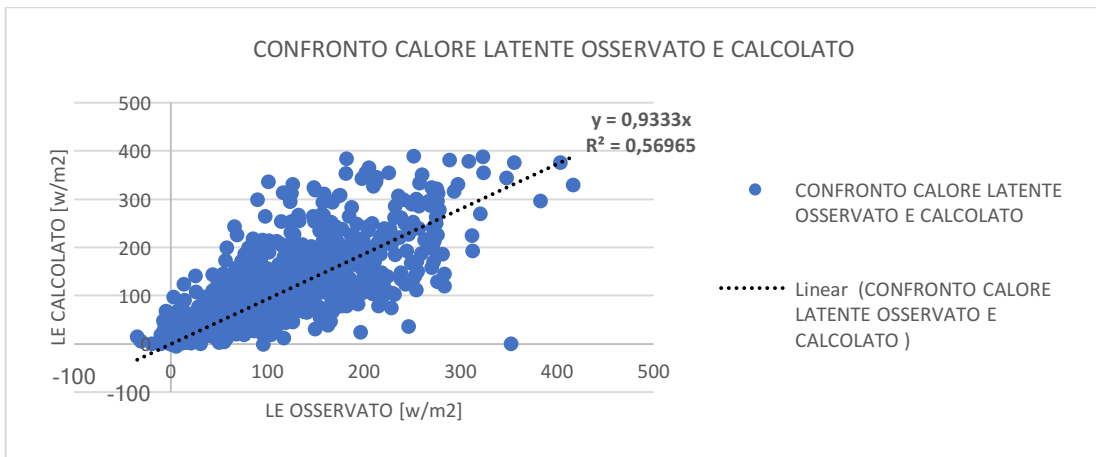


Grafico 5-28: Diagramma di correlazione tra il calore latente osservato e quello calcolato dopo la fase di calibrazione. Campo di verze.

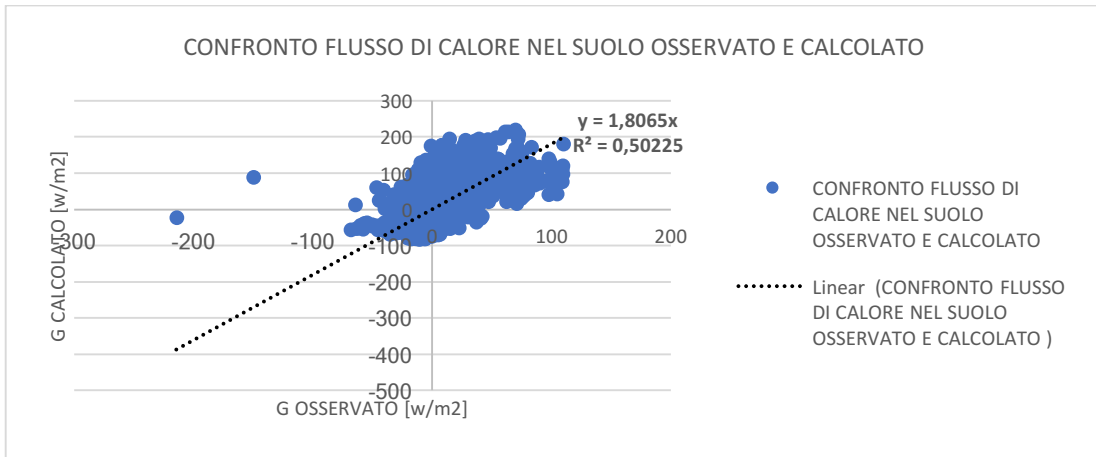


Grafico 5-29: Diagramma di correlazione tra il calore nel suolo osservata e quella calcolata dopo la fase di calibrazione. Campo di verze.

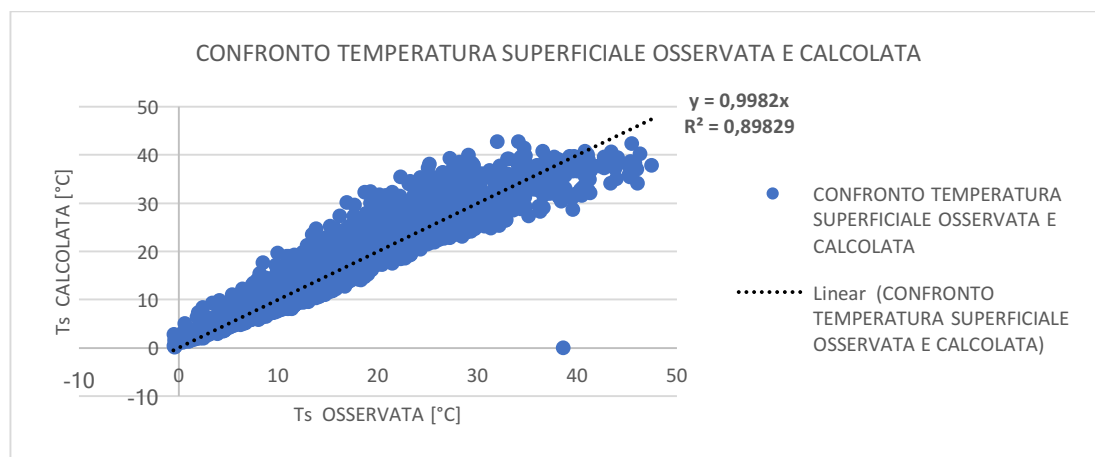


Grafico 5-30: Diagramma di correlazione tra la temperatura del suolo osservata e quella calcolata dopo la fase di calibrazione. Campo di verze.

5.2.3 Risultati Campo Pomodori Azienda

A conclusione della fase di calibrazione del modello, si riportano nelle pagine seguenti gli andamenti temporali osservati dalla “Stazione Azienda Pomodori” delle variabili SM, Rn, LE, H, G, LST, per il periodo simulato riguardante il campo di pomodori, confrontate con i valori calcolati con i parametri della prima simulazione (chiamata simulazione ORIGINALE) e con quelli calcolati alla fine del processo di calibrazione.

Nella Tabella 5-6 sono riportati i valori dei parametri riferiti alla simulazione originale, con indicati gli errori quadratici medi RMSE, il coefficiente angolare della regressione lineare tra valori osservati e simulati m , ed infine il coefficiente di correlazione lineare R^2 , delle variabili rappresentati nei grafici. Vengono inoltre riportati i volumi di acqua ceduta per evapotraspirazione che costituisce il fabbisogno irriguo della coltura. Gli effetti della calibrazione sono evidenti, in quanto l’errore assoluto tra valori osservati e simulati si abbassa dal 13.4 al 7%.

Nella Tabella 5-7 sono invece riportati i parametri e indici statistici dei valori riferiti alla simulazione calibrata finale.

Nel Grafico 5-31 sono riportati i confronti tra i dati relativi all’umidità nel terreno osservata e calcolata tramite le simulazioni. L’effetto della calibrazione è visibile, anche se i valori della simulazione originaria erano già piuttosto buoni, almeno per questa variabile. Nel periodo compreso tra il 20/05 e il 25/06, si nota che la simulazione tende a sottostimare i valori di SM. Questo potrebbe essere dovuto alla presenza di un fenomeno meteorico localmente molto intenso, tale da causare l’aumento repentino di SM misurato. Tuttavia, data la variabilità spaziale dell’evento, i suoi effetti potrebbero essere stati ridotti all’interno della simulazione

dall'interpolazione che il modello FEST-EWB attua tra i dati provenienti da più stazioni di misura.

I benefici della calibrazione sono estremamente visibili anche nei grafici successivi, cioè quelli relativi a Rn, LE, H, G e LST.

Osservando infine il Grafico 5-40 sull'andamento della temperatura del suolo, si nota come i valori massimi della simulazione siano inferiori durante tutto il periodo simulato. Questo è probabilmente da imputare a errori nella misurazione da parte dello strumento.

PARAMETRI IN INPUT	RMSE	m	R²			
$\theta_{sat} = 0.464$ $\theta_{res} = 0.075$ $F_c = 0.318$ $W_p = 0.197$ $k_{sat} = 5.0000e-07$ m/s $bc = 0.242$ bubbling pressure = 0.2589m initial saturation = 0.4	SM [-]	0.05				
	LST [°C]	4.25	LST	0.86	LST 0.91	
	LE [w/m²]	75.23	LE	0.71	LE 0.12	
	G [w/m²]	40.36	G	1.26	G 0.73	
	Rn [w/m²]	89.19	Rn	0.71	Rn 0.93	
	H [w/m²]	75.04	H	0.59	H 0.28	
	Volume finale ET osservata [m³/ha]					2285
	Volume finale ET simulata [m³/ha]					1979
	Errore assoluto finale volumi di ET [%]					13.4

Tabella 5-6: Risultati analisi statistiche della simulazione originale a scala di campo, effettuati sul campo di pomodori Azienda

PARAMETRI IN INPUT	RMSE	m	R²			
$\theta_{sat} = 0.463$ $\theta_{res} = 0.027$ $F_c = 0.27$ $W_p = 0.117$ $k_{sat} = 5e-07$ m/s $bc = 0.252$ bubbling pressure = 0.1115m initial saturation = 0.5	SM [-]	0.06				
	LST [°C]	3.52	LST	0.90	LST 0.90	
	LE [w/m²]	70.67	LE	0.89	LE 0.14	
	G [w/m²]	39.41	G	1.33	G 0.78	
	Rn [w/m²]	39.87	Rn	0.91	Rn 0.97	
	H [w/m²]	75.87	H	0.85	H 0.17	
	Volume finale ET osservata [m³/ha]					2285
	Volume finale ET simulata [m³/ha]					2445
	Errore assoluto finale volumi di ET [%]					7

Tabella 5-7: Risultati analisi statistiche della simulazione finale a scala di campo, effettuati sul campo di pomodori Azienda

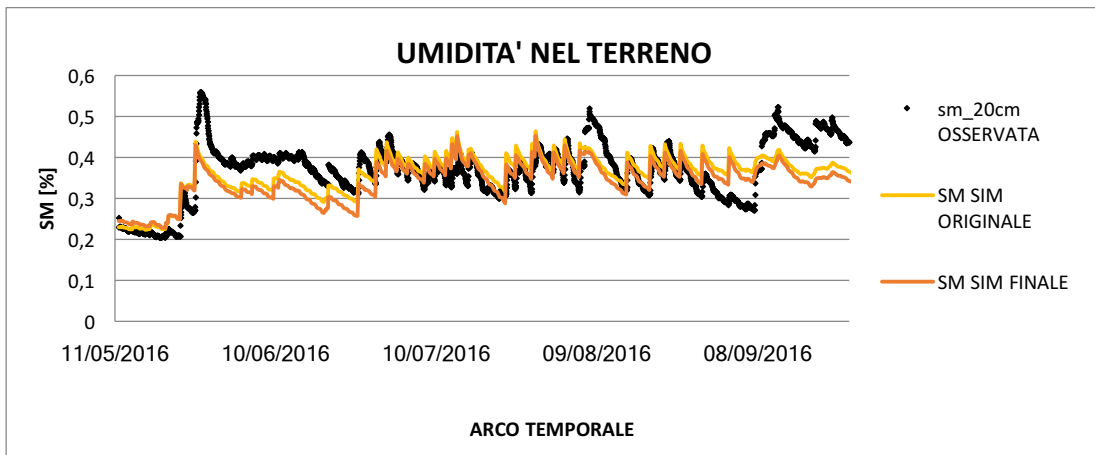


Grafico 5-31: Confronto tra l'andamento dell'umidità nel terreno osservata, simulata con i parametri originali e calibrata dopo 10 simulazioni. Campo Pomodori Azienda.

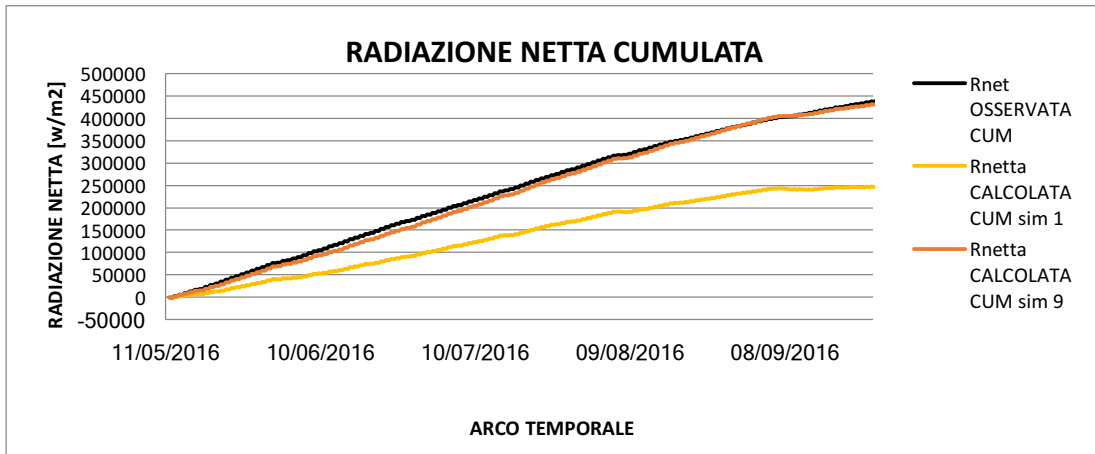


Grafico 5-32: Confronto tra l'andamento della radiazione netta cumulata osservata, simulata con i parametri originali e calibrata dopo 10 simulazioni. Campo Pomodori Azienda.

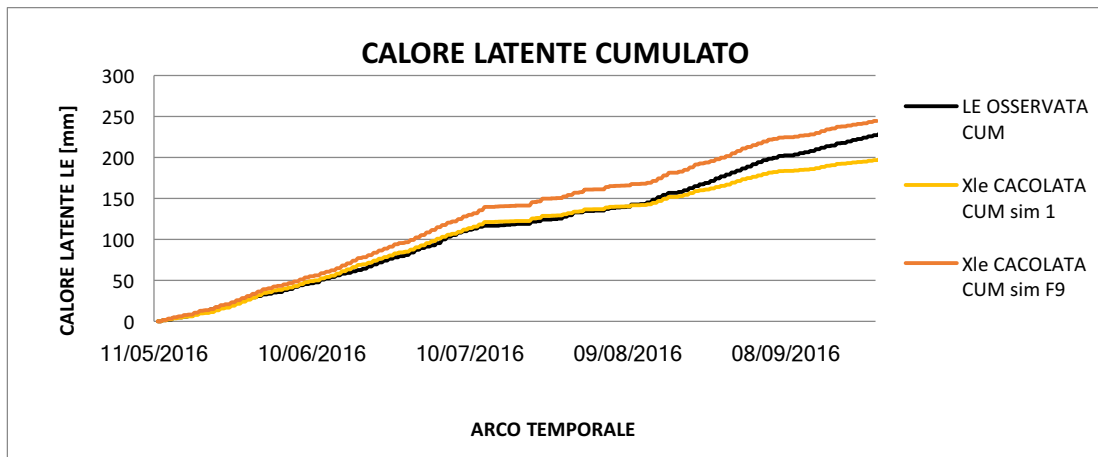


Grafico 5-33: Confronto tra l'andamento calore latente cumulato osservato, simulato con i parametri originali e calibrato dopo 10 simulazioni. Campo Pomodori Azienda.

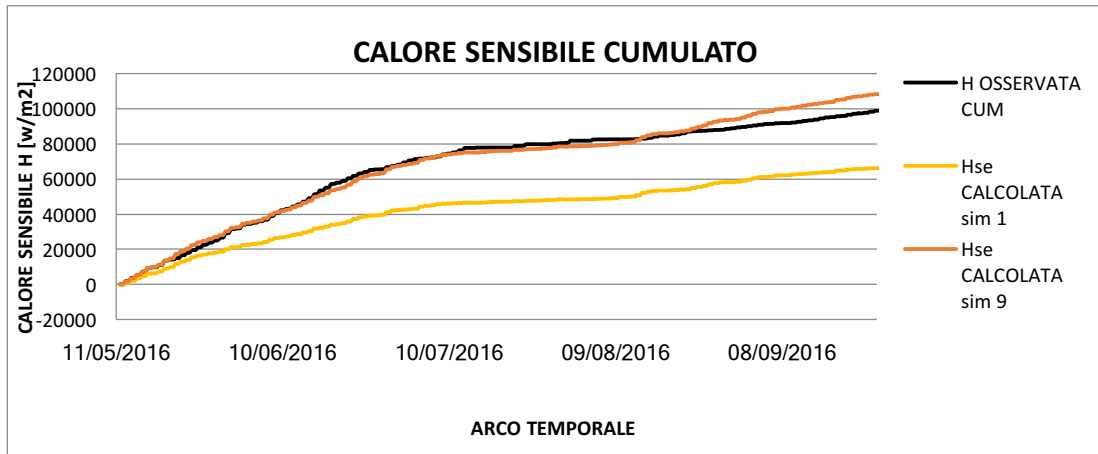


Grafico 5-34: Confronto tra l'andamento del calore sensibile cumulato osservato, simulato con i parametri originali e calibrato dopo 10 simulazioni. Campo Pomodori Azienda.

