

POLITECNICO DI MILANO

Facoltà di Ingegneria Civile, Ambientale e Territoriale

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



**GESTIONE DELLA RISORSA IDRICA  
NEL CONSORZIO PER LA BONIFICA  
DELLA CAPITANATA: MODELLISTICA  
IDROLOGICA E IMMAGINI  
SATELLITARI**

Relatore: Prof.ssa Chiara Corbari

Tesi di laurea di:

Giulia Airoidi – Matricola 883851

Stefano Citterio - Matricola 883922

Anno accademico 2017/2018



# Ringraziamenti

*Per questo lavoro di tesi, i nostri riconoscimenti vanno in particolar modo alla professoressa Chiara Corbari per averci seguito e supportato, proponendoci di analizzare una tematica così attuale.*

*Desideriamo ringraziare le nostre famiglie, che ci hanno permesso di intraprendere questo percorso di studio, per il costante appoggio e incoraggiamento.*

*Infine rivolgiamo un ringraziamento a tutti i docenti che hanno contribuito alla nostra crescita formativa e personale.*





## Sintesi

L'obiettivo di questo elaborato di tesi consiste nella calibrazione e validazione del modello idrologico FEST-EWB per la relativa implementazione nella metodologia SIM per il risparmio irriguo, applicata al caso studio del Consorzio per la Bonifica della Capitanata.

La calibrazione è stata effettuata a scala puntuale in corrispondenza di un campo coltivato prima a pomodoro e poi grano nel corso delle stagioni 2017 e 2018, facendo riferimento ai dati osservati da una stazione Eddy Covariance situata nel campo stesso. La validazione del modello FEST-EWB è stata invece eseguita a scala di bacino per gli anni 2017 e 2018, sulla base di parametri del suolo e della vegetazione già calibrati in un lavoro di tesi precedente (De Pedrini, 2017). Le immagini di temperatura superficiale del suolo (LST) simulate dal FEST-EWB sono state quindi confrontate con quelle fornite dai satelliti dei programmi Landsat e Sentinel. L'analisi è stata implementata a diverse risoluzioni spaziali al suolo, partendo da un livello di dettaglio elevato pari a 30 m per poi scalare a risoluzioni più basse di 1 km e 10 km.

La metodologia SIM, tecnica innovativa per la gestione della risorsa idrica destinata all'irrigazione, è stata quindi applicata sia a scala locale che a scala di bacino e ha permesso di ottimizzare l'uso dell'acqua senza condizionare la resa agricola delle colture, limitando notevolmente gli sprechi.

Alla fine si è ottenuto un modello calibrato e validato nell'area di studio e la sua integrazione con la metodologia SIM ha permesso di valutare la possibile riduzione e ottimizzazione dei quantitativi d'acqua utilizzati per l'irrigazione.



# Indice dei contenuti

RINGRAZIAMENTI.....	I
SINTESI.....	III
INDICE DEI CONTENUTI .....	V
INDICE DELLE FIGURE.....	IX
INDICE DELLE TABELLE.....	XVII
INTRODUZIONE .....	1
CAPITOLO 1 INQUADRAMENTO TERRITORIALE .....	7
CAPITOLO 2 DATI METEOROLOGICI E IDROLOGICI PUNTUALI IN INPUT E VALIDAZIONE DEL MODELLO IDROLOGICO .....	9
2.1 Stazioni meteo analizzate.....	9
2.1.1 Problematiche riscontrate .....	13
2.2 La tecnica Eddy Covariance.....	15
2.2.1 Specifiche tecniche Eddy Covariance .....	16
2.2.2 La stazione Eddy Covariance utilizzata per l’analisi a scala locale.....	18
CAPITOLO 3 DATI SPAZIALI IN INPUT AL MODELLO IDROLOGICO.....	21
3.1 Proprietà e caratteristiche del suolo .....	21
3.1.1 Confronto alle diverse scale di risoluzione spaziale .....	22
3.2 Dati da satellite .....	27
3.2.1 Validazione dei dati da satellite .....	29
3.2.2 Confronto alle diverse scale di risoluzione spaziale .....	30
3.4 Dati di irrigazione .....	35

CAPITOLO 4 METODOLOGIA .....	39
4.1 Il modello idrologico FEST-EWB .....	39
4.2 Calibrazione e validazione.....	41
4.2.1 Calibrazione a scala locale .....	41
4.2.2 Validazione a scala di bacino .....	42
4.3 Metodologia SIM .....	43
4.4 Indicatori.....	45
CAPITOLO 5 ANALISI A SCALA PUNTUALE.....	47
5.1 Calibrazione del modello FEST-EWB .....	48
5.1.1 Coltivazione a pomodoro.....	49
5.1.2 Coltivazione a grano.....	56
5.2 Irrigazione con metodologia SIM .....	63
5.2.1 Campo coltivato a pomodoro.....	63
5.2.2 Campo coltivato a grano .....	67
5.3 Indicatori dell'uso dell'acqua .....	70
5.3.1 Campo coltivato a pomodoro.....	70
5.3.2 Campo coltivato a grano .....	72
CAPITOLO 6 ANALISI A SCALA DI BACINO .....	75
6.1 Analisi alla risoluzione spaziale di 30 m.....	76
6.1.1 Miglioramento distribuzione dell'irrigazione nel FEST-EWB.....	81
6.1.2 Calcolo degli errori alla risoluzione spaziale di 30 m .....	90
6.2 Analisi alla risoluzione spaziale di 1 km.....	97
6.3 Analisi alla risoluzione spaziale di 10 km .....	103
6.4 Confronto tra le risoluzioni spaziali di 30 m, 1 km e 10 km .....	109
6.4.1 Confronto alla stazione Eddy Covariance.....	116

6.5 Irrigazione con metodologia SIM.....	119
CONCLUSIONI.....	121
BIBLIOGRAFIA.....	125



## Indice delle figure

Figura 1.1: Inquadramento dell'area del comprensorio del Sud Fortore, evidenziata in rosso.....	8
Figura 1.2: Superficie del Consorzio per la Bonifica della Capitanata di Foggia con evidenziato il comprensorio esaminato .....	8
Figura 2.1: Distribuzione delle stazioni di misura nel territorio della Puglia, con evidenziato il comprensorio irriguo .....	10
Figura 2.2: Dettaglio delle stazioni di misura nell'area in esame.....	10
Figura 2.3: Durata temporale dei dati raccolti dalle stazioni .....	14
Figura2.4: Comprensorio del Fortore con zoom sul campo considerato e Eddy Covariance .....	18
Figura 2.5: Umidità del suolo misurata dalla stazione Eddy Covariance.....	19
Figura 2.6: ET cumulata misurata dalla stazione Eddy Covariance.....	19
Figura 3.1: Mappe del DEM a 30 m, 1 km, 10 km e relativi istogrammi .....	22
Figura 3.2: Mappe della permeabilità k a 30 m, 1 km, 10 km e relativi istogrammi	23
Figura 3.3: Mappe di FC a 30 m, 1 km, 10 km e relativi istogrammi .....	23
Figura 3.4: Mappe di WP a 30 m, 1 km, 10 km e relativi istogrammi .....	24
Figura 3.5: Mappe di $\theta_{res}$ a 30 m, 1 km, 10 km e relativi istogrammi .....	24
Figura 3.6: Mappe di Rs min a 30 m, 1 km, 10 km e relativi istogrammi.....	25
Figura 3.7: Mappe di profondità di suolo idrologicamente attivo a 30 m, 1 km, 10 km e relativi istogrammi.....	25
Figura 3.8: Immagine di buona qualità (L8, 17/02/2018).....	28
Figura 3.9: Immagine parziale (L8, 30/05/2017) .....	28
Figura 3.10: Immagine con nuvole (L8, 16/01/2018).....	28
Figura 3.11: Immagine con linee oblique (L7, 14/06/2017).....	28

Figura 3.12: Confronto dati osservati da stazione Eddy Covariance e satellite L7 ...	29
Figura 3.13: Confronto dati osservati da stazione Eddy Covariance e satellite L8 ...	29
Figura 3.14: Mappe di albedo a 30 m, 1 km e 10 km e relativi istogrammi .....	30
Figura 3.15: Mappe del LAI a 30 m, 1 km e 10 km e relativi istogrammi .....	31
Figura 3.16: Mappe della FV a 30 m, 1 km e 10 km e relativi istogrammi .....	31
Figura 3.17: Media albedo a 30m, 1km e 10km .....	32
Figura 3.18: Deviazione standard albedo a 30m, 1 km e 10 km .....	33
Figure 3.19: Media LAI a 30m, 1km e 10km .....	33
Figure 3.20: Deviazione standard LAI a 30m, 1km e 10km .....	34
Figura 3.21: Media frazione vegetata a 30m, 1km e 10km .....	34
Figura 3.22: Deviazione standard frazione vegetata a 30m, 1km e 10km .....	35
Figura 3.23: Acquedotto di Foggia .....	36
Figura 3.24: Distribuzione delle colture presenti nel comprensorio .....	36
Figura 3.25: Portata irrigata nelle stagioni irrigue 2017-2018 .....	37
Figura 4.1: Schema di funzionamento del modello idrologico FEST-EWB .....	40
Figura 4.2: Rappresentazione grafica di TAW, RAW, FC e WP .....	44
Figura 5.1: Localizzazione del campo in esame nel comprensorio del Sud Fortore .	48
Figura 5.2: Confronto tra l'umidità del suolo osservata, simulata con i parametri originali e calibrata. Campo pomodoro .....	51
Figura 5.3: Confronto tra la radiazione netta osservata, simulata con i parametri originali e calibrata. Campo pomodoro .....	51
Figura 5.4: Confronto tra il calore latente osservato, simulato con i parametri originali e calibrato. Campo pomodoro. ....	52
Figura 5.5: Confronto tra il calore sensibile osservato, simulato con i parametri originali e calibrato. Campo pomodoro. ....	52
Figura 5.6: Confronto tra il flusso di calore sotterraneo osservato, simulato con i parametri originali e calibrato. Campo pomodoro .....	53
Figura 5.7: Confronto tra la temperatura superficiale osservata, simulata con i parametri originali e calibrata. Campo pomodoro .....	53



Figura 5.8: Diagramma di correlazione tra l'umidità osservata e simulata. Campo pomodoro.....	54
Figura 5.9: Diagramma di correlazione tra la radiazione netta osservata e simulata. Campo pomodoro.....	54
Figura 5.10: Diagramma di correlazione tra il calore latente osservato e simulato. Campo pomodoro.....	54
Figura 5.11: Diagramma di correlazione tra il calore sensibile osservato e simulato. Campo pomodoro.....	55
Figura 5.12: Diagramma di correlazione tra il flusso di calore sotterraneo osservato e simulato. Campo pomodoro.....	55
Figura 5.13: Diagramma di correlazione tra la temperatura superficiale osservata e simulata. Campo pomodoro.....	55
Figura 5.14: Confronto tra l'umidità osservata, simulata con i parametri originali e calibrata. Campo grano.....	58
Figura 5.15: Confronto tra la radiazione netta osservata, simulata con i parametri originali e calibrata. Campo grano.....	58
Figura 5.16: Confronto tra il calore latente osservato, simulato con i parametri della simulazione originaria e calibrato. Campo grano.....	59
Figura 5.17: Confronto tra il calore sensibile osservato, calibrato con i parametri della simulazione originaria e calibrato. Campo grano.....	59
Figura 5.18: Confronto tra il flusso di calore nel terreno osservato, simulato con i parametri della simulazione originaria e calibrato. Campo grano.....	60
Figura 5.19: Confronto tra la temperatura superficiale osservata, simulata con i parametri della simulazione originale e calibrata. Campo grano.....	60
Figura 5.20: Diagramma di correlazione tra l'umidità osservata e simulata. Campo grano.....	61
Figura 5.21: Diagramma di correlazione tra la radiazione netta osservata e simulata. Campo grano.....	61
Figura 5.22: Diagramma di correlazione tra il calore latente osservato e simulato. Campo grano.....	61

Figura 5.23: Diagramma di correlazione tra il calore sensibile osservato e simulato. Campo grano.....	62
Figura 5.24: Diagramma di correlazione tra il flusso di calore nel terreno osservato e simulato. Campo grano. ....	62
Figura 5.25: Diagramma di correlazione tra la temperatura superficiale del suolo osservata e simulata. Campo grano.....	62
Figura 5.26: Umidità nel suolo e strategia SIM per l'irrigazione del pomodoro. ....	64
Figura 5.27: Irrigazione, evapotraspirazione e precipitazione cumulata. Campo pomodoro.....	66
Figura 5.28: Umidità del suolo e strategia SIM per l'irrigazione del grano .....	68
Figura 5.29: Irrigazione, ET e precipitazione cumulata. Campo grano. ....	69
Figura 5.30: WUE e IWUE dai dati del FEST-EWB con irrigazione osservata e del FEST-EWB con irrigazione SIM. Campo pomodoro.....	71
Figura 5.31: RSWD, deficit di percolazione ed efficienza dell'irrigazione dai dati del FEST-EWB con irrigazione osservata e del FEST-EWB con irrigazione SIM. Campo pomodoro.....	71
Figura 5.32: WUE e IWUE dai dati del FEST-EWB con irrigazione osservata e dal FEST-EWB con irrigazione SIM. Campo grano.....	73
Figura 5.33: RSWD, deficit di percolazione ed efficienza dell'irrigazione dai dati del FEST-EWB con irrigazione osservata e dal FEST-EWB con irrigazione SIM. Campo grano.....	73
Figura 6.1: Confronto delle medie di temperature delle immagini simulate dal FEST-EWB con quelle osservate dal satellite L7 a 30 m .....	77
Figura 6.2: Confronto delle medie di temperature delle immagini simulate dal FEST-EWB con quelle osservate dal satellite L8 a 30 m .....	77
Figura 6.3: Confronto delle medie di temperature delle immagini simulate dal FEST-EWB con quelle osservate dal satellite S3A a 30 m.....	78
Figura 6.4: Confronto delle medie di temperature delle immagini simulate dal FEST-EWB con quelle osservate dal satellite L7 con indice di frazione vegetata minore di 0.05.....	79

Figura 6.5: Confronto delle medie di temperature delle immagini simulate dal FEST-EWB con quelle osservate dal satellite L7 con indice di frazione vegetata compreso tra 0.05 e 0.5.....	80
Figura 6.6: Confronto delle medie di temperature delle immagini simulate dal FEST-EWB con quelle osservate dal satellite L7 con indice di frazione vegetata maggiore di 0.5 .....	80
Figura 6.7: Miglioramento distribuzione irrigazione nel FEST-EWB: confronto tra l'approccio con irrigazione distribuita e solo nelle aree vegetate, rispetto ai dati osservati dal satellite L7 con $FV > 0.5$ .....	81
Figura 6.8: Relazione tra indice NDVI, temperature superficiale e copertura della vegetazione .....	82
Figura 6.9: Andamento puntuale NDVI per le colture di grano e di pomodoro per gli anni 2017 e 2018 .....	83
Figura 6.10: Andamento temperatura superficiale per le colture di grano e di pomodoro per gli anni 2017 e 2018.....	83
Figura 6.11: Andamento CSWI per le colture di grano e di pomodoro per gli anni 2017 e 2018 .....	84
Figura 6.12: Confronto tra le medie di temperatura delle immagini simulate con i 3 approcci utilizzati per migliorare la distribuzione dell'irrigazione nel FEST-EWB rispetto a quelle osservate dal satellite L7 .....	85
Figura 6.13: Confronto tra le medie di temperatura delle immagini simulate con i 3 approcci utilizzati per migliorare la distribuzione dell'irrigazione nel FEST-EWB rispetto a quelle osservate dal satellite L8 .....	85
Figura 6.14: Confronto tra le medie di temperatura delle immagini simulate con i 3 approcci utilizzati per migliorare la distribuzione dell'irrigazione nel FEST-EWB rispetto a quelle osservate dal satellite S3A.....	86
Figura 6.15: Ingrandimento mesi estivi Landsat 7.....	86
Figura 6.16: Ingrandimento mesi estivi Landsat 8.....	87
Figura 6.17: Mappa LST satellite L7 14/06/2017.....	88
Figura 6.18: Mappa LST irrigazione distribuita 14/06/2017.....	88

Figura 6.19: Mappa LST aree vegetate 14/06/2017.....	88
Figura 6.20: Mappa LST con NDVI 14/06/2017.....	88
Figura 6.21: Ingrandimento campo 1: mappa satellite, irrigazione distribuita, aree vegetate, NDVI.....	88
Figura 6.22: Mappa LST satellite L7 09/07/2017.....	89
Figura 6.23: Mappa LST irrigazione distribuita 09/07/2017 .....	89
Figura 6.24: Mappa LST aree vegetate 09/07/2017.....	89
Figura 6.25: Mappa LST con NDVI 09/07/2017.....	89
Figura 6.26: Ingrandimento campo 2: mappa satellite, irrigazione distribuita, aree vegetate, NDVI.....	89
Figura 6.27: Medie stagionali delle differenze assolute valutate in ogni pixel per L7, L8 e S3A a 30 m .....	90
Figura 6.28: Confronto mappe LST Landsat 7 e FEST-EWB a 30 m.....	92
Figura 6.29: Confronto mappe LST Landsat 8 e FEST-EWB a 30 m.....	94
Figura 6.30: Confronto mappe LST Sentinel 3A e FEST-EWB a 30 m.....	96
Figura 6.31: Confronto tra le medie di temperature delle immagini simulate dal FEST-EWB e quelle osservate dal satellite L7 a 1 km .....	97
Figura 6.32: Confronto tra le medie di temperature delle immagini simulate dal FEST-EWB e quelle osservate dal satellite L8 a 1 km .....	98
Figura 6.33: Confronto tra le medie di temperature delle immagini simulate dal FEST-EWB e quelle osservate dal satellite S3A a 1 km.....	98
Figura 6.34: Medie stagionali delle differenze assolute valutate in ogni pixel per L7, L8 e S3A a 1 km .....	99
Figura 6.35: Confronto mappe LST Landsat 7 e FEST-EWB a 1 km.....	100
Figura 6.36: Confronto mappe LST Landsat 8 e FEST-EWB a 1 km.....	101
Figura 6.37: Confronto mappe LST Sentinel S3A e FEST-EWB a 1km .....	102
Figura 6.38: Confronto tra le medie di temperature delle immagini simulate dal FEST-EWB e quelle osservate dal satellite L7 a 10 km .....	103
Figura 6.39: Confronto tra le medie di temperature delle immagini simulate dal FEST-EWB e quelle osservate dal satellite L8 a 10 km .....	104

Figura 6.40: Confronto tra le medie di temperature delle immagini simulate dal FEST-EWB e quelle osservate dal satellite S3A a 10 km .....	104
Figura 6.41: Medie stagionali delle differenze assolute valutate in ogni pixel per L7, L8 e S3A a 10 km.....	105
Figura 6.42: Confronto mappe LST Landsat 7 e FEST-EWB a 10 km .....	106
Figura 6.43: Confronto mappe LST Landsat 8 e FEST-EWB a 10 km .....	107
Figura 6.44: Confronto mappe LST Sentinel S3A e FEST-EWB a 10 km.....	107
Figura 6.45: Errori a 30 m, 1 km e 10 km per L7 .....	109
Figura 6.46: Errori a 30 m, 1 km e 10 km per L8 .....	110
Figura 6.47: Errori a 30 m, 1 km e 10 km per S3A.....	110
Figura 6.48: Confronto mappe LST L7 e FEST-EWB a 30 m, 1 km e 10 km .....	111
Figura 6.49: Confronto mappe LST L8 e FEST-EWB a 30 m, 1 km e 10 km .....	112
Figura 6.50: Confronto mappe LST S3A e FEST-EWB a 30 m, 1 km e 10 km.....	113
Figura 6.51: Confronto umidità simulata dal FEST-EWB a 30 m, 1 km, 10 km ...	114
Figura 6.52: Confronto evapotraspirazione cumulata simulata dal FEST-EWB a 30 m, 1 km, 10 km .....	115
Figura 6.53: Confronto percolazione cumulata simulata dal FEST-EWB a 30 m, 1 km, 10 km .....	115
Figura 6.54: Confronto puntuale dell'umidità del terreno osservata e simulata a 30 m, 1 km e 10 km. Campo pomodoro .....	116
Figura 6.55: Confronto puntuale dell'umidità del terreno osservata e simulata a 30 m, 1 km e 10 km. Campo grano .....	117
Figura 6.56: Confronto LST osservate da Eddy, misurate dai satelliti e simulate dal FEST-EWB.....	118
Figura 6.57: Irrigazione Sud Fortore osservata e con metodologia SIM.....	119



## Indice delle tabelle

Tabella 2.1: Stazioni di misura e relative coordinate spaziali.....	12
Tabella 2.2: Cadenza delle misurazioni dei dati raccolti dalle stazioni.....	13
Tabella 2.3: Disponibilità temporale dei dati raccolti dalle stazioni .....	14
Tabella 3.1: Media e deviazione standard delle matrici a 30 m, 1 km e 10 km.....	26
Tabella 3.2: Media e deviazione standard delle matrici dei parametri della vegetazione a 30 m, 1 km e 10 km .....	32
Tabella 5.1: Parametri in input alla simulazione originaria e indici statistici. Campo pomodoro.....	49
Tabella 5.2: Parametri in input alla simulazione finale e indici statistici. Campo pomodoro.....	50
Tabella 5.3: Indici statistici simulazione originaria. Campo grano.....	56
Tabella 5.4: Parametri in input alla simulazione finale e statistiche. Campo grano.	57
Tabella 5.5: Irrigazione osservata. Campo pomodoro.....	65
Tabella 5.6: Irrigazione con metodologia SIM. Campo pomodoro .....	65
Tabella 5.7: Irrigazione osservata. Campo grano.....	69
Tabella 5.8: Irrigazione con metodologia SIM. Campo grano .....	69
Tabella 5.9: Evapotraspirazione, irrigazione e percolazione cumulata annua simulata dal FEST-EWB con irrigazione osservata e dal FEST-EWB con irrigazione SIM ..	70
Tabella 5.10: Indicatori pomodoro dai dati del FEST-EWB con irrigazione osservata e dal FEST-EWB con irrigazione SIM.....	70
Tabella 5.11: Evapotraspirazione, irrigazione e percolazione simulata dal FEST-EWB con irrigazione osservata e dal FEST-EWB con irrigazione SIM .....	72
Tabella 5.12: Indicatori grano dai dati del FEST-EWB con irrigazione osservata e dal FEST-EWB con irrigazione SIM .....	72

Tabella 6.1: Riepilogo valori delle differenze assolute valutate in ogni pixel per L7, L8 e S3A a 30 m con irrigazione distribuita .....	78
Tabella 6.2: Riepilogo valori delle differenze assolute valutate in ogni pixel per L7, L8 e S3A a 30 m .....	90
Tabella 6.3: Riepilogo valori delle differenze assolute valutate in ogni pixel per L7, L8 e S3A a 1km .....	99
Tabella 6.4: Riepilogo valori delle differenze assolute valutate in ogni pixel per L7, L8 e S3A a 10 km .....	105
Tabella 6.5: Valori medi degli errori .....	110
Tabella 6.6: Irrigazione, Evapotraspirazione, Percolazione e Pioggia cumulati negli anni 2017 e 2018, simulate dal FEST-EWB con irrigazione osservata e con SIM.	119



# INTRODUZIONE

Gli effetti dei cambiamenti climatici in atto a scala locale e globale e lo sfruttamento sempre più intensivo della risorsa idrica hanno portato nel corso degli anni a porre particolare attenzione sull'utilizzo dell'acqua, fonte essenziale per la sopravvivenza e lo sviluppo della collettività.

L'acqua ricopre infatti circa il 70% della superficie terrestre, ma si tratta di una risorsa limitata e solo il 2.5% del totale è dolce. Di questa risorsa il 68.7% è sotto forma di ghiacciai e neve permanente, il 31% fa parte delle falde acquifere e lo 0.3% è contenuta in laghi e fiumi. Solamente l'1% di essa è quindi disponibile per gli ecosistemi e per l'uomo, che rappresenta lo 0.01% di tutta l'acqua disponibile sulla Terra (FAO, 2015).

La domanda di risorsa idrica è strettamente influenzata dalla crescita demografica mondiale della popolazione, che si stima dovrebbe aumentare del 33%, passando da 7 a 9,3 miliardi entro il 2050 (Unesco, 2016), e dal cambiamento climatico che andrà sempre più ad alterare le condizioni meteorologiche in termini di temperature, precipitazioni e portata dei fiumi, dalle quali dipende la produzione alimentare mondiale.

Secondo l'ultima valutazione dell'Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), il 2015 è stato l'anno globalmente più caldo mai verificatosi dall'inizio delle registrazioni e il riscaldamento globale potrà comportare l'aumento di 1.5 °C in appena 11 anni o sicuramente entro i prossimi 20 anni. Questo fenomeno non è da

sottovalutare considerando che nell'ultimo decennio si è assistito ad un'impressionante serie di incendi boschivi, siccità, ondate di calore e inondazioni in tutto il mondo.

Il settore che necessita del maggior quantitativo d'acqua è quello agricolo, che in Italia utilizza circa il 60% della risorsa idrica disponibile (FAO, 2012); considerando l'aumento della popolazione previsto ed il conseguente incremento della domanda di cibo, si stima che per il 2030 dovrà destinarsi all'agricoltura un 14% in più d'acqua per riuscire a compensare il gap previsto del 40% tra domanda e offerta d'acqua (FAO, 2012).

Nel corso degli anni sono stati intrapresi diversi studi che si propongono di realizzare interventi finalizzati al miglioramento delle tecniche irrigue con lo scopo di risparmiare consistenti quantitativi d'acqua. La ricerca scientifica si è infatti indirizzata verso lo sviluppo e la messa a punto di modelli idrologici che, sfruttando l'accoppiamento con dati tele rilevati da piattaforme aeree e/o satellitari, consentono di stimare i principali flussi idrologici ed energetici come l'evapotraspirazione e l'umidità del suolo, indispensabili per il calcolo dei fabbisogni irrigui.

Le tecniche remote, operanti nelle regioni dello spettro elettromagnetico tra il visibile e l'infrarosso vicino (VIS/NIR), rappresentano una via a basso costo che può essere impiegata per determinare la variabilità spazio-temporale dei numerosi parametri fisici impiegati nei modelli idrologici, tra cui le proprietà e caratteristiche del suolo e della vegetazione come l'indice di area fogliare (LAI), l'albedo e l'altezza della coltura.

Uno dei primi approcci con le immagini satellitari per la misura dei flussi evaporativi delle colture è stato applicato in Italia, nella regione Toscana, dove la banda spettrale utilizzata è stata quella delle microonde. I risultati a scala locale hanno mostrato un buon accordo tra l'umidità del suolo osservata da satellite e quella simulata dal modello idrologico, mentre a larga scala l'effetto della vegetazione ha inciso maggiormente sui risultati in quanto le microonde, a questo livello di dettaglio, non sono in grado di rilevare l'eterogeneità spaziale dei parametri che caratterizzano il territorio (Giacomelli et al., 1995 Mancini et al., 1999). Kalma e Calder (1994) hanno

infatti dimostrato come la variabilità spaziale della vegetazione e delle condizioni del suolo hanno un ruolo fondamentale nel fenomeno dell'evapotraspirazione.

In alternativa alle microonde, ci si è poi indirizzati verso l'utilizzo di immagini satellitari nella banda dell'infrarosso termico, utilizzate come variabile di input del modello idrologico per la stima dell'evapotraspirazione, risolvendo il bilancio energetico senza considerare quello di massa. Tra questa tipologia di modelli si citano il Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL) (Bastiaanssen et al. 1998) e il Surface Energy Balance System (SEBS) (Su 2002), che non distinguono tra evaporazione e traspirazione (modelli "a una sorgente"), il Two Source Energy Balance (TSEB) (Norman et al. 1995), il Simplified Surface Energy Balance Index (S-SEBI) (Roerink et al. 2000) e l'Atmosphere-Land Exchange Inverse Model (ALEXI) (Anderson et al. 1997) che considerano evaporazione e traspirazione separatamente (modelli "a due sorgenti"). Questa tipologia di modelli è in grado quindi di valutare i parametri della vegetazione in ogni pixel del dominio, ma non forniscono una stima diretta dell'umidità del suolo.

Esistono poi modelli idrologici basati su algoritmi che, accoppiati a dati satellitari, risolvono sia il bilancio energetico che quello di massa sfruttando la temperatura superficiale del suolo (LST), variabile connessa all'umidità del suolo. Anche questa tipologia di modelli presenta alcune limitazioni relative per esempio alla copertura nuvolosa, che può disturbare o addirittura impedire la raccolta dei dati, ed alla numerosità e variabilità dei parametri in gioco. Negli ultimi anni, nuovi studi hanno cercato di migliorare ulteriormente la qualità delle simulazioni utilizzando, oltre all'accoppiamento dei dati satellitari ai modelli idrologici, anche le previsioni meteorologiche, fornendo un supporto decisionale per la programmazione dell'irrigazione, come ad esempio il modello EPIC-PHASE (Cabelguenne et al., 1997), il sistema di allerta danese EWARNING (Jensen e Thysen, 2003) e il metodo Pre.G.I., Previsione e Gestione Irrigua (Ceppi et al., 2014).

Questo lavoro di tesi si propone di applicare la metodologia SIM (Smart Irrigation from Soil Moisture Forecast Using Satellite and Hydro-Meteorological Modelling), progetto finanziato dall'Unione Europea nell'ambito del programma WaterWorks 2014, che mira a sviluppare uno strumento operativo per la previsione in tempo reale

dei fabbisogni idrici di irrigazione al fine di supportare una gestione dell'acqua parsimoniosa.

Questa tecnica innovativa è già stata utilizzata in altri casi studio in Olanda, Cina e Spagna, siti caratterizzati da diverse condizioni climatiche, disponibilità d'acqua, tipologia di colture e tecniche di irrigazione. In questo elaborato si andrà invece ad analizzare un'ampia area situata nella Regione Puglia, vicino alla città di Foggia, facente parte del Consorzio per la Bonifica della Capitanata. La zona è caratterizzata da una fiorente attività agricola ma anche da una notevole scarsità della risorsa idrica a scopo irriguo, che richiede quindi una gestione efficiente dell'uso dell'acqua.

Il modello idrologico distribuito utilizzato per la modellazione nel caso studio è il FEST-EWB (Mancini 1990; Ravazzani 2001; Corbari 2011), dall'inglese "Flash-flood-Event-based Spatially distributed rainfall-runoff Transformation-Energy Water Balance", sviluppato dal Politecnico di Milano a partire dal 1990. Esso calcola l'evapotraspirazione e quindi la dinamica dell'umidità del suolo, accoppiando il bilancio idrico a quello energetico. 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 verifica l'equazione del bilancio energetico in ogni pixel della superficie del bacino.

Il FEST-EWB richiede in ingresso una molteplicità di parametri del suolo, della vegetazione e dati meteorologici che influiscono significativamente sugli output delle simulazioni. Per questo motivo è necessario eseguire una calibrazione e validazione del modello attraverso il confronto con dati provenienti da altre fonti, quali immagini satellitari di temperatura acquisite, in questo caso, tramite i programmi Landsat e Sentinel, e dati meteorologici ed energetici forniti da un particolare tipo di stazione denominata Eddy Covariance. Nei capitoli successivi verranno approfondite in modo dettagliato queste tecnologie e i relativi parametri.

Sarà quindi possibile valutare nello specifico i fabbisogni idrici delle diverse colture analizzate, offrendo una strumentazione in grado di prevedere i quantitativi d'acqua necessari ad ottimizzare la resa agricola, limitando gli sprechi e offrendo un supporto decisionale ad agricoltori ed Enti pubblici per la programmazione irrigua.

Nel Capitolo 1 verrà identificata l'area di studio.

Nel Capitolo 2 verranno descritti i dati meteorologici puntuali in input al modello idrologico e la stazione Eddy Covariance.

Nel Capitolo 3 verranno analizzati i dati spaziali in input al modello.

Nel Capitolo 4 verrà introdotto il modello idrologico FEST-EWB e la metodologia SIM.

Nel Capitolo 5 verrà trattata la calibrazione del modello con la stazione Eddy Covariance e l'applicazione della metodologia SIM a scala puntuale.

Nel Capitolo 6 verrà infine eseguita la validazione del modello con immagini satellitari e l'applicazione della metodologia SIM a scala di bacino.



# CAPITOLO 1

## INQUADRAMENTO TERRITORIALE

L'area di studio analizzata in questo lavoro di tesi è situata nella Regione Puglia, vicino alla città di Foggia, e fa parte del Consorzio per la Bonifica della Capitanata. Il Consorzio si estende per oltre 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 per la Bonifica della Capitanata, 2018). In questo contesto si individua l'importanza dell'elaborato di tesi che andrà a focalizzarsi sull'area del Comprensorio del Sud Fortore, la più estesa del Consorzio (Figura 1.1).



Figura 1.1: Inquadramento dell'area del comprensorio del Sud Fortore, evidenziata in rosso

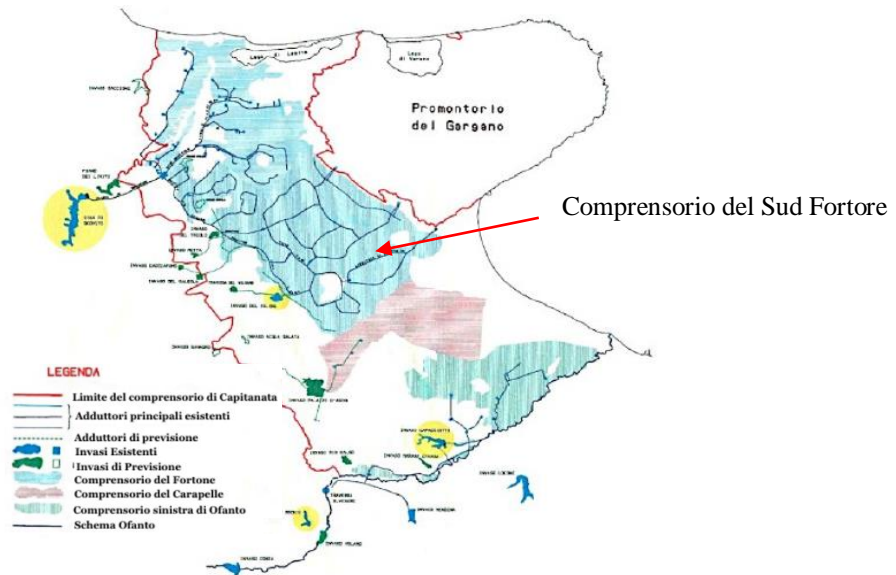


Figura 1.2: Superficie del Consorzio per la Bonifica della Capitanata di Foggia con evidenziato il comprensorio esaminato



## **CAPITOLO 2**

# **DATI METEOROLOGICI E IDROLOGICI PUNTUALI IN INPUT E VALIDAZIONE DEL MODELLO IDROLOGICO**

La prima fase del lavoro di tesi ha riguardato il reperimento dei dati meteorologici. In particolare, sono state raccolte misure puntuali di:

- Precipitazione;
- Vento;
- Temperatura dell'aria;
- Umidità relativa;
- Radiazione incidente

Questi parametri sono stati utilizzati come input per le simulazioni idrologiche ed elaborati dal modello FEST-EWB per effettuare le analisi sull'intero bacino di interesse. Un particolare tipo di stazione, denominata Eddy Covariance, ha consentito di misurare, oltre ai dati meteorologici, anche quelli energetici, sulla base dei quali si è validato il modello anche a scala puntuale.

### **2.1 Stazioni meteo analizzate**

Le stazioni di misura dei dati meteorologici prese in esame sono 74, disposte in tutto il territorio della Puglia e non solo nell'area d'interesse; si tratta di un numero piuttosto

elevato ma necessario per incrementare la densità della rete di misura, con l'obiettivo di validarne l'attendibilità e colmare eventuali dati mancanti delle stazioni limitrofe all'area di studio, come richiesto per una corretta simulazione idrologica, la quale necessita di un valore ad ogni istante temporale.

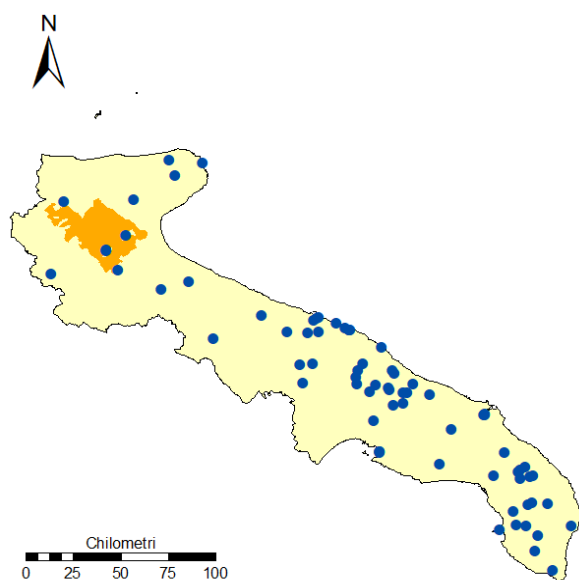


Figura 2.1: Distribuzione delle stazioni di misura nel territorio della Puglia, con evidenziato il comprensorio irriguo

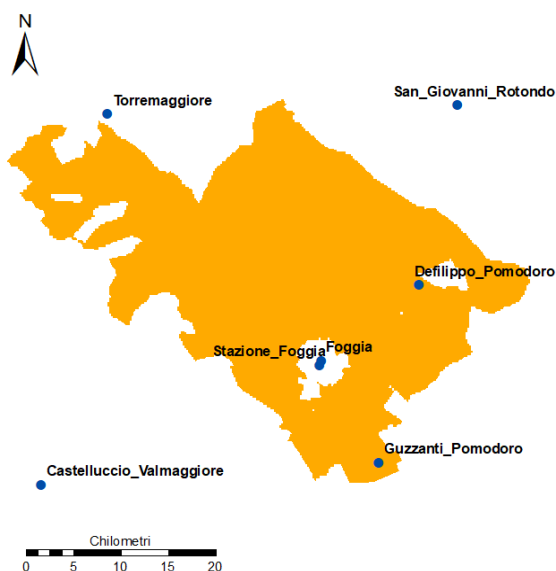


Figura 2.2: Dettaglio delle stazioni di misura nell'area in esame

I dati utilizzati per le analisi sono stati forniti da ARPA Puglia, dal Politecnico di Milano, che ha installato due stazioni Eddy Covariance, e da Meteo Network, associazione privata che collabora con l'Ateneo. Le misurazioni si riferiscono al periodo che va da Gennaio 2017 a Ottobre 2018, durata sufficientemente estesa da comprendere le fasi di semina, crescita e raccolta delle colture.

L'elenco delle stazioni utilizzate è riportato nella Tabella 2.1, suddivise per ente gestore, tipologia, e coordinate nel sistema di riferimento WGS 1984 UTM ZONE 33N.

<b>ENTE GESTORE</b>	<b>STAZIONE</b>	<b>TIPOLOGIA</b>	<b>X (EST)</b>	<b>Y (NORD)</b>
<b>ARPA PUGLIA</b>	Stazione_Bari	Meteo	658989	4553467
	Stazione_Foggia	Meteo	545819	4589475
<b>POLITECNICO MILANO</b>	Defilippo_Pomodoro	Eddy Covariance	556288	4598034
	Guzzanti_Pomodoro	Eddy Covariance	552042	4579084
<b>METEO NETWORK</b>	Acquaviva_delle_Fonti	Meteo	655466	4528257
	Alberobello	Meteo	688960	4516783
	Bari_1	Meteo	602574	4541694
	Bari_2	Meteo	668027	4550342
	Bari_3	Meteo	657916	4552726
	Bari_4	Meteo	656337	4551615
	Bitritto	Meteo	653260	4544778
	Brindisi_1	Meteo	747342	4500593
	Brindisi_2	Meteo	747257	4500745
	Brindisi_3	Meteo	746661	4500246
	Cassano_delle_Murge	Meteo	648808	4527419
	Castellana_Grotte	Meteo	682288	4528396
	Castelluccio_Valmaggiore	Meteo	516454	4576734
	Castrignano_de_Greci	Meteo	780613	4452279
	Cavallino_1	Meteo	771524	4467077
	Cavallino_2	Meteo	772737	4467218
	Cerignola_2	Meteo	574825	4568672
	Cisternino_1	Meteo	706056	4512620
	Cisternino_2	Meteo	703666	4512489
	Collepasso	Meteo	769374	4440137
	Crispiano	Meteo	687970	4497493
	Fasano_1	Meteo	699300	4523020
	Fasano_2	Meteo	708987	4517164
	Fasano_3	Meteo	698295	4524336
Foggia	Meteo	545933	4589969	

<b>METEO NETWORK</b>	Galatina	Meteo	770224	4451547
	Galatone	Meteo	762390	4448248
	Gallipoli	Meteo	755233	4437964
	Latiano	Meteo	729554	4492506
	Lecce_1	Meteo	766031	4470775
	Lecce_2	Meteo	793608	4440416
	Lecce_3	Meteo	765117	4469483
	Lecce_4	Meteo	768769	4472094
	Lequile	Meteo	766025	4465758
	Locorotondo_1	Meteo	696551	4514128
	Locorotondo_2	Meteo	696154	4514923
	Manduria	Meteo	722960	4473998
	Martina_Franca_1	Meteo	698739	4505687
	Martina_Franca_2	Meteo	686085	4512780
	Mola_di_Bari_1	Meteo	675564	4546479
	Mola_di_Bari_2	Meteo	672837	4547650
	Mola_di_Bari_3	Meteo	674958	4546709
	Mola_di_Bari_4	Meteo	674816	4546498
	Monopoli	Meteo	692341	4537075
	Monte_Sant_Angelo	Meteo	582361	4630284
	Morciano_di_Leuca	Meteo	783186	4416354
	Noci	Meteo	679159	4517192
	Ostuni_1	Meteo	704016	4506953
	Ostuni_2	Meteo	717996	4511595
	Palo_del_Colle	Meteo	641966	4545204
	Putignano_1	Meteo	678785	4520938
	Putignano_2	Meteo	679574	4524400
	San_Ferdinando_di_Puglia	Meteo	589588	4572515
	San_Giovanni_Rotondo	Meteo	560302	4617165
	Santeramo_in_Colle	Meteo	650426	4517880
	Soletto	Meteo	772457	4452647
	Squinzano	Meteo	757878	4479924
	Supersano	Meteo	775657	4434976
	Taranto_1	Meteo	691155	4480266
	Taranto_2	Meteo	691506	4480538
	Taranto_3	Meteo	691492	4480535
	Taurisano	Meteo	774098	4426574
	Terlizzi	Meteo	628424	4554317
	Torremaggiore	Meteo	523442	4616211
	Tuglie	Meteo	764278	4440536
Valenzano	Meteo	658561	4545342	
Veglie	Meteo	751863	4467650	
Vico_del_Gargano	Meteo	579319	4638563	
Vieste	Meteo	597079	4637115	

Tabella 2.1: Stazioni di misura e relative coordinate spaziali

## 2.1.1 Problematiche riscontrate

I dati utilizzati erano affetti da alcune problematiche e limitazioni che hanno reso necessario modifiche al fine di ottenere misure corrette e complete per le simulazioni. In primo luogo sono stati individuati gli istanti temporali in cui le stazioni meteo non hanno funzionato regolarmente, generando dei buchi nelle misure, in corrispondenza dei quali è stato attribuito il valore di dato nullo (-9999), richiesto dal modello FEST-EWB per non interrompere la simulazione. Le sequenze di malfunzionamento delle stazioni erano del tutto casuali, spaziando da singole ore ad intere giornate mancanti; in alcuni casi, invece, erano presenti dei dati doppi, che sono stati eliminati.

Un'altra problematica ha riguardato l'adeguamento nella frequenza delle misurazioni, le quali erano disponibili con cadenze differenti. In particolare i dati di ARPA Puglia e Politecnico di Milano sono stati forniti per intervalli semiorari, mentre quelli delle stazioni Meteo Network per intervalli orari. Per poter effettuare l'analisi con valori congruenti a livello temporale, le misure semiorarie sono state mediate con quelle orarie, ottenendo così intervalli con la stessa frequenza di un'ora.

<b>ARPA PUGLIA</b>	<b>POLITECNICO MILANO</b>	<b>METEO NETWORK</b>
semioraria	semioraria	oraria

Tabella 2.2: Cadenza delle misurazioni dei dati raccolti dalle stazioni

Infine, i dati erano disponibili per archi temporali differenti in quanto le stazioni sono state installate o equipaggiate con strumentazioni utili alla misurazione di specifici parametri in periodi diversi. Alcune di esse sono infatti presenti sul campo da più tempo mentre altre sono più recenti come le Eddy Covariance che sono state installate nel corso del 2017. Ne consegue che la disponibilità delle misure non era uniforme su tutto l'arco temporale considerato e sono stati inseriti quindi valori di dato nullo per i periodi non coperti dalle registrazioni.

Viene riportata di seguito la tabella con le rispettive date di inizio e fine delle registrazioni e cadenza delle stesse per tutte le stazioni meteo considerate.

ENTE GESTORE	STAZIONE	DISPONIBILITÀ DATI RACCOLTI
<b>ARPA PUGLIA</b>	Stazione_Bari Stazione_Foggia	dal 01/01/2014 ore 00:00 al 02/10/2018 ore 23:00 dal 16/04/2015 ore 11:00 al 02/10/2018 ore 23:00
<b>POLITECNICO MILANO</b>	Defilippo_Pomodoro Guzzanti_Pomodoro	dal 01/09/2017 ore 00:00 al 20/09/2018 ore 16:00 dal 05/06/2017 ore 12:00 al 20/09/2018 ore 18:00
<b>METEO NETWORK</b>	Tutte le stazioni	dal 11/01/2015 ore 08:00 al 02/10/2018 ore 23:00

Tabella 2.3: Disponibilità temporale dei dati raccolti dalle stazioni

Per rendere ancora più leggibile i differenti archi temporali di disponibilità delle misurazioni, viene anche riportato un grafico a barre.

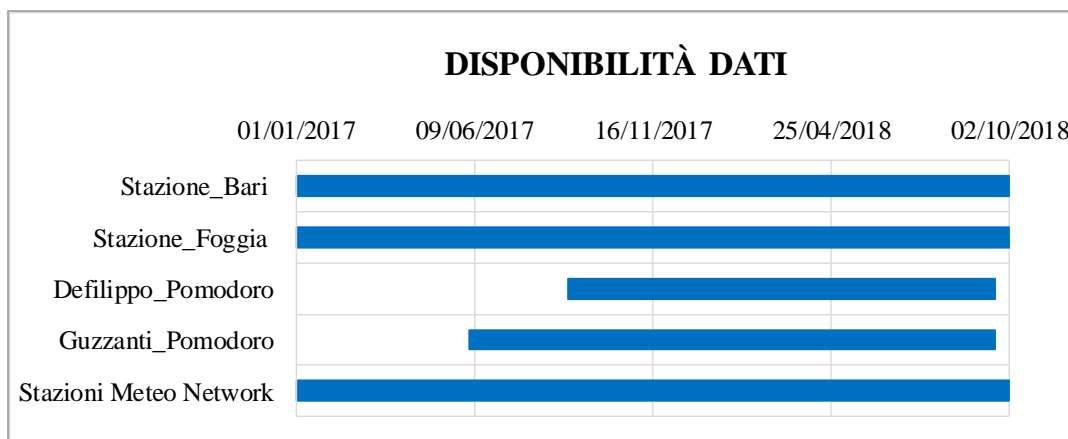


Figura 2.3: Durata temporale dei dati raccolti dalle stazioni

## 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 (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 di una complessa analisi dei dati acquisiti.

### **2.2.1 Specifiche tecniche Eddy Covariance**

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<sub>2</sub>
- Flusso di calore nel terreno G
- Radiazione in ingresso RIN
- Radiazione in uscita ROUT
- 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 permette da un lato 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 dei 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.

## 2.2.2 La stazione Eddy Covariance utilizzata per l'analisi a scala locale

La tecnica della Eddy Covariance è stata utilizzata a scala puntuale per valutare l'andamento dei flussi turbolenti di calore latente e sensibile, radiazione netta, umidità del suolo, flusso di calore nel terreno e temperatura superficiale del suolo. Il campo in esame è situato nel comprensorio del Sud Fortore ed è stato coltivato inizialmente a pomodoro e successivamente a grano (Figura 2.4).

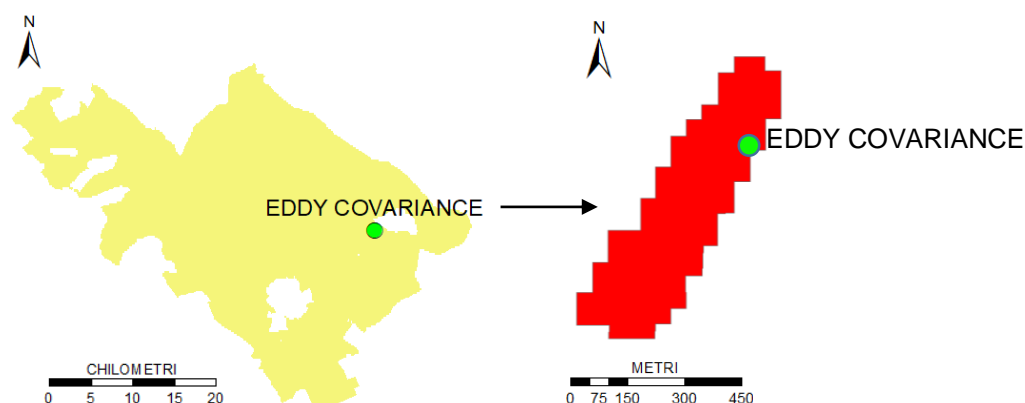


Figura 2.4: Comprensorio del Fortore con zoom sul campo considerato e Eddy Covariance

La stazione di misura ha coordinate 556334, 457920 (latitudine, longitudine) nel sistema di riferimento WGS 1984 UTM ZONE 33N e il periodo di registrazione coincide con le stagioni di crescita delle colture, che va dal 28/04/2017 al 31/07/2017 per il pomodoro e dal 01/09/2017 al 08/06/2018 per il grano.

Le due colture analizzate sono tra le più diffuse nel territorio di studio nel periodo estivo e si differenziano per periodo di crescita, semina, raccolta e fabbisogno irriguo. Il periodo di crescita dei pomodori coincide con i mesi estivi, i più critici per la disponibilità d'acqua, e richiede inoltre quantitativi d'acqua maggiori rispetto al grano che, al contrario, può essere coltivato per parte della stagione in deficit idrico. Le analisi vogliono evidenziare proprio la differenza tra le due tipologie di colture in termini di fabbisogno idrico.

Nei grafici sottostanti vengono riportati degli esempi di dati registrati della Eddy Covariance, tra cui l'andamento nel tempo dell'umidità del suolo e dell'evapotraspirazione cumulata.

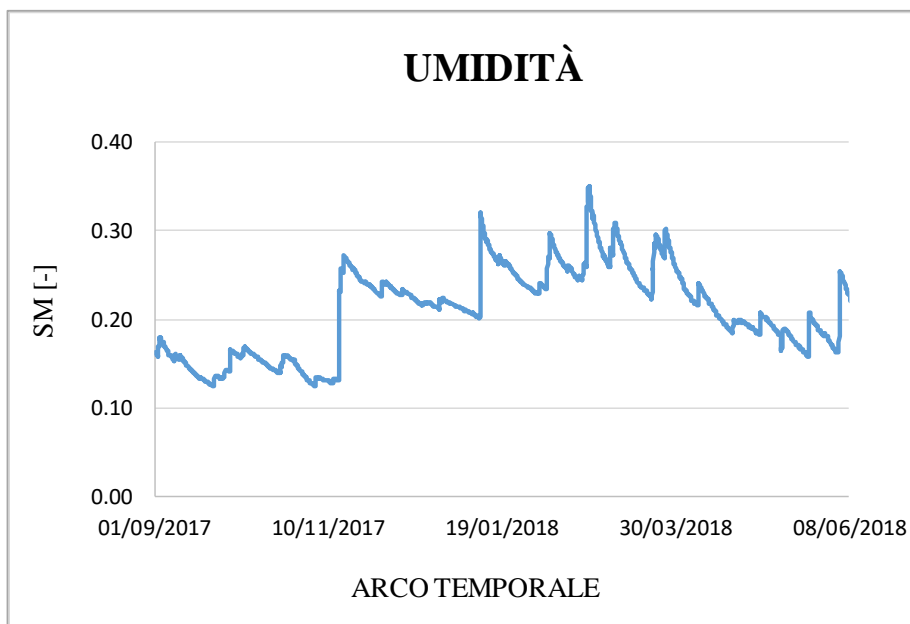


Figura 2.5: Umidità del suolo misurata dalla stazione Eddy Covariance



Figura 2.6: ET cumulata misurata dalla stazione Eddy Covariance



# **CAPITOLO 3**

## **DATI SPAZIALI IN INPUT AL MODELLO IDROLOGICO**

Il modello distribuito FEST-EWB per il suo funzionamento necessita di dati spazialmente distribuiti rappresentanti le caratteristiche e le proprietà del suolo e della vegetazione dell'area di applicazione. Le mappe di questi parametri sono state implementate e elaborate con il software ArcGIS e utilizzate in input al FEST-EWB.

### **3.1 Proprietà e caratteristiche del suolo**

Le matrici relative alle caratteristiche e proprietà del suolo sono state fornite da un precedente elaborato di tesi (De Pedrini, 2017) e sono qui utilizzate come input per la modellazione del FEST-EWB alla risoluzione spaziale di 30 m, tra cui:

- DEM dell'area del Consorzio per la Bonifica della Capitanata [m]
- Pendenza [°]
- Orientamento
- Aree contribuenti
- Direzione di flusso

Le matrici dei parametri idrologici-idraulici del suolo comprendono:

- Permeabilità  $k$  [m/s]
- Capacità di campo FC (Field Capacity) [-]

- Punto di appassimento WP (Wilting Point) [-]
- Distribuzione della dimensione dei vuoti  $\lambda$  (Brooks and Corey) [-]
- Bubbling Pressure [m]
- Contenuto d'acqua residuo  $\theta_{res}$  [-]
- Contenuto d'acqua a saturazione  $\theta_{sat}$  [-]
- Curve Number CN [-]
- Resistenza stomatica minima  $R_{Smin}$  [w/m<sup>2</sup>]
- Profondità di suolo idrologicamente attivo [m]

### 3.1.1 Confronto alle diverse scale di risoluzione spaziale

Utilizzando il software ArcGIS sono state create le stesse mappe dei parametri elencati nel capitolo precedente ma con risoluzione più bassa, passando da 30 m a 1 km e 10 km; questa analisi è stata effettuata per verificare la possibilità di utilizzare gli stessi parametri iniziali anche in aree in cui non si ha una disponibilità così dettagliata dei dati. Nelle figure sottostanti vengono riportate alcune delle mappe elaborate con i rispettivi istogrammi.

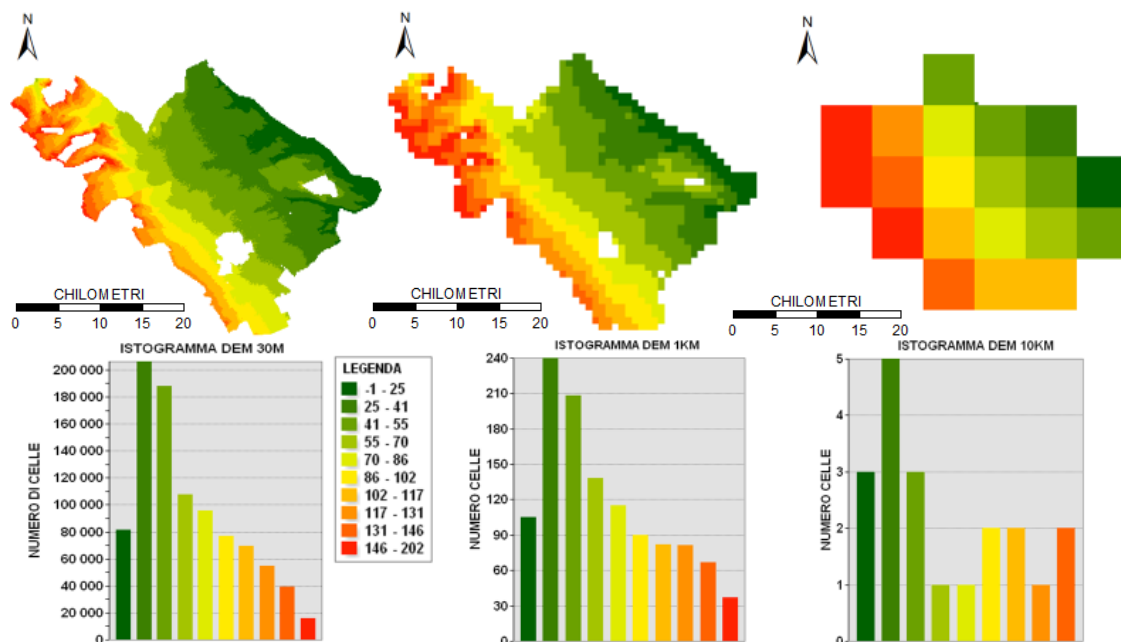


Figura 3.1: Mappe del DEM a 30 m, 1 km, 10 km e relativi istogrammi

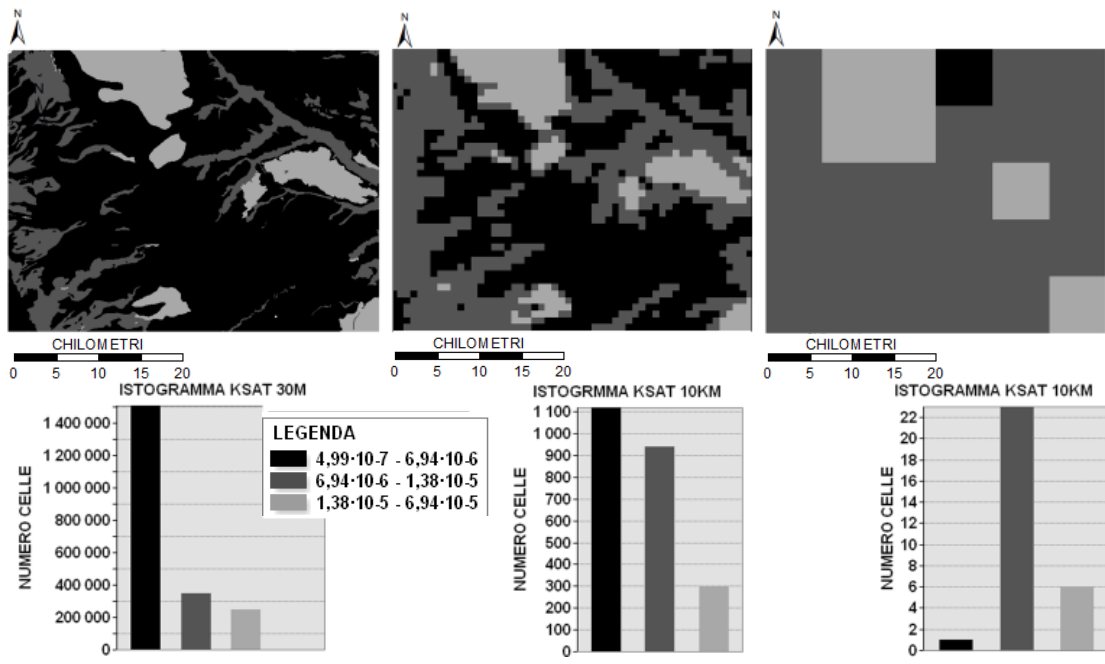


Figura 3.2: Mappe della permeabilità  $k$  a 30 m, 1 km, 10 km e relativi istogrammi