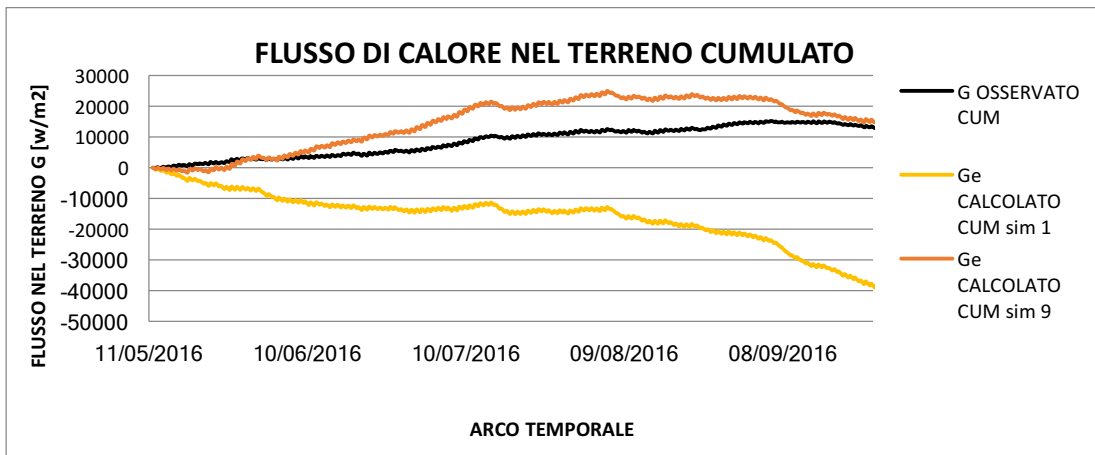


Grafico 5-35: Confronto tra l'andamento del flusso cumulato di calore nel terreno osservato, simulato con i parametri originali e calibrato dopo 10 simulazioni. Campo Pomodori Azienda.

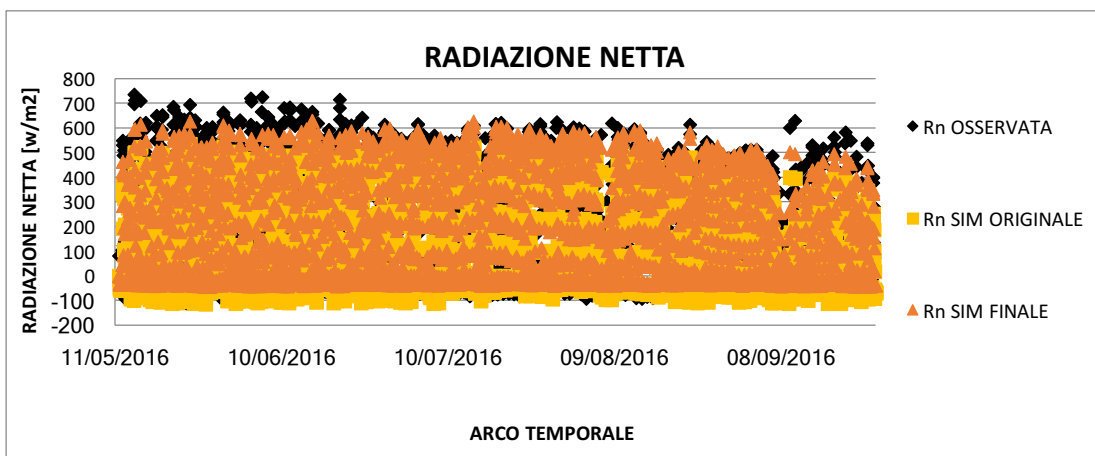


Grafico 5-36: Confronto tra l'andamento della radiazione netta osservata, simulata con i parametri originali e calibrata dopo 10 simulazioni. Campo Pomodori Azienda.

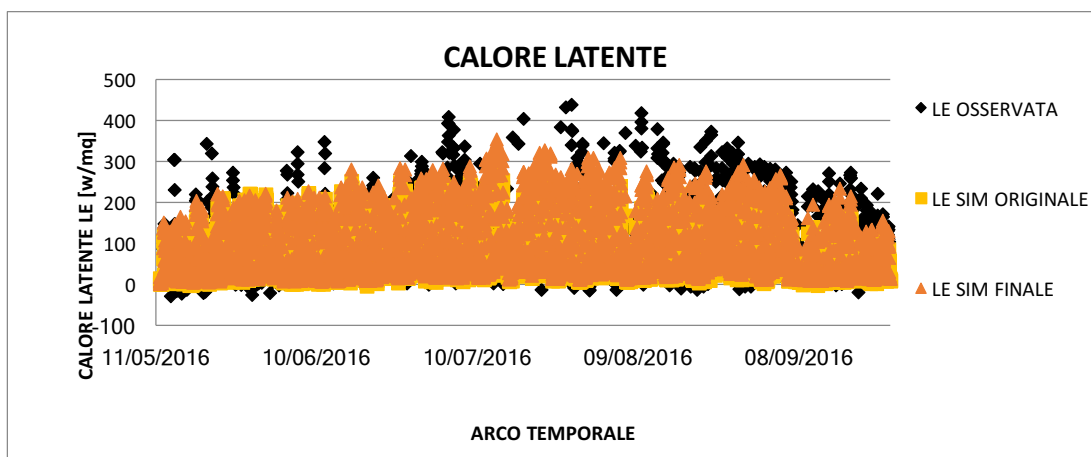


Grafico 5-37: Confronto tra il calore latente osservato, simulato con i parametri originali e calibrato dopo 10 simulazioni. Campo Pomodori Azienda.

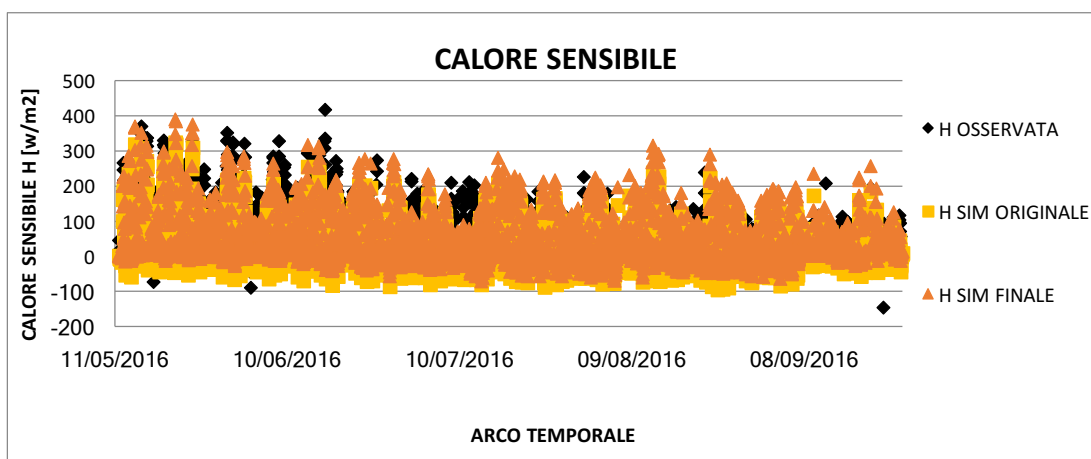


Grafico 5-38: Confronto tra il calore sensibile osservato, simulato con i parametri originali e calibrato dopo 10 simulazioni. Campo Pomodori Azienda.

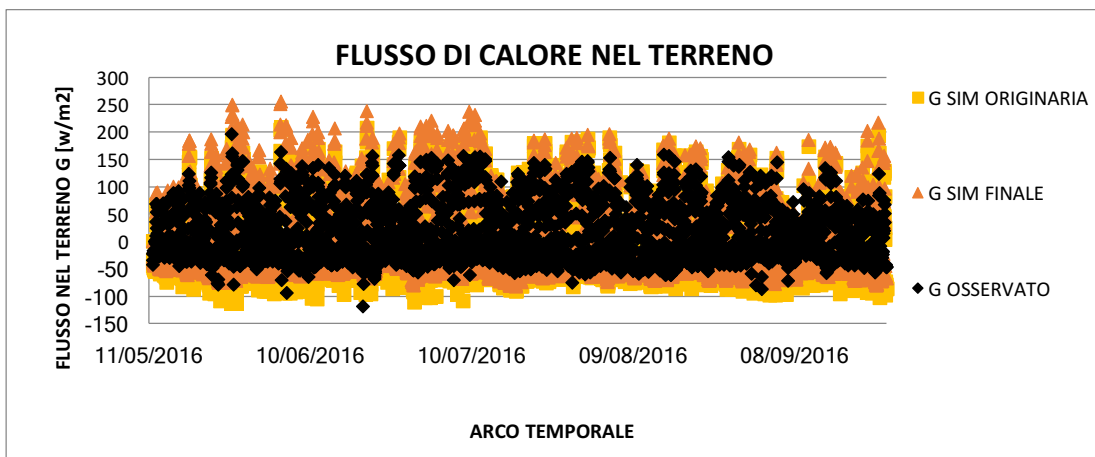


Grafico 5-39: Confronto tra l'andamento del flusso di calore nel terreno osservato, simulato con i parametri originali e calibrato dopo 10 simulazioni. Campo Pomodori Azienda.

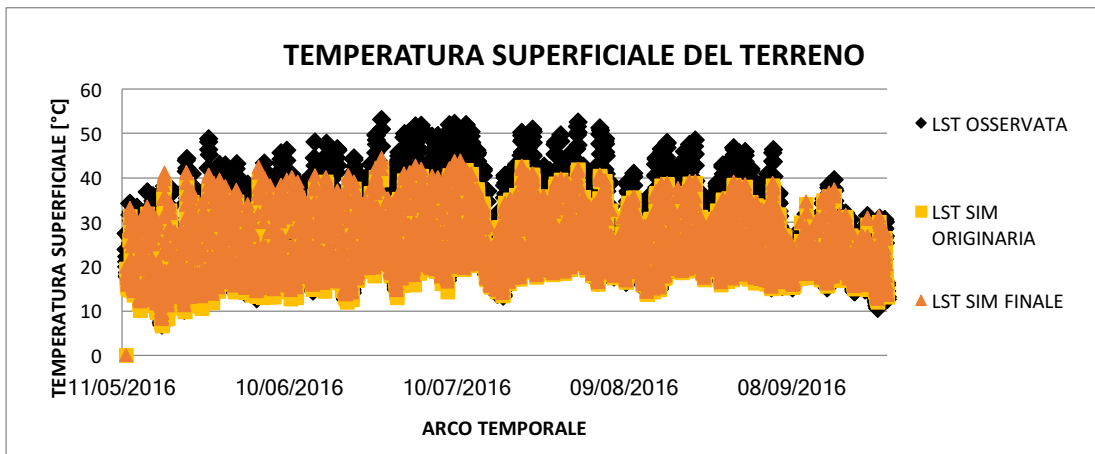


Grafico 5-40: Confronto tra l'andamento della temperatura superficiale del terreno osservata, simulata con i parametri originali e calibrata dopo 10 simulazioni. Campo Pomodori Azienda.

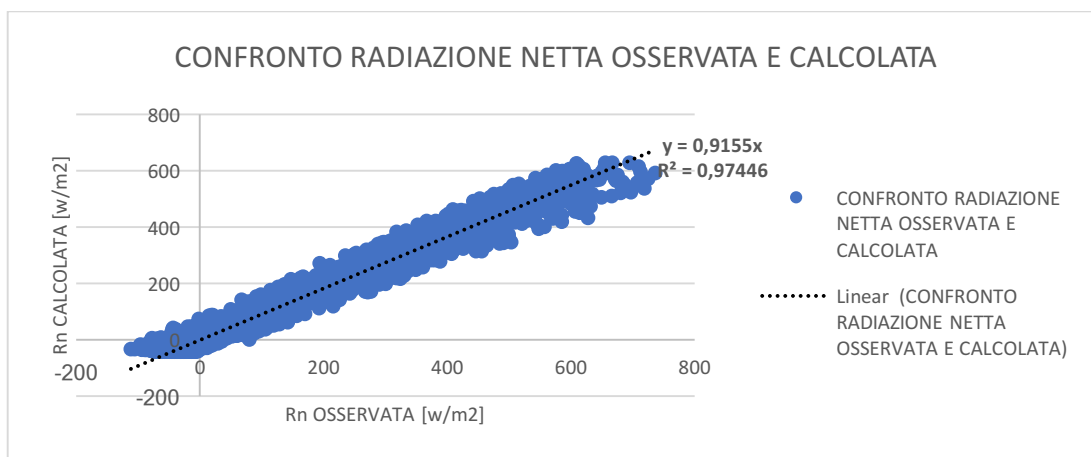


Grafico 5-41: Diagramma di correlazione tra la radiazione netta osservata e quella calcolata dopo la fase di calibrazione. Campo di Pomodori Azienda.

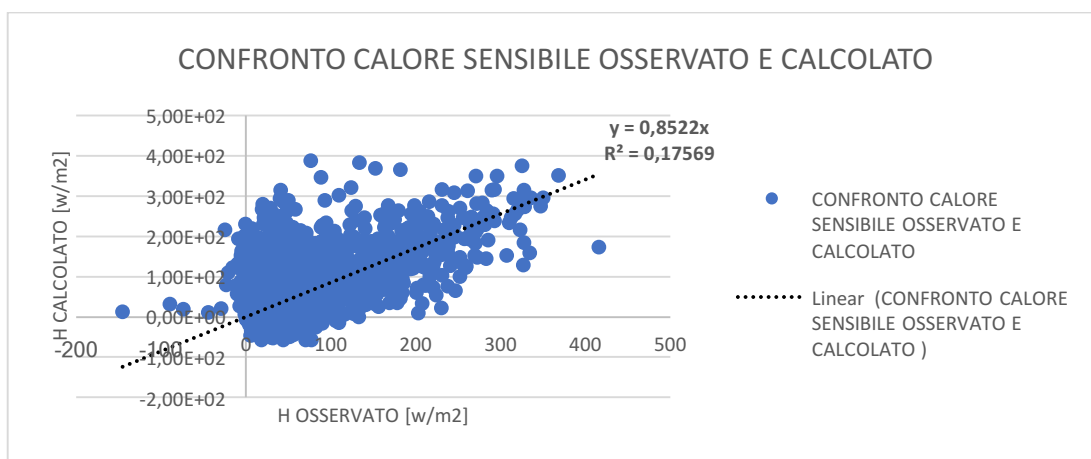


Grafico 5-42: Diagramma di correlazione tra il calore sensibile osservato e quello calcolato dopo la fase di calibrazione. Campo di Pomodori Azienda.

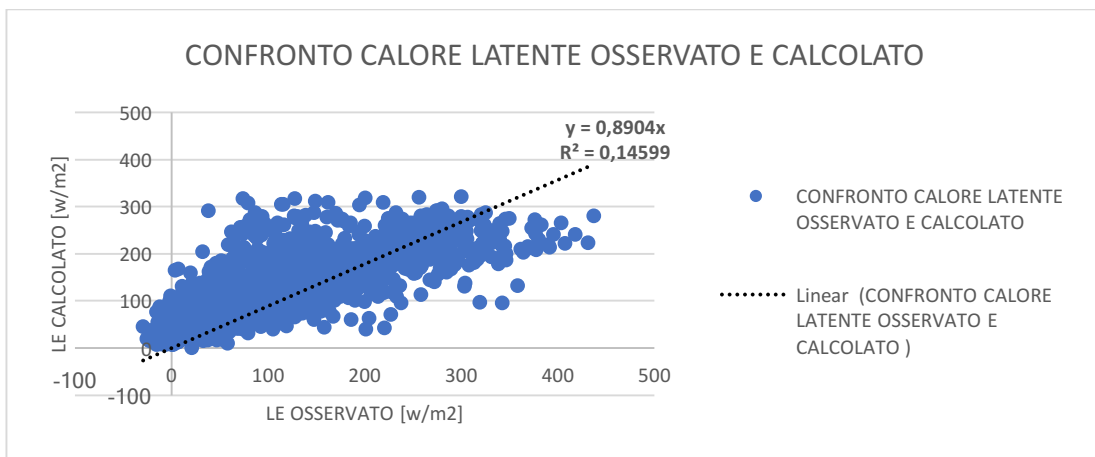


Grafico 5-43: Diagramma di correlazione tra il calore latente osservato e quello calcolato dopo la fase di calibrazione. Campo di pomodori Azienda.