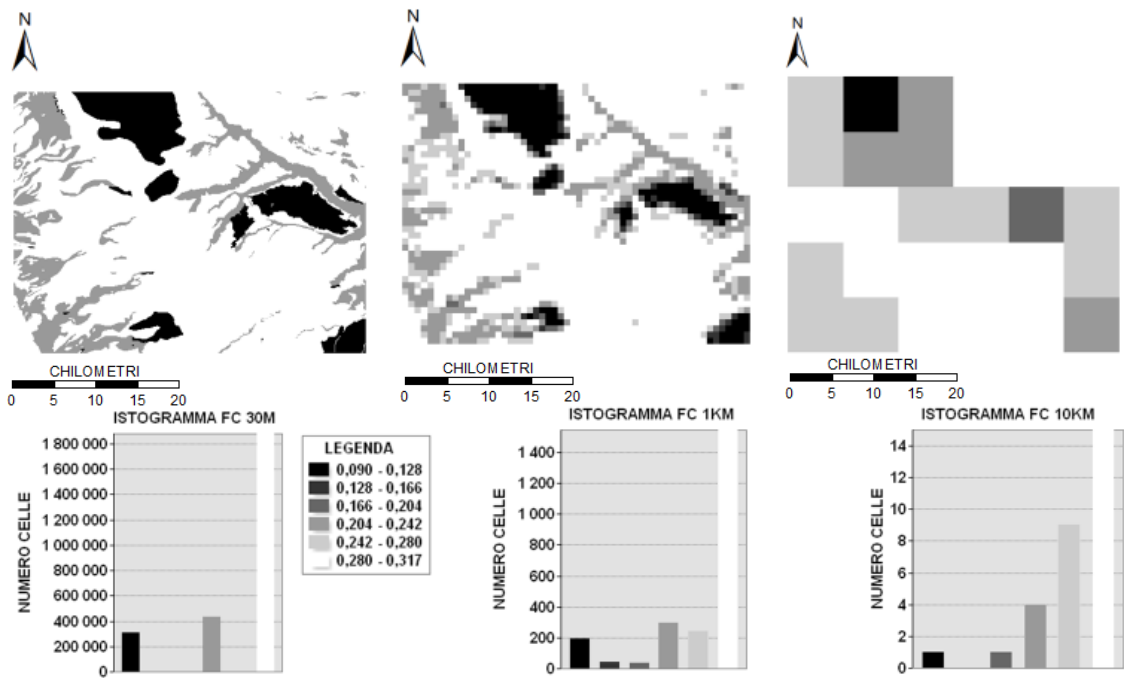


Figura 3.3: Mappe di FC a 30 m, 1 km, 10 km e relativi istogrammi

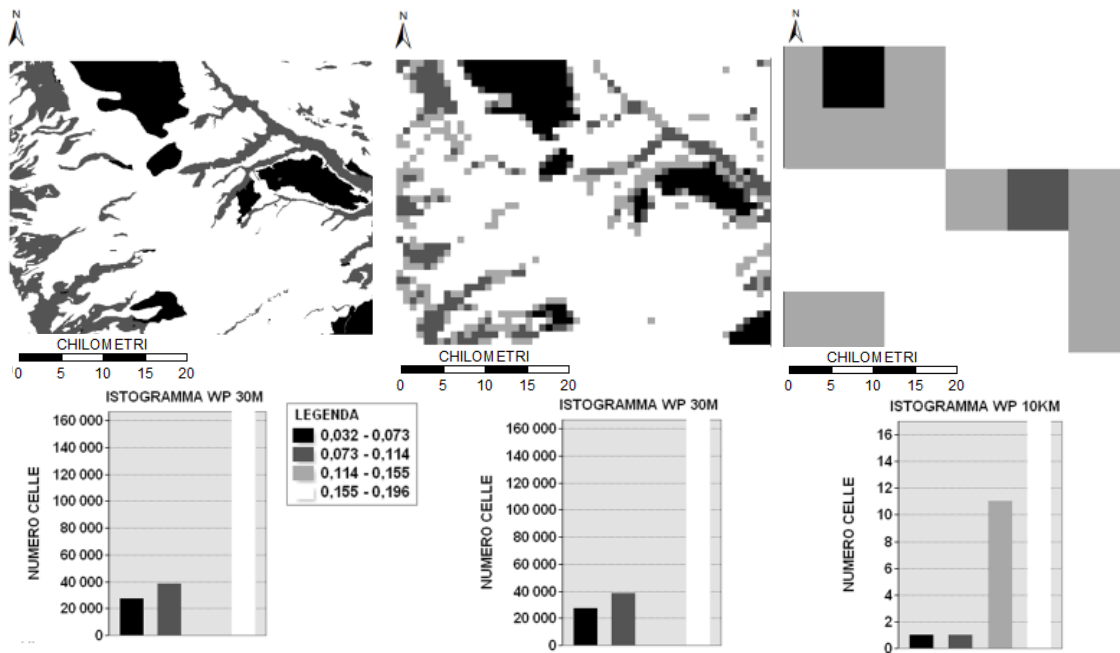


Figura 3.4: Mappe di WP a 30 m, 1 km, 10 km e relativi istogrammi

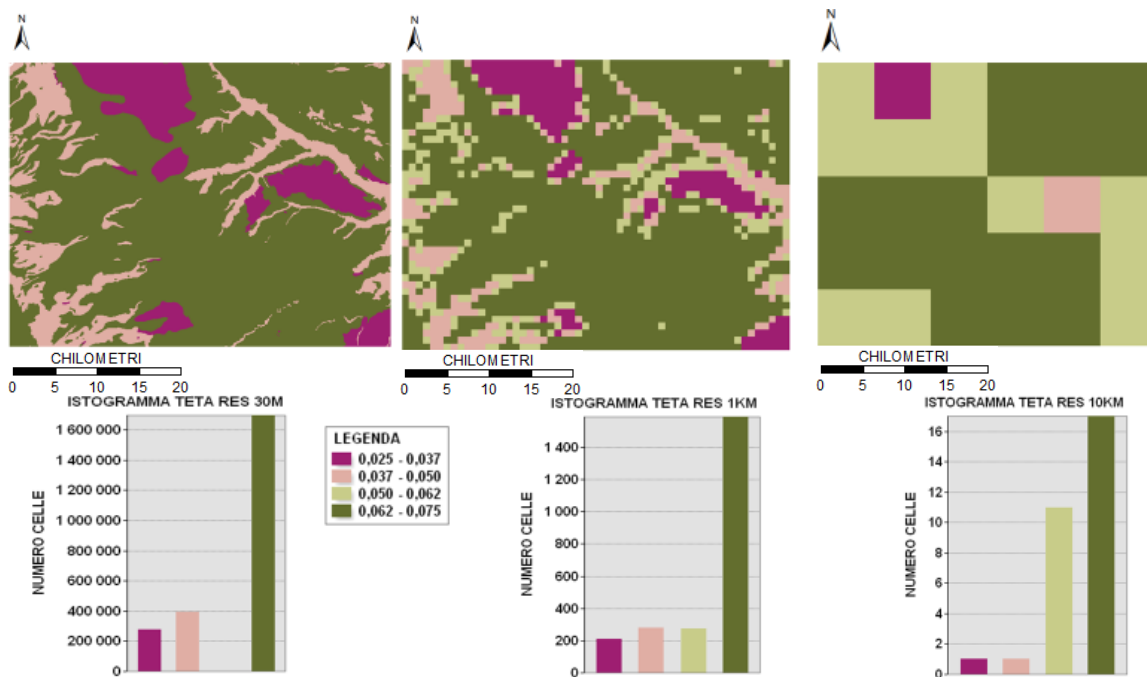


Figura 3.5: Mappe di  $\theta_{res}$  a 30 m, 1 km, 10 km e relativi istogrammi



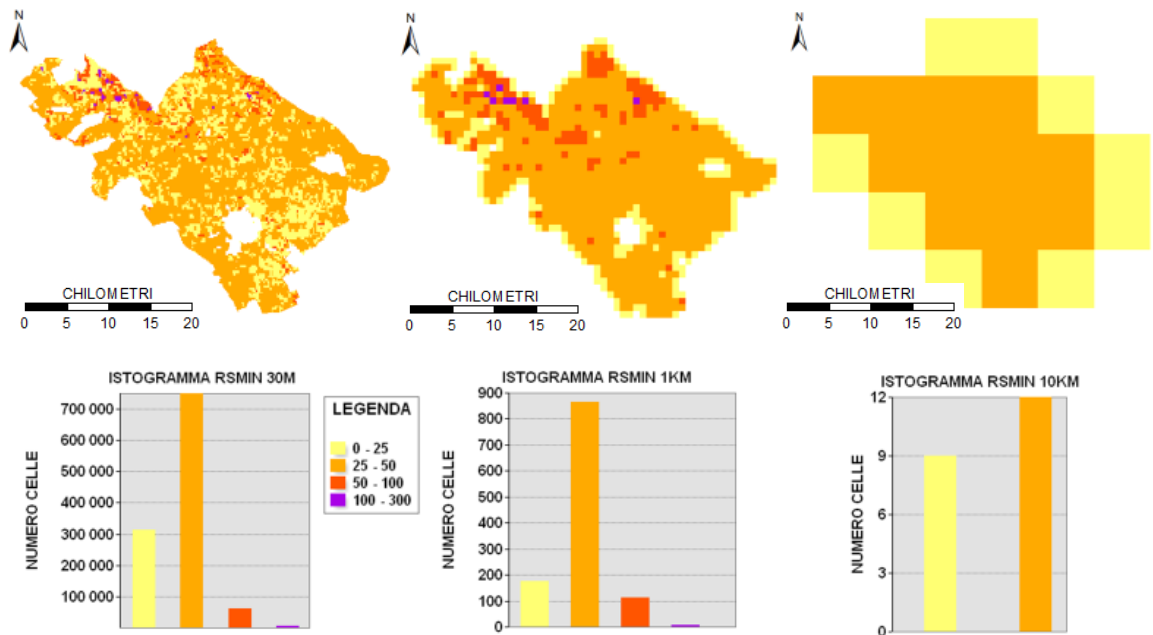


Figura 3.6: Mappe di Rs min a 30 m, 1 km, 10 km e relativi istogrammi

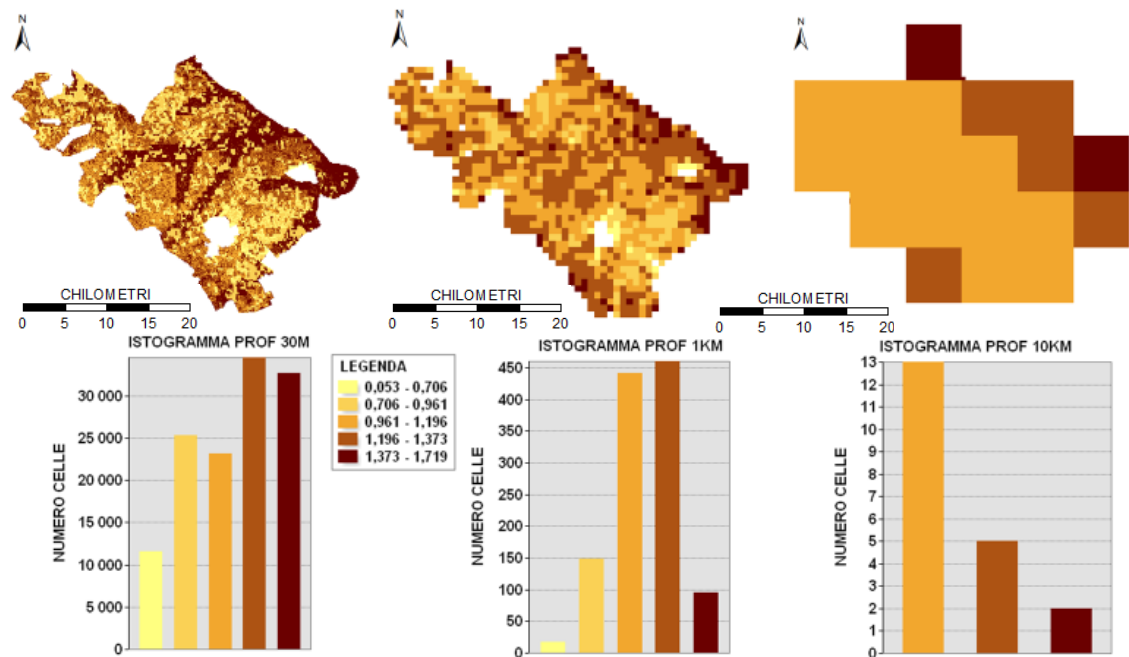


Figura 3.7: Mappe di profondità di suolo idrologicamente attivo a 30 m, 1 km, 10 km e relativi istogrammi

Le mappe a 1 km risultano in buon accordo con quelle a 30 m. Quelle a 10 km perdono parte dell'informazione avendo un livello di dettaglio più basso con deviazioni standard decisamente inferiori (Tabella 3.1).

Osservando gli istogrammi delle matrici si può notare come la distribuzione delle classi assuma un andamento analogo alle scale di risoluzione di 30 m e di 1 km, mentre per quelle di 10 km la perdita di informazione comporta la scomparsa di alcune classi e la diversa distribuzione dei valori nelle stesse, pur mantenendo le proporzioni tra i valori.

Per avere anche un riscontro numerico è stata riportata una tabella con i valori di media e deviazione standard delle matrici.

	<b>30M</b>		<b>1 KM</b>		<b>10KM</b>	
	<b>Media</b>	<b>Std dev</b>	<b>Media</b>	<b>Std dev</b>	<b>Media</b>	<b>Std dev</b>
<b>DEM</b>	65.56	35.92	65.44	38.78	65.3	40.7
<b>Pendenza</b>	1.13	1.34	0.38	0.28	0.18	0.06
<b>Orientamento</b>	101.99	107.92	85.53	79.67	53.1	8.74
<b>Direzioni di deflusso</b>	29.25	36.53	58.89	56.97	58.2	61.36
<b>Aree contribuenti</b>	0.16	2.39	0.04	0.22	0.05	0.22
<b>K sat</b>	3.14	4.59	3.18	4.13	3.54	3.08
<b>FC</b>	0.27	0.06	0.27	0.06	0.27	0.04
<b>WP</b>	0.16	0.05	0.16	0.04	0.15	0.03
<b><math>\theta_{res}</math></b>	0.06	0.01	0.06	0.01	0.06	0.01
<b><math>\theta_{sat}</math></b>	0.45	0.008	0.45	0.008	0.45	0.004
<b>Distribuz dimensione vuoti</b>	0.3	0.1	0.3	0.09	0.31	0.07
<b>Bubbling pressure</b>	0.22	0.06	0.21	0.05	0.21	0.04
<b>Rs minima</b>	20.1	26.49	19.67	23.01	15.67	16.59
<b>Profondità suolo attivo</b>	1.15	0.28	1.15	0.18	1.18	0.1

Tabella 3.1: Media e deviazione standard delle matrici a 30 m, 1 km e 10 km

Anche in questo caso si può notare l'accordo ottenuto alle diverse risoluzioni; per i parametri idrologici e idraulici le statistiche sono molto simili, mentre quelle di pendenza, orientamento, direzioni di deflusso e aree contribuenti, ottenute dal rispettivo DEM con risoluzione minore, si differenziano maggiormente.

## 3.2 Dati da satellite

Le mappe dei parametri distribuiti di albedo, frazione vegetata (FV), Leaf Area Index (LAI) e Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) utilizzati in input dal FEST-EWB sono stati forniti dai satelliti del programma Landsat e dal Sentinel 2A, mentre la temperatura superficiale, ricavata dai due satelliti Landsat e dal Sentinel 3A, verrà utilizzata in seguito per validare i risultati delle simulazioni del modello.

Le matrici relative ai parametri distribuiti propri della superficie sono state ricavate dall'analisi di immagini satellitari, elaborate e corrette atmosfericamente in un precedente elaborato di tesi (Stanganelli, 2016) e della collaborazione del progetto SIM.

Le immagini satellitari sono state acquisite da diversi satelliti:

- Landsat 7 e Landsat 8 appartenenti al programma statunitense Landsat, che consiste in una serie di missioni satellitari per l'osservazione della Terra portato avanti congiuntamente dalla NASA e dall'USGS. La disponibilità delle immagini per il caso di studio oggetto del lavoro di tesi coincide con il periodo che va dal 05/01/2017 al 30/09/2018 per L7 e dal 06/01/2017 al 29/09/2018 per L8; l'acquisizione dei dati avviene una volta ogni 16 giorni e la risoluzione al suolo è di 30 m per entrambi i satelliti.
- Sentinel 2A e Sentinel 3A appartengono al programma Copernicus per l'osservazione terrestre, sviluppato dall'ESA; la disponibilità dei dati va dal 08/01/2018 al 30/09/2018 per S2A e dal 28/06/2018 al 01/10/2018 per S3A e i due satelliti coprono l'intero globo ogni 5 giorni con risoluzione di dettaglio al suolo rispettivamente pari a 10 m e 1 km.

La maggior parte delle immagini satellitari erano caratterizzate da una buona qualità (Figura 3.8), alcune non includevano l'intero comprensorio a causa del parziale passaggio del satellite sull'area di studio (Figura 3.9), mentre altre erano soggette a errori di acquisizione, dovuti alla copertura nuvolosa che può oscurare porzioni di territorio generando dei buchi nei dati e quindi influire sulla simulazione (Figura 3.10). Le immagini acquisite dal Landsat 7 sono inoltre disturbate da linee oblique di dati mancanti, a causa di un malfunzionamento del sensore a bordo del satellite (Figura 3.11).



Figura 3.8: Immagine di buona qualità (L8, 17/02/2018)



Figura 3.9: Immagine parziale (L8, 30/05/2017)



Figura 3.10: Immagine con nuvole (L8, 16/01/2018)



Figura 3.11: Immagine con linee oblique (L7, 14/06/2017)

### 3.2.1 Validazione dei dati da satellite

Per determinare quale tra i satelliti considerati nell'analisi è in grado di fornire i risultati di temperatura superficiale al suolo più attendibili, si è deciso di confrontare le misure remote con i dati puntuali osservati dalla stazione Eddy Covariance situata nel campo inquadrato nel capitolo precedente. I dati del 2017 e del 2018 sono stati integrati con quelli degli anni 2013-2016 elaborati in un precedente lavoro di tesi (De Pedrini, 2017). Dalle figure seguenti è possibile notare come la miglior corrispondenza si ottiene per il Landsat 7.

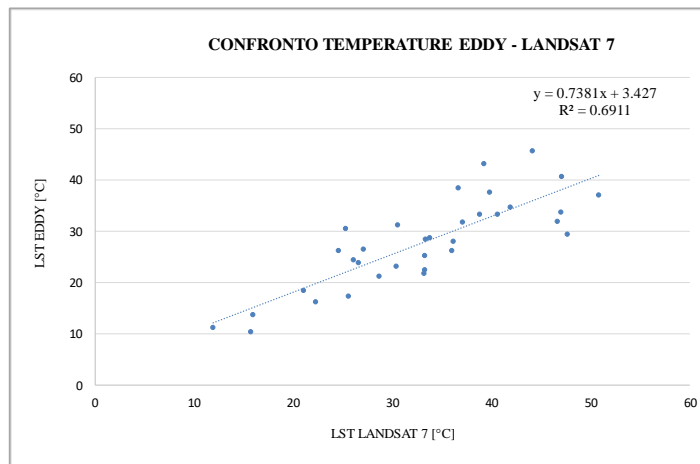


Figura 3.12: Confronto dati osservati da stazione Eddy Covariance e satellite L7

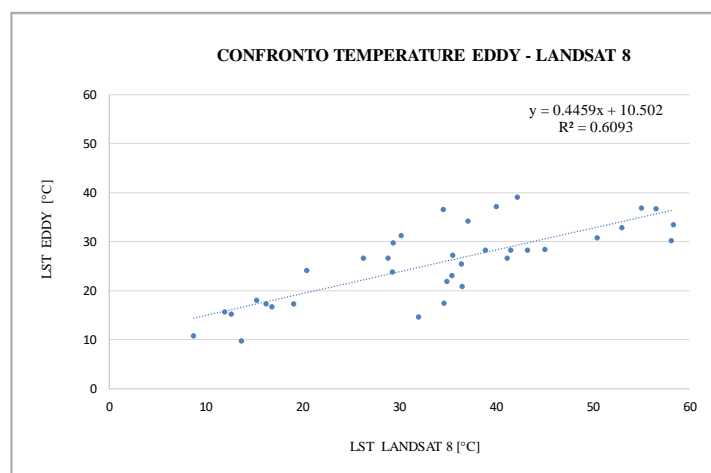


Figura 3.13: Confronto dati osservati da stazione Eddy Covariance e satellite L8

### 3.2.2 Confronto alle diverse scale di risoluzione spaziale

Anche per i parametri di vegetazione si sono utilizzati i software ArcGIS e Matlab per elaborare e modificare la risoluzione delle mappe, riducendola da 30 m a 1 km e a 10 km. Questa analisi viene effettuata per verificare la possibilità di utilizzare dati con livello di dettaglio minore ed effettuare un confronto con quelli a risoluzione maggiore.

Le mappe di albedo, LAI e FV a 30 m, 1 km, 10 km e i rispettivi istogrammi vengono riportati nelle figure sottostanti, considerando come esempio quelle acquisite in data 21\01\2017 dal satellite L7.

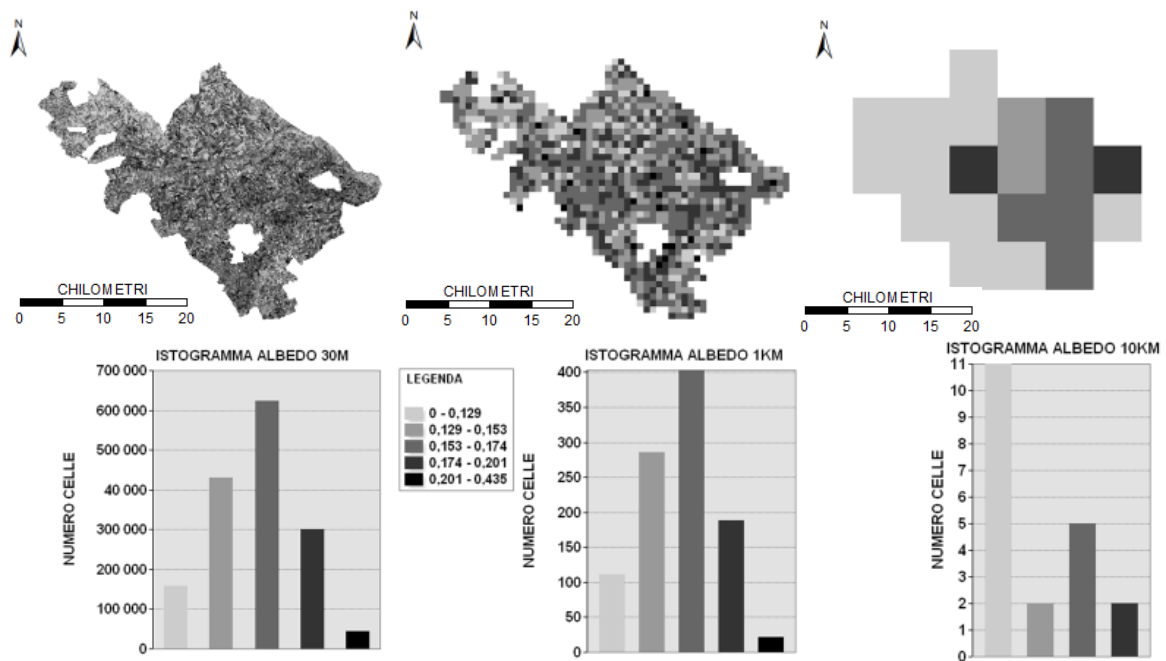


Figura 3.14: Mappe di albedo a 30 m, 1 km e 10 km e relativi istogrammi

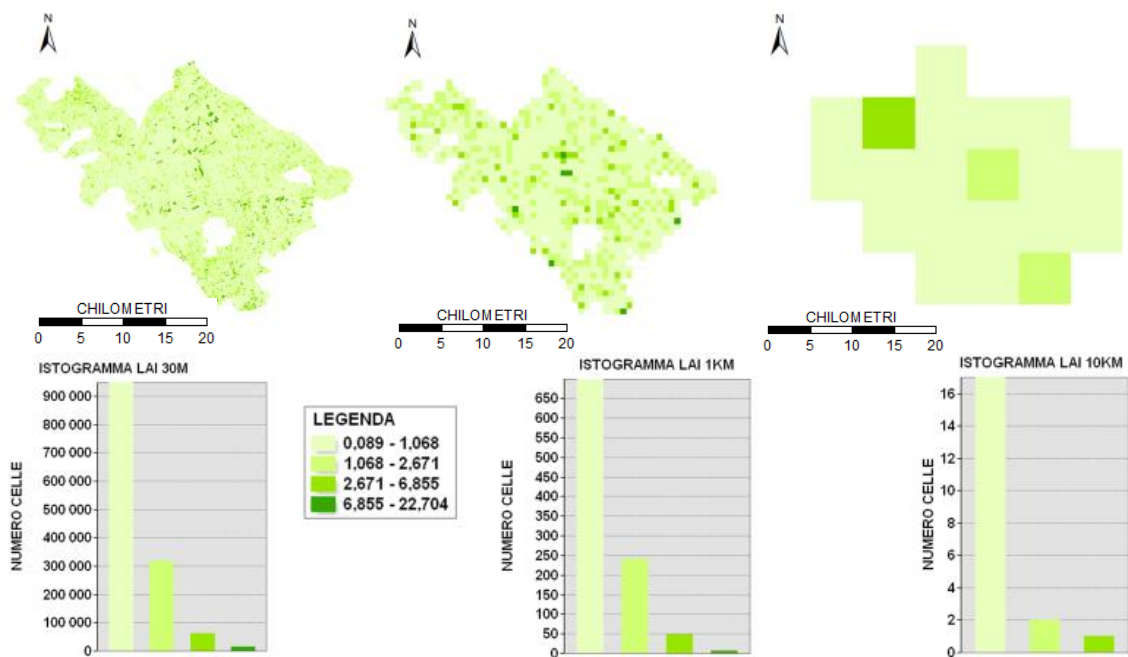


Figura 3.15: Mappe del LAI a 30 m, 1 km e 10 km e relativi istogrammi

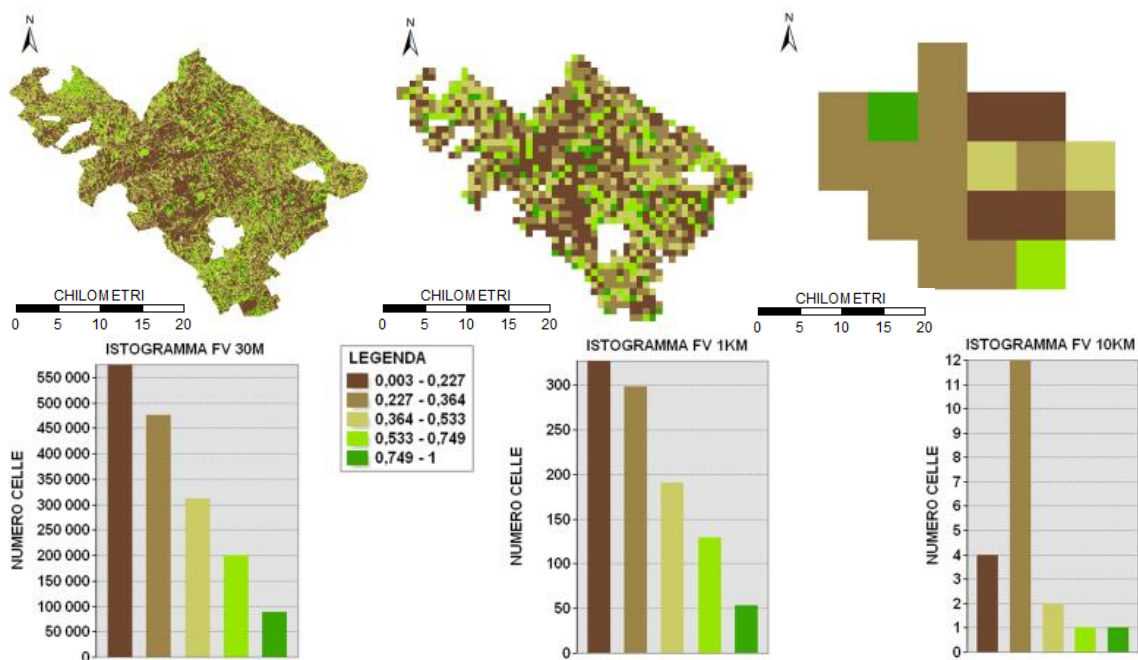


Figura 3.16: Mappe della FV a 30 m, 1 km e 10 km e relativi istogrammi

Anche in questo caso le mappe a 1 km e a 10 km risultano in buon accordo con quelle a 30 m, gli istogrammi presentano lo stesso andamento e gli stessi rapporti anche a scale differenti, ovviamente perdendo in informazione.

Si riportano nella tabella seguente le medie e le deviazioni standard dell'immagine usata come esempio nelle mappe precedenti, alle diverse risoluzioni spaziali considerate.

	30 M		1 KM		10 KM	
	Media	Std dev	Media	Std dev	Media	Std dev
<b>ALBEDO</b>	0.15	0.03	0.15	0.02	0.15	0.01
<b>LAI</b>	1.58	1.54	1.54	1.53	1.84	0.81
<b>FV</b>	0.37	0.22	0.37	0.22	0.39	0.04

Tabella 3.2: Media e deviazione standard delle matrici dei parametri della vegetazione a 30 m, 1 km e 10 km

Anche osservando la media e la deviazione standard calcolate per tutte le mappe dei parametri della vegetazione disponibili nel periodo di osservazione, si può notare come i valori della media non siano soggetti a forti cambiamenti mentre la deviazione standard è caratterizzata da maggiori variazioni.

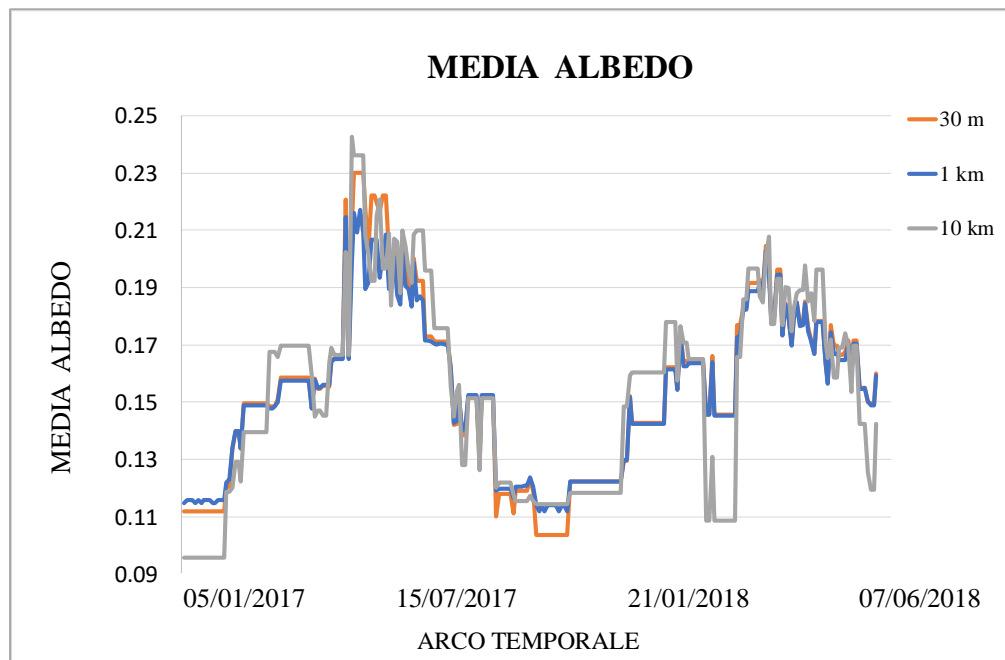


Figure 3.17: Media albedo a 30m, 1km e 10km



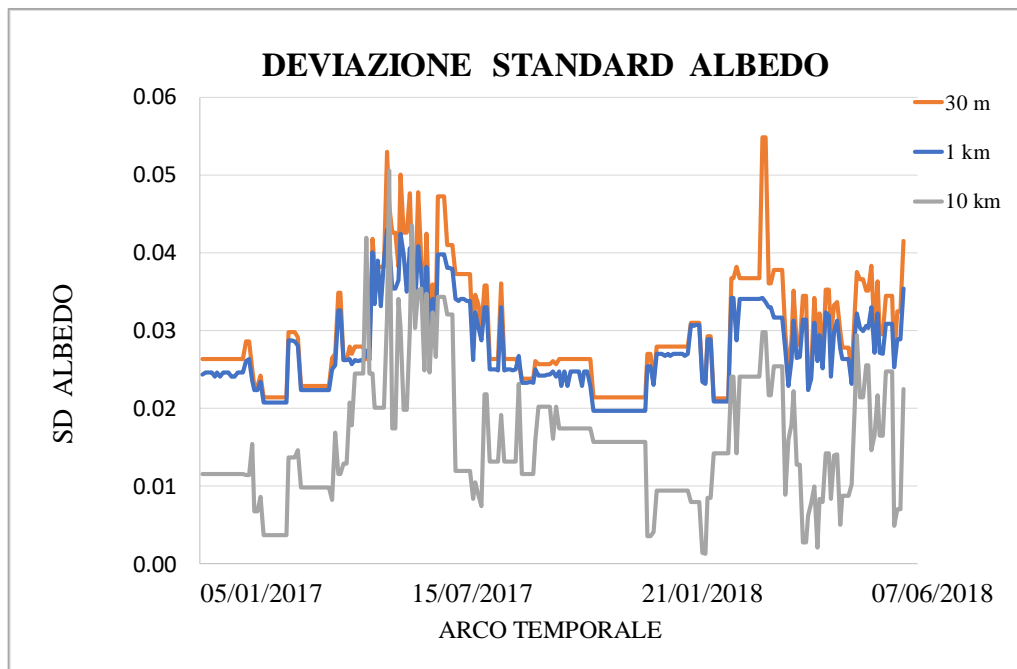


Figura 3.18: Deviazione standard albedo a 30m, 1 km e 10 km

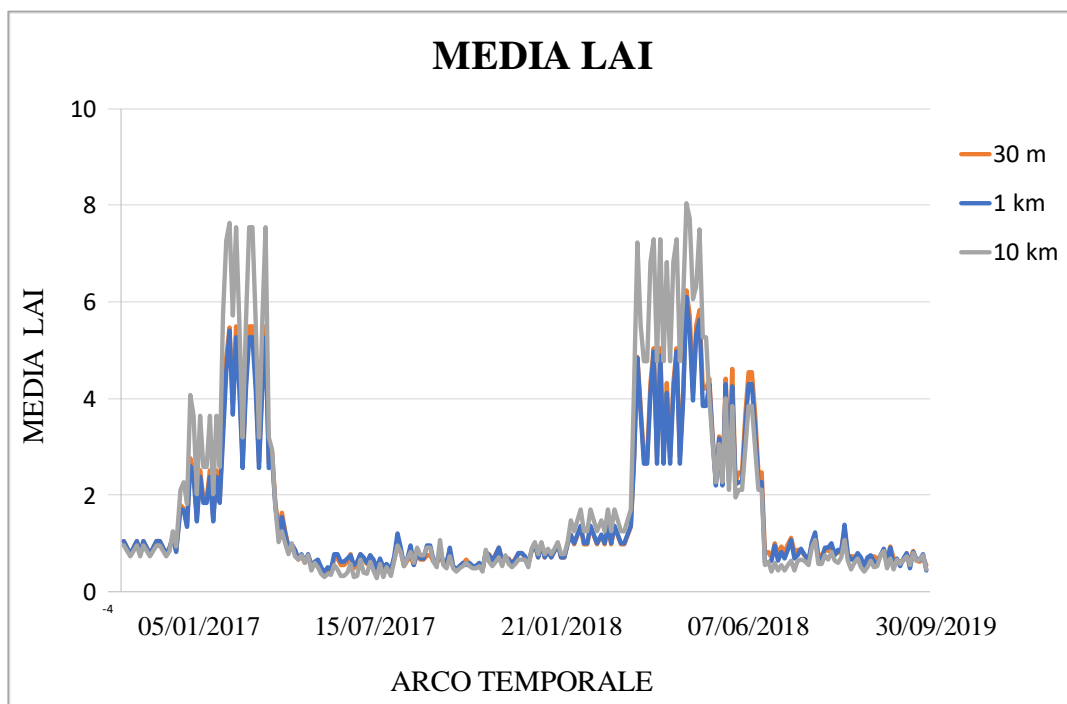


Figure 3.19: Media LAI a 30m, 1km e 10km

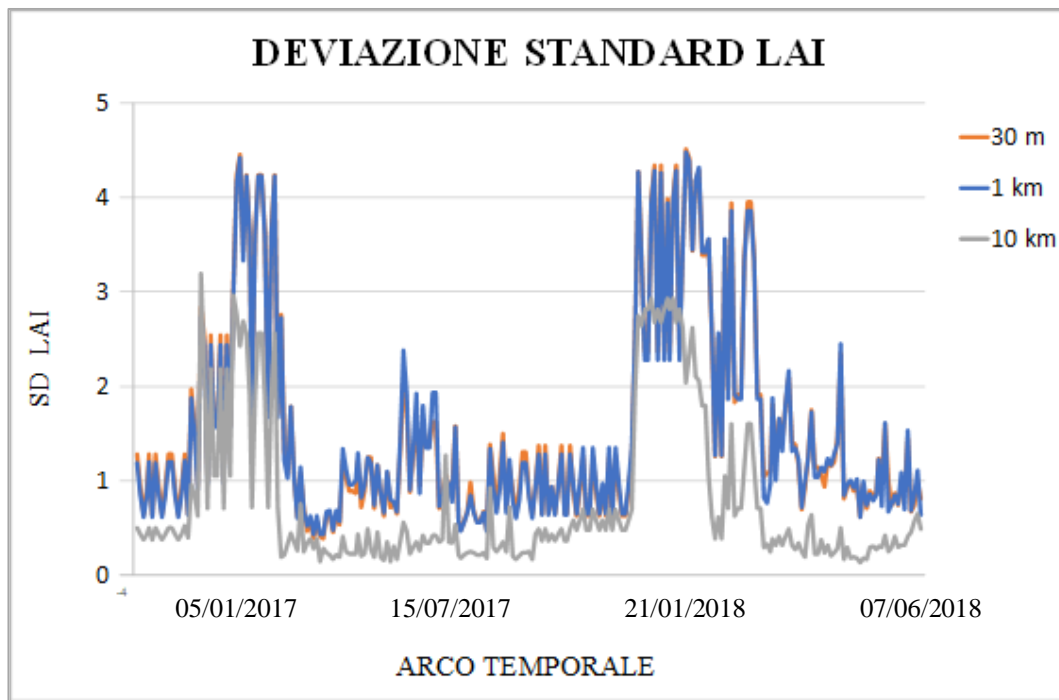


Figure 3.20: Deviazione standard LAI a 30m, 1km e 10km

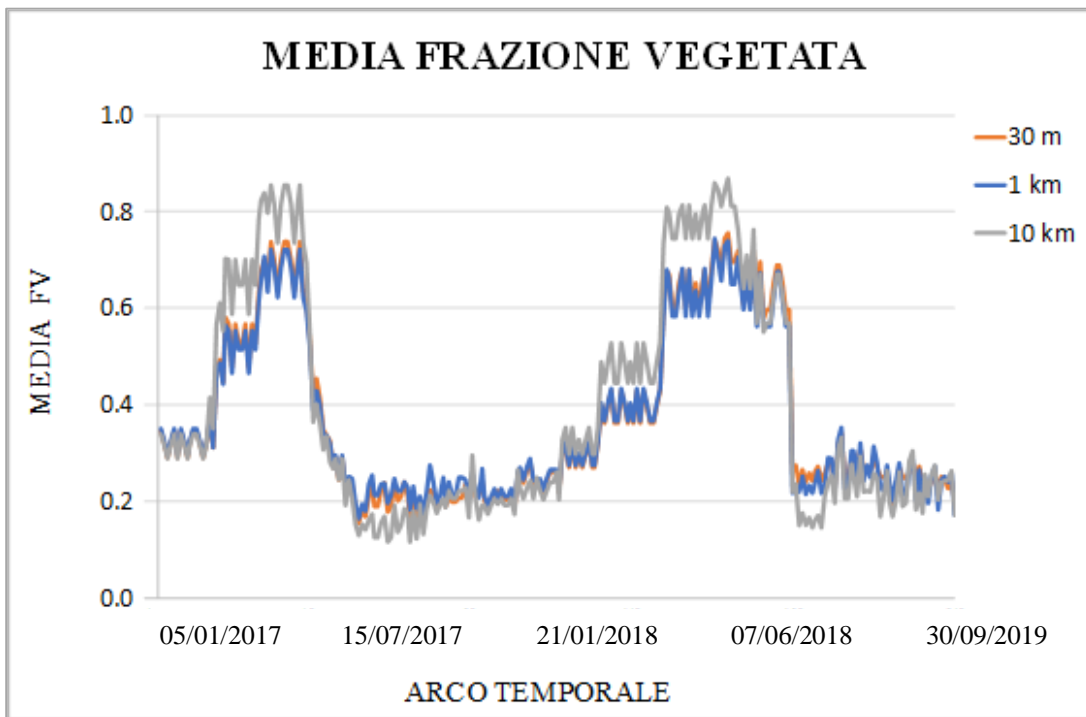


Figure 3.21: Media frazione vegetata a 30m, 1km e 10km

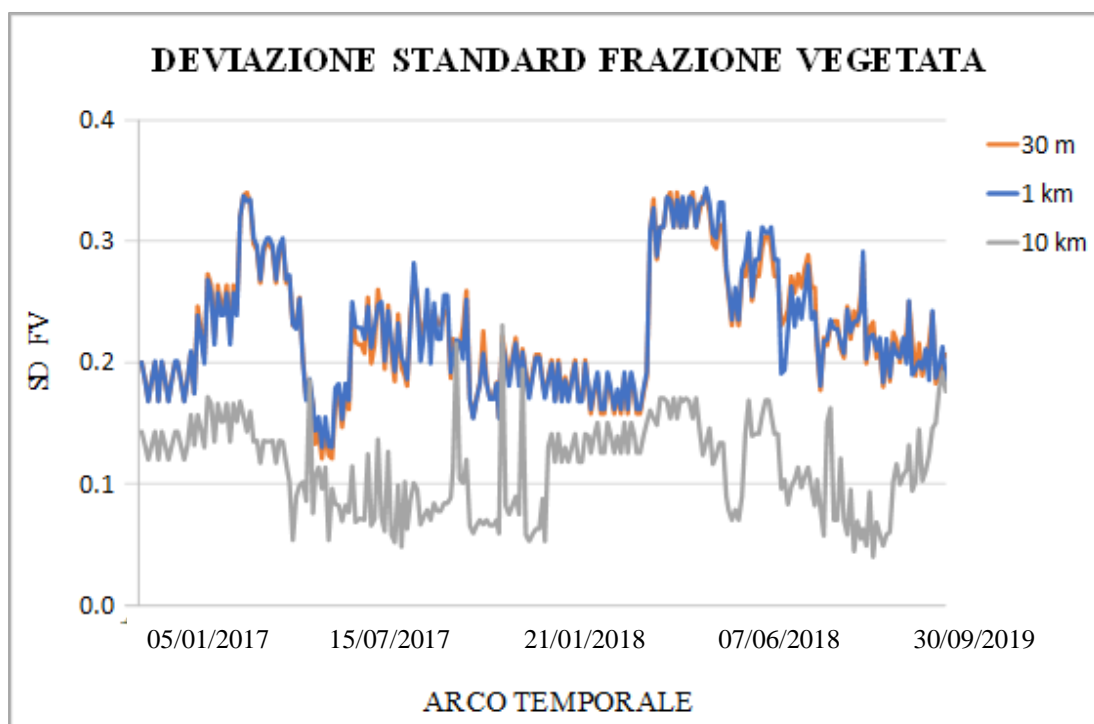


Figura 3.22: Deviazione standard frazione vegetata a 30m, 1km e 10km

### 3.4 Dati di irrigazione

La struttura operativa che si occupa della gestione dell'irrigazione nel territorio del comprensorio è l'Area Agraria, che è articolata in vari settori tra cui Irrigazione Sud Fortore che provvede alla distribuzione dell'acqua per usi irrigui nell'area di studio, curando la manutenzione ed assicurando il regolare esercizio della rete irrigua comiziale (Consorzio per la Bonifica della Capitanata, 2018).

L'acquedotto in pressione presente nell'area in esame è riportato nella figura 3.23 ed è regolato dalla presenza di tre principali sorgenti:

- Vasca tavoliere
- Vasca S3
- Diga di Capaccio

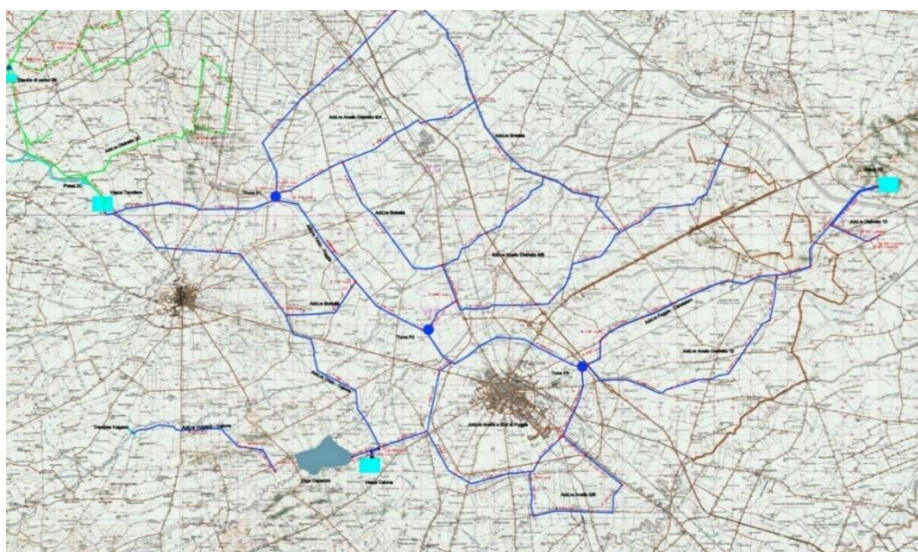


Figura 3.23: Acquedotto di Foggia

Il Consorzio per la Bonifica della Capitanata ha fornito i volumi di irrigazione giornaliera che viene distribuita uniformemente su tutto il territorio e destinati ad uso agricolo, tipologia di utilizzo del suolo predominante nell'area di interesse. Le colture maggiormente diffuse nell'area in esame sono quella del pomodoro durante il periodo estivo e quella del grano. La distribuzione delle colture presenti nel comprensorio e l'andamento nel tempo dell'irrigazione sono riportate in figura 3.24 (De Pedrini, 2017).

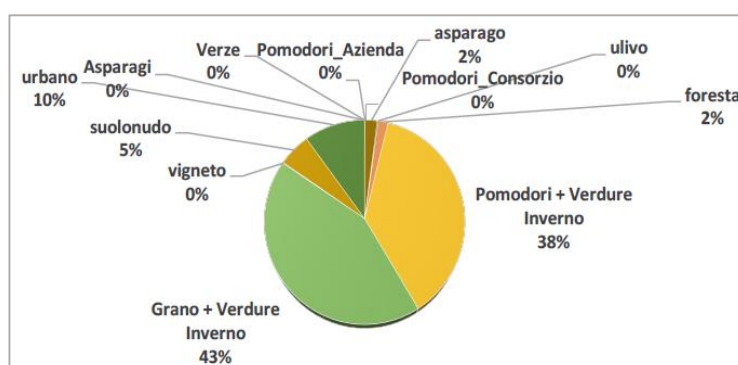


Figura 3.24: Distribuzione delle colture presenti nel comprensorio



Figura 3.25: Portata irrigata nelle stagioni irrigue 2017-2018

Come è possibile notare dal grafico, l'irrigazione non è fornita per tutti i mesi dell'anno, ma solamente nei periodi che vanno dalla stagione primaverile a quella autunnale, in base al fabbisogno irriguo delle colture.



# CAPITOLO 4

## METODOLOGIA

### 4.1 Il modello idrologico FEST-EWB

Il modello idrologico distribuito utilizzato per la modellazione nel caso studio è il FEST-EWB (Mancini 1990; Ravazzani 2001; Corbari 2011), dall'inglese "Flash-flood-Event-based Spatially distributed rainfall-runoff Transformation-Energy Water Balance", sviluppato dal Politecnico di Milano a partire dal 1990. Esso calcola l'evapotraspirazione e quindi la dinamica dell'umidità del suolo, accoppiando il bilancio idrico a quello energetico. 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 verifica l'equazione del bilancio energetico in ogni pixel della superficie del bacino, anche indicato come RET (Representative Equilibrium Temperature).

Trattandosi di un modello distribuito, il dominio viene discretizzato con una griglia regolare composta da celle quadrate nelle quali ogni parametro deve essere definito. Il carico computazionale per simulare tutte le celle è per questo motivo elevato, ma il modello permette di considerare sia la variabilità spaziale delle forzanti meteorologiche sia l'eterogeneità spaziale delle caratteristiche del bacino (v. Brath, 1995; Beven, 1985; Rosso et al., 1994). Il modello richiede in ingresso una molteplicità di parametri tra cui:

- le forzanti atmosferiche come la temperatura dell'aria, la radiazione incidente, la velocità del vento, la precipitazione e l'umidità dell'aria, che vengono registrate da stazioni di terra o ottenute da modelli meteorologici;
- il modello digitale delle quote (DEM), dal quale ricavare le proprietà del bacino come pendenza, orientamento, aree contribuenti e direzione di flusso;
- i parametri del suolo come la permeabilità, la capacità di campo, il punto di appassimento e il contenuto d'acqua;
- i parametri della vegetazione come l'indice di area fogliare (LAI), l'albedo, la frazione vegetata (FV), l'altezza della vegetazione e la resistenza stomatica, che possono essere ricavati da satellite.

Il FEST-EWB è un modello di tipo modulare, che consente di simulare, oltre ai flussi energetici e all'umidità del suolo, anche la trasformazione degli afflussi meteorici in deflussi di piena alla sezione di chiusura del bacino, tramite il metodo di Muskingum, nella forma proposta da Cunge (1969), parte che non verrà però considerata per gli scopi di questo lavoro di tesi.

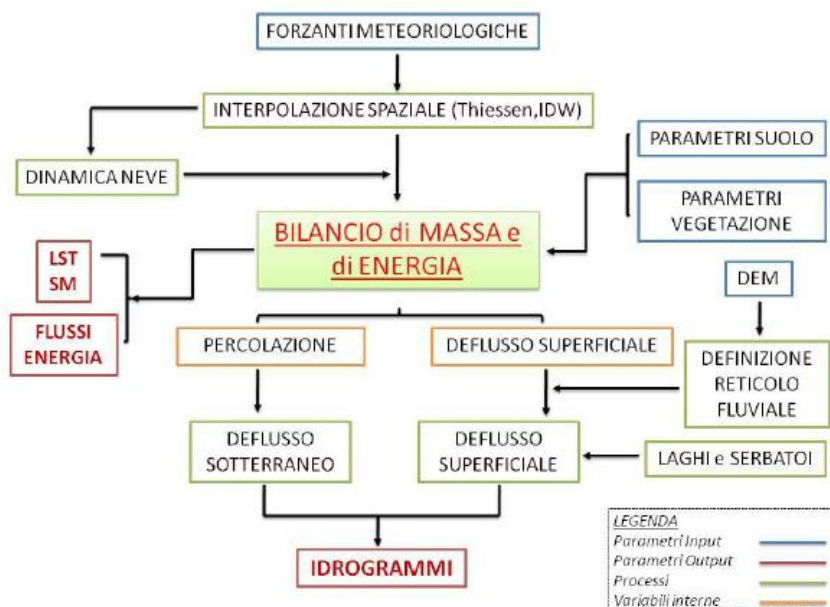


Figura 4.1: Schema di funzionamento del modello idrologico distribuito FEST-EWB



## 4.2 Calibrazione e validazione

Il processo di calibrazione riveste una fase fondamentale nell'esito delle simulazioni e consiste in un'operazione di ricerca dei valori dei parametri principali che regolano i processi idrologici all'interno del bacino; anche piccole variazioni di questi valori possono comportare modifiche significative degli output. La ricerca dei valori ottimali continua finché non si ottiene una buona corrispondenza tra i dati simulati e quelli osservati. La tipologia di calibrazione utilizzata in questo elaborato è denominata "Trial and Error", dispendiosa in termini di tempo in quanto richiede la modifica manuale dei parametri, ma che consente di determinare l'influenza di ogni singolo parametro sui risultati della simulazione.

La validazione consiste invece nel verificare che il modello calibrato sia in grado di simulare correttamente anche un campione di dati diversi.

Nel lavoro di tesi è stata effettuata una calibrazione a scala locale in cui i flussi idrologici ed energetici calcolati mediante la simulazione sono stati confrontati con quelli misurati dalla stazione Eddy Covariance e una validazione a scala di bacino in cui i dati di temperatura superficiale calcolati mediante la simulazione sono stati confrontati con quelli misurati da satellite.

### 4.2.1 Calibrazione a scala locale

Nella calibrazione a scala locale, sono stati confrontati i dati calcolati mediante la simulazione del FEST-EWB e quelli misurati dalla stazione Eddy Covariance posta in corrispondenza del campo in esame. Si tratta di una calibrazione a scala puntuale effettuata in corrispondenza della stazione.

Il confronto ha riguardato l'andamento temporale delle seguenti variabili:

- Umidità nel terreno SM [-]
- Radiazione netta [ $\text{w/m}^2$ ]
- Calore sensibile H [ $\text{w/m}^2$ ]

- Calore latente [w/m<sup>2</sup>]
- Flusso di calore nel terreno [w/m<sup>2</sup>]
- Temperatura superficiale [°C]

Per determinare il grado di adattamento dei valori simulati a quelli osservati, sono stati calcolati i seguenti indicatori statistici:

- RMSE (Root Mean Square Error), definito come:

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

- Indice di Nash, definito come:

$$NASH = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (OSS_i - SIM_i)^2}{\sum_{i=1}^n (OSS_i - \overline{OSS})^2}$$

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

L'analisi di questi indicatori ha permesso di determinare quali parametri cambiare e di quanto, al fine di migliorare la corrispondenza tra gli output delle simulazioni e i dati osservati.

#### 4.2.2 Validazione a scala di bacino

La validazione a scala di bacino, riferita all'intero comprensorio del Sud Fortore, si è basata sul confronto tra i dati simulati e quelli osservati di temperatura superficiale, ottenuti rispettivamente dalle simulazioni del FEST-EWB e dalle misurazioni fornite dai satelliti Landsat 7, Landsat 8 e Sentinel 3A.

Le statistiche delle differenze tra i valori simulati e osservati valutati pixel a pixel sono state calcolate tramite l'utilizzo del software Matlab, tra cui:

- Media assoluta
- Media relativa
- Deviazione standard
- RMSE

Oltre agli indici sopra elencati, sono state calcolate anche media e deviazione standard tra le immagini satellitari quelle ottenute dal FEST-EWB.

Tra i disturbi che possono influenzare una corretta acquisizione dei dati satellitari si ha ad esempio l'eventuale copertura nuvolosa che può oscurare porzioni di territorio; un'altra problematica riguarda le immagini acquisite dal Landsat 7, che risultano essere disturbate da linee oblique di dati mancanti a causa di un malfunzionamento del sensore a bordo del satellite per il rilevamento della temperatura superficiale. Per questo, al fine di ottenere un confronto soddisfacente con i dati di temperatura superficiale simulati, nel processo di validazione si considerano solamente le immagini caratterizzate da una qualità migliore.

### **4.3 Metodologia SIM**

La metodologia SIM si propone come uno strumento innovativo che mira ad una gestione parsimoniosa dell'acqua fornendo previsioni in tempo reale del comportamento dell'umidità del suolo. Il criterio decisionale alla base del metodo consiste nel confrontare le previsioni di umidità del suolo con la soglia di stress idrico ( $\theta_{\text{critico}}$ ) sotto la quale la coltura comincia a soffrire per mancanza di acqua, e quindi stabilire i tempi e le quantità di irrigazione (WaterWorks, 2014).

Per calcolare la soglia di stress idrico, si utilizza la metodologia di Allen et al., 1998 (FAO-foglio 56), che tiene conto dei diversi tipi di suolo e coltura, della fase di crescita della vegetazione e del clima dell'area di studio:

$$\theta_{critico} = FC - p \cdot (FC - WP)$$

dove FC è la capacità di campo, ovvero la quantità massima di acqua che può essere trattenuta nel terreno senza generare deflusso superficiale, WP è il punto di appassimento, ossia il livello in cui le radici non sono più in grado di estrarre acqua dal sottosuolo provocando la morte della pianta e p è il coefficiente di esaurimento definito come:

$$p = \frac{RAW}{TAW}$$

TAW è il "Total Available Water", ovvero il quantitativo totale d'acqua presente nel terreno, definito come:  $TAW = FC - WP$ , mentre RAW è il "Readily Available Water", ovvero una parte del TAW che la coltura può utilizzare senza soffrire di alcun tipo di stress idrico, definito come:  $RAW = FC - \theta_{critico}$ .

I valori del coefficiente di esaurimento p per i diversi tipi di colture sono stati calcolati e messi a disposizione sul sito della FAO; si tratta di un numero che varia da 0 a 1 ed è influenzato dai parametri climatici e dall'evapotraspirazione.

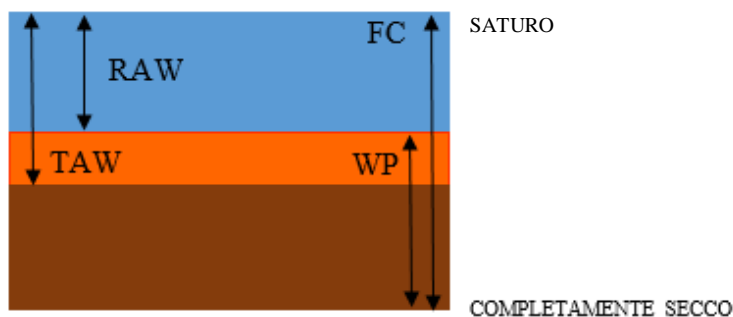


Figura 4.2: Rappresentazione grafica di TAW, RAW, FC e WP

La metodologia SIM permette quindi di ridurre i volumi ed il numero di irrigazioni mantenendo l'umidità del suolo all'interno dell'intervallo compreso tra la capacità di campo e la soglia di stress critico. L'irrigazione viene fornita quando l'umidità raggiunge il  $\theta_{critico}$ , evitando di causare stress idrico alla pianta, con un quantitativo tale da raggiungere il valore di FC, ma senza superarlo, evitando di generare deflusso superficiale e di sprecare quindi acqua.

## 4.4 Indicatori

Per analizzare dal punto di vista quantitativo le differenze tra le diverse metodologie adottate per la gestione dell'acqua a scopo irriguo, si può far riferimento ad alcuni indicatori (Progetto SIM, 2016) tra cui:

- Water Use Efficiency:  $WUE = \frac{\text{Resa agricola della coltura [kg/m}^2\text{]}}{\text{ET cumulata annua [m]}}$
- Irrigation Water Use Efficiency:  $IWUE = \frac{\text{Resa agricola della coltura [kg/m}^2\text{]}}{\text{Irrigazione cumulata annua [m]}}$
- Relative Soil Water Deficit:  $RWSD = \frac{1-(Sm-Wp)}{(Fc-Wp)}$
- Percolation Deficit =  $\frac{(\text{Pioggia}+\text{Irrigazione})-\text{Percolazione}}{(\text{Pioggia}+\text{Irrigazione})}$
- Irrigation Efficiency =  $\frac{ET}{(\text{Pioggia}+\text{Irrigazione})}$

Le metodologie per l'irrigazione che presentano l'efficienza maggiore sono da preferire per la programmazione della gestione irrigua.



## **CAPITOLO 5**

### **ANALISI A SCALA PUNTUALE**

In questo capitolo vengono riportati i risultati dell'analisi effettuata a scala puntuale in corrispondenza di un campo preso in esame all'interno del comprensorio del Sud Fortore, coltivato inizialmente a pomodoro e poi a grano, dove è localizzata una stazione Eddy Covariance che misura la dinamica dell'umidità, della temperatura superficiale del suolo e altri flussi energetici (Capitolo 2.2.2). I dati osservati dalla stazione verranno confrontati con quelli simulati dal modello FEST-EWB per determinare quanto il modello è in grado di rappresentare la realtà.

Inizialmente è stata svolta la calibrazione dei parametri e delle caratteristiche del suolo e della vegetazione in input al modello. Attraverso il confronto grafico e l'analisi di alcuni indici statistici tra le variabili simulate e quelle osservate dalla stazione Eddy Covariance, sono stati scelti i parametri ottimali per il modello.

Successivamente sono stati analizzati i dati di irrigazioni forniti dal Consorzio nel campo in esame e confrontati con i risultati ottenuti a seguito dell'applicazione della metodologia SIM, che mira a ridurre sia la frequenza delle irrigazioni che i volumi di acqua coinvolti. Il metodo introduce infatti il concetto di soglia irrigua, ovvero la condizione che determina l'inizio dell'irrigazione, riducendo gli sprechi e mantenendo le colture in uno stato ottimale dal punto di vista del fabbisogno idrico.

Sono stati poi calcolati una serie di indicatori dell'uso dell'acqua per dimostrare la migliore efficienza della metodologia SIM, sia per quanto riguarda l'irrigazione che le perdite d'acqua per evapotraspirazione e percolazione (Capitolo 4).

## 5.1 Calibrazione del modello FEST-EWB

I risultati delle simulazioni a scala locale fanno riferimento ai valori registrati dalla stazione Eddy Covariance in corrispondenza del campo analizzato, coltivato a pomodoro nella stagione primaverile-estiva del 2017 e successivamente a grano fino a giugno 2018.

La localizzazione del campo e della stazione Eddy all'interno del comprensorio del Sud Fortore è riportata nella Figura 5.1.

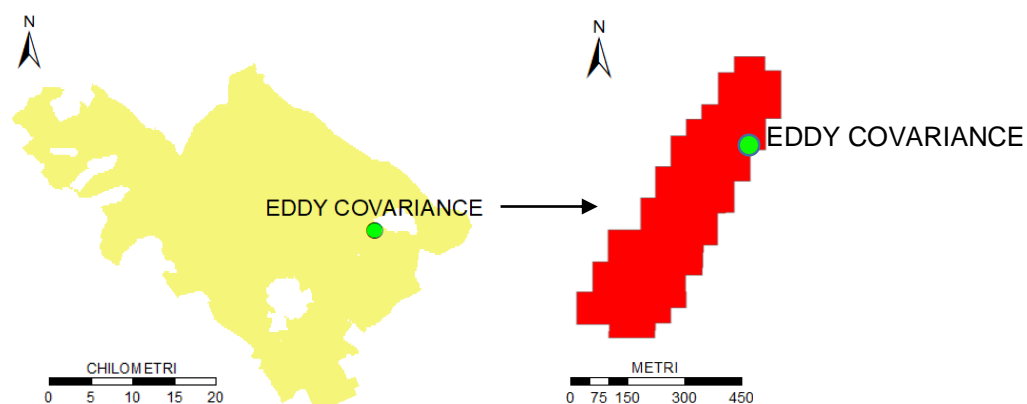


Figura 5.1: Localizzazione del campo in esame nel comprensorio del Sud Fortore



### 5.1.1 Coltivazione a pomodoro

Durante la fase di calibrazione sono state eseguite un totale di 28 simulazioni, inizialmente modificando un parametro alla volta per determinare la relativa influenza sui risultati e successivamente scegliendo la configurazione ottimale per simulare i flussi turbolenti di calore latente e sensibile, radiazione netta, flusso di calore nel suolo, temperatura superficiale e umidità relativa del suolo.

Vengono riportati nella Tabella 5.1 i parametri della simulazione originaria e i rispettivi indici statistici tra cui l'errore quadratico medio RMSE, l'indice di NASH, il coefficiente angolare della regressione lineare tra i dati osservati e quelli simulati  $m$  ed infine il coefficiente di correlazione lineare  $R^2$  (Capitolo 4.2.1). Nella Tabella 5.2 vengono invece riportati i parametri e le statistiche della simulazione finale ottenuti dopo la calibrazione. Durante la fase di calibrazione i parametri che hanno condizionato maggiormente le variabili di output sono stati la permeabilità e la saturazione iniziale del terreno, il punto di appassimento, la capacità di campo e la resistenza stomatica minima della coltura. Per quanto riguarda le statistiche, invece, si è ottenuto un miglioramento per i flussi di calore latente, calore sensibile e umidità nel terreno, mentre per le altre variabili non si osservano variazioni significative.