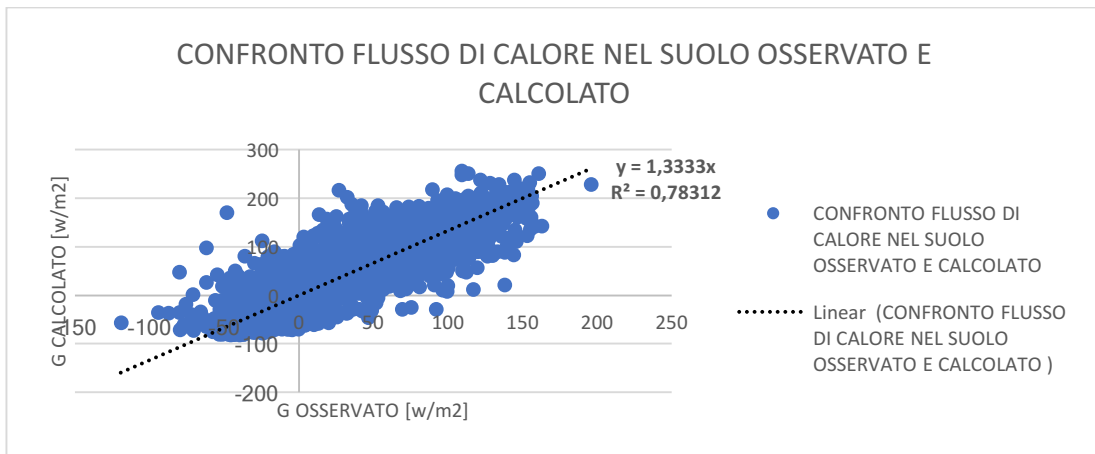


Grafico 5-44: Diagramma di correlazione tra il flusso di calore nel suolo osservato e quello calcolato dopo la fase di calibrazione. Campo di pomodori Azienda.

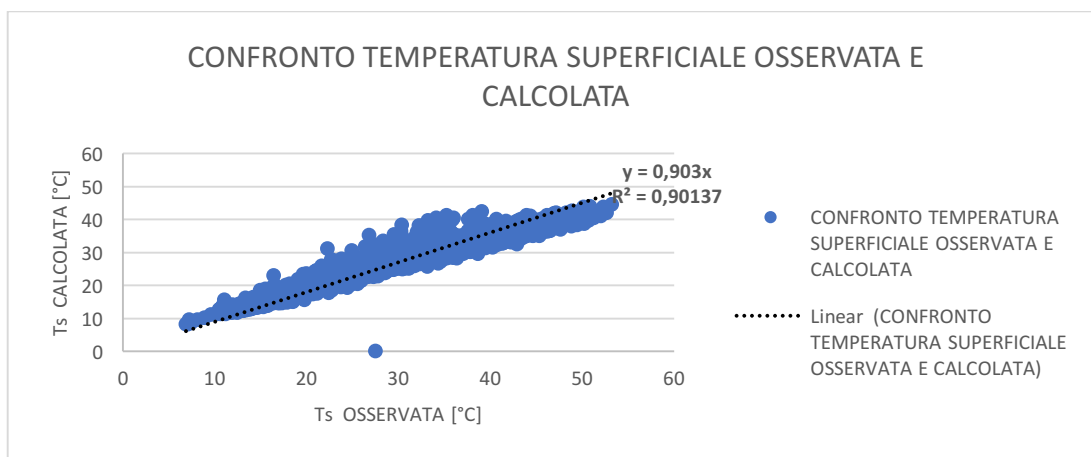


Grafico 5-45: Diagramma di correlazione tra la temperatura superficiale del suolo osservata e quella calcolata dopo la fase di calibrazione. Campo di pomodori Azienda.

5.2.4 Risultati Campo Pomodori Consorzio

Concludendo la calibrazione a scala di campo, si riportano nelle pagine seguenti gli andamenti temporali osservati dalla “Stazione Pomodori Consorzio” delle variabili SM, Rn, LE, H, G, LST, per il periodo simulato riguardante il campo di pomodori, confrontate con i valori calcolati con i parametri della prima simulazione (chiamata simulazione ORIGINALE) e con quelli calcolati alla fine del processo di calibrazione.

Nella Tabella 5-8 sono riportati i valori dei parametri riferiti alla simulazione originale, con indicati gli errori quadratici medi RMSE, il coefficiente angolare della regressione lineare tra valori osservati e simulati m , ed infine il coefficiente di correlazione lineare R^2 , delle variabili rappresentati nei grafici. Vengono inoltre riportati i volumi di acqua ceduta per evapotraspirazione che costituisce il fabbisogno irriguo della coltura. In questo caso la calibrazione non è stata efficace, infatti nonostante i ripetuti tentativi per migliorare i risultati, l’errore assoluto tra i valori osservati e simulati è aumentato dal 2.4 al 137%.

Nella Tabella 5-9 sono invece riportati i parametri e indici statistici dei valori riferiti alla simulazione calibrata finale.

Nel Grafico 5-47, sono riportati i confronti tra i dati relativi all’umidità nel terreno osservata e calcolata tramite le simulazioni. L’effetto della calibrazione è visibile, anche se i valori della simulazione originaria erano già piuttosto buoni, almeno per questo parametro.

Non si è tuttavia riusciti a calibrare efficacemente i risultati dei flussi energetici, come si vede nei successivi grafici riferiti ai valori cumulati. Questo si pensa sia dovuto ai tipici errori nella acquisizione dei dati da parte della stazione Eddy Covariance. Infatti le misurazioni

indipendenti delle maggiori componenti del bilancio energetico non sono in effetti sempre coerenti con il principio di conservazione dell'energia. Questo è indicato come una mancanza nella chiusura del bilancio energetico. La maggior parte dei risultati in letteratura hanno mostrato che la somma dei flussi di calore sensibile e latente misurati da stazioni Covariance fossero inferiori alla differenza tra radiazione netta e flussi di calore terreno. (T.E. Twinea, 2000)

Questo tipo di analisi è stata realizzata e mostrata nel Grafico 5-46, che riporta la correlazione tra i dati di Rn-G e H+LE, così come analizzata da Bowen. Si è identificato in letteratura che per valori di correlazione minori di 0,7, l'utilità delle misure di calore sensibile e latente per la validazione o calibrazione del modello risulta estremamente ridotta. (Kustas *et al.*, 1991)

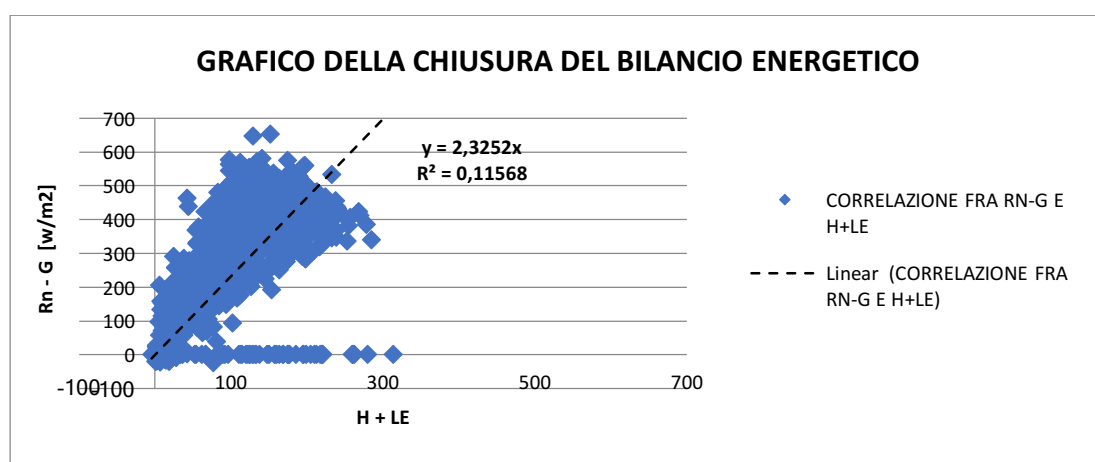


Grafico 5-46: Chiusura del bilancio energetico nel Campo Pomodori Consorzio.

Quanto detto va dunque a giustificare la mancata calibrazione efficace per questi due parametri. Osservando il Grafico 5-48 e Grafico 5-51, si può in effetti notare come la calibrazione sia servita a migliorare sensibilmente i valori simulati.

Osservando infine il Grafico 5-40 sull'andamento della temperatura del suolo, si nota come vi siano periodi di assenza dei dati piuttosto frequenti nella seconda parte del periodo analizzato. Questi sono dovuti a malfunzionamenti generali della strumentazione, che presenta mancanze degli altri parametri in questi stessi periodi.

PARAMETRI IN INPUT	RMSE	m	R²
$\theta_{sat} = 0.464$	SM [-]	0.11	
$\theta_{res} = 0.075$	LST [°C]	3.19	LST 1.02 LST 0.77
$F_c = 0.318$	LE [w/m²]	48.30	LE 0.87 LE 0.28
$W_p = 0.197$	G [w/m²]	49.28	G 0.85 G 0.58
$k_{sat} = 5.0000e-07$ m/s	Rn [w/m²]	106.96	Rn 0.60 Rn 0.85
$bc = 0.242$	H [w/m²]	41.97	H 1.62 H 0.15
bubbling pressure = 0.2589m			
initial saturation = 0.32			

Volume finale ET osservata [m³/ha]	1164
Volume finale ET simulata [m³/ha]	1204
Errore assoluto finale volumi di ET [%]	3.4

Tabella 5-8: Risultati analisi statistiche della simulazione originale a scala di campo, effettuati sul campo di pomodori Consorzio

PARAMETRI IN INPUT	RMSE	m			R²
	SM [-]	0.07			
	LST [°C]	3.79	LST	1	LST 0.8
	LE [w/m²]	139.9	LE	1.94	LE 0.01
	G [w/m²]	46.88	G	0.94	G 0.61
	Rn [w/m²]	54.42	Rn	0.93	Rn 0.94
	H [w/m²]	50.12	H	1.68	H 0.03
	Volume finale ET osservata [m³/ha]	1164			
	Volume finale ET simulata [m³/ha]	2748			
	Errore assoluto finale volumi di ET [%]	137.5			

$\theta_{sat} = 0.425$
 $\theta_{res} = 0.035$
 $F_c = 0.194$
 $W_p = 0.082$
 $k_{sat} = 6.9444e-06 \text{ m/s}$
 $bc = 0.378$
bubbling pressure
 $= 0.1466m$
initial saturation = 0.45

Tabella 5-9: Risultati analisi statistiche della simulazione finale a scala di campo, effettuati sul campo di pomodori Consorzio

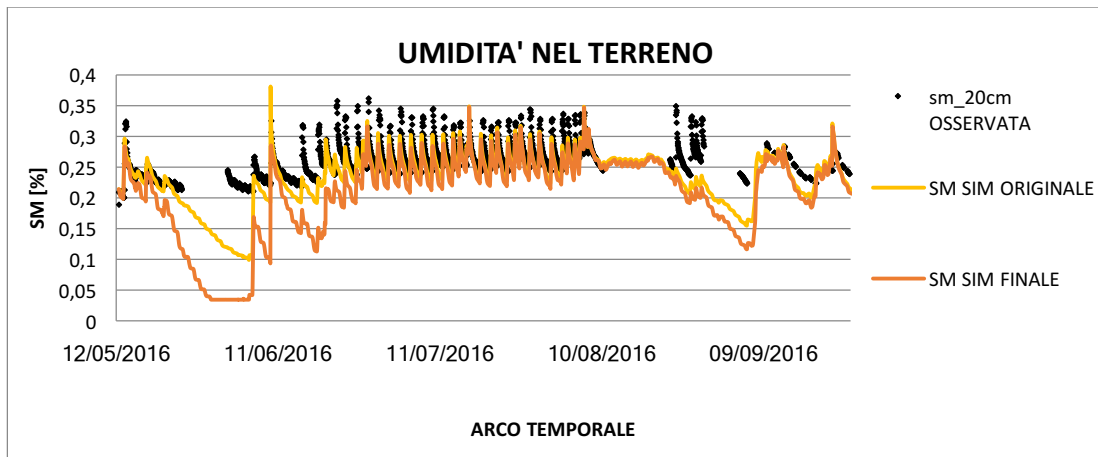


Grafico 5-47: Confronto tra l'andamento dell'umidità nel terreno osservata, simulata con i parametri originali e calibrata dopo 10 simulazioni. Campo Pomodori Consorzio.

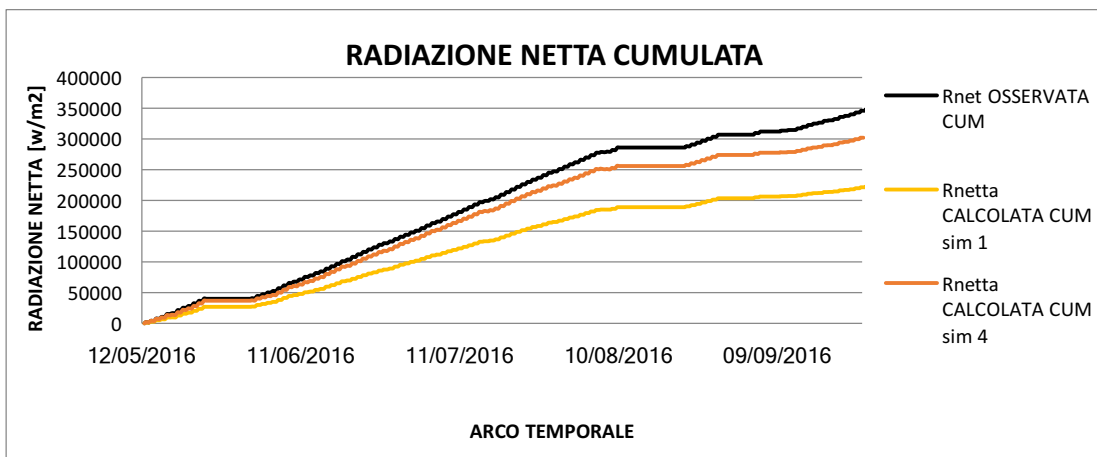


Grafico 5-48: Confronto tra l'andamento della radiazione netta cumulata osservata, simulata con i parametri originali e calibrata dopo 10 simulazioni. Campo Pomodori Consorzio.

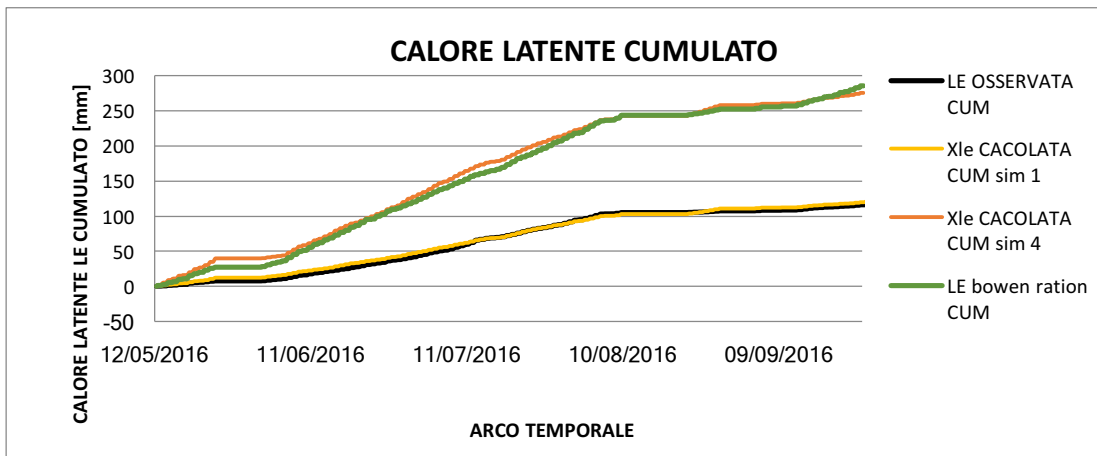


Grafico 5-49: Confronto tra l'andamento del calore latente cumulato osservato, simulato con i parametri originali e calibrato dopo 10 simulazioni. Campo Pomodori Consorzio.