PARAMETRI IN INPUT ALLA SIMULAZIONE ORIGINARIA	INDICI STATISTICI			
	RMSE	NASH	m	R <sup>2</sup>
k_sat = $6.9444 \cdot 10^{-6}$ CN = 69 saturazione iniziale = 0.66 wp = 0.07 fc = 0.3 $\theta_{res}$ = 0.035 $\theta_{sat}$ = 0.464 rs_min = 100 prof_radici = 0.15 bc = 0.378 bp = 0.1444				
<b>SM [%]</b>	0.08	0.21	0.72	0.45
<b>Rn [w/m<sup>2</sup>]</b>	145.59	0.47	0.63	0.86
<b>LE [w/m<sup>2</sup>]</b>	48.15	0.67	1.02	0.63
<b>H [w/m<sup>2</sup>]</b>	65.44	0.23	0.8	0.26
<b>G[w/m<sup>2</sup>]</b>	384667	$-6.58 \cdot 10^{-5}$	1.31	0.6
<b>LST[°C]</b>	6.73	0.95	1.25	0.66

Tabella 5.1: Parametri in input alla simulazione originaria e indici statistici. Campo pomodoro.

PARAMETRI IN INPUT ALLA SIMULAZIONE FINALE	INDICI STATISTICI			
	RMSE	NASH	m	R <sup>2</sup>
k_sat = 4.17E-06				
CN = 69				
saturazione iniziale = 0.5				
wp = 0.117				
fc = 0.27				
θ_res = 0.035				
θ_sat = 0.464				
rs_min = 150				
prof_radici = 0.15				
bc = 0.378				
bp = 0.1444				
<b>SM [%]</b>	0.03	0.78	0.62	0.56
<b>Rn [w/m<sup>2</sup>]</b>	147.39	0.45	0.63	0.87
<b>LE[w/m<sup>2</sup>]</b>	41.71	0.7	0.92	0.62
<b>H [w/m<sup>2</sup>]</b>	64.55	0.29	0.98	0.31
<b>G [w/m<sup>2</sup>]</b>	384666	-6.45·10 <sup>-5</sup>	1.26	0.6
<b>LST [°C]</b>	7.09	0.94	1.31	0.67

Tabella 5.2: Parametri in input alla simulazione finale e indici statistici. Campo pomodoro.

L'andamento nel tempo delle variabili di umidità relativa e dei flussi turbolenti di calore latente, sensibile, radiazione netta, flusso di calore nel suolo e temperatura superficiale con i parametri della simulazione originaria e finale, confrontato con i dati osservati dalla stazione Eddy Covariance, è riportato nei grafici delle pagine seguenti.

Come sottolineato per le statistiche, anche a livello grafico la calibrazione ha avuto degli effetti positivi sui flussi di calore latente e calore nel suolo ma è l'umidità del terreno la variabile caratterizzata dal miglioramento più marcato, influenzato principalmente dal valore della permeabilità del terreno. Per quanto riguarda la radiazione netta, il calore sensibile e la temperatura superficiale, la simulazione originaria e quella finale hanno fornito risultati simili, mentre si nota una sottostima della radiazione netta rispetto ai valori osservati, probabilmente dovuta a una registrazione errata della stazione Eddy Covariance; di conseguenza anche il calore nel suolo ne risulta influenzato in quanto legato alla radiazione netta dall'equazione del bilancio energetico:  $Rn - G = H + LE$ . Come si può osservare dall'equazione, una sottostima della Rn comporta una sovrastima di G.

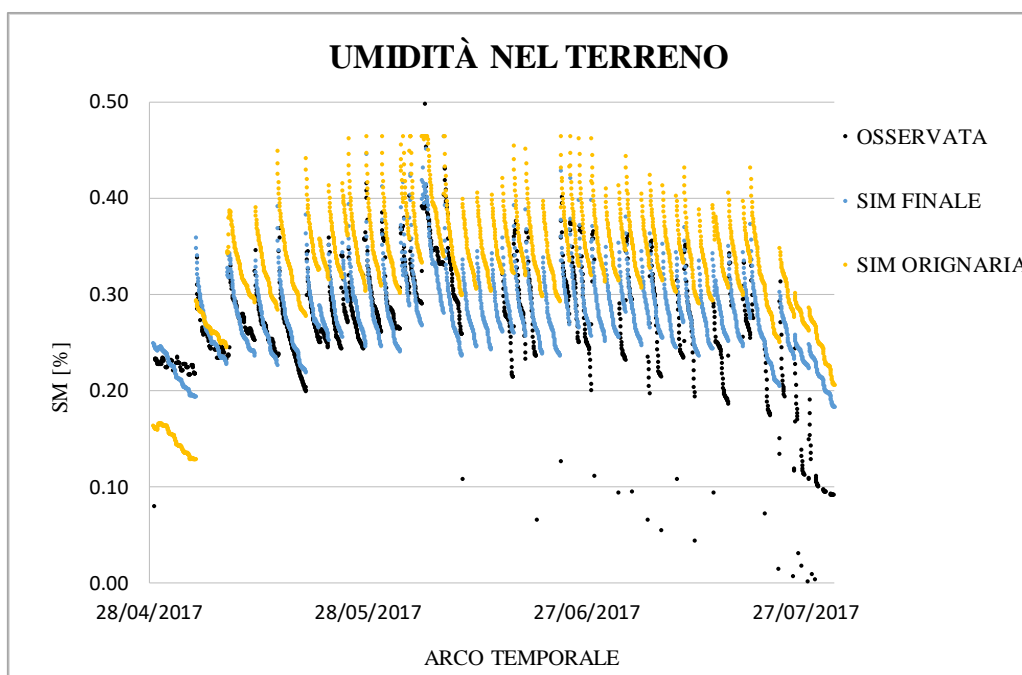


Figura 5.2: Confronto tra l'umidità del suolo osservata, simulata con i parametri originali e calibrata. Campo pomodoro.

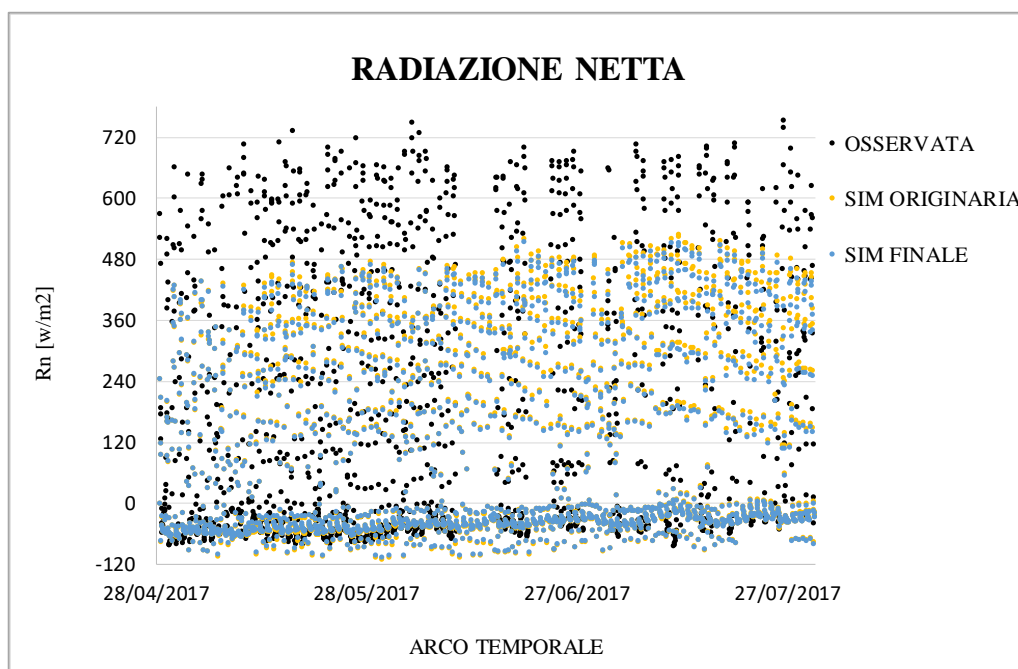


Figura 5.3: Confronto tra la radiazione netta osservata, simulata con i parametri originali e calibrata. Campo pomodoro.

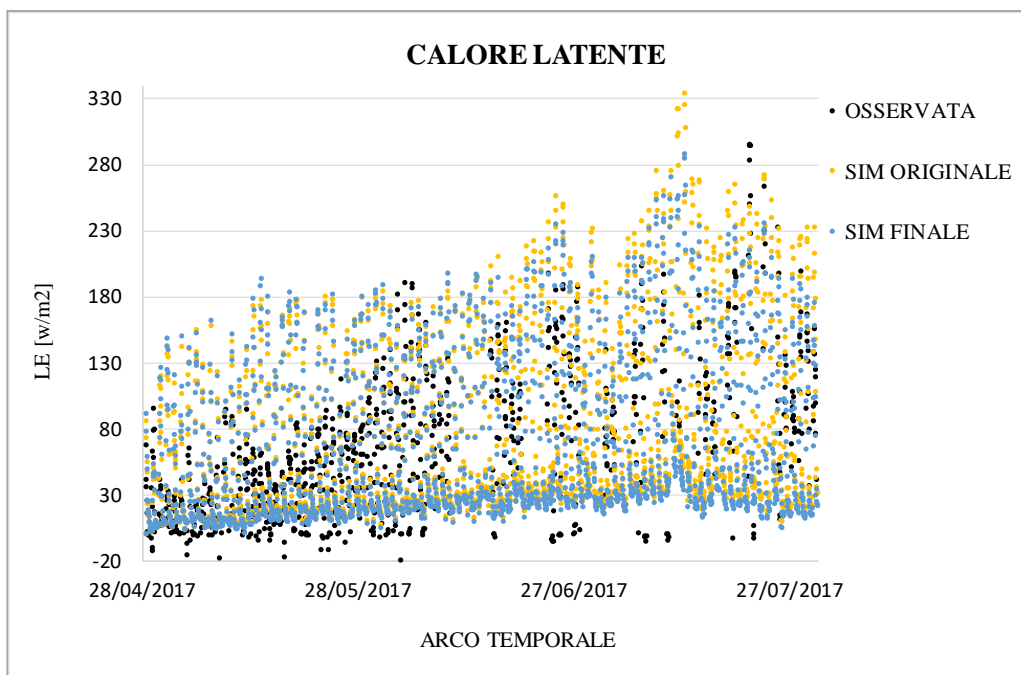


Figura 5.4: Confronto tra il calore latente osservato, simulato con i parametri originali e calibrato. Campo pomodoro.

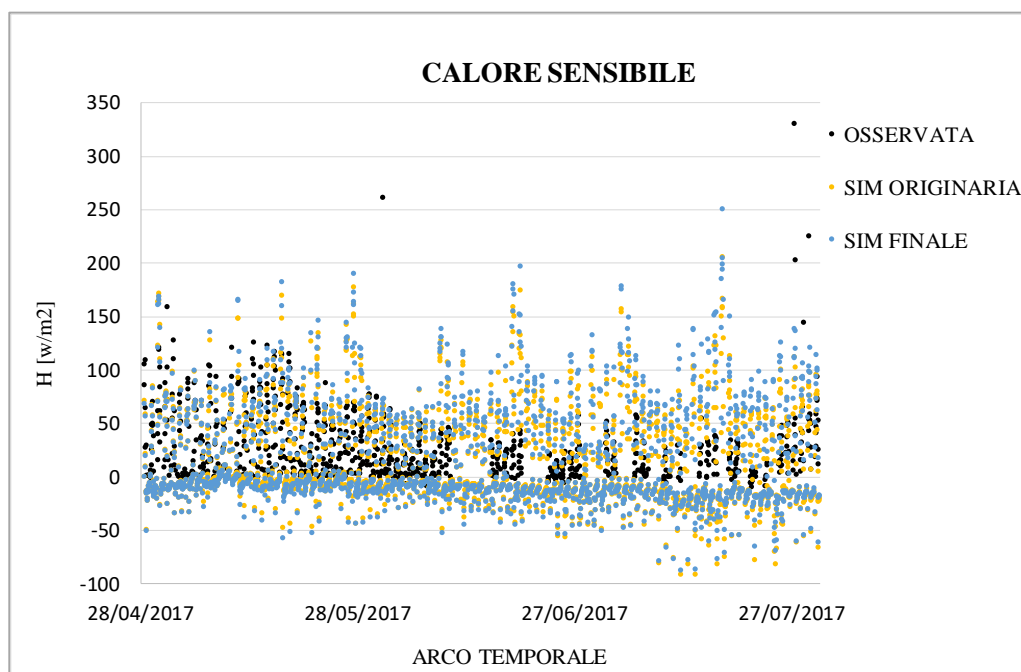


Figura 5.5: Confronto tra il calore sensibile osservato, simulato con i parametri originali e calibrato. Campo pomodoro.

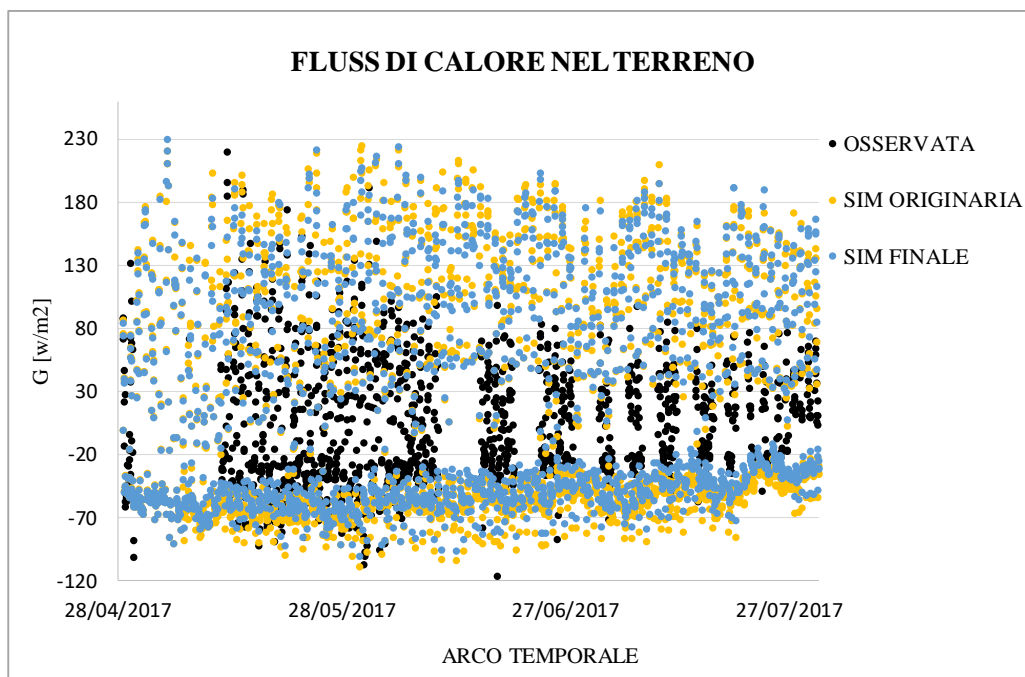


Figura 5.6: Confronto tra il flusso di calore sotterraneo osservato, simulato con i parametri originali e calibrato. Campo pomodoro.

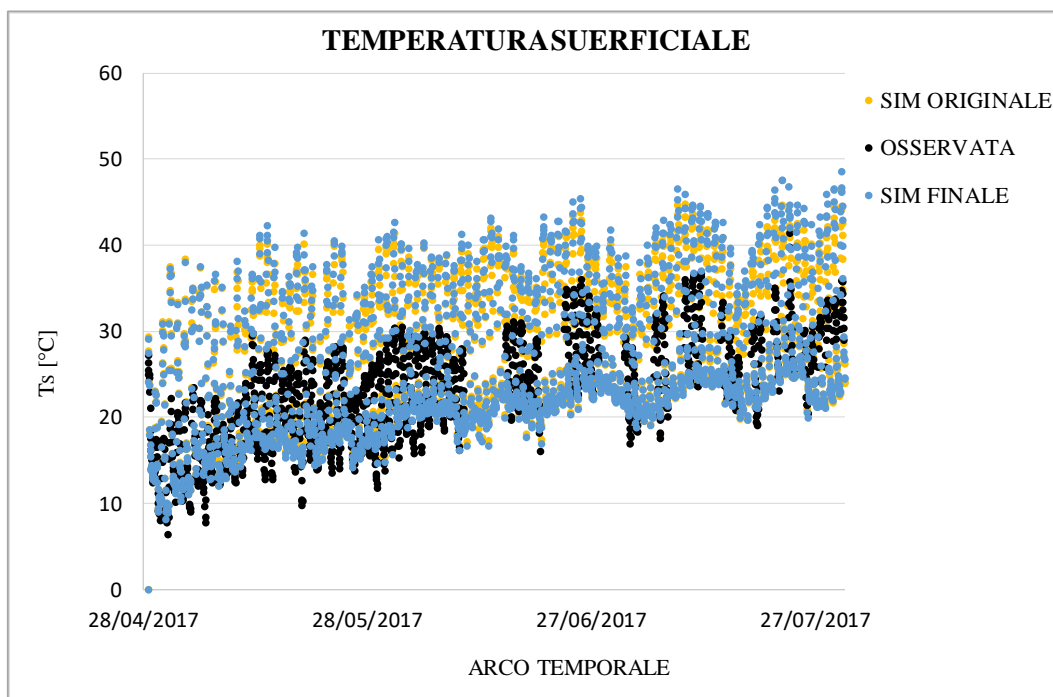


Figura 5.7: Confronto tra la temperatura superficiale osservata, simulata con i parametri originali e calibrata. Campo pomodoro.

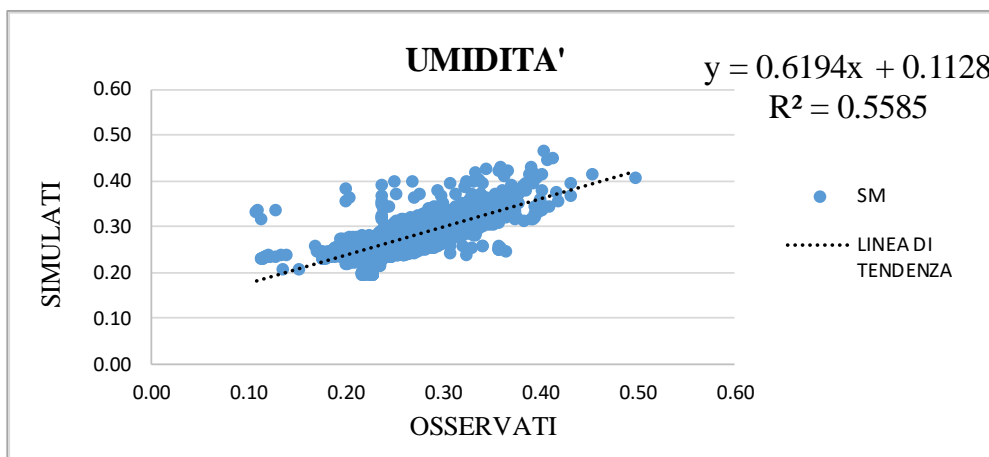


Figura 5.8: Diagramma di correlazione tra l'umidità osservata e simulata. Campo pomodoro.

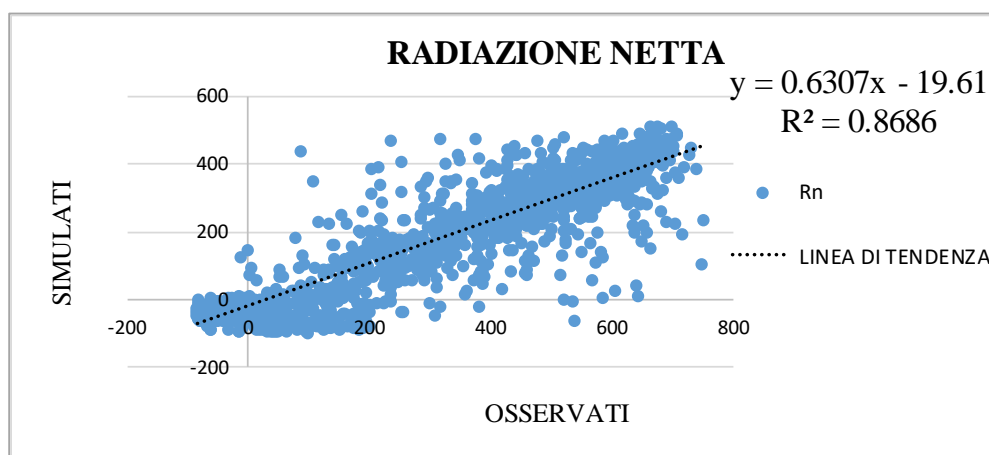


Figura 5.9: Diagramma di correlazione tra la radiazione netta osservata e simulata. Campo pomodoro.

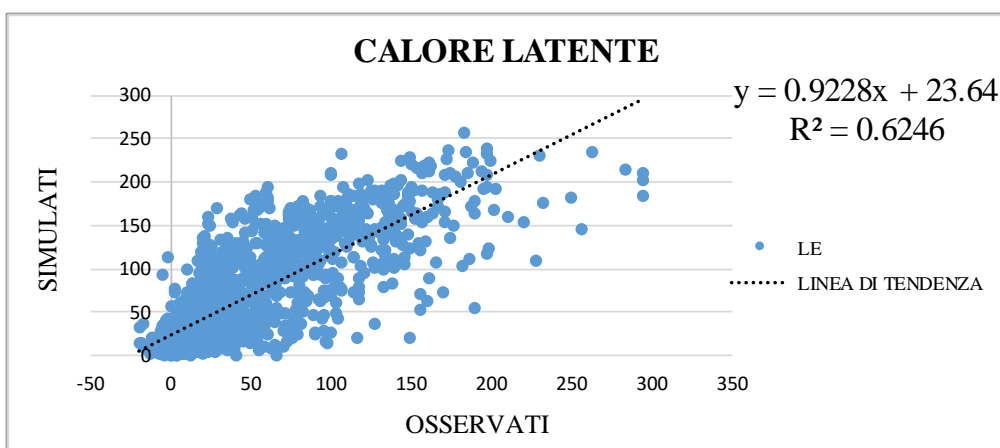


Figura 5.10: Diagramma di correlazione tra il calore latente osservato e simulato. Campo pomodoro.

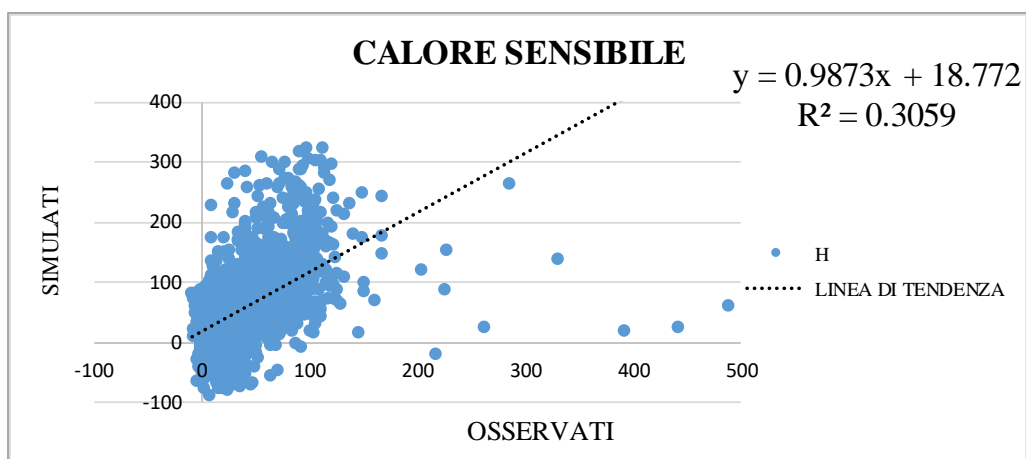


Figura 5.11: Diagramma di correlazione tra il calore sensibile osservato e simulato. Campo pomodoro.

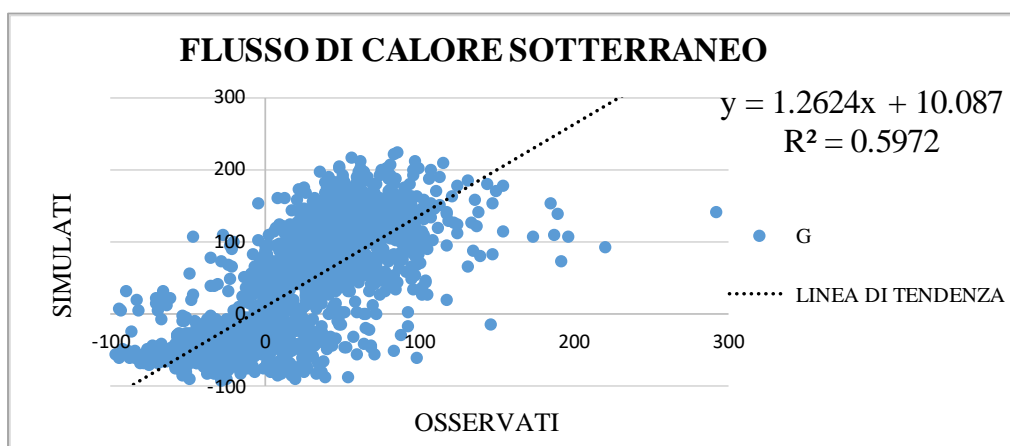


Figura 5.12: Diagramma di correlazione tra il flusso di calore sotterraneo osservato e simulato. Campo pomodoro.

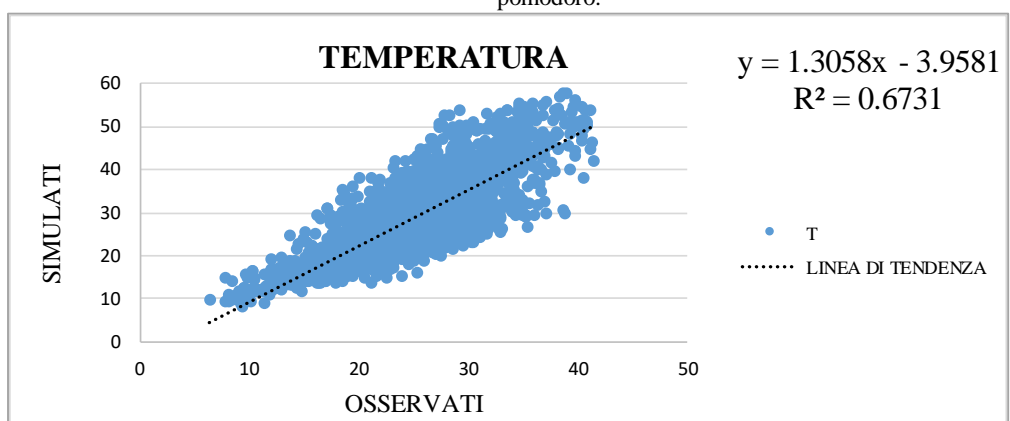


Figura 5.13: Diagramma di correlazione tra la temperatura superficiale osservata e simulata. Campo pomodoro.

## 5.1.2 Coltivazione a grano

Lo stesso campo coltivato a pomodoro dal 28/04/2017 al 31/07/2017 è stato successivamente impiegato per la coltivazione del grano dal 01/09/2017 al 08/06/2018. I parametri del suolo utilizzati come input al FEST-EWB sono quindi i medesimi calibrati precedentemente anche se, rispetto al pomodoro, sono stati utilizzati dei valori di permeabilità del terreno e saturazione iniziale leggermente diversi che possono dipendere da lavorazioni agrarie del campo e dalla compattazione del terreno. È stata inoltre modificata la profondità delle radici per meglio rappresentare la coltivazione del grano.

Vengono riportati nella Tabella 5.3 le statistiche della simulazione originaria, tra cui l'errore quadratico medio RMSE, l'indice di Nash, il coefficiente angolare della regressione lineare tra i valori simulati e osservati  $m$  ed il coefficiente di correlazione della regressione lineare tra i valori simulati e osservati  $R^2$  (Capitolo 4.2.1). Le statistiche si differenziano da quelle ottenute per il pomodoro in quanto il periodo della simulazione è diverso, pur essendo i parametri iniziali gli stessi.

Nella Tabella 5.4 sono invece riportati i parametri e gli indici statistici della simulazione finale.

	INDICI STATISTICI			
	RMSE	NASH	$m$	$R^2$
<b>SM [%]</b>	0.05	0.1	0.61	0.48
<b>Rn [w/m<sup>2</sup>]</b>	149.63	0.28	0.58	0.68
<b>LE [w/m<sup>2</sup>]</b>	47.79	-0.32	0.13	0.007
<b>H [w/m<sup>2</sup>]</b>	99.8	0.29	1.51	0.38
<b>G [w/m<sup>2</sup>]</b>	37.3	0.52	1.08	0.53
<b>LST [°C]</b>	5.71	0.64	1.14	0.65

Tabella 5.3: Indici statistici simulazione originaria. Campo grano.



<b>PARAMETRI IN INPUT ALLA SIMULAZIONE FINALE</b>
$k_{sat} = 1.39 \cdot 10^{-6}$ CN = 69 saturazione iniziale = 0.3 $w_p = 0.117$ $f_c = 0.27$ $\theta_{res} = 0.035$ $\theta_{sat} = 0.464$ $rs_{min} = 150$ prof_radici = 0.2 $bc = 0.378$ $bp = 0.1466$

	<b>INDICI STATISTICI</b>			
	<b>RMSE</b>	<b>NASH</b>	<b>m</b>	<b>R<sup>2</sup></b>
<b>SM [%]</b>	0.03	0.47	0.89	0.61
<b>Rn [w/m<sup>2</sup>]</b>	149.04	0.3	0.59	0.69
<b>LE [w/m<sup>2</sup>]</b>	64.45	-0.1	0.32	0.08
<b>H [w/m<sup>2</sup>]</b>	93.92	0.31	1.47	0.4
<b>G [w/m<sup>2</sup>]</b>	39.13	0.52	1.12	0.53
<b>LST [°C]</b>	5.52	0.65	1.12	0.67

Tabella 5.4: Parametri in input alla simulazione finale e indici statistici. Campo grano.

Dall'analisi delle statistiche si ottiene un miglioramento per l'umidità relativa del suolo, i flussi di calore latente e calore sensibile e la temperatura superficiale, mentre gli indici di radiazione netta e flusso di calore sono rimasti simili a quelli iniziali.

L'andamento nel tempo delle variabili SM, Rn, LE, H, G e LST con i parametri della simulazione originaria e finale, confrontato con i dati osservati dalla stazione Eddy Covariance, è riportato nei grafici delle pagine seguenti.

Per l'umidità nel terreno si può notare un notevole miglioramento, influenzato principalmente dal parametro della permeabilità del terreno. Il calore latente risulta anch'esso migliorato, mentre non si osservano variazioni significative per il flusso di calore nel terreno e per la temperatura superficiale del suolo, che risultano però sovrastimati rispetto ai dati della stazione Eddy Covariance. Per quanto riguarda la radiazione netta, i dati simulati sono sottostimati rispetto a quelli osservati e questo può dipendere probabilmente da errori di misura da parte della stazione, come evidenziato per il pomodoro. Di conseguenza, anche il calore sensibile ne risulta influenzato in quanto è legato alla radiazione netta dall'equazione di bilancio energetico:  $R_n - H = G + LE$ . Una sottostima della radiazione netta comporta una sovrastima del calore sensibile, come riscontrato nelle analisi.