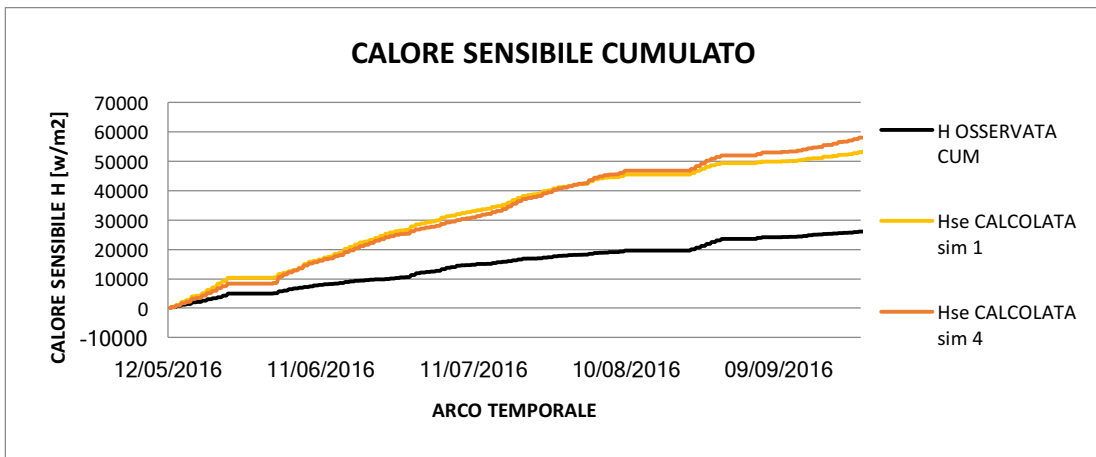


Grafico 5-50: Confronto tra l'andamento del calore sensibile osservato, simulato con i parametri originali e calibrato dopo 10 simulazioni. Campo Pomodori Consorzio.

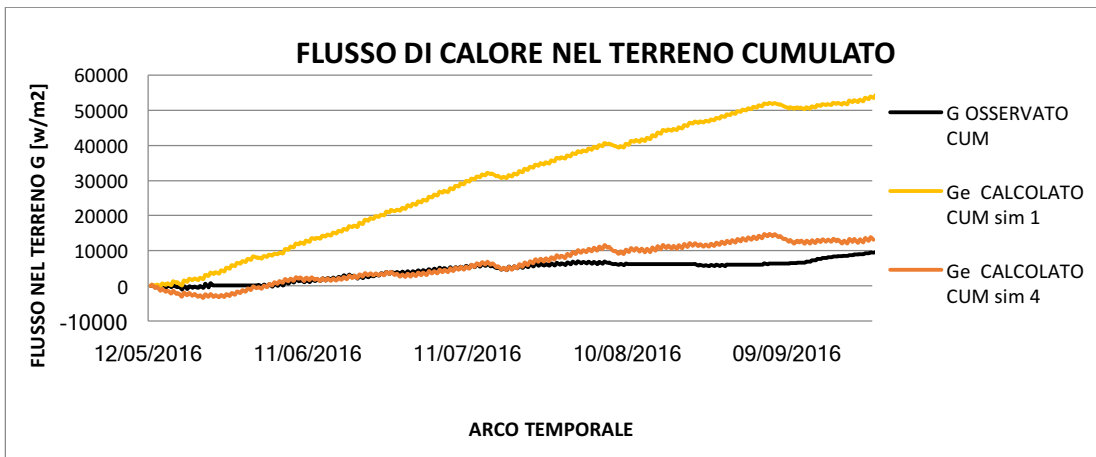


Grafico 5-51: Confronto tra l'andamento del flusso di calore nel terreno cumulato osservato, simulato con i parametri originali e calibrato dopo 10 simulazioni. Campo Pomodori Consorzio.

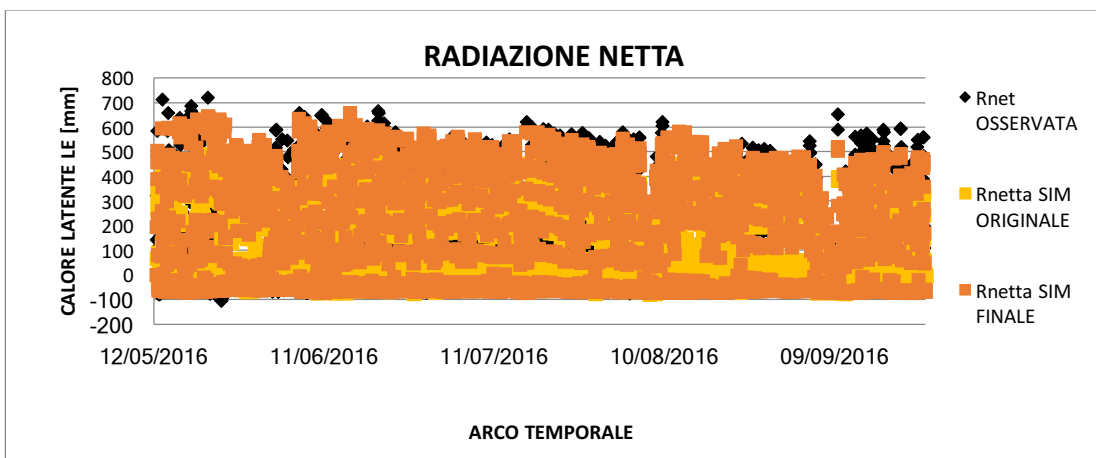


Grafico 5-52: Confronto tra la radiazione netta osservata, simulata con i parametri originali e calibrata dopo 10 simulazioni. Campo Pomodori Consorzio.

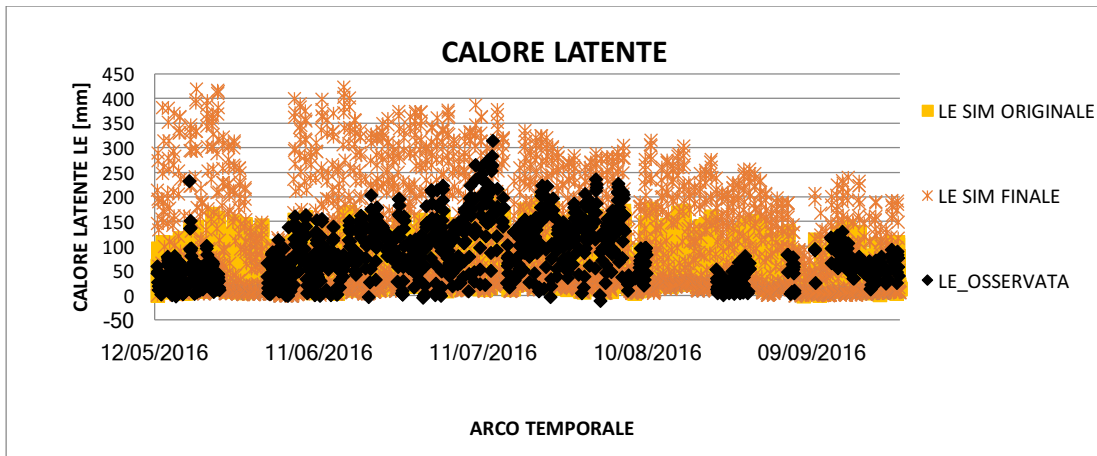


Grafico 5-53: Confronto tra il calore latente osservato, simulato con i parametri originali e calibrato dopo 10 simulazioni. Campo Pomodori Consorzio.

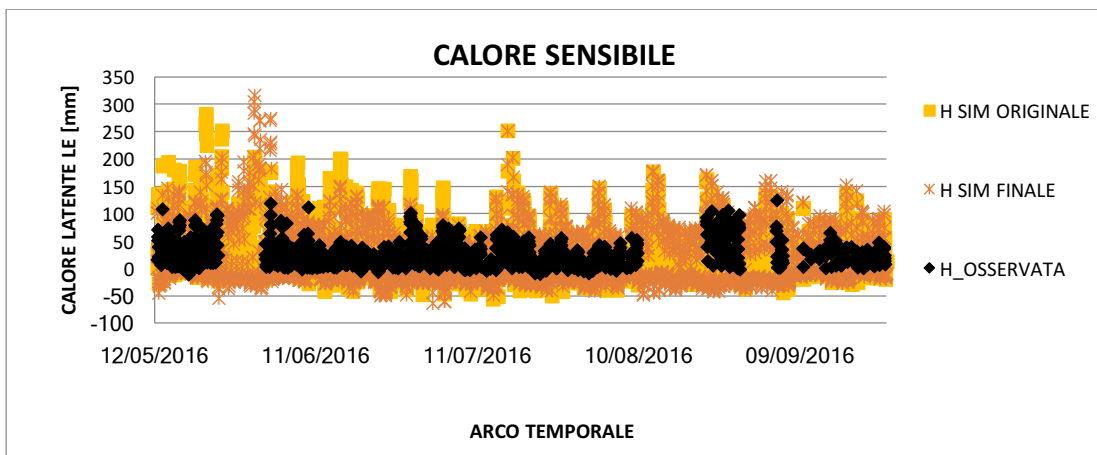


Grafico 5-54: Confronto tra il calore sensibile osservato, simulato con i parametri originali e calibrato dopo 10 simulazioni. Campo Pomodori Consorzio.

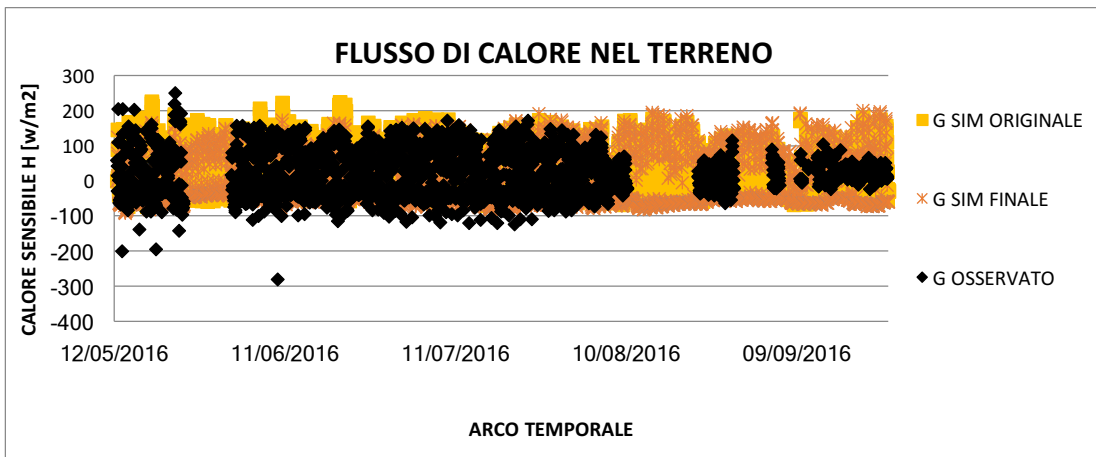


Grafico 5-55: Confronto tra il flusso di calore nel terreno osservato, simulato con i parametri originali e calibrato dopo 10 simulazioni. Campo Pomodori Consorzio.

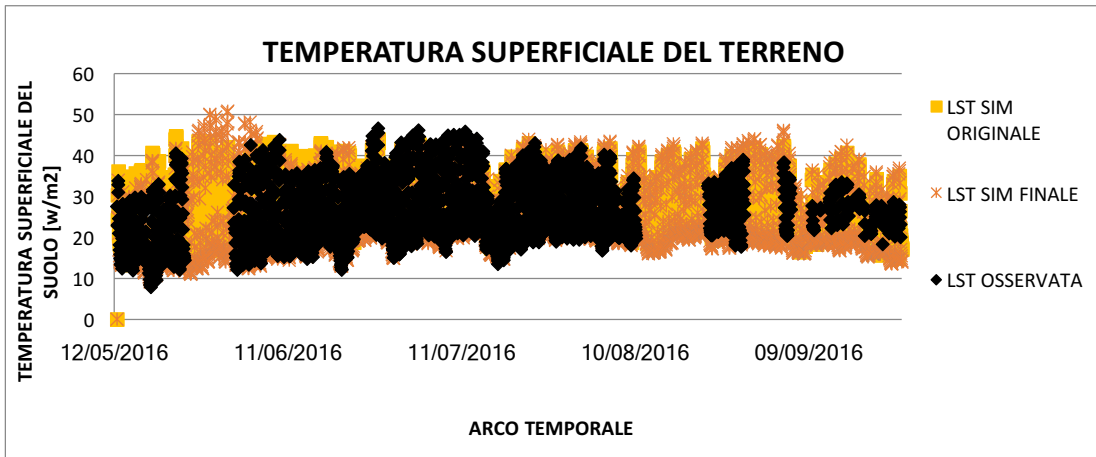


Grafico 5-56: Confronto tra la temperatura superficiale del terreno osservata, simulata con i parametri originali e calibrata dopo 10 simulazioni. Campo Pomodori Consorzio.

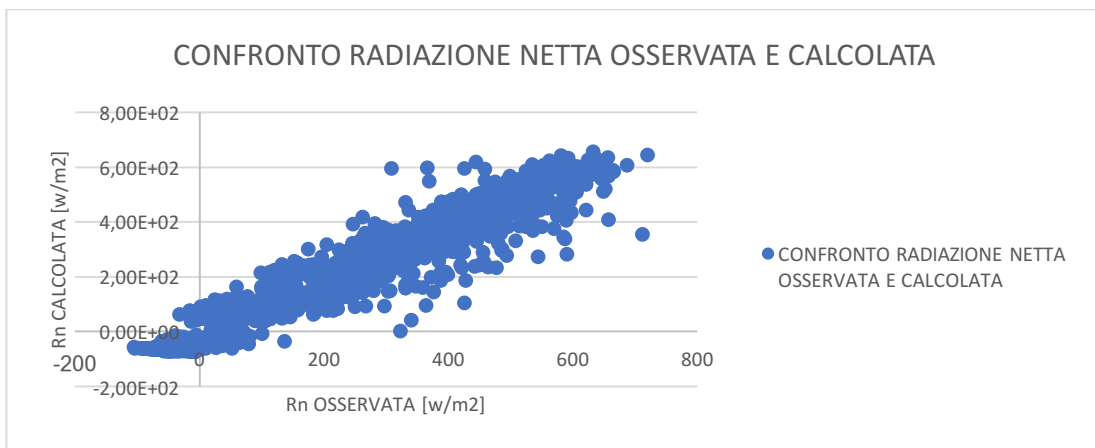


Grafico 5-57: Diagramma di correlazione tra la radiazione netta osservata e quella calcolata dopo la fase di calibrazione. Campo di pomodori Consorzio.

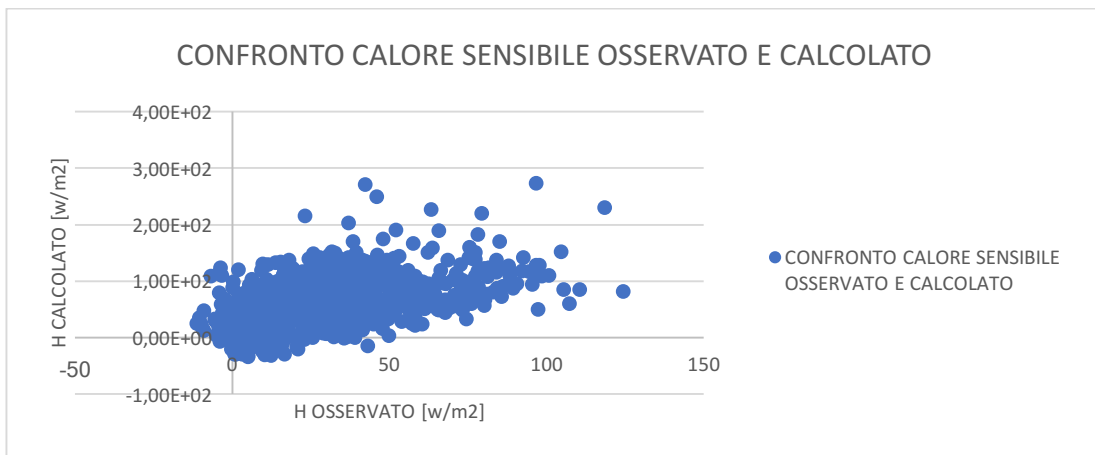


Grafico 5-58: Diagramma di correlazione tra il calore sensibile osservato e quello calcolato dopo la fase di calibrazione. Campo di pomodori Consorzio.

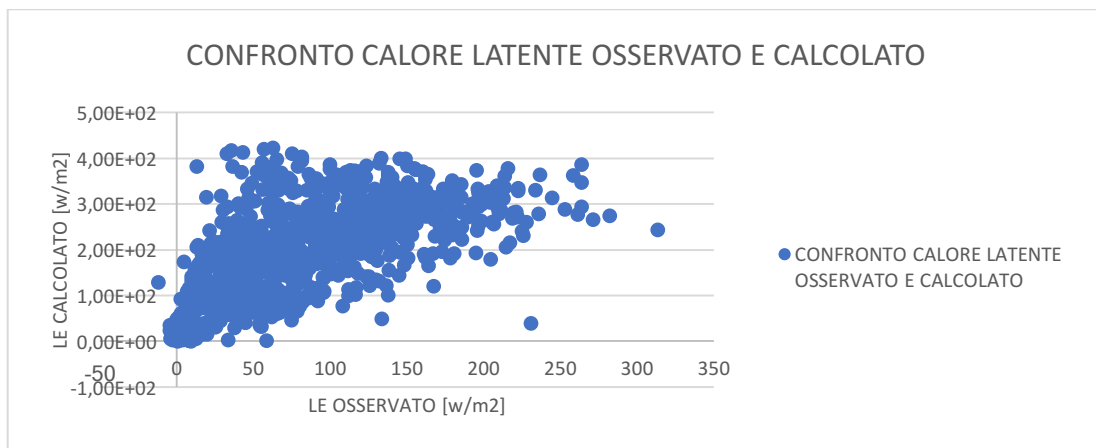


Grafico 5-59: Diagramma di correlazione tra calore latente osservato e quello calcolato dopo la fase di calibrazione. Campo di pomodori Consorzio.

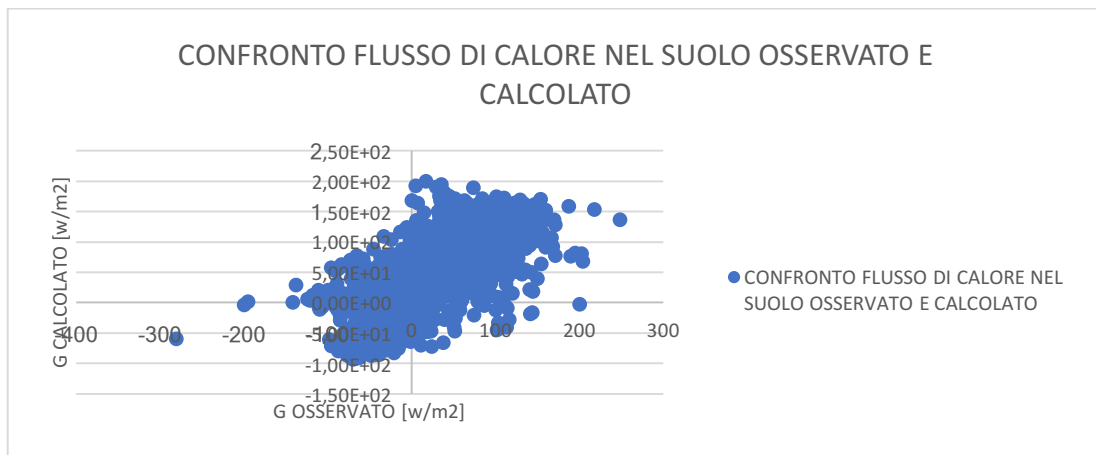


Grafico 5-60: Diagramma di correlazione tra il flusso di calore nel terreno osservato e quella calcolato dopo la fase di calibrazione. Campo di pomodori Consorzio.

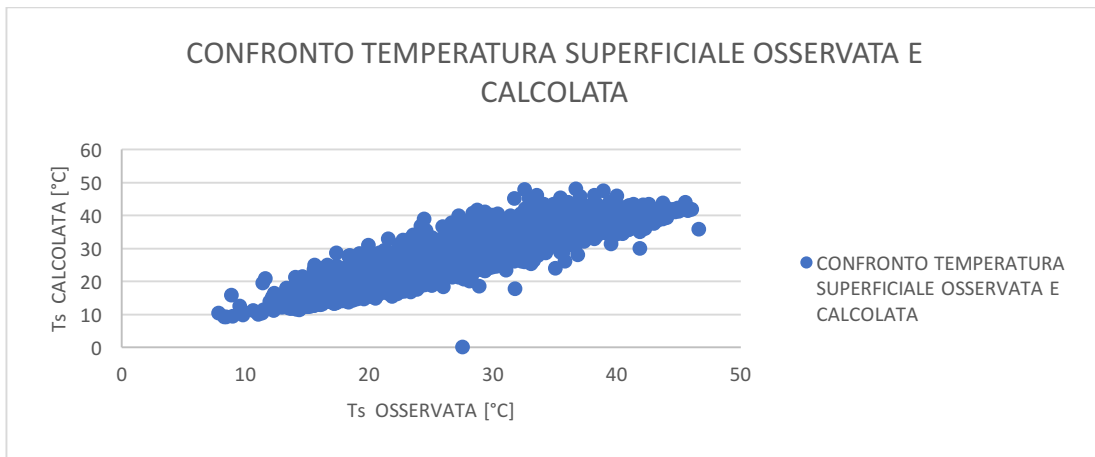


Grafico 5-61: Diagramma di correlazione tra la temperatura superficiale del suolo osservata e quella calcolata dopo la fase di calibrazione. Campo di pomodori Consorzio.

5.3 Risultati alla scala di consorzio

Per quanto riguarda l'analisi delle immagini termiche della superficie del consorzio confrontate con i risultati delle simulazioni FEST, nel Grafico 5-62 sono riportati i risultati della differenza media assoluta tra i dati di LST osservati e calcolati, sia della simulazione originaria che in quella finale, successiva quindi alla calibrazione.

Si vede chiaramente come i valori medi delle differenze di LST della maggior parte delle immagini, si siano sensibilmente ridotti. La calibrazione è dunque stata efficace, come anche visibile nel Grafico 5-63, in cui la differenza tra le temperature medie registrate dalle immagini Landsat sull'area del consorzio e quelle modellate, si attesta mediamente attorno a soli 2 °C.

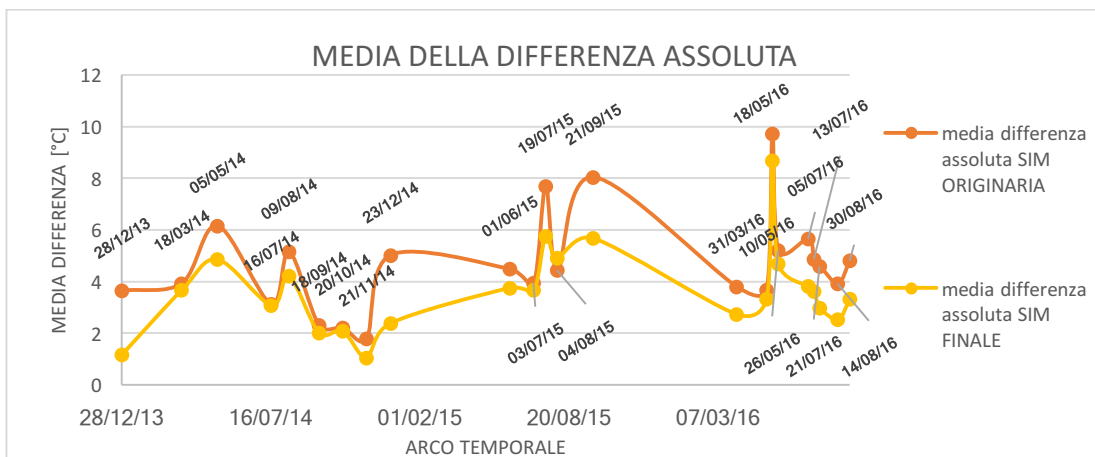


Grafico 5-62: Media della differenza assoluta tra i valori osservati Landsat e simulati FEST

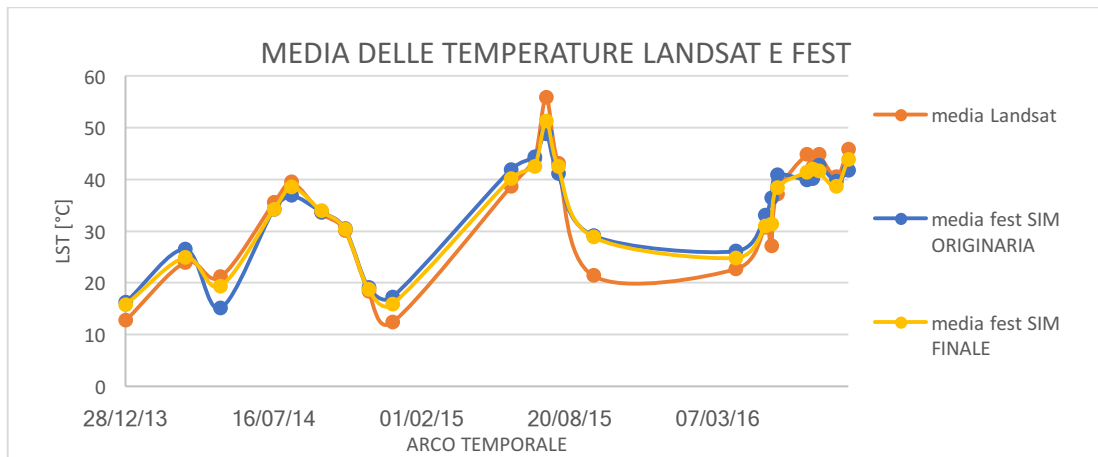
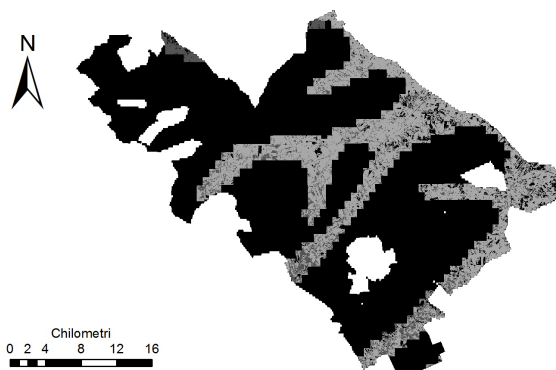


Grafico 5-63: Media delle temperature da immagini Landsat a confronto con quelle simulate FEST

Nelle successive figure vengono riportate le mappe dei parametri che sono stati calibrati pixel a pixel per l'intera area del consorzio, che sono:

- Resistenza stomatica minima $r_{s_{min}}$
- Profondità media di suolo attivo
- Conduttività idraulica a saturazione K_{sat}

Nella Figura 5-3 e Figura 5-4, i valori riportati negli istogrammi originali e successivi alla calibrazione, sono riferiti a valori diversi, in quanto la maggior parte dei valori calibrati venivano a trovarsi al di fuori delle classi degli istogrammi originari. Questo invece non vale nel caso della Figura 5-5, in cui i valori utilizzati per stabilire le classi sono gli stessi nell'istogramma originario e in quello dopo la calibrazione.



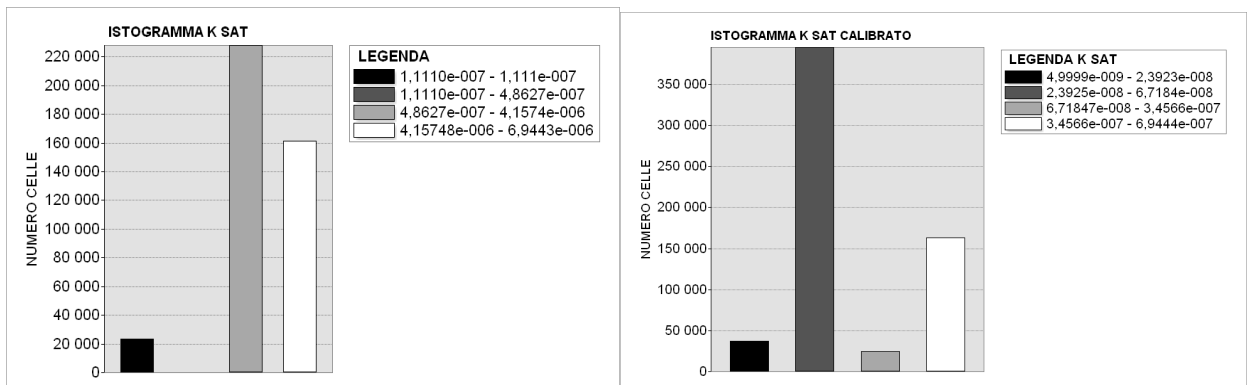


Figura 5-3: Mappa calibrata e istogrammi della conduttività idraulica a saturazione K_{sat} [m/s]. A sinistra vi è l'istogramma dei valori originali. A destra vi è l'istogramma dei valori calibrati.

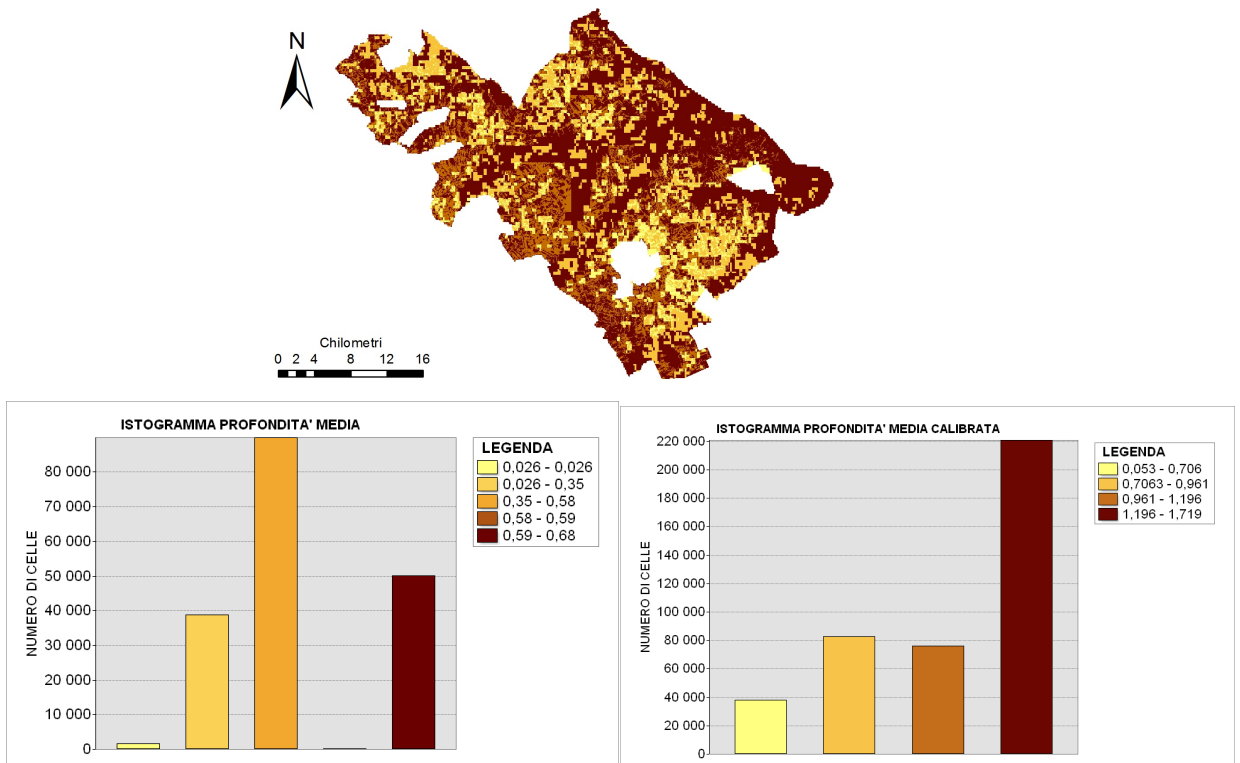


Figura 5-4: Mappa calibrata e istogrammi della profondità media di suolo attivo idrologicamente [m]. A sinistra vi è l'istogramma dei valori originali. A destra vi è l'istogramma dei valori calibrati.