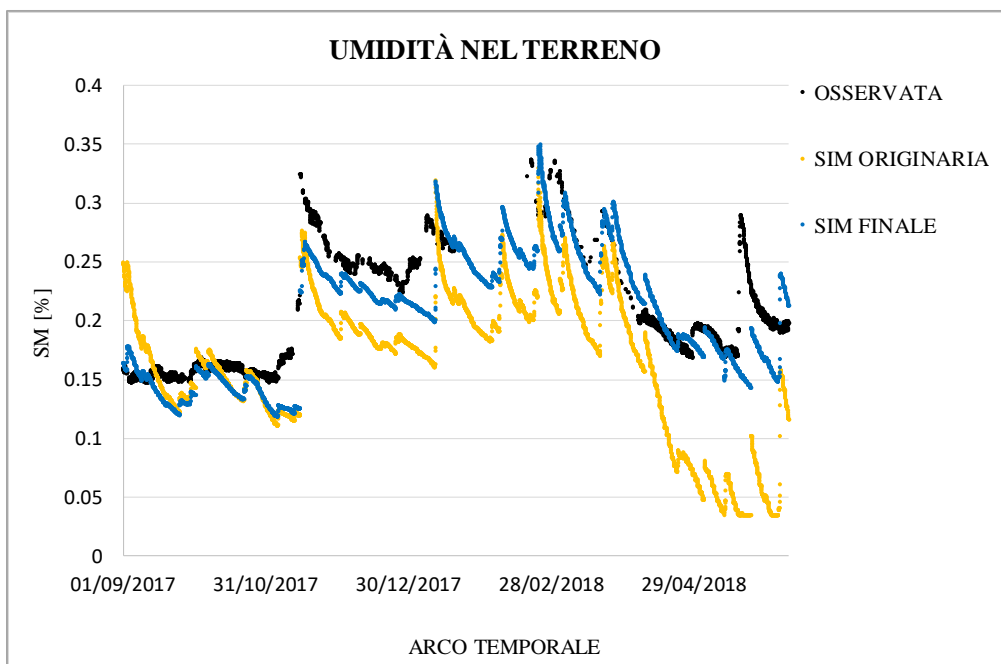


Figura 5.14: Confronto tra l'umidità osservata, simulata con i parametri originali e calibrata. Campo grano.

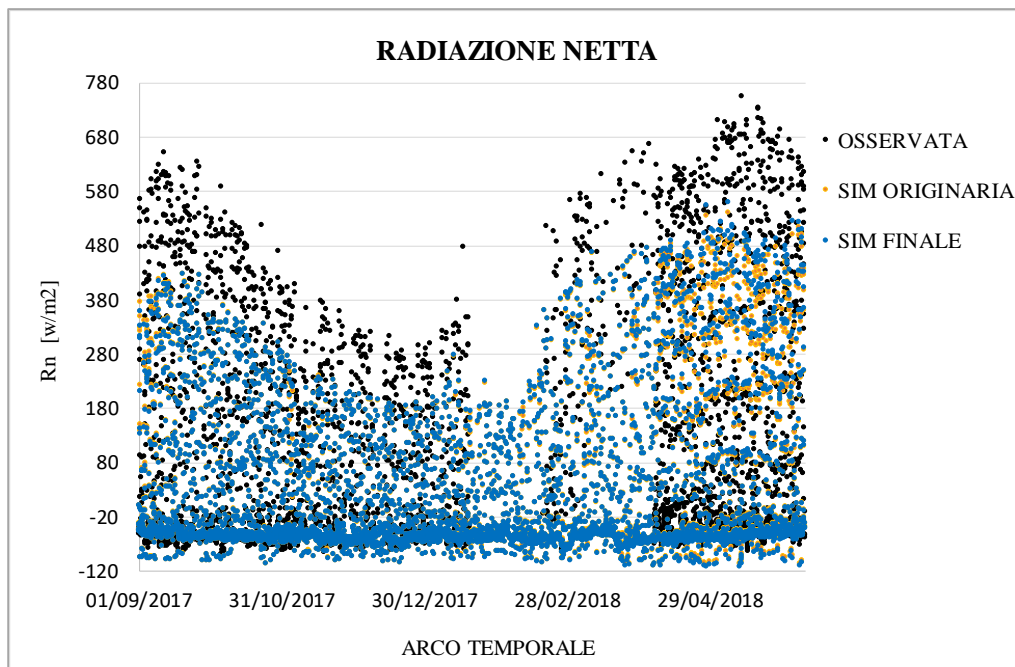


Figura 5.15: Confronto tra la radiazione netta osservata, simulata con i parametri originali e calibrata. Campo grano.

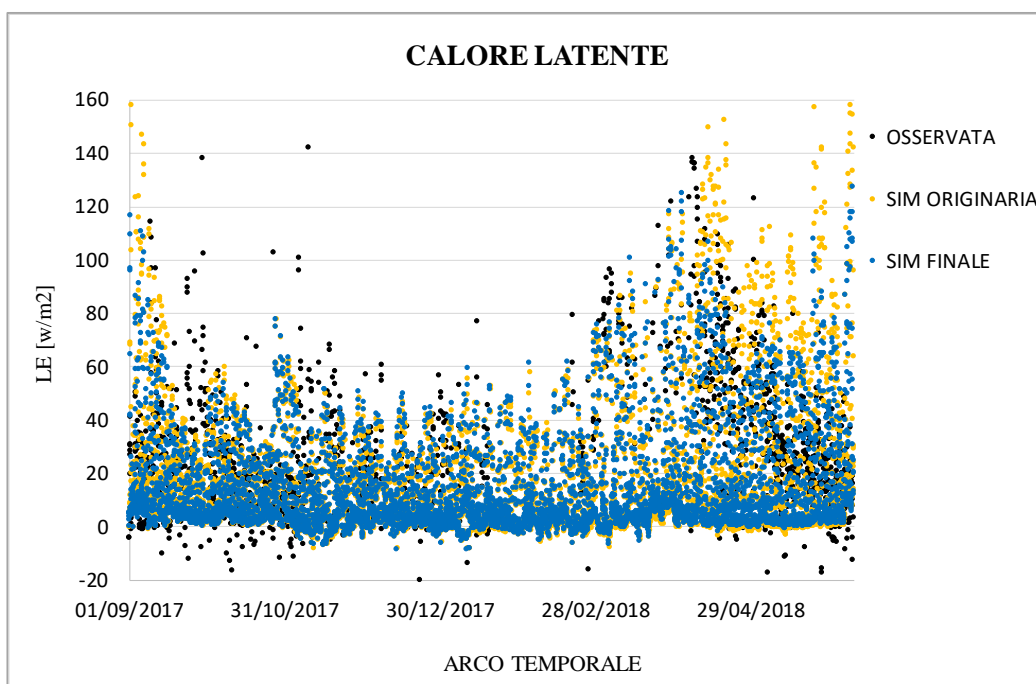


Figura 5.16: Confronto tra il calore latente osservato, simulato con i parametri della simulazione originaria e calibrato. Campo grano.

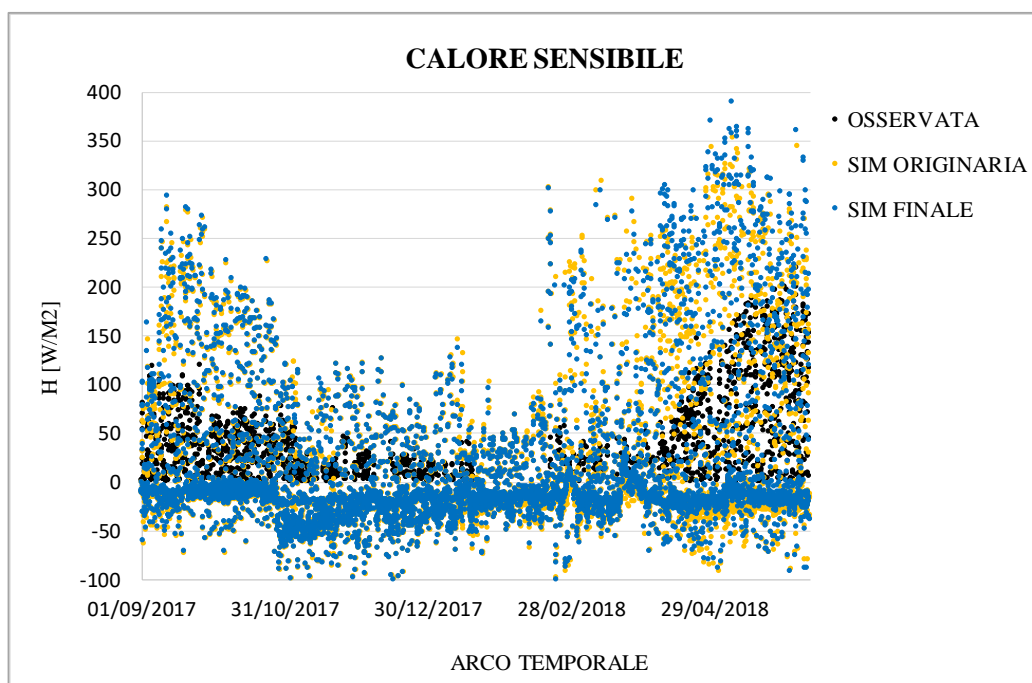


Figura 5.17: Confronto tra il calore sensibile osservato, calibrato con i parametri della simulazione originaria e calibrato. Campo grano.

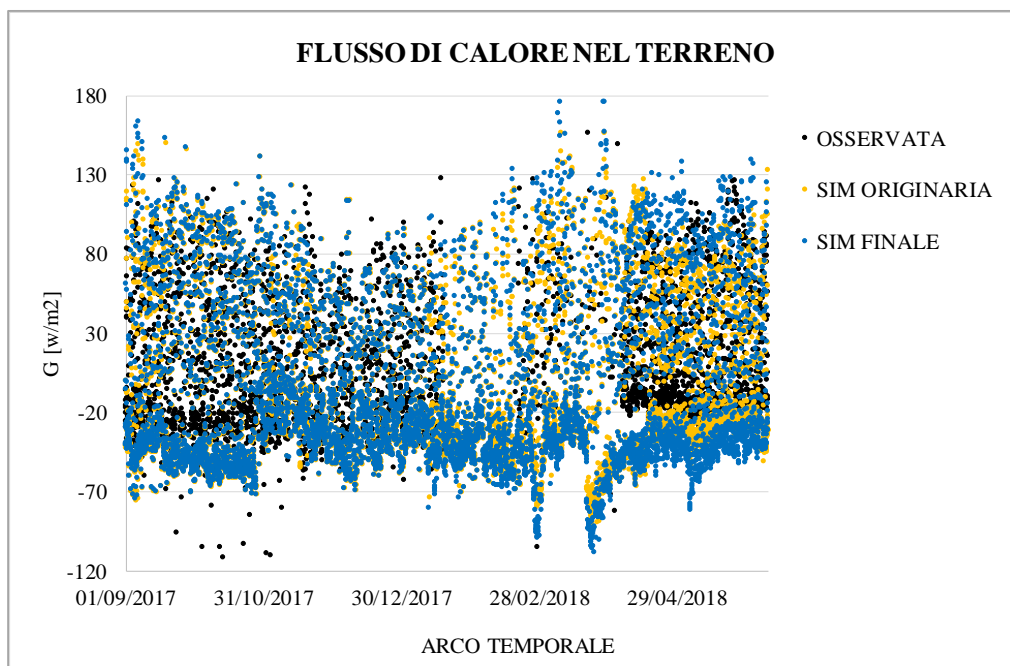


Figura 5.18: Confronto tra il flusso di calore nel terreno osservato, simulato con i parametri della simulazione originaria e calibrato. Campo grano.

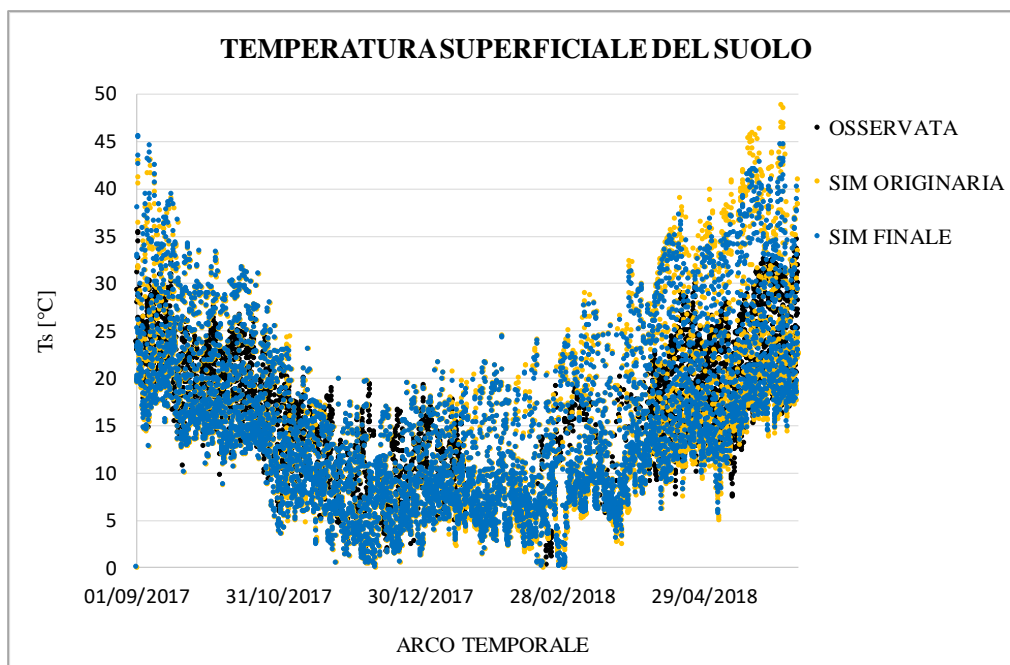


Figura 5.19: Confronto tra la temperatura superficiale osservata, simulata con i parametri della simulazione originale e calibrata. Campo grano.

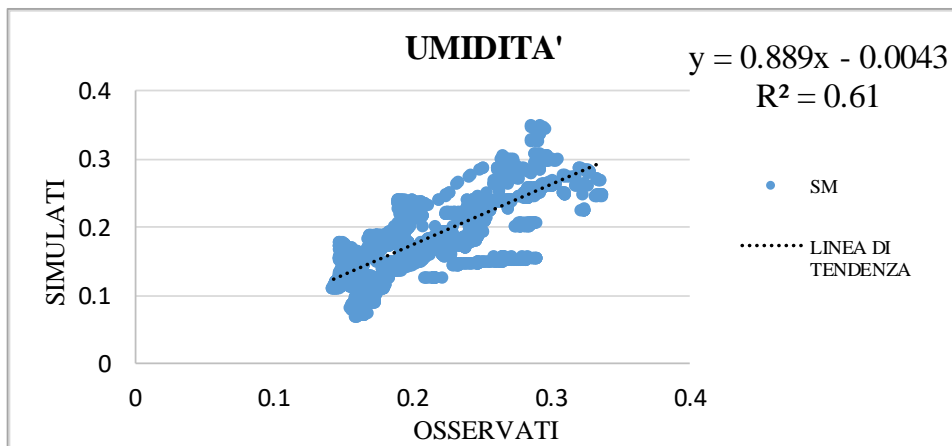


Figura 5.20: Diagramma di correlazione tra l'umidità osservata e simulata. Campo grano.

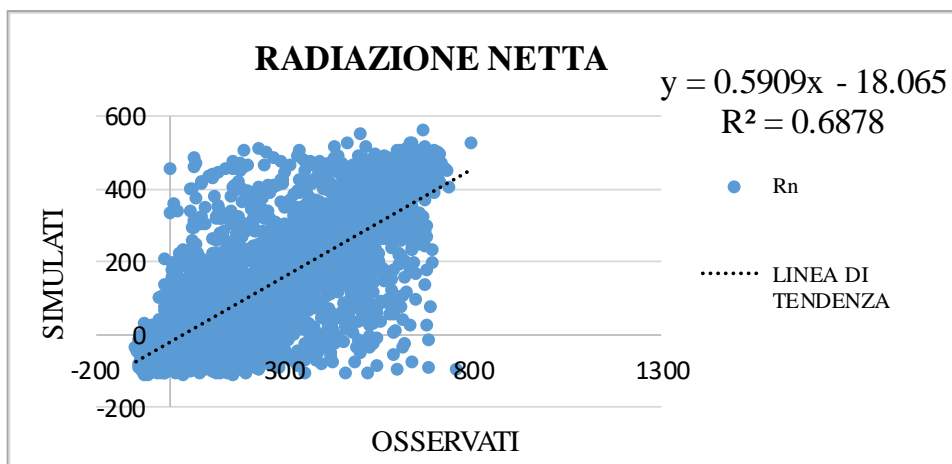


Figura 5.21: Diagramma di correlazione tra la radiazione netta osservata e simulata. Campo grano.

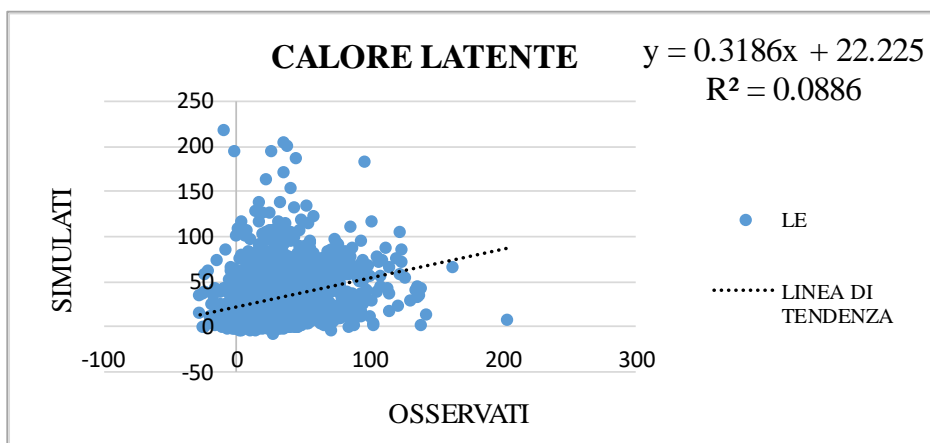


Figura 5.22: Diagramma di correlazione tra il calore latente osservato e simulato. Campo grano.

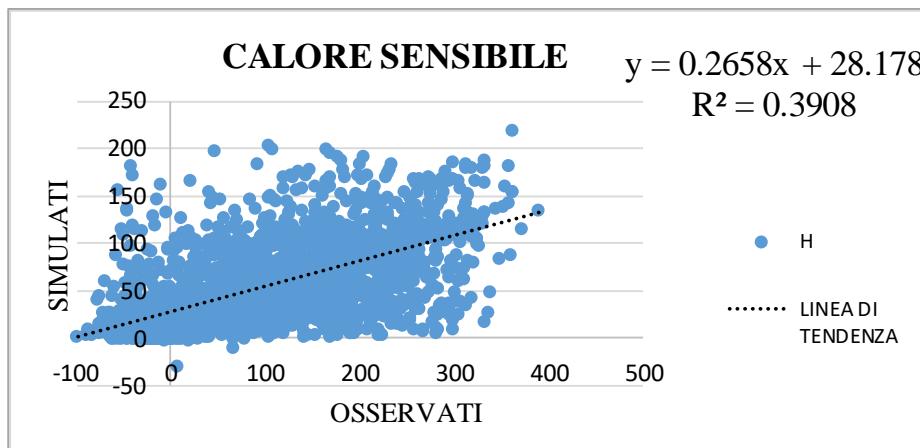


Figura 5.23: Diagramma di correlazione tra il calore sensibile osservato e simulato. Campo grano.

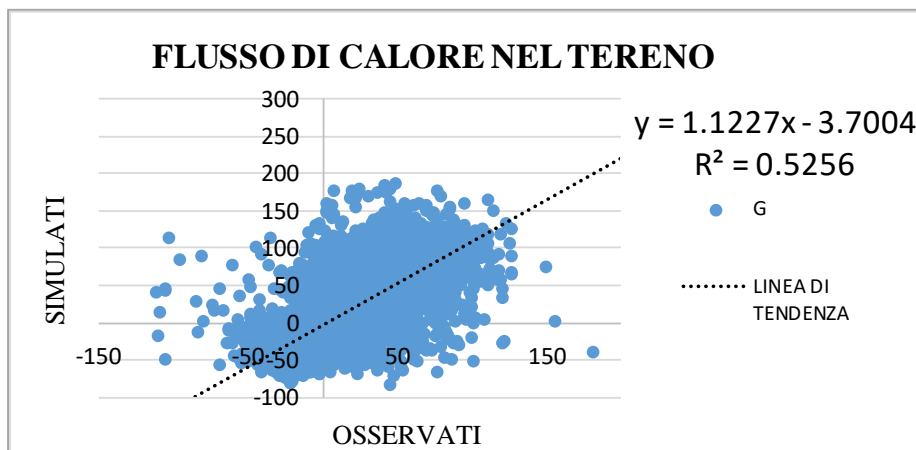


Figura 5.24: Diagramma di correlazione tra il flusso di calore nel terreno osservato e simulato. Campo grano.

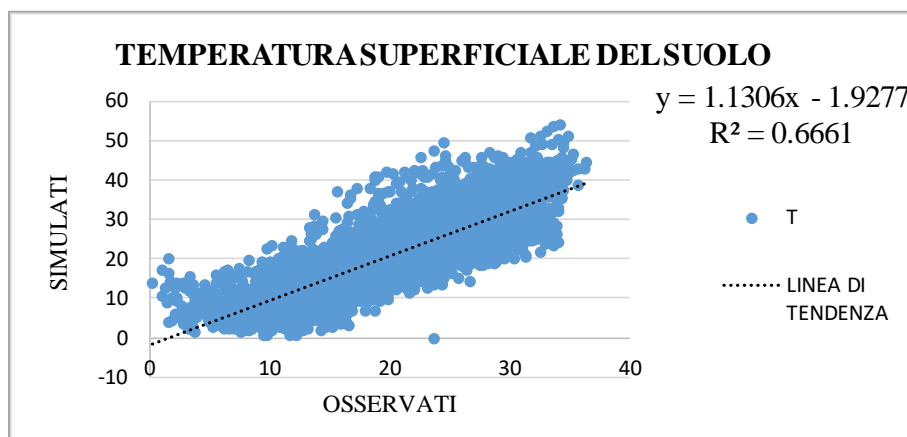


Figura 5.25: Diagramma di correlazione tra la temperatura superficiale del suolo osservata e simulata. Campo grano.

## 5.2 Irrigazione con metodologia SIM

La metodologia SIM si propone come uno strumento innovativo che mira ad una gestione parsimoniosa della risorsa idrica permettendo di ridurre il consumo di acqua irriguo. Il criterio decisionale alla base del metodo consiste nel confrontare le stime di umidità del suolo con la soglia di stress idrico ( $\theta_{critico}$ ) sotto la quale la coltura comincia a soffrire per mancanza di acqua, e quindi stabilire i tempi e le quantità di irrigazione. Le analisi qui riportate sono effettuate in reanalisi, ovvero elaborando dati raccolti in passato nel 2017 e 2018, nel progetto SIM sono effettuate utilizzando le previsioni meteorologiche.

### 5.2.1 Campo coltivato a pomodoro

Per calcolare la soglia di stress idrico, si utilizza la metodologia di Allen et al., 1998 (FAO-foglio 56) (Capitolo 4.3), che tiene conto dei diversi tipi di suolo e coltura, della fase di crescita della vegetazione e del clima dell'area di studio.

La soglia critica risulta pari a:

$$\theta_{critico} = 0.2088$$

I valori della capacità di campo e del punto di appassimento sono quelli utilizzati nella calibrazione finale, rispettivamente pari a:

$$FC = 0.27$$

$$WP = 0.117$$

Il coefficiente di esaurimento  $p$  è stato fornito dalla FAO e per il pomodoro assume il valore di:

$$p = 0.4$$

Il contenuto d'acqua totale presente nel terreno considerato e il contenuto d'acqua che può essere utilizzato dalla pianta senza causare in stress idrico, sono stati calcolati e risultano pari a:

$$TAW = 0.153$$

$$RAW = 0.06$$

In Figura 5.26 sono riportate due simulazioni diverse: la prima utilizzando il modello FEST-EWB calibrato e i dati di irrigazione forniti dal Consorzio e la seconda applicando la metodologia SIM, introducendo quindi la soglia irrigua.

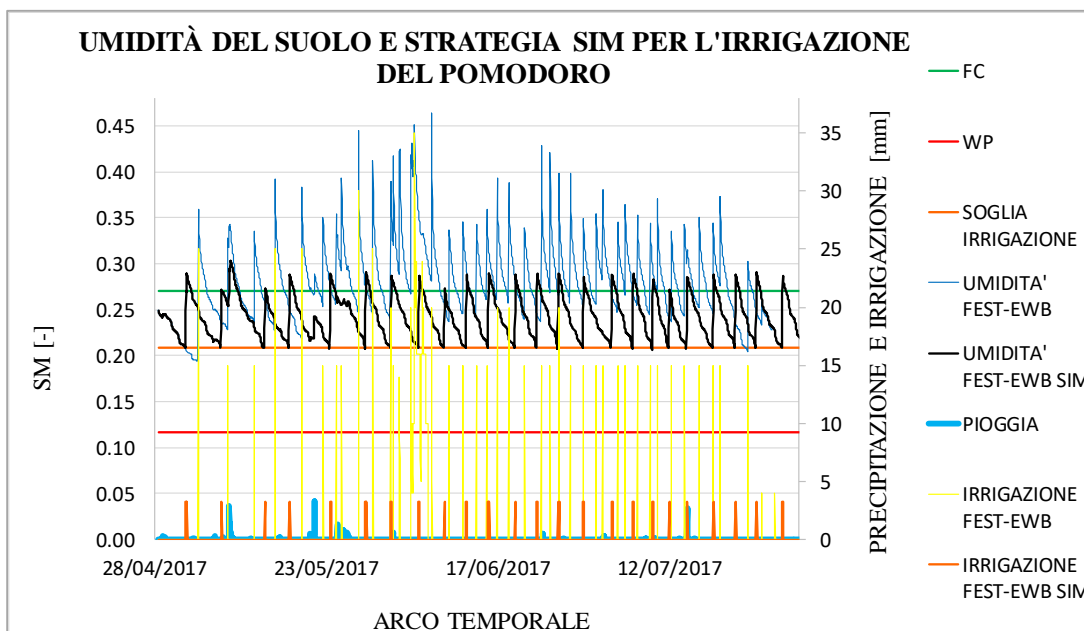


Figura 5.26: Umidità nel suolo e strategia SIM per l'irrigazione del pomodoro.

Dalle analisi dei risultati si può notare come il numero di irrigazioni con la metodologia SIM diminuisca, passando da 43 a 25. Anche il quantitativo d'acqua utilizzato risulta essere molto minore infatti il metodo SIM consente di eliminare le perdite di acqua dovute al deflusso superficiale (contenuto d'acqua superiore alla capacità di campo) e di mantenere l'umidità all'interno del RAW, condizione ottimale per la pianta in quanto le consente di prelevare acqua dal terreno senza causare stress idrico. Si può vedere chiaramente l'idea alla base della metodologia SIM, ovvero irrigare solo nel momento in cui l'umidità raggiunge la soglia irrigua e per un quantitativo tale da raggiungere e non superare la capacità di campo. I quantitativi di irrigazione giornalieri sono elencati nelle tabelle seguenti.



<b>DATA IRRIGAZIONE OSSERVATA</b>	<b>IRRIGAZIONE OSSERVATA [mm/giorno]</b>
04/05/2017	25
08/05/2017	15
12/05/2017	15
15/05/2017	25
19/05/2017	25
22/05/2017	15
24/05/2017	15
25/05/2017	15
27/05/2017	30
29/05/2017	25
01/06/2017	40
02/06/2017	38
04/06/2017	181
05/06/2017	396
06/06/2017	299
07/06/2017	35
09/06/2017	15
11/06/2017	15
13/06/2017	15
15/06/2017	15
16/06/2017	20
18/06/2017	20
20/06/2017	15
23/06/2017	30
24/06/2017	35
25/06/2017	20
27/06/2017	23
29/06/2017	15
01/07/2017	15
02/07/2017	15
04/07/2017	15
05/07/2017	15
07/07/2017	15
09/07/2017	15
10/07/2017	15
12/07/2017	15
14/07/2017	15
16/07/2017	15
18/07/2017	15
19/07/2017	15
23/07/2017	15
25/07/2017	4
27/07/2017	4

<b>DATA IRRIGAZIONE SIM</b>	<b>IRRIGAZIONE SIM [mm/giorno]</b>
02/05/2017	12.96
07/05/2017	9.72
14/05/2017	9.72
17/05/2017	12.96
23/05/2017	12.96
28/05/2017	12.96
01/06/2017	12.96
05/06/2017	12.96
09/06/2017	9.72
12/06/2017	12.96
15/06/2017	12.96
19/06/2017	12.96
22/06/2017	12.96
25/06/2017	12.96
29/06/2017	12.96
03/07/2017	12.96
06/07/2017	12.96
09/07/2017	12.96
12/07/2017	9.72
14/07/2017	9.72
18/07/2017	12.96
21/07/2017	12.96
24/07/2017	12.96
28/07/2017	12.96
31/07/2017	12.96

Tabella 5.6: Irrigazione con metodologia SIM.  
Campo pomodoro.

Tabella 5.5: irrigazione osservata. Campo pomodoro.

Nei dati di irrigazione osservati, il volume totale di acqua risulta essere pari a 1625 mm durante la stagione irrigua del pomodoro, mentre quello ottenuto con la metodologia SIM è pari a 307.8 mm. Questo dato evidenzia l'efficacia del metodo, che consente di risparmiare oltre 1300 mm di acqua e dimezzando circa il numero di irrigazioni. In Figura 5.27 vengono riportati gli andamenti cumulati di irrigazione, evapotraspirazione e precipitazione, in cui è ben visibile la differenza tra i due approcci.

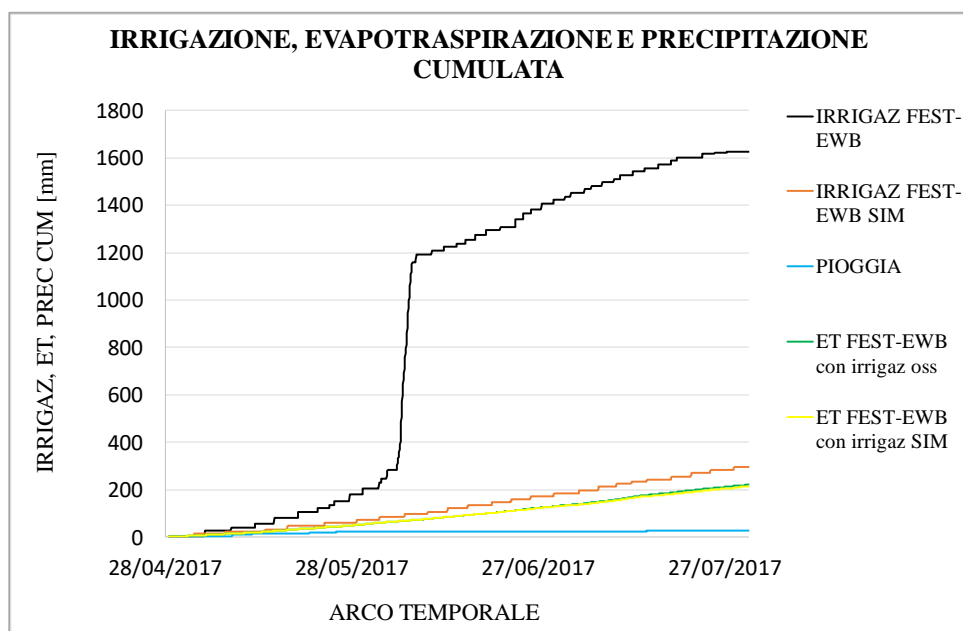


Figura 5.27: Irrigazione, evapotraspirazione e precipitazione cumulata. Campo pomodoro.