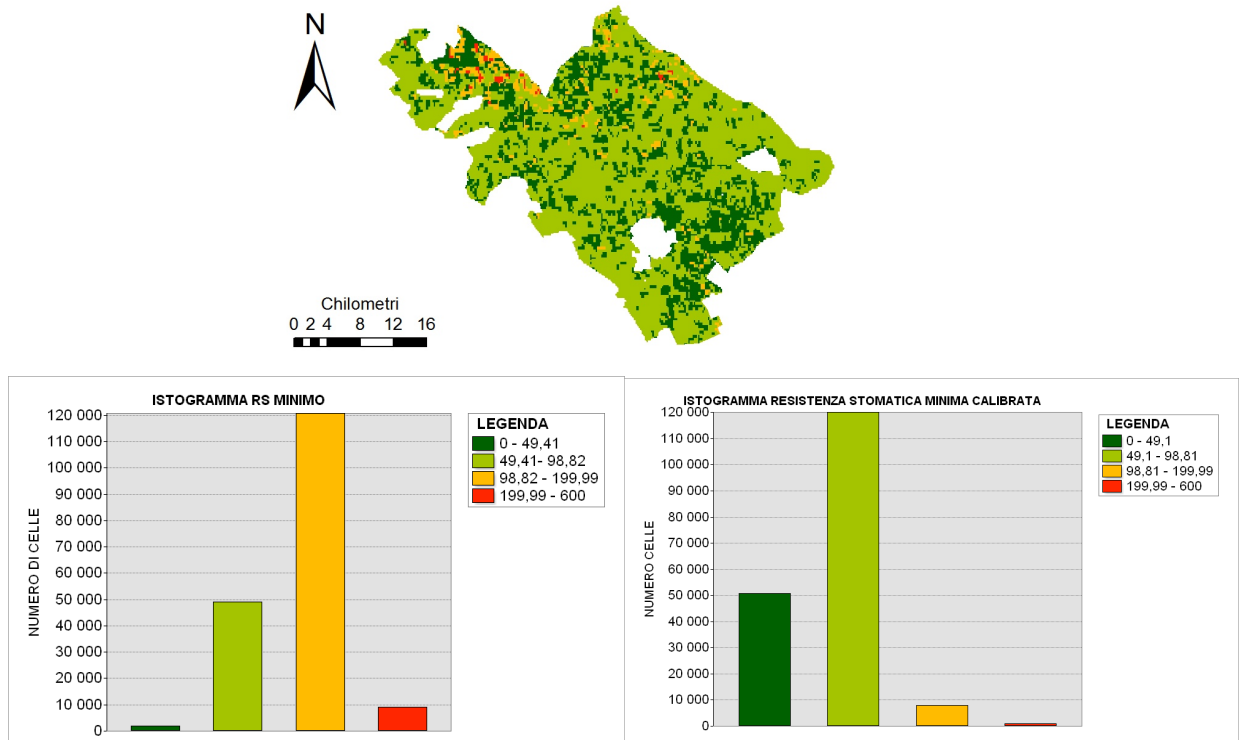
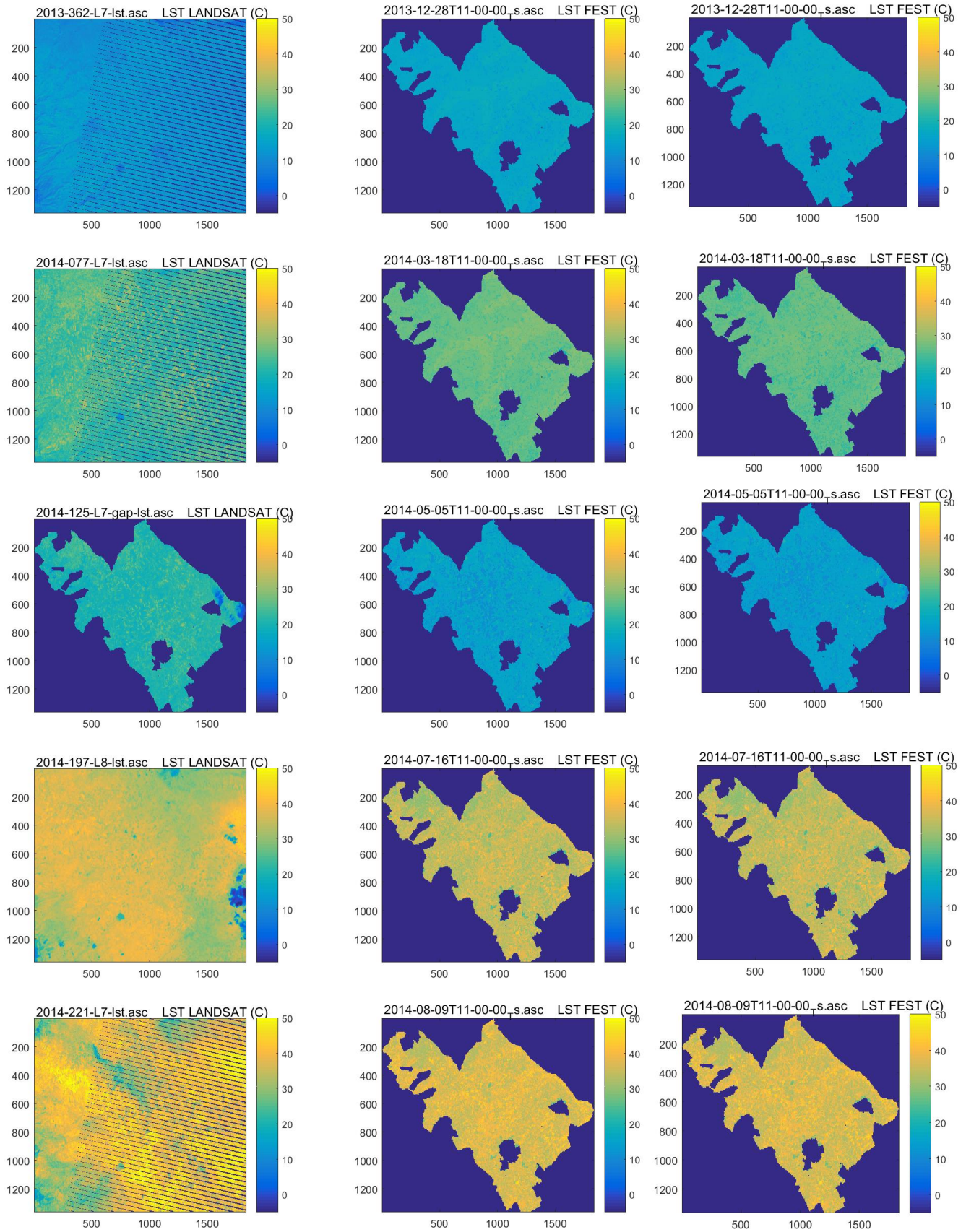


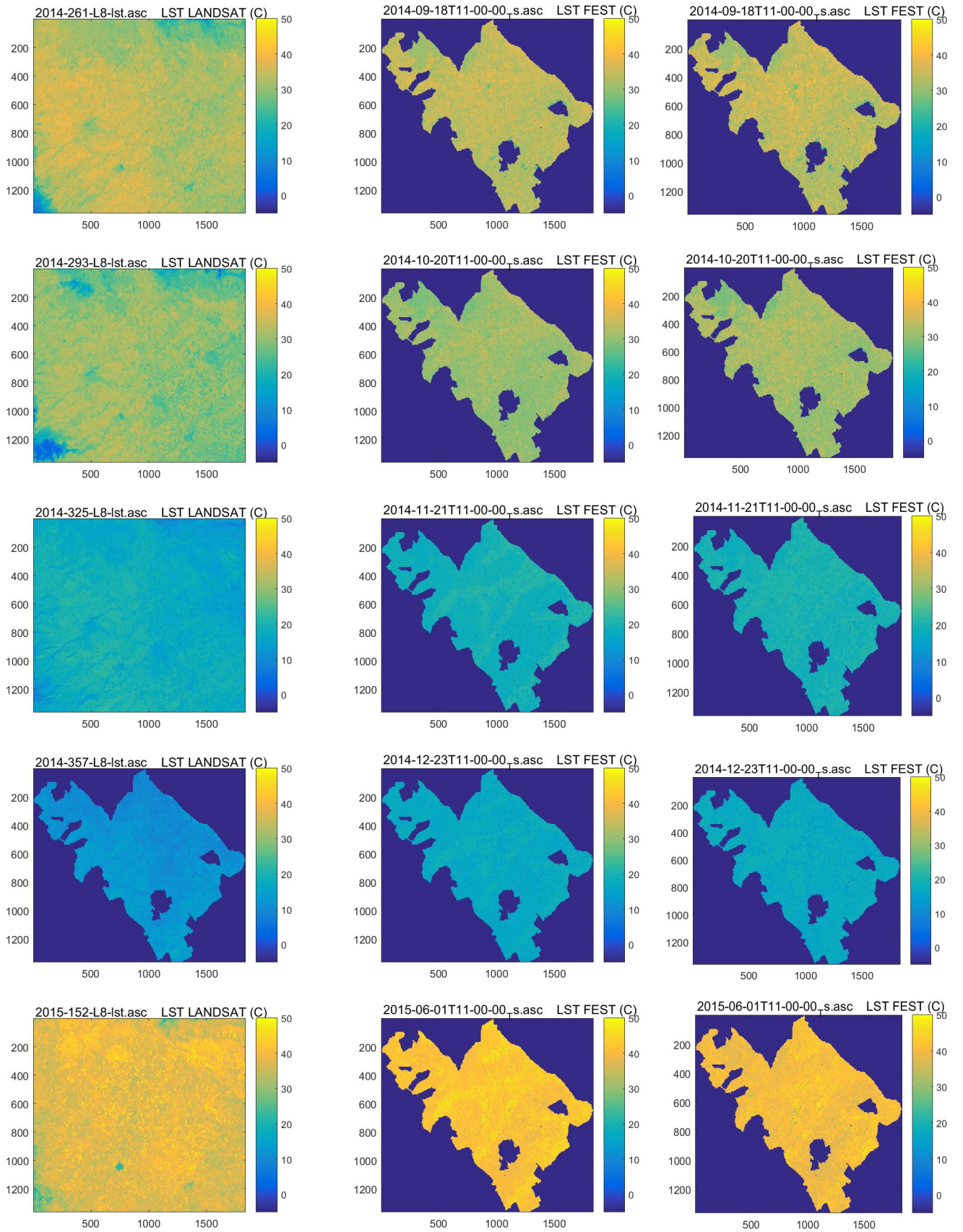
Figura 5-5: Mappa calibrata e istogrammi della resistenza stomatica minima rs_{min} [w/m^2]. A sinistra vi è l'istogramma dei valori originali. A destra vi è l'istogramma dei valori calibrati.

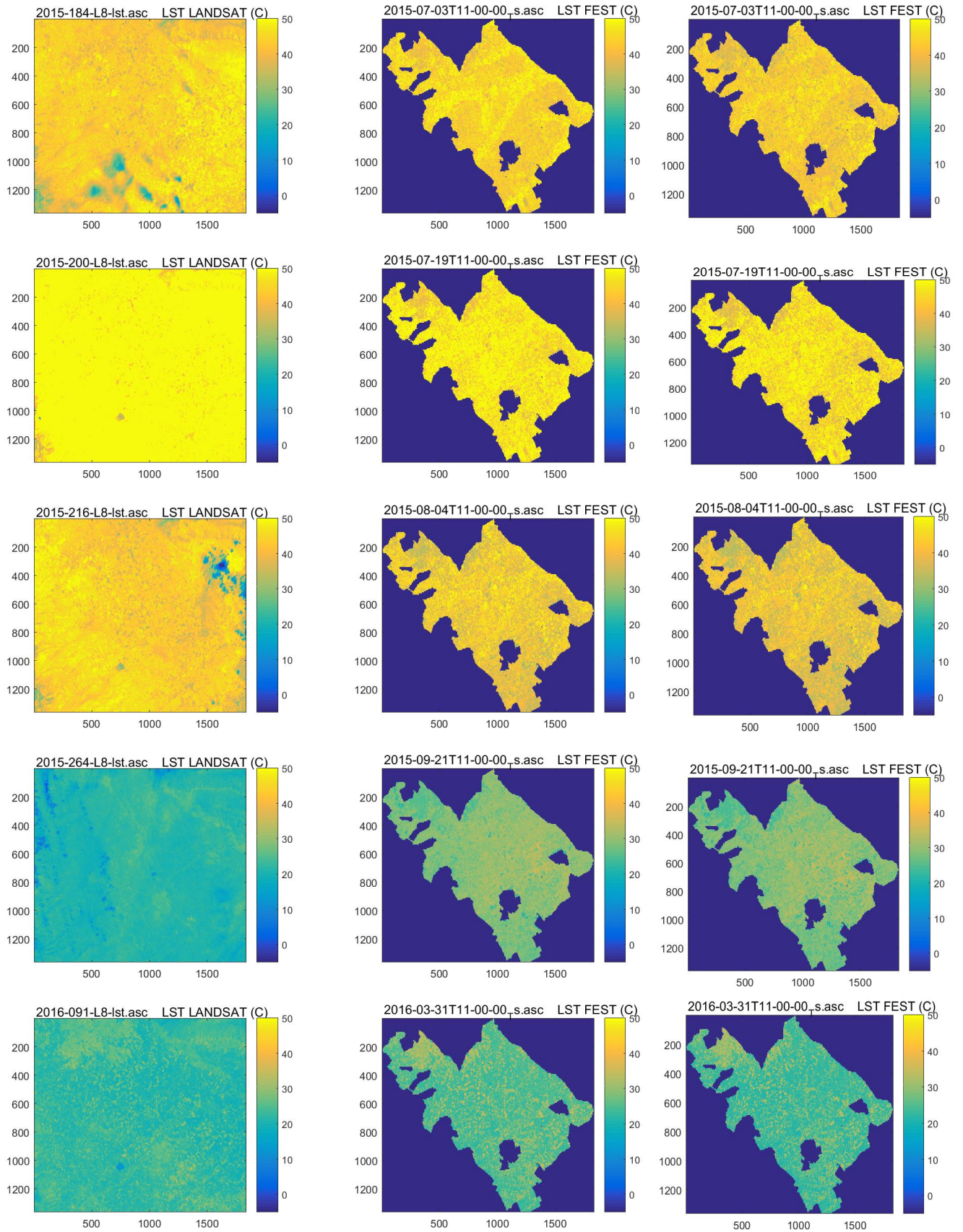
Osservando i risultati riportati negli istogrammi delle figure sopra, si nota come la K_{sat} sia stata mediamente ridotta di un ordine di grandezza, in seguito al processo di calibrazione pixel a pixel. Per quanto riguarda la profondità del terreno, essa è stata in media notevolmente aumentata, passando da un range di 0.35-0.58 m a 1.19-1.71 m. Infine nell'ultimo grafico, riferito alla resistenza stomatica minima, si vede come mediamente sul consorzio sia stata diminuita, da un range di 98.82-199.99 w/m^2 a 49.1-98.81 w/m^2 .

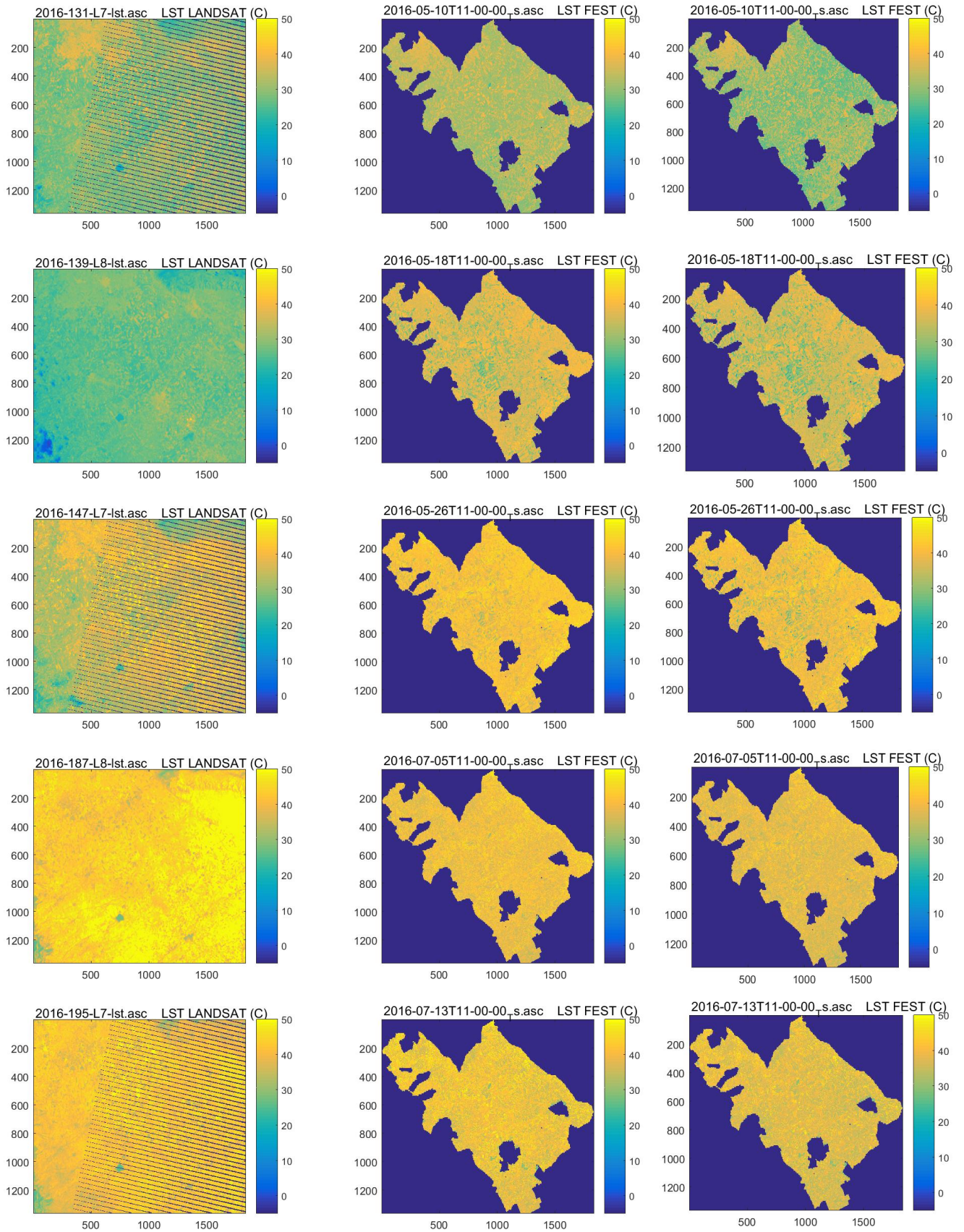
Di seguito vengono infine riportate le 23 immagini della temperatura superficiale sul consorzio, misurate a sinistra e calcolate a destra, nelle giornate indicate nella Tabella 5-1.

In ordine vengono proposte le immagini scattate dai satelliti Landsat della temperatura superficiale del terreno LST, seguite dalle immagini simulate con i parametri originali ed infine le immagini simulate con quelli calibrati.









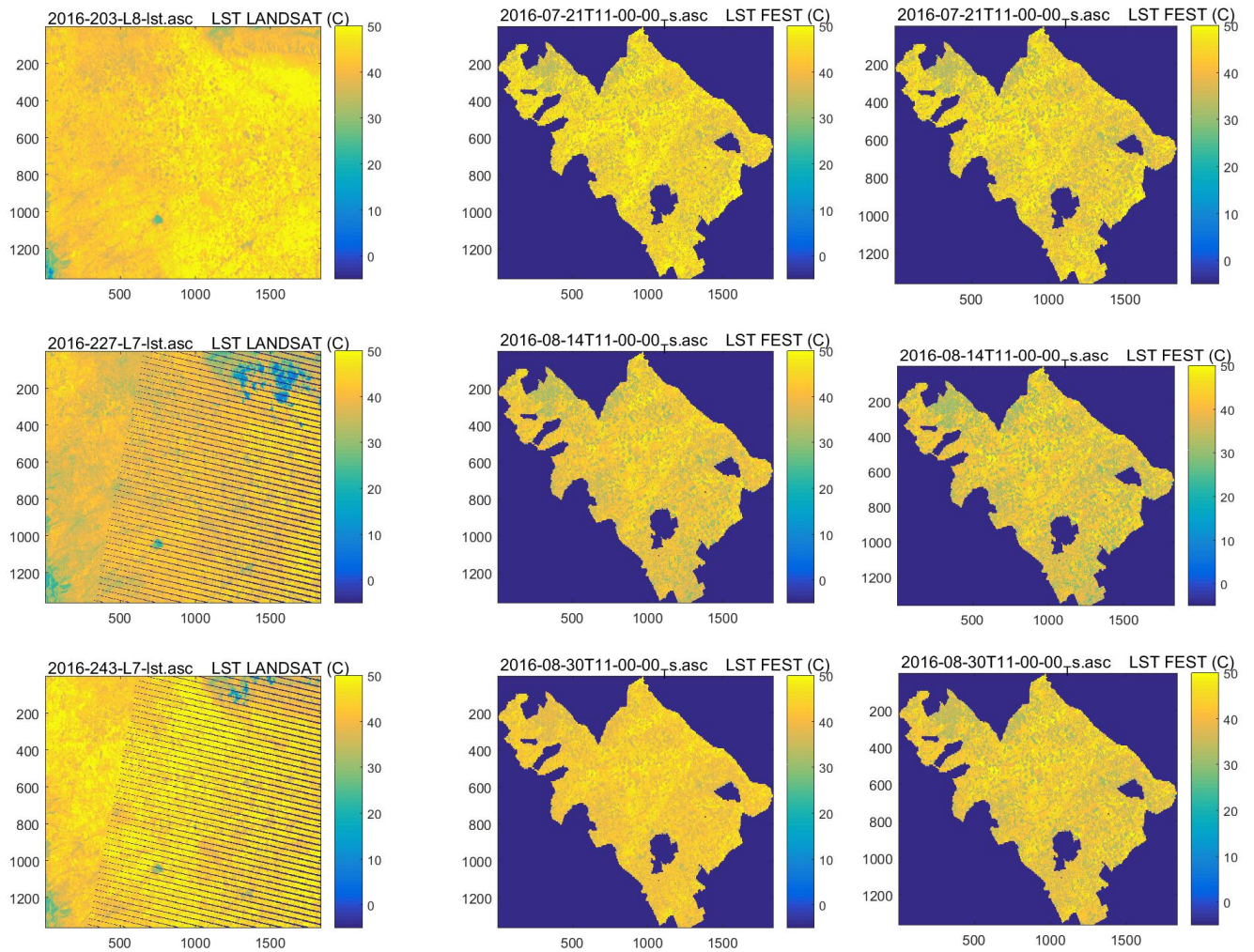


Figura 5-6: Confronto fra le LST dalle immagini satellitari Landsat e quelle da modello FEST-EWB della simulazione originale (immagine centrale) e della simulazione finale (immagine a destra).

Capitolo 6

CONCLUSIONI

In questa tesi si è calibrato il modello idrologico FEST-EWB del Politecnico di Milano, applicato sull'area di cui fa parte il Consorzio di Bonifica della Capitanata di Foggia, in particolare della parte di maggiore estensione: il Comprensorio di Fortore. L'area è soggetta ad un intenso sfruttamento agricolo, che si scontra con la crescente domanda di acqua potabile ad uso civile e per il settore industriale. La scarsità idrica che affligge la zona causa inevitabilmente dei ritardi nei tempi di approvvigionamento, che penalizzano in particolar modo il settore primario.

La calibrazione è avvenuta a scala di campo e a scala di bacino.

Per la scala di campo si è deciso di analizzare 4 campi distinti di asparagi, verze e pomodori, coltivati in luoghi e tempi differenti, in cui sono stati disponibili i dati da altrettante stazioni Eddy Covariance. Il periodo della simulazione ha interessato un arco di circa 3 anni, in cui sono stati raccolti i dati da oltre 48 stazioni, tra Eddy Covariance e stazioni meteo, per avere una maggiore densità di dati disponibili. I dati hanno subito un processo di validazione successivo alla loro raccolta, per eliminarne i valori impossibili e le mancanze verificatesi durante i malfunzionamenti. Sono stati analizzati i comportamenti dell'umidità del suolo (SM), il calore latente (LE), il calore sensibile (H), la radiazione netta (R_n), il flusso di calore nel suolo (G) e la temperatura superficiale (LST). I risultati dei confronti successivi alla calibrazione risultano molto promettenti in 3 campi, con errori piuttosto limitati nella stima dei flussi energetici e nella rappresentazione della LST e SM. Nell'ultimo campo non si è riusciti a raggiungere risultati soddisfacenti, a causa di probabili errori nell'acquisizione dei dati da parte della stazione Eddy Covariance che ha sottostimati i flussi di LE ed H. È emerso in letteratura che questo è un problema comune di questo tipo di stazione di misura, che si manifesta come una mancanza consistente nella chiusura del bilancio energetico.

La calibrazione a scala di consorzio è stata realizzata modificando pixel a pixel i parametri del suolo e della vegetazione tramite il confronto tra le immagini satellitari Landsat di LST e quelle modellate del FEST-EWB.

Sono stati calcolati infine i fabbisogni irrigui delle 4 colture, confrontandone i valori osservati e simulati prima e dopo la fase di calibrazione. Nei campi di verze e pomodori dell'azienda sono stati ottenuti i risultati più promettenti, portando gli errori assoluti a circa il 7 e 2.7%.

Le difficoltà avute nelle calibrazioni dei campi di asparagi e pomodori consorzio sono da imputare ad errori nell'acquisizione dei valori di LE.

Alla fine si è ottenuto un modello FEST-EWB calibrato per il consorzio in esame, in grado di simulare più o meno correttamente gli andamenti dei flussi energetici ed idrologici. Si è inoltre potuto procedere al calcolo dei fabbisogni irrigui, utile ad una futura implementazione con la metodologia Pre.G.I. o "Previsione e Gestione Irrigua", riguardante la previsione idro-metereologica finalizzata ad una più efficiente gestione irrigua.

CAPITOLO 7 BIBLIOGRAFIA

- (JMP), W. H. (2015). *Progress on Drinking Water and Sanitation, 2015 Update and MDG Assessment*. Switzerland: World Health Organization, UNICEF.
- A. Ceppia, G. R. (2013). Real Time Drought Forecasting System for Irrigation Management. *Procedia Environmental Sciences*, 19, 776–784.
- ARPA Puglia. (s.d.). *Agenzia Regionale per la Prevenzione e la Protezione dell'Ambiente*. Tratto il giorno 09 29, 2016 da <http://www.arpa.puglia.it/web/guest/meteomonitor2>
- Blenkinsop, S. F. (2007). Changes in drought characteristics for Europe projected by the PRUDENCE regional climate models. *Int. J. Climatol.*, 1595–1610.
- Brown, P. D. (2010). Optimal on-farm irrigation scheduling with a seasonal water limit using simulated annealing. *Agr. Water Manage.*, 892–900.
- Bruinsma, J. (2003). *World Agriculture: Towards 2015/2030, An FAO Perspective*. Rome: Earthscan, London and Food and Agriculture Organization.
- C Corbari, D. M. (2012). Effetto delle correzioni dei dati misurati da stazioni eddy covariance sulla stima dei flussi evapotraspirativi. *Rivista italiana di agrometeorologia= Italian journal of agrometeorology*.
- Cabelguenne, M. D. (1997). *Real time irrigation management using the EPIC – PHASE model and weather forecasts*. Tolosa: Agr. Water Manage.
- Cai, J. L. (2007). *Estimating reference evapotranspiration with the FAO Penman – Monteith equation using daily weather forecast messages*. Agr. Forest Meteorol.
- Charlotte de Fraiture, D. M. (2010). Investing in water for food, ecosystems, and livelihoods: An overview of the comprehensive assessment of water management in agriculture. *Agricultural Water Management*, 97, 495–501.
- Chavez, P. S. (1988). An improved dark-object subtraction technique for atmospheric scattering correction of multispectral data. *Remote sensing of environment*, 459–479.
- Consorzio di Bonifica della Capitana. (2017, 03 27). *Consorzio di Bonifica della Capitana - Schemi idrici*. Tratto da Consorzio di Bonifica della Capitana: http://consorzio.fg.it/index.php?option=com_content&view=article&id=50&Itemid=136
- Corbari et al, M. M. (2011, February). Calibration and Validation of a Distributed Energy–Water Balance Model Using Satellite Data of Land Surface Temperature and Ground Discharge Measurements. *Journal of Hydrometeorology*, 15, 376–392.
- CRA-CIN. (2009, 01 01). *CRA.Clima.Evapotranspiration- Priestley-Taylor equation*. Tratto da agsys.cra-cin.it: <http://agsys.cra-cin.it/tools/evapotranspiration/help/Priestley-Taylor.html>
- FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations. (1998, 01 01). *Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements - FAO Irrigation and drainage paper 56*. Tratto il giorno 01 16, 2017 da <http://www.fao.org/documents/en/>: <http://www.fao.org/docrep/X0490E/x0490e00.htm#Contents>

- G.E.P. Box, G. J. (1976). *Time Series Analysis: Forecasting and Control*. San Francisco: Holden-Day.
- Gowing, J. W. (2001). *Real-time scheduling of supplemental irrigation for potatoes using a decision model and short term weather forecasts*. Agr. Water Manage.
- Hoogenboom, A. A. (2007, APRIL/MARCH). Comparison of Priestley-Taylor and FAO-56 Penman-Monteith for Daily Reference Evapotranspiration Estimation in Georgia. *JOURNAL OF IRRIGATION AND DRAINAGE ENGINEERING*, 175-182.
- IPCC, I. P. (2013, June 18). Tratto il giorno April 5, 2016 da http://www.ipcc-data.org/guidelines/pages/gcm_guide.html
- J. A. Sobrino, J. C.-M.-T.-C. (2009). Thermal remote sensing from Airborne Hyperspectral Scanner data in the framework of the SPARC and SEN2FLEX projects: an overview. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2031–2037.
- Jensen, A. L. (2003). *Agricultural information and decision support by sms.*. EFITA Conference.
- Kustas, W. G. (1991). An interdisciplinary field study of the energy and water fluxes in the atmosphere-biosphere system over semi-arid rangelands: description and preliminary results. *Bull. Am. Meteorol. Soc*, 1683–1705.
- Molden, D. (2007). *Water for Food, Water for Life: A Comprehensive Assessment of Water Management in Agriculture*. Colombo: Earthscan, London and International Water Management Institute.
- Northon, K. (2016, January 20). *NASA, NOAA Analyses Reveal Record-Shattering Global Warm Temperatures in 2015*. Tratto il giorno April 14, 2016 da [nasa.gov: http://www.nasa.gov/press-release/nasa-noaa-analyses-reveal-record-shattering-global-warm-temperatures-in-2015](http://www.nasa.gov/press-release/nasa-noaa-analyses-reveal-record-shattering-global-warm-temperatures-in-2015)
- Ravazzani et al, F. S. (2016). *Il progetto SEGUICI e lo sviluppo di soluzioni Smart per la Gestione delle risorse idriche ad uso Civile*. Milano: ASITA.
- Smith, M. (1992). *A computer program for irrigation planning and management*. Rome: FAO.
- Stanganelli, M. (2016). *Retrieval of parameters and variables of a hydrological water and energy balance model from satellite images, case studies of Barrax and Foggia*. Milano.
- T.E. Twine, *. W. (2000). Correcting eddy-covariance flux underestimates over a grassland. *Agricultural and Forest Meteorology*, 297.
- The Core Writing Team, M. R. (2014). *IPCC, 2014: Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Geneva, Switzerland: IPCC.
- United Nations, D. o. (2015). *World Population Prospects: The 2015 Revision, Volume II: Demographic Profiles*. New York: United Nations.
- Yiou, D. J.-F. (2014). EURO-CORDEX: new high-resolution climate change projections for European impact research. *Regional Environmental Change*, 563–578.

APPENDICE A

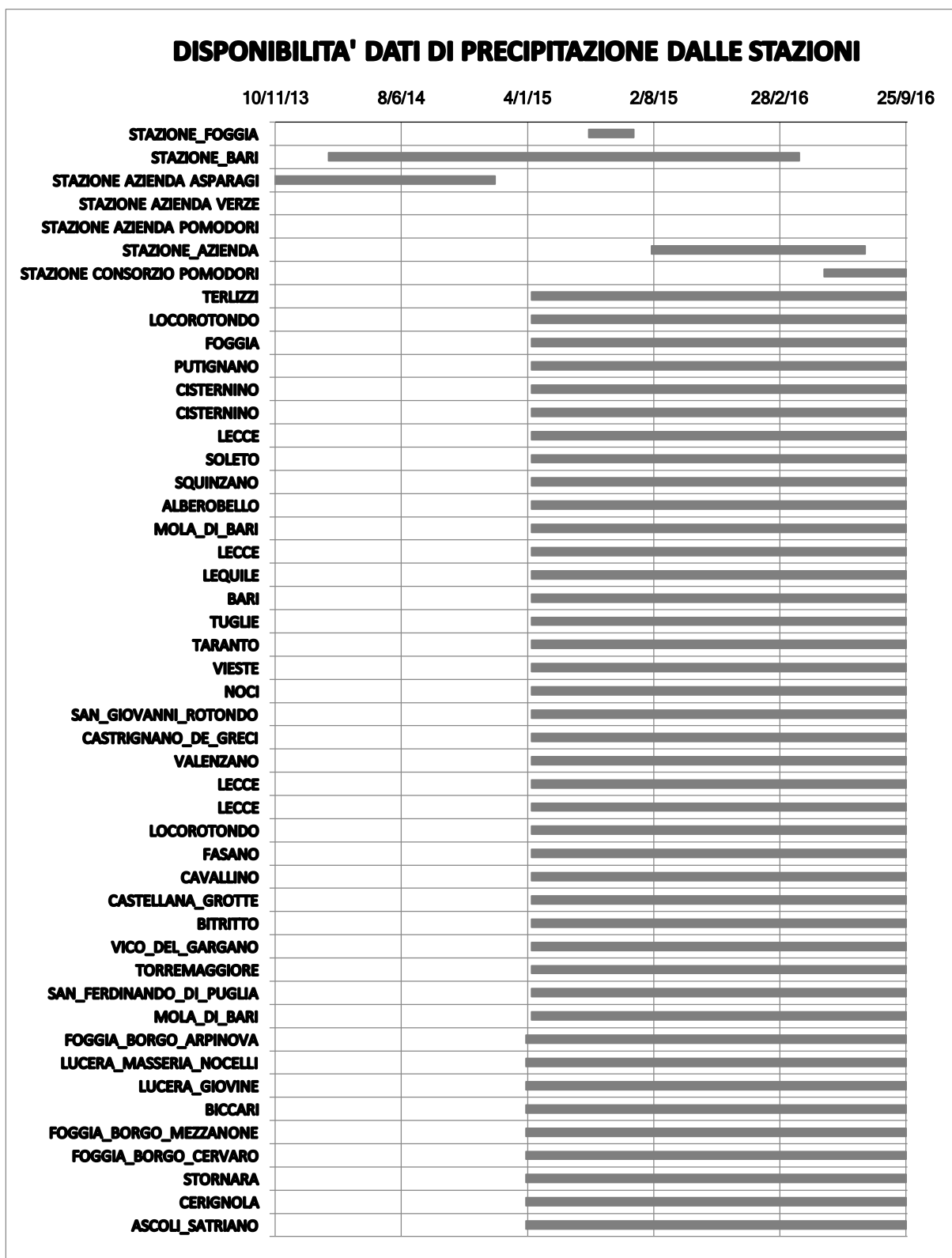
Di seguito vengono proposti gli allegati che, al fine di non appesantire eccessivamente la trattazione, non sono stati inseriti direttamente all'interno dei capitoli della tesi. Alcuni di essi risultano tuttavia già riportati nel testo, ma si è preferito inserirli nuovamente per avere fedelmente il quadro d'insieme di quanto prodotto.