## 5.2.2 Campo coltivato a grano

Anche per il campo coltivato a grano, per calcolare la soglia di stress idrico, è stata applicata la metodologia di Allen et al., 1998 (FAO-foglio 56) (Capitolo 4.3):

$$\theta_{critico} = 0.1859$$

I valori della capacità di campo e del punto di appassimento sono quelli della calibrazione finale, rispettivamente pari a:

$$FC = 0.27$$

$$WP = 0.117$$

Il coefficiente di esaurimento  $p$  è stato fornito dalla FAO e, per il grano, assume un valore di:

$$p = 0.55$$

Il contenuto d'acqua totale presente nel terreno ed il contenuto d'acqua che può essere utilizzato dalla pianta senza provocare stress idrico sono pari a:

$$TAW = 0.153$$

$$RAW = 0.08$$

In Figura 5.28 sono riportate due simulazioni diverse: la prima utilizzando il modello FEST-EWB calibrato e i dati di irrigazione forniti dal Consorzio e la seconda applicando la metodologia SIM, introducendo quindi la soglia irrigua.

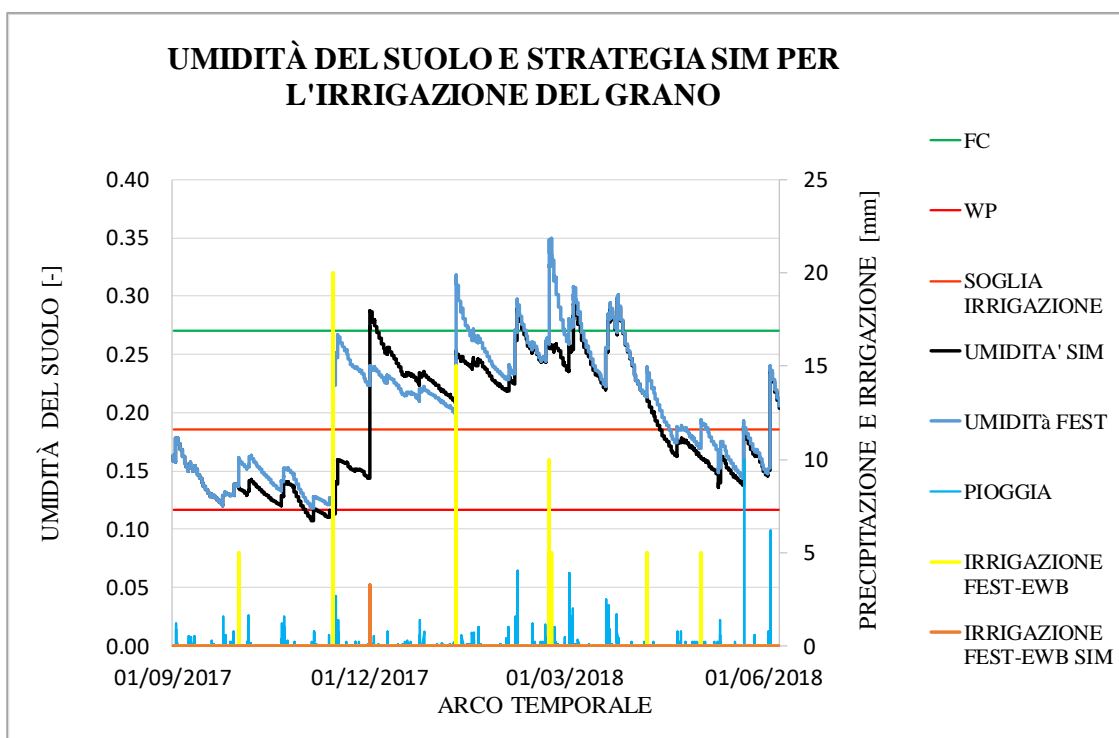


Figura 5.28: Umidità del suolo e strategia SIM per l'irrigazione del grano

Il grano, a differenza del pomodoro, è una coltura che non necessita di elevata disponibilità di acqua, infatti viene coltivato per parte della stagione in deficit idrico, come visibile nella parte iniziale e finale del grafico. L'umidità del suolo è infatti compresa tra la soglia di irrigazione ed il punto di appassimento.

Anche in questo caso, la metodologia SIM consente comunque di diminuire il numero di irrigazioni ed il relativo quantitativo d'acqua, come visibile dal confronto tra gli andamenti delle due umidità. In questa analisi la pioggia ha un ruolo più rilevante rispetto a quanto osservato per il pomodoro, poiché è sufficiente a mantenere l'umidità ad un livello adeguato al fabbisogno idrico del grano.

I quantitativi di acqua giornalieri per il grano sono riportati di seguito.

DATE IRRIGAZIONE OSSERVATA	IRRIGAZIONE OSSERVATA [mm/giorno]
01/01/2017	5
14/11/2017	20
10/01/2018	15
22/02/2018	19
23/02/2018	5
08/04/2018	5
03/05/2018	5

Tabella 5.7: Irrigazione osservata. Campo grano.

DATE IRRIGAZIONE SIM	IRRIGAZIONE SIM [mm/giorno]
01/12/2017	25.92

Tabella 5.8: Irrigazione con metodologia SIM.  
Campo grano.

La quantità totale di acqua per l'irrigazione osservata è pari a 74 mm, mentre quella ottenuta con la metodologia SIM è pari a 25.92 mm. La differenza tra i due approcci risulta meno evidente rispetto al caso del pomodoro a causa del minor fabbisogno idrico del grano, ma il metodo SIM, come mostrato in Figura 5.29, è comunque più efficace.

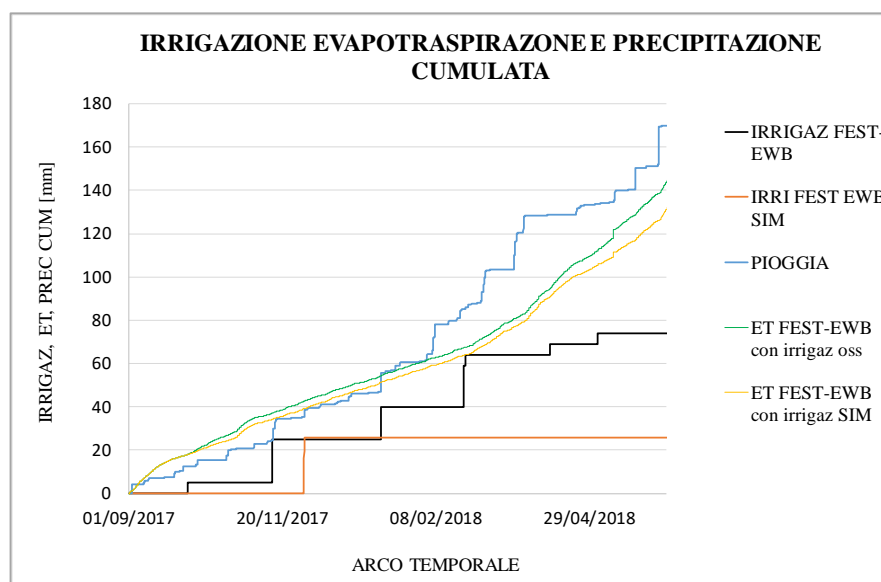


Figura 5.29: Irrigazione, evapotraspirazione e precipitazione cumulata. Campo grano.

## 5.3 Indicatori dell'uso dell'acqua

Il confronto dal punto di vista numerico tra la gestione dell'irrigazione operata dal Consorzio e a seguito dell'applicazione della metodologia SIM è stato effettuato per entrambe le colture calcolando diversi indicatori dell'uso dell'acqua (Capitolo 4.4).

### 5.3.1 Campo coltivato a pomodoro

Gli indicatori calcolati sono quelli riportati nel Capitolo 4.4.

La resa del grano è stata resa disponibile dal Consorzio ed è pari a 9.8 kg/m<sup>2</sup>.

Il dato di pioggia cumulata annua è pari a 0.027 m, i parametri di FC e WP sono quelli della simulazione finale e l'umidità è quella calcolata ad ogni istante temporale dal FEST-EWB e dal FEST-EWB con SIM. I valori di evapotraspirazione, irrigazione e percolazione cumulata annua simulati dal FEST-EWB con irrigazione osservata e ottenuti a seguito dell'applicazione della metodologia SIM sono riportati in Tabella 5.10.

	<b>FEST-EWB con irrigazione osservata</b>	<b>FEST-EWB con irrigazione SIM</b>
<b>ET cum annua [m]</b>	0.22	0.21
<b>Irrigazione cum annua [m]</b>	1.63	0.3
<b>Percolazione cum annua [m]</b>	0.71	0.11

Tabella 5.9: Evapotraspirazione, irrigazione e percolazione cumulata annua simulata dal FEST-EWB con irrigazione osservata e dal FEST-EWB con irrigazione SIM

I valori degli indicatori sono riportati nella Tabella 5.11.

	<b>WUE [Kg/m3]</b>	<b>IWUE [Kg/m3]</b>	<b>RSWD</b>	<b>Deficit di percolazione</b>	<b>Efficienza irrigazione</b>
<b>FEST-EWB con irrigazione osservata</b>	44.55	6.01	0.98	0.57	0.13
<b>FEST-EWB con SIM</b>	46.67	32.67	0.98	0.66	0.64

Tabella 5.10: Indicatori pomodoro dai dati del FEST-EWB con irrigazione osservata e dal FEST-EWB con irrigazione SIM

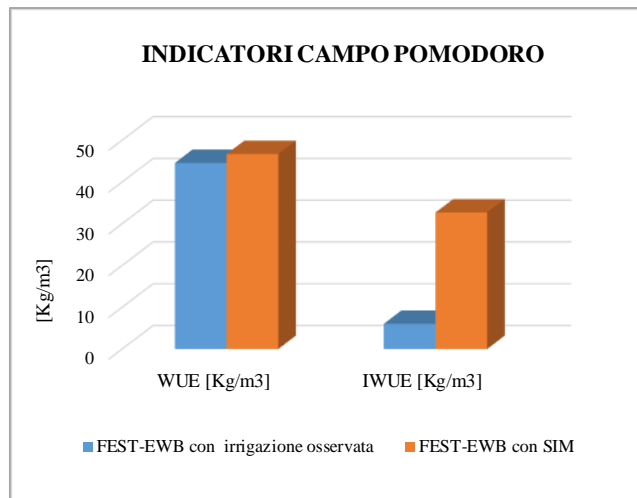


Figura 5.30: WUE e IWUE dai dati del FEST-EWB con irrigazione osservata e del FEST-EWB con irrigazione SIM. Campo pomodoro.

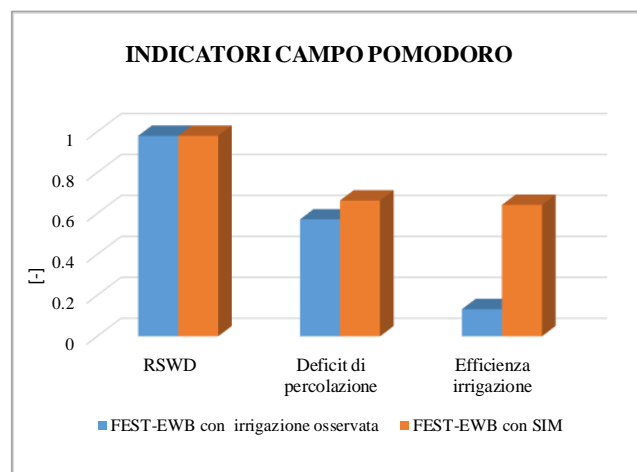


Figura 5.31: RSWD, deficit di percolazione ed efficienza dell'irrigazione dai dati del FEST-EWB con irrigazione osservata e del FEST-EWB con irrigazione SIM. Campo pomodoro.

Gli indicatori dimostrano come la metodologia SIM sia effettivamente più efficiente nella gestione dell'acqua a scopo irriguo, specialmente confrontando i valori di IWUE ed efficienza dell'irrigazione.

### 5.3.2 Campo coltivato a grano

Anche per il campo coltivato a grano sono stati calcolati gli stessi indicatori valutati per la coltivazione a pomodoro.

La resa del grano è stata sempre fornita dal Consorzio ed è pari a 0.265 kg/m<sup>2</sup>.

Il dato di pioggia cumulata annua è pari a 0.17 m, i parametri di FC e WP sono quelli della simulazione finale e l'umidità è quella calcolata ad ogni istante temporale dal FEST-EWB e dal FEST-EWB con SIM. I valori di evapotraspirazione, irrigazione e percolazione cumulata annua con irrigazione osservata e ottenuti a seguito dell'applicazione della metodologia SIM sono riportati in Tabella 5.11.

	<b>FEST-EWB con irrigazione osservata</b>	<b>FEST-EWB con irrigazione SIM</b>
<b>ET cum annua [m]</b>	0.14	0.13
<b>Irrigazione cum annua [m]</b>	0.074	0.03
<b>Percolazione cum annua [m]</b>	0.09	0.06

Tabella 5.11: Evapotraspirazione, irrigazione e percolazione simulata dal FEST-EWB con irrigazione osservata e dal FEST-EWB con irrigazione SIM

I valori degli indicatori sono invece riassunti in tabella 5.1

	<b>WUE [kg/m<sup>3</sup>]</b>	<b>IWUE [kg/m<sup>3</sup>]</b>	<b>RSWD</b>	<b>DEFICIT PERCOLAZIONE</b>	<b>EFFICIENZA IRRIGAZIONE</b>
<b>FEST-EWB con irrigazione osservata</b>	1.83	3.58	0.99	0.63	0.59
<b>FEST-EWB con SIM</b>	2.00	10.22	0.99	0.72	0.68

Tabella 5.12: Indicatori grano dai dati del FEST-EWB con irrigazione osservata e dal FEST-EWB con irrigazione SIM



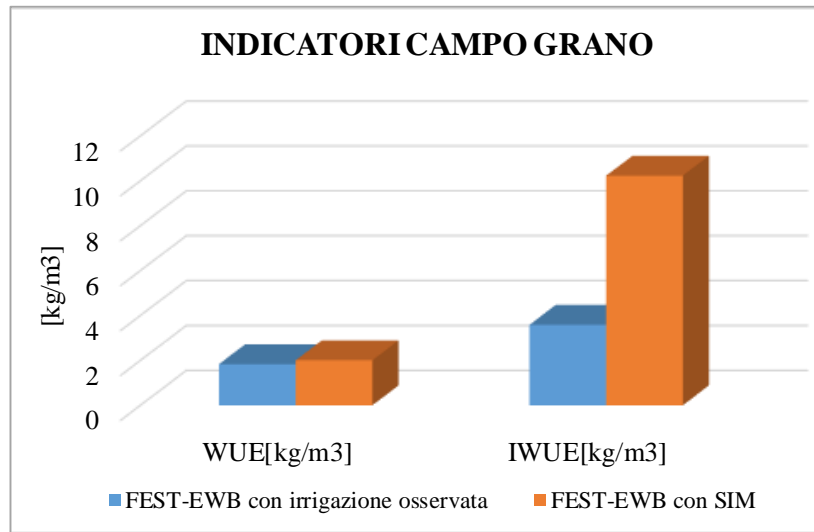


Figura 5.32: WUE e IWUE dai dati del FEST-EWB con irrigazione osservata e dal FEST-EWB con irrigazione SIM. Campo grano

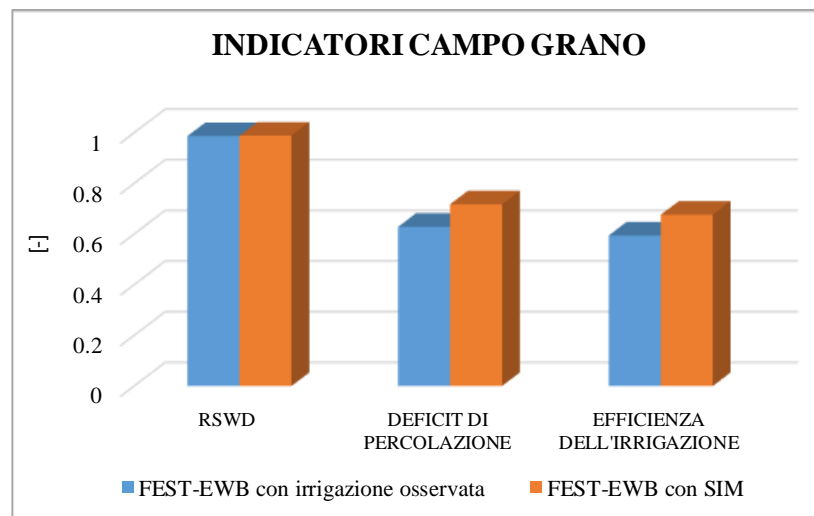


Figura 5.33: RSWD, deficit di percolazione ed efficienza dell'irrigazione dai dati del FEST-EWB con irrigazione osservata e dal FEST-EWB con irrigazione SIM. Campo grano

Anche in questo caso la metodologia SIM dimostra la propria efficienza maggiore nella gestione dell'uso dell'acqua per l'irrigazione.



## **CAPITOLO 6**

### **ANALISI A SCALA DI BACINO**

In questo capitolo vengono riportati i risultati dell'analisi effettuata a scala di bacino, ovvero estesa all'intero comprensorio del Sud Fortore. A differenza di quanto svolto a scala puntuale, in questo caso è stata effettuata una validazione del modello FEST-EWB per gli anni 2017 e 2018, sulla base di parametri del suolo e della vegetazione già calibrati in un lavoro di tesi precedente (De Pedrini, 2017).

La validazione è stata effettuata con le immagini di temperatura superficiale del suolo fornite dai satelliti dei programmi Landsat e Sentinel, e confrontate con quelle simulate dal FEST-EWB. L'analisi a scala di bacino è stata eseguita a diverse risoluzioni spaziali al suolo, partendo da un livello di dettaglio elevato pari a 30 m per poi scalare a risoluzioni più basse di 1 km e 10 km. Il motivo di questa scelta risiede nel verificare la possibilità di utilizzare gli stessi parametri iniziali anche in aree in cui non si ha una disponibilità dettagliata dei dati.

## 6.1 Analisi alla risoluzione spaziale di 30 m

L'analisi alla risoluzione spaziale più elevata e con il maggior grado di dettaglio è stata svolta a 30 m e i dati fanno riferimento all'intero comprensorio del Sud Fortore. Inizialmente l'irrigazione è stata distribuita in modo uniforme su tutto il bacino, poi solo nelle aree in cui era presente la vegetazione ed infine esclusivamente nei campi con vegetazione verde e rigogliosa, caratterizzati da un valore di NDVI elevato. Questi accorgimenti hanno permesso al FEST-EWB di simulare in modo più corretto la temperatura superficiale del suolo, anche tenendo in considerazione sia la presenza che il diverso fabbisogno irriguo delle colture. Il pomodoro necessita infatti di irrigazione costante per tutta la stagione di crescita ed è caratterizzato da un valore di NDVI elevato, mentre il grano non richiede, come già evidenziato precedentemente nell'analisi puntuale, di consistenti quantitativi idrici ed assume valori di NDVI più modesti, specialmente nella fase della stagione in cui assume la tipica colorazione gialla.

Le prime analisi fanno quindi riferimento all'irrigazione distribuita uniformemente su tutto il bacino. Il software Matlab è stato utilizzato per elaborare le mappe di temperatura superficiale del suolo (LST), confrontando i risultati delle simulazioni del FEST-EWB con le immagini osservate dai satelliti Landsat 7, Landsat 8 e Sentinel 3. Sono state quindi calcolate le medie delle immagini di LST simulate e osservate, separatamente per i 3 satelliti considerati nell'analisi, che vengono riportate nelle figure 6.1, 6.2 e 6.3. Si può subito notare come le temperature simulate dal modello siano generalmente sovrastimate rispetto ai valori misurati dal Landsat 7 e sottostimate, soprattutto nei mesi estivi, nel caso del Landsat 8. Per il Sentinel 3 si riscontrano invece differenze maggiori rispetto agli altri due satelliti a causa della diversa risoluzione al suolo iniziale del Sentinel 3, pari a 1 km, successivamente ricampionata a 30 m per poter effettuare il confronto con il FEST-EWB.

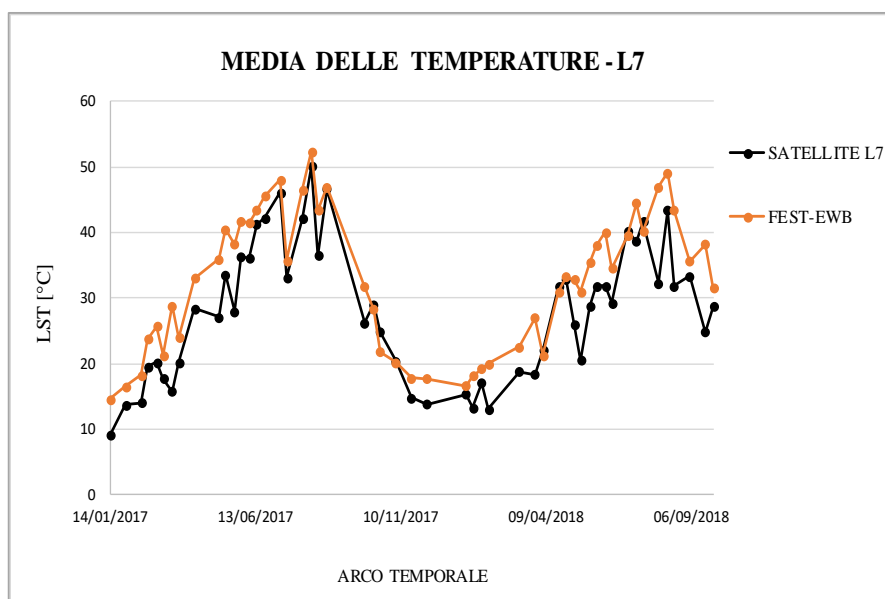


Figura 6.1: Confronto delle medie di temperature delle immagini simulate dal FEST-EWB con quelle osservate dal satellite L7 a 30 m

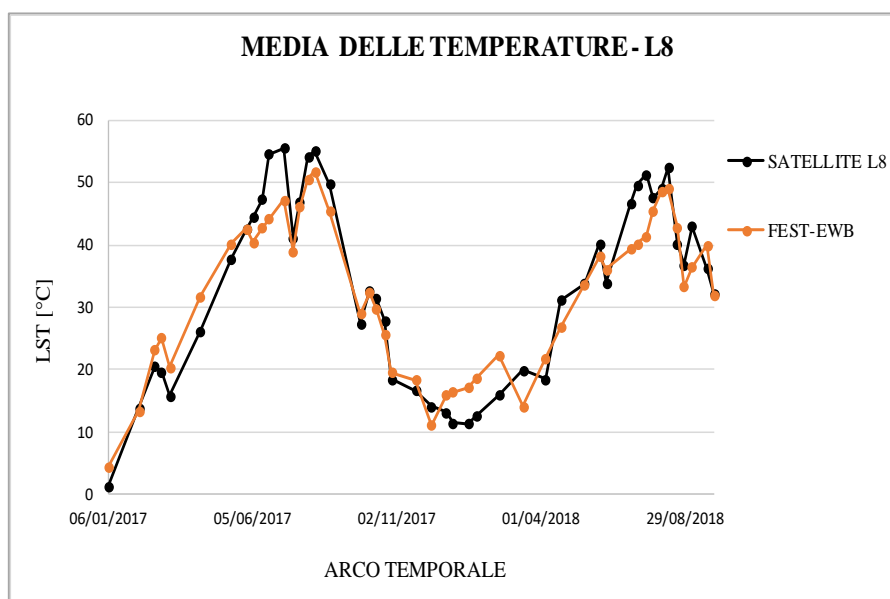


Figura 6.2: Confronto delle medie di temperature delle immagini simulate dal FEST-EWB con quelle osservate dal satellite L8 a 30 m

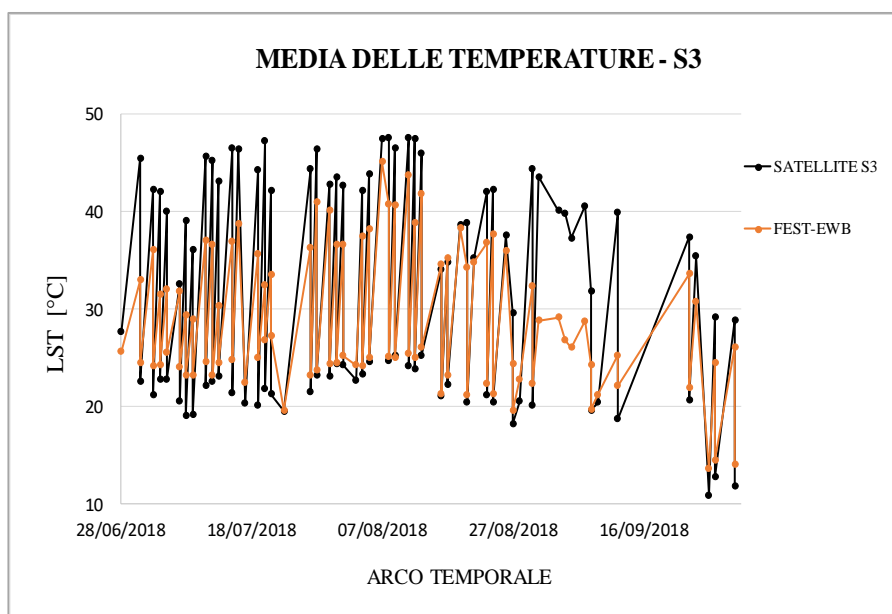


Figura 6.3: Confronto delle medie di temperature delle immagini simulate dal FEST-EWB con quelle osservate dal satellite S3A a 30 m

Per quanto riguarda il Sentinel 3, si osserva, tra le misure simulate e osservate da satellite, una corrispondenza migliore di notte quando la temperatura superficiale del suolo tende ad uniformarsi su tutto il comprensorio; di giorno, invece, le differenze sono maggiori probabilmente a causa del contributo della vegetazione, che genera un abbassamento localizzato delle temperature.

Per avere anche un riscontro numerico degli errori tra le temperature simulate dal modello FEST-EWB e quelle osservate da satellite si riportano le medie delle differenze assolute, valutate in ogni pixel e suddivise in base alla stagione (Tabella 6.1).

°C	INVERNO	PRIMAVERA	ESTATE	AUTUNNO	VALORE MEDIO
<b>L7</b>	5.11	6.66	6.07	4.90	5.36
<b>L8</b>	4.68	4.69	6.68	3.18	5.08
<b>S3A</b>	-	-	5.18	3.28	5.02

Tabella 6.1: Riepilogo valori delle differenze assolute valutate in ogni pixel per L7, L8 e S3A a 30 m con irrigazione distribuita

Per determinare quali aree contribuiscono maggiormente all'incremento delle differenze tra le temperature simulate e osservate, sono state calcolate le medie delle immagini dei satelliti e del FEST-EWB facendo riferimento all'indice di frazione vegetata FV, che ha permesso di distinguere suolo nudo ( $FV < 0.05$ ), aree mediamente vegetate ( $0.05 < FV < 0.5$ ) e aree fortemente vegetate ( $FV > 0.5$ ). Nelle figure seguenti vengono riportati i risultati delle analisi.

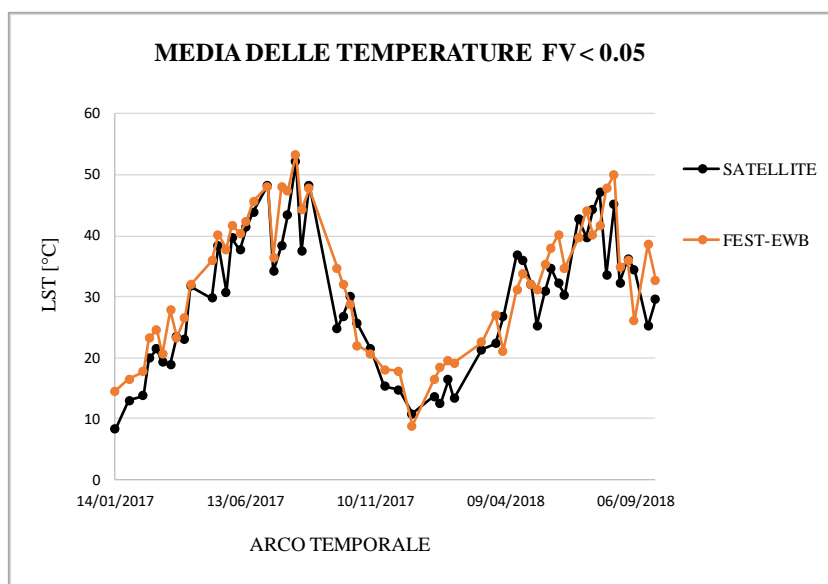


Figura 6.4: Confronto delle medie di temperature delle immagini simulate dal FEST-EWB con quelle osservate dal satellite L7 con indice di frazione vegetata minore di 0.05

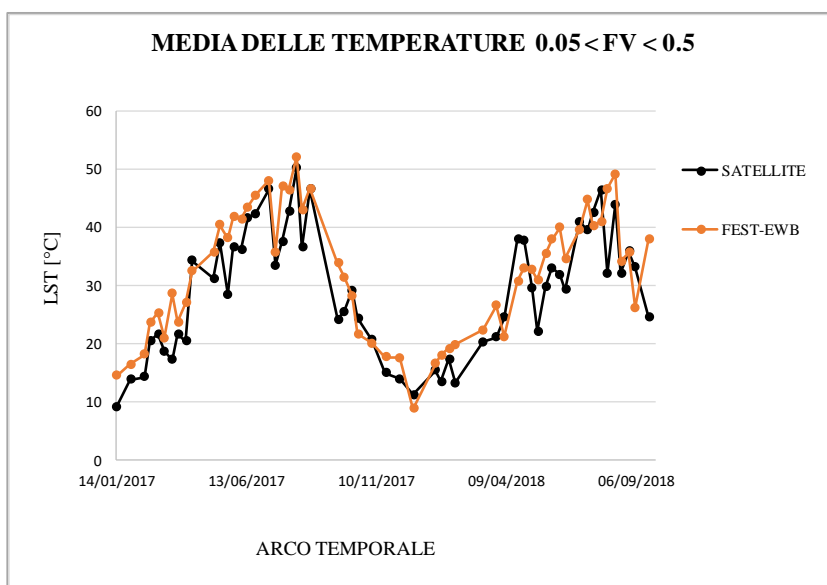


Figura 6.5: Confronto delle medie di temperature delle immagini simulate dal FEST-EWB con quelle osservate dal satellite L7 con indice di frazione vegetata compreso tra 0.05 e 0.5

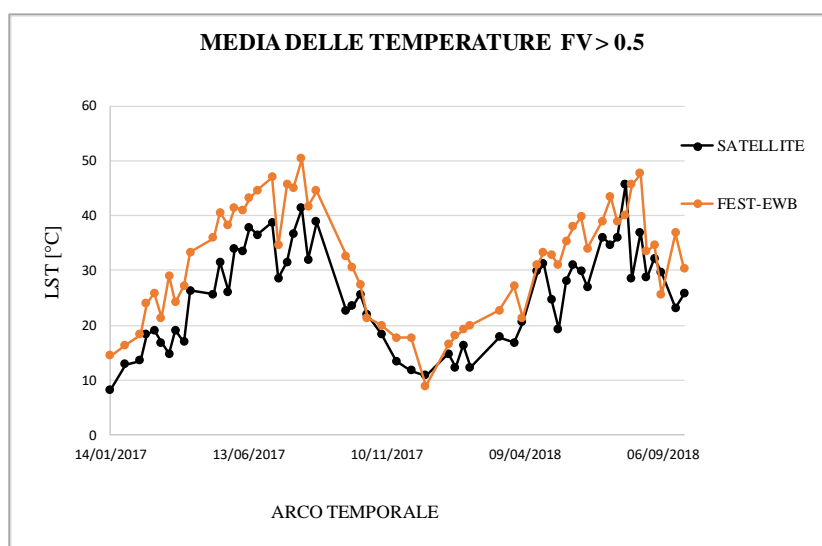


Figura 6.6: Confronto delle medie di temperature delle immagini simulate dal FEST-EWB con quelle osservate dal satellite L7 con indice di frazione vegetata maggiore di 0.5

Si può notare come le differenze maggiori tra le temperature superficiali del suolo siano più elevate nel caso di aree fortemente vegetate ( $FV > 0.5$ ), la presenza della vegetazione riveste quindi un ruolo determinante nei risultati delle simulazioni e richiede quindi una trattazione più approfondita che verrà effettuata nel capitolo successivo.