A.1 Disponibilità temporale dei dati di INPUT FEST dalle stazioni

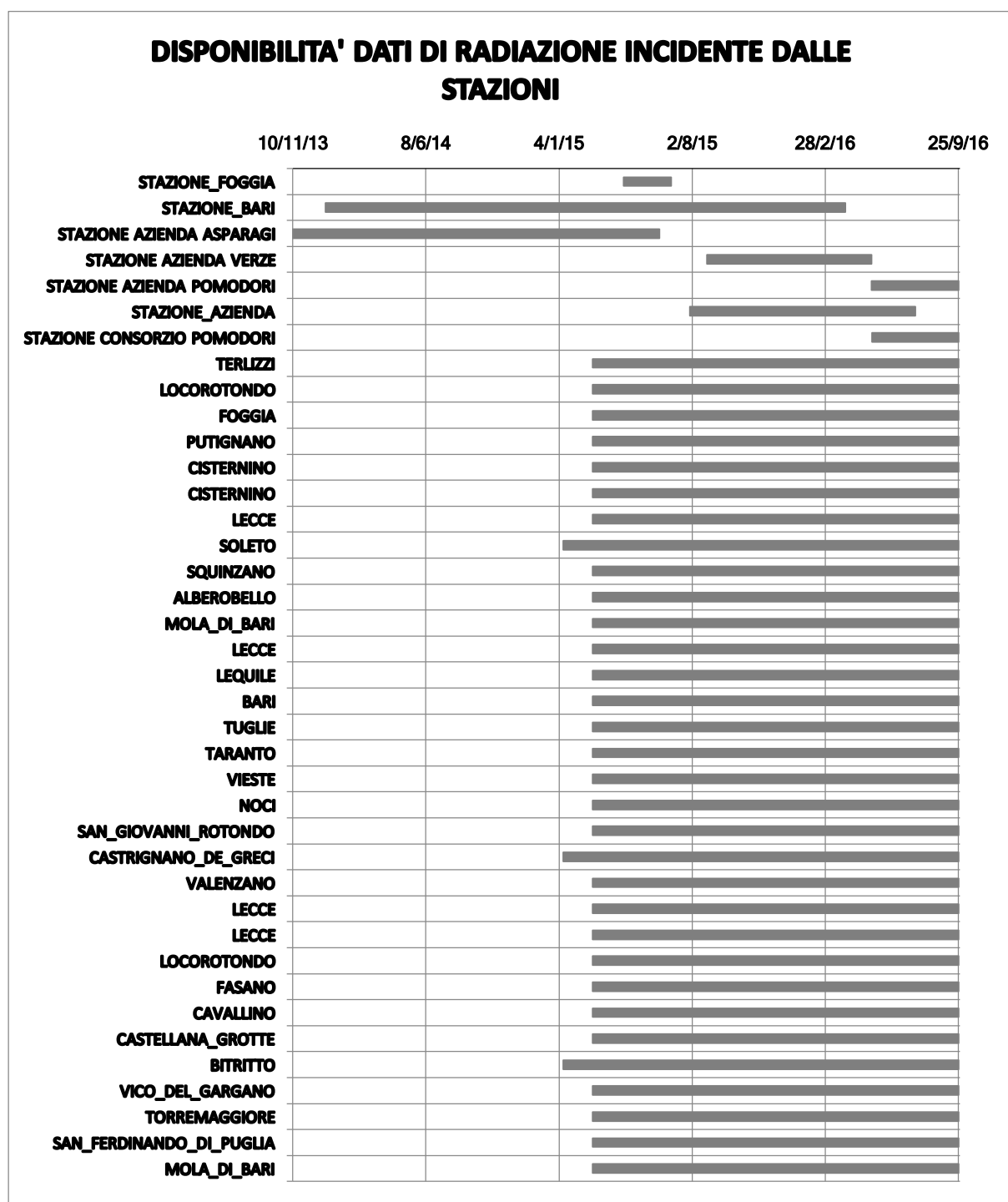
Negli allegati seguenti è possibile vedere schematicamente come i dati delle stazioni siano stati disponibili durante il periodo della simulazione, che va dall'inizio del grafico (10/11/2013) sino alla fine (25/09/2016). Come si può vedere la maggior parte dei valori è stata resa disponibile per la seconda parte della simulazione, da gennaio 2015 fino alla fine.



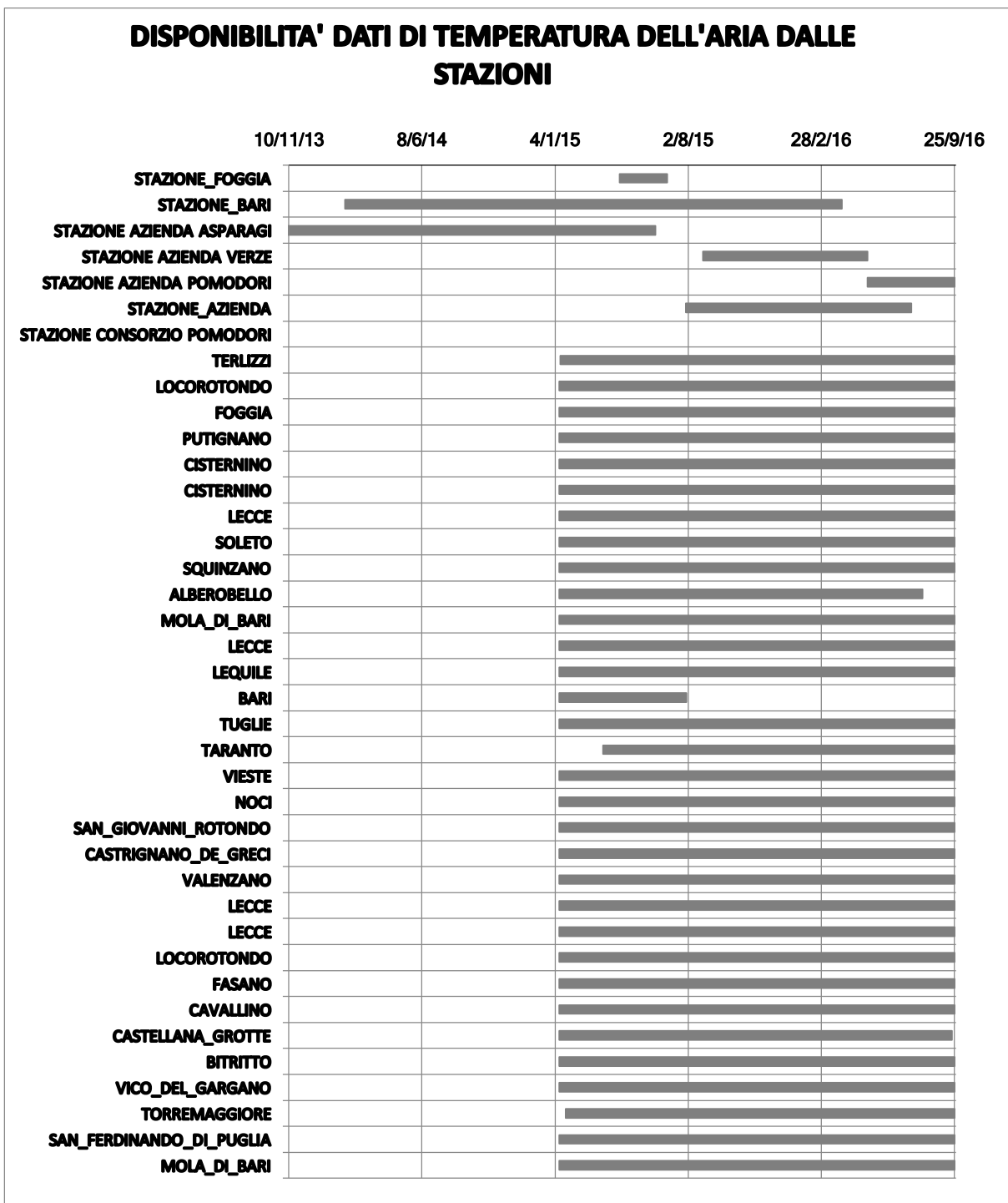
Allegato 1: Durata periodo di acquisizione dei dati dalle stazioni Eddy Covariance



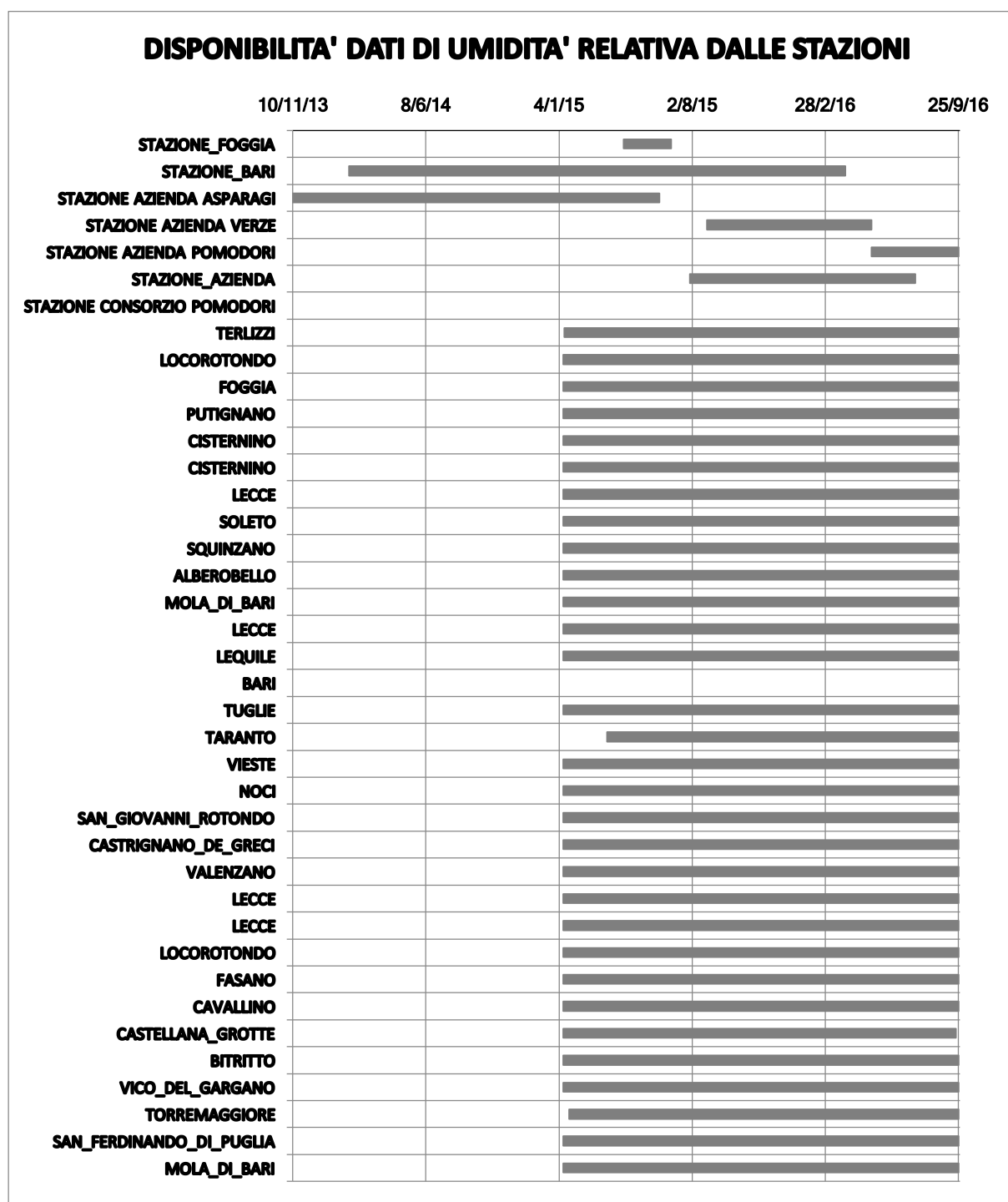
Allegato 2: Disponibilità dai dati pluviometrici dalle stazioni



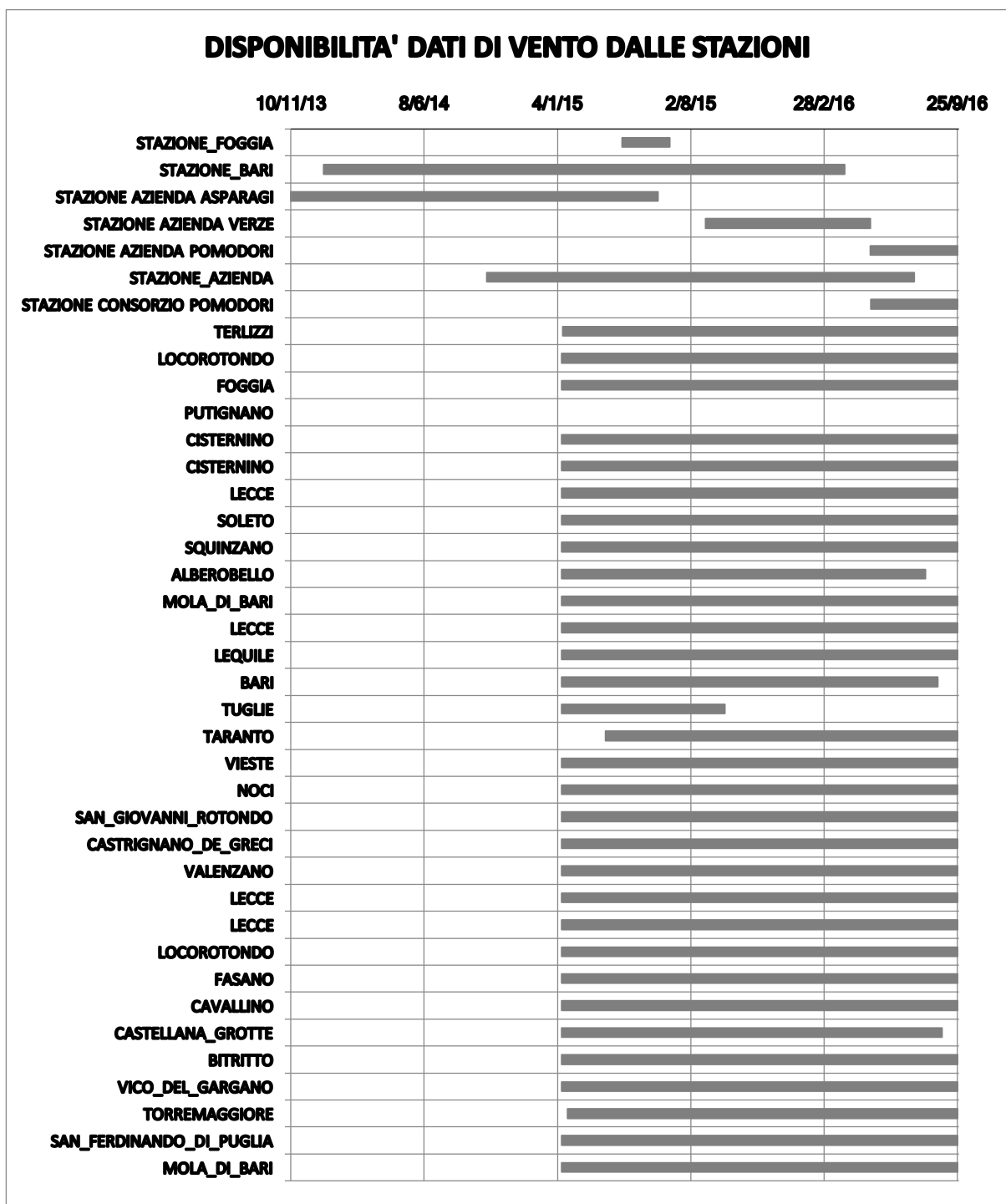
Allegato 3: disponibilità dei dati di radiazione solare incidente dalle stazioni Eddy



Allegato 4: Disponibilità di dati della temperatura dell'aria dalle stazioni Eddy Covariance



Allegato 5: Disponibilità di dati dell'umidità relativa dalle stazioni Eddy Covariance



Allegato 6: Disponibilità di dati del vento dalle stazioni Eddy Covariance