### 6.1.1 Miglioramento distribuzione dell'irrigazione nel FEST-EWB

Dal confronto tra i valori di temperatura osservati dai satelliti e quelli simulati dal modello FEST-EWB sono state riscontrate delle differenze, come già evidenziato in precedenza (Tabella 6.1). Per cercare di migliorare le simulazioni e renderle più simili ai dati osservati, si è deciso di distribuire l'irrigazione solo nelle aree vegetate ed escludere quindi le zone caratterizzate da suolo nudo, dove non è necessario fornire il supporto idrico.

L'applicazione di questo approccio ha consentito di migliorare le temperature simulate, soprattutto nelle aree con vegetazione maggiore, dove è stata ottenuta una corrispondenza più accurata rispetto ai dati satellitari, specialmente nei periodi estivi (Figura 6.7).

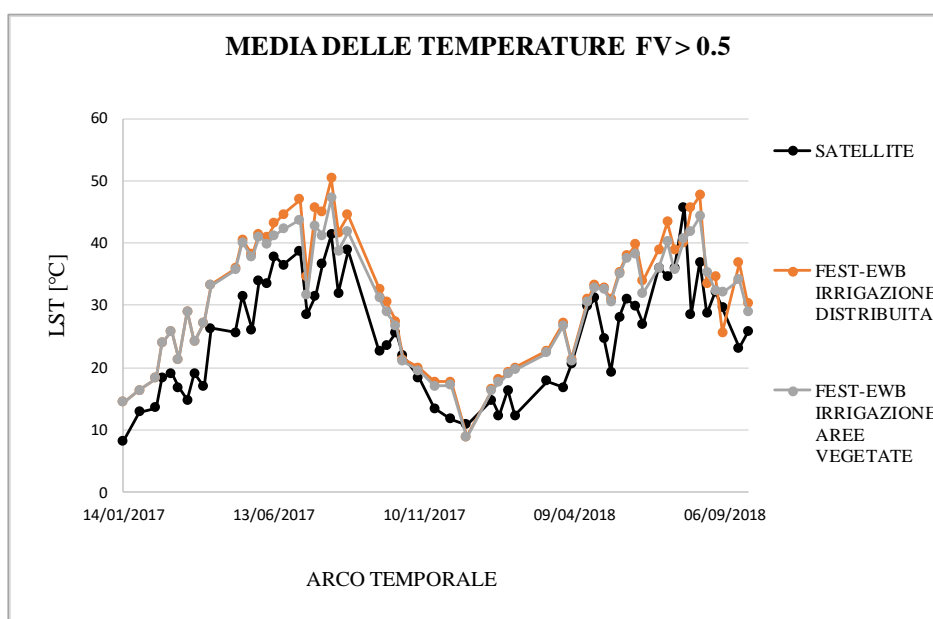


Figura 6.7: Miglioramento distribuzione irrigazione nel FEST-EWB: confronto tra l'approccio con irrigazione distribuita e solo nelle aree vegetate, rispetto ai dati osservati dal satellite L7 con  $FV > 0.5$

Per affinare ulteriormente i valori di temperatura superficiale, si è pensato di operare una distinzione tra le colture più diffuse nel comprensorio, pomodoro e grano, caratterizzate anche da fabbisogni idrici molto differenti; il pomodoro, rispetto al grano, richiede infatti elevati quantitativi di acqua.

La diversificazione tra le colture è stata basata sull'NDVI, un indice che può assumere valori tra 0 e 1 e permette di identificare la presenza e lo stato di salute della vegetazione.

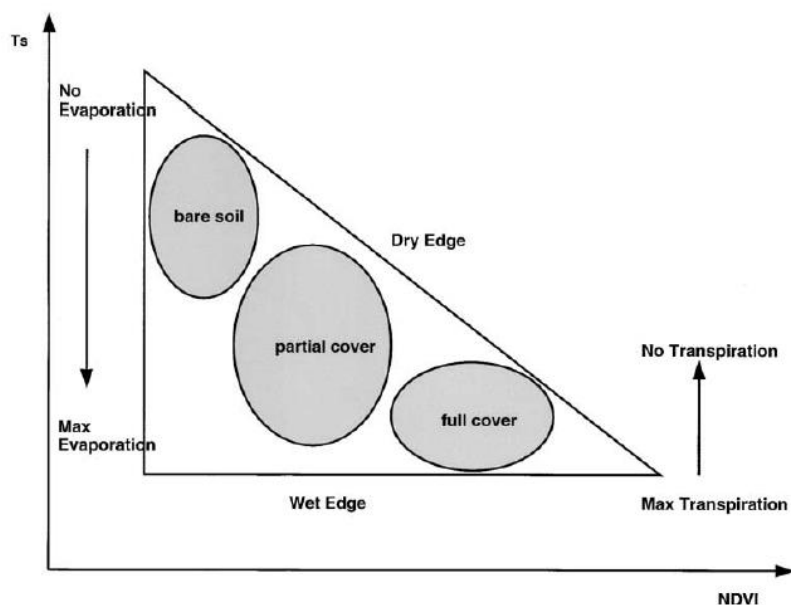


Figura 6.8: Relazione tra indice NDVI, temperature superficiale e copertura della vegetazione

In questo modo è stato possibile escludere dall'irrigazione i campi di grano nella stagione in cui assumono una colorazione da verde a gialla tipica dei mesi primaverili ed estivi, caratterizzati da valori di NDVI molto più bassi. Questo non accade invece per il pomodoro che si mantiene verde per tutta la stagione e ed ha quindi associato un valore di NDVI sempre elevato.

In Figura 6.9 è stato rappresentato l'andamento dell'NDVI per gli anni 2017-2018, sia in corrispondenza del campo analizzato a scala puntuale, dove si sono alternate le colture di pomodoro e grano, che in un campo vicino coltivato a grano per entrambi gli anni. Considerando il 2017, si può notare come l'NDVI assuma valori più alti nei periodi in cui le colture sono più verdi e rigogliose, rispettivamente nei mesi invernali per il grano ed in quelli primaverili ed estivi per il pomodoro. Nel 2018 i due campi sono invece stati entrambi coltivati a grano ed infatti l'andamento dell'NDVI è simile.

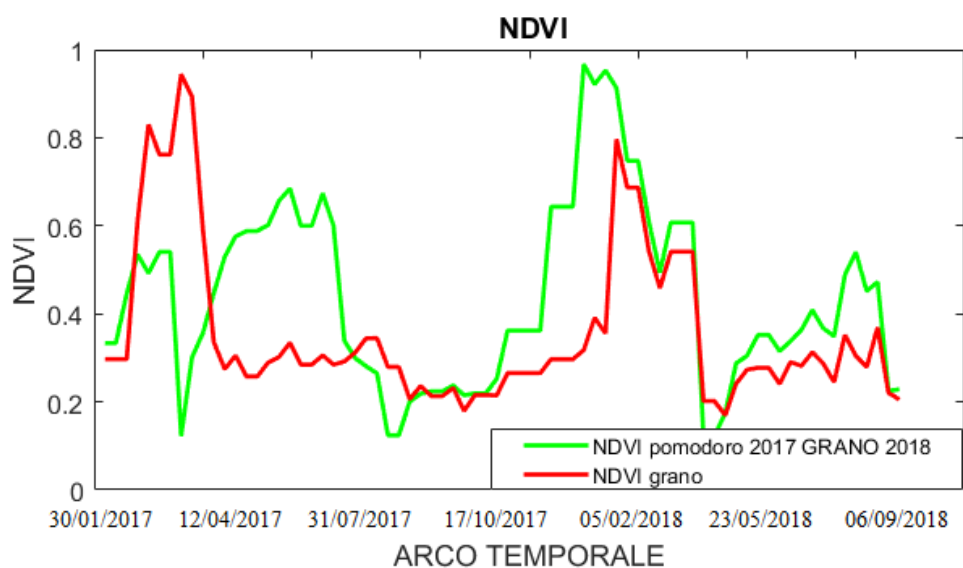


Figura 6.9: Andamento puntuale NDVI per le colture di grano e di pomodoro per gli anni 2017 e 2018

Sempre con riferimento al 2017 e distinguendo pomodoro e grano, anche la temperatura superficiale del suolo è influenzata dalla tipologia di coltura, assumendo valori più elevati in corrispondenza di NDVI bassi e valori più bassi in corrispondenza di NDVI elevati (Figura 6.10).

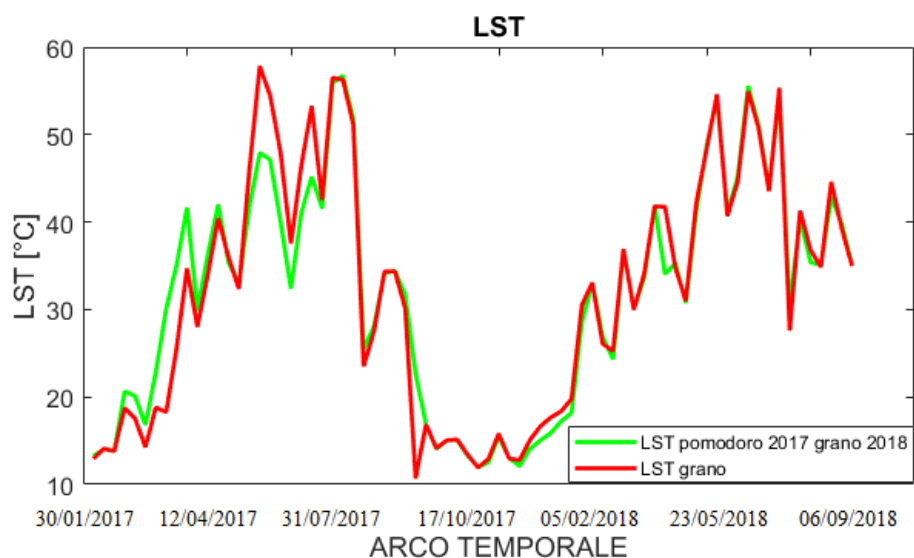


Figura 6.10: Andamento temperatura superficiale per le colture di grano e di pomodoro per gli anni 2017 e 2018

Per verificare che l'andamento della LST non dipenda solamente dalla stagionalità, è stato calcolato l'indice di stress idrico della coltura (CSWI):

$$CSWI = \frac{LST - LST_{min}}{LST_{max} - LST_{min}}$$

che ha confermato come la temperatura superficiale sia effettivamente influenzata dalla presenza e dallo stato della vegetazione (Figura 6.11).

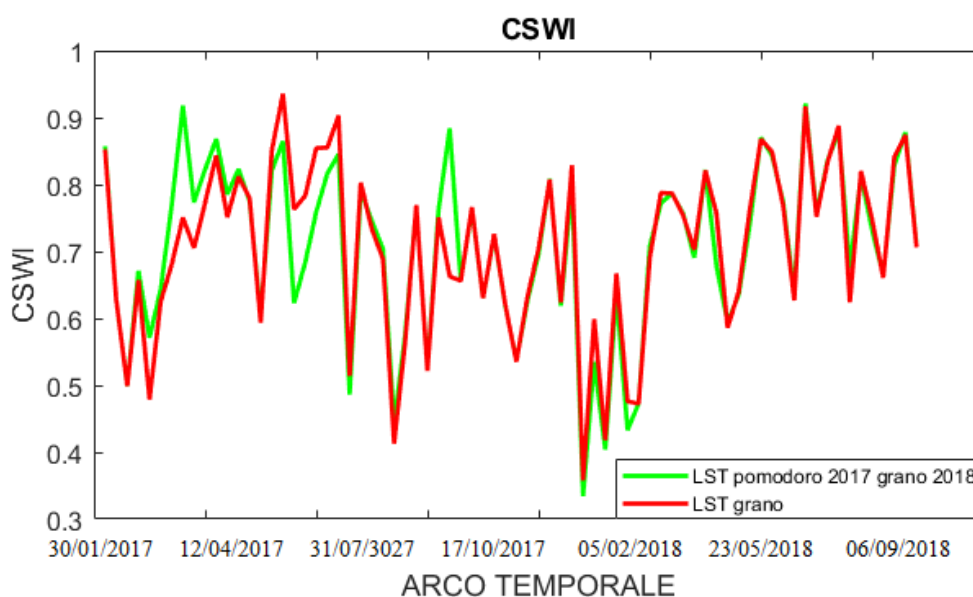


Figura 6.11: Andamento CSWI per le colture di grano e di pomodoro per gli anni 2017 e 2018

I tre diversi approcci considerati per la distribuzione dell'irrigazione nel FEST-EWB sono poi stati confrontati nelle figure seguenti, separatamente per i satelliti L7, L8 ed S3. Le differenze maggiori si notano prevalentemente nei periodi primaverili ed estivi, ovvero nei periodi maggiormente irrigui, mentre risultano pressoché simili nel resto dell'anno.

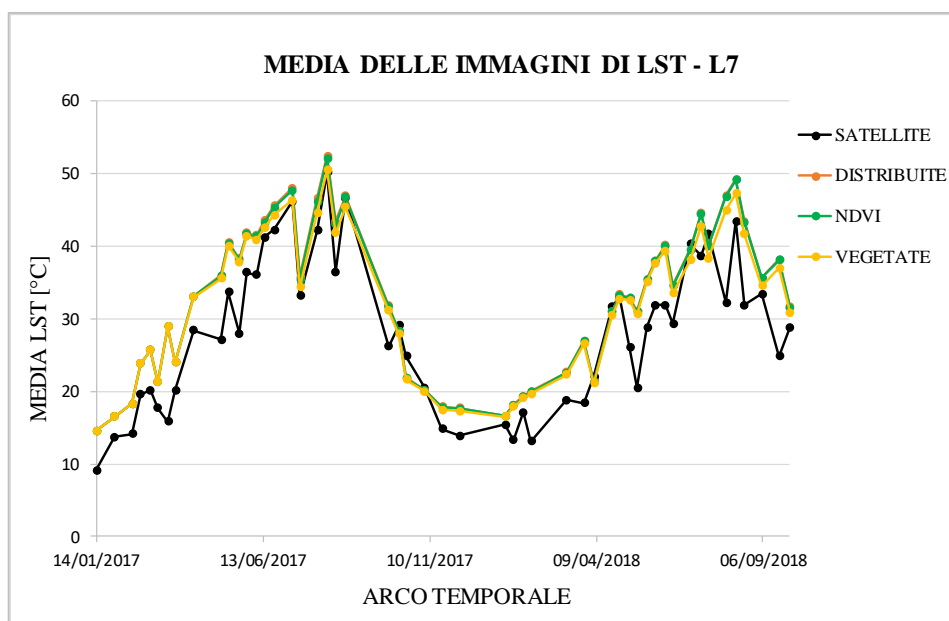


Figura 6.12: Confronto tra le medie di temperatura delle immagini simulate con i 3 approcci utilizzati per migliorare la distribuzione dell'irrigazione nel FEST-EWB rispetto a quelle osservate dal satellite L7

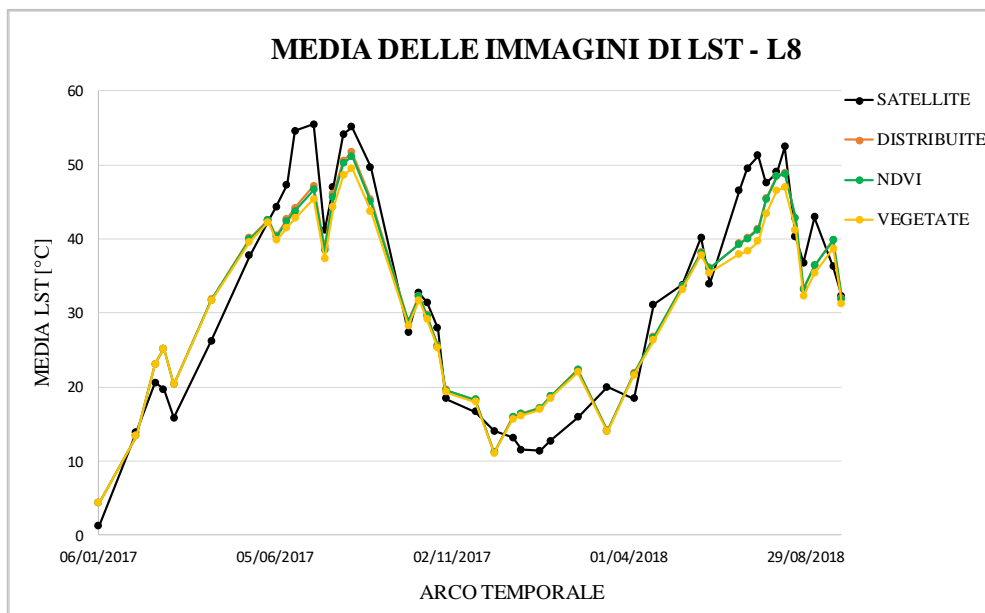


Figura 6.13: Confronto tra le medie di temperatura delle immagini simulate con i 3 approcci utilizzati per migliorare la distribuzione dell'irrigazione nel FEST-EWB rispetto a quelle osservate dal satellite L8

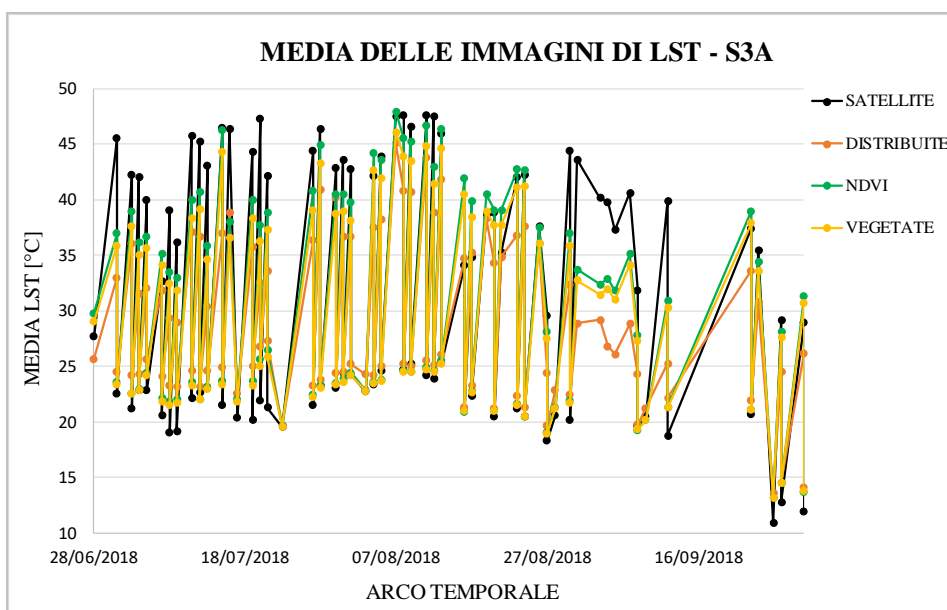


Figura 6.14: Confronto tra le medie di temperatura delle immagini simulate con i 3 approcci utilizzati per migliorare la distribuzione dell'irrigazione nel FEST-EWB rispetto a quelle osservate dal satellite S3A

Relativamente ai satelliti Landsat, più attendibili rispetto al Sentinel poiché caratterizzati da una risoluzione al suolo più elevata, sono stati eseguiti degli ingrandimenti in corrispondenza dei mesi estivi, dove si hanno le maggiori differenze a causa del contributo più marcato della vegetazione.

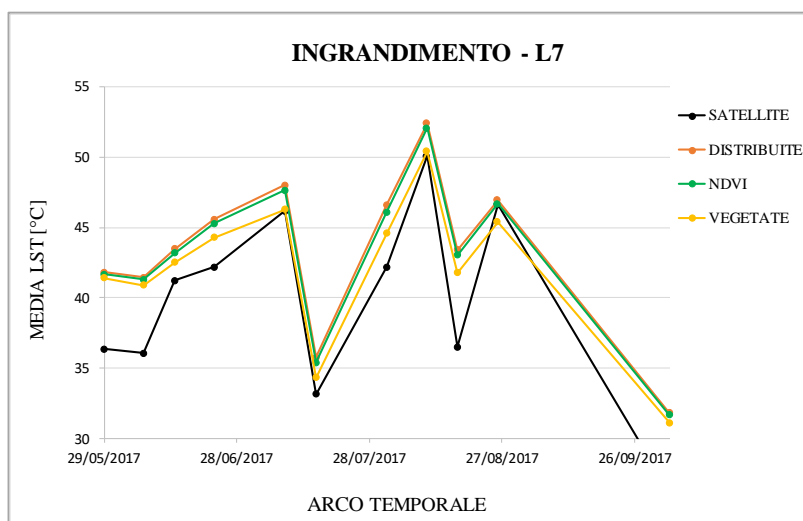


Figura 6.15: Ingrandimento mesi estivi Landsat 7

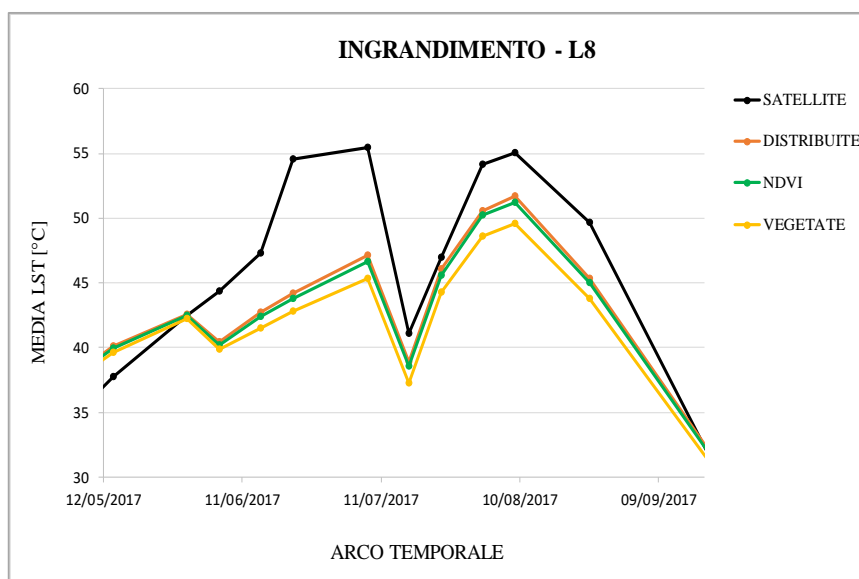


Figura 6.16: Ingrandimento mesi estivi Landsat 8

La simulazione con irrigazione nelle sole aree vegetate è quella che più si avvicina ai dati osservati dal satellite Landsat 7, mentre nel caso del Landsat 8 la simulazione con irrigazione distribuita sull'intero bacino approssima meglio le misure da satellite. Come già detto nel Capitolo 3.2.1, il Landsat 7 è il satellite che più si avvicina ai dati simulati dalla stazione Eddy Covariance, quindi il più attendibile.

Essendo questi risultati ottenuti dalla media delle immagini, è stata poi effettuata un'analisi più dettagliata considerando alcune mappe dell'intero comprensorio e analizzando la distribuzione delle temperature. Nelle mappe riportate come esempio vengono confrontate le misure del Landsat 7 relative al 14/06/2017 e al 09/07/2017 con le simulazioni del FEST-EWB, periodo estivo in cui si notano le differenze maggiori tra gli approcci considerati. Si può osservare come le temperature simulate risultino più alte rispetto a quelle misurate dal satellite a causa di una sovrastima operata dal modello, come già detto in precedenza. Sono però ben visibili le differenze tra il caso di irrigazione distribuita sull'intero bacino e quello di irrigazione fornita solo nelle aree vegetate; in quest'ultimo scenario si notano infatti temperature mediamente più basse localizzate proprio in corrispondenza dei campi coltivati e dovute alla distribuzione dello stesso quantitativo idrico su un'area complessivamente più piccola. Le mappe nelle quali si è irrigato considerando il valore dell'NDVI

rappresentano un caso intermedio tra le due precedenti, con presenza di aree “azzurre” maggiori rispetto al caso di irrigazione distribuita, ma minori rispetto al caso di irrigazioni nelle sole aree vegetate, poiché vengono escluse le colture del grano.

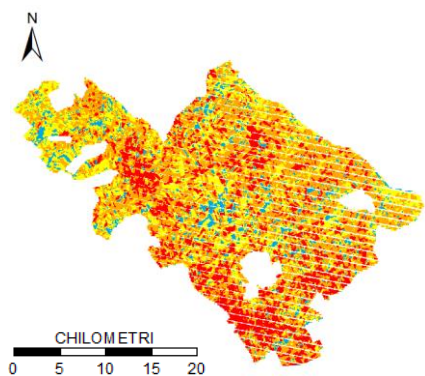


Figura 6.17: Mappa LST satellite L7 14/06/2017

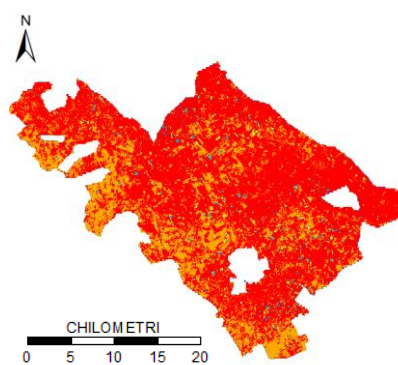


Figura 6.18: Mappa LST irrigazione distribuita 14/06/2017

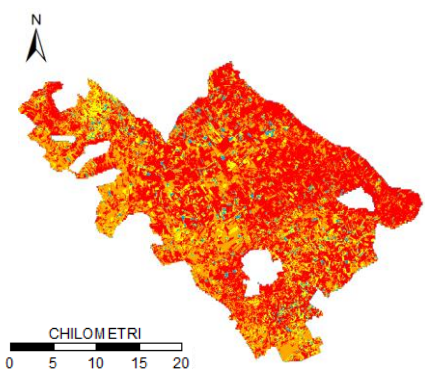


Figura 6.19: Mappa LST aree vegetate 14/06/2017

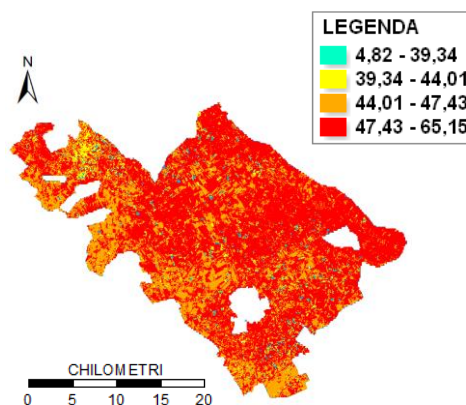


Figura 6.20: Mappa LST con NDVI 14/06/2017

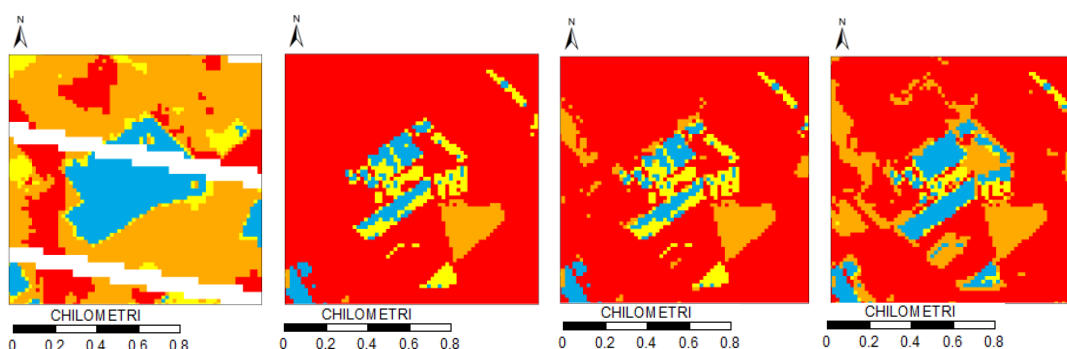


Figura 6.21: Ingrandimento campo 1: mappa satellite, irrigazione distribuita, aree vegetate, NDVI



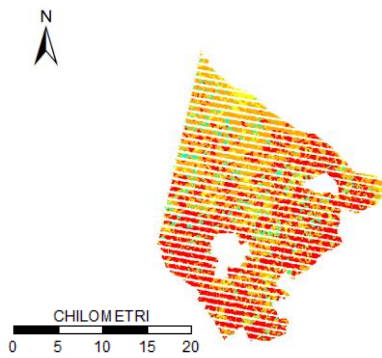


Figura 6.22: Mappa LST satellite L7 09/07/2017

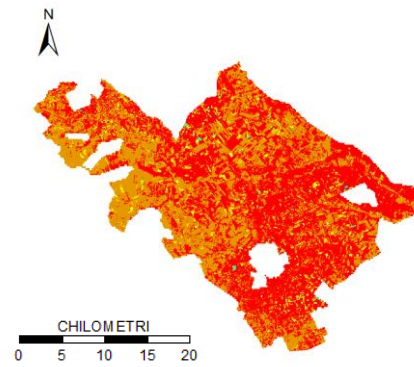


Figura 6.23: Mappa LST irrigazione distribuita 09/07/2017

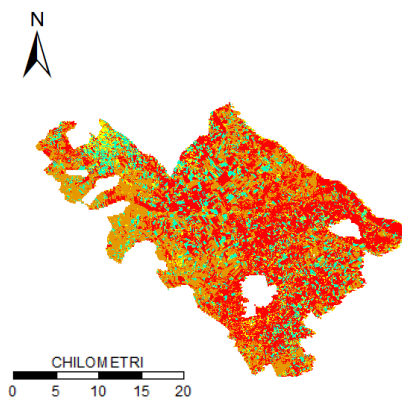


Figura 6.24: Mappa LST aree vegetate 09/07/2017

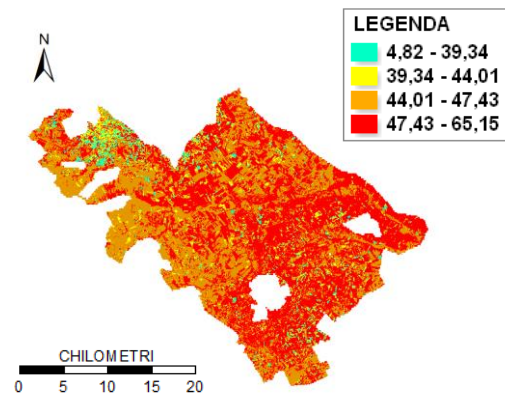


Figura 6.25: Mappa LST con NDVI 09/07/2017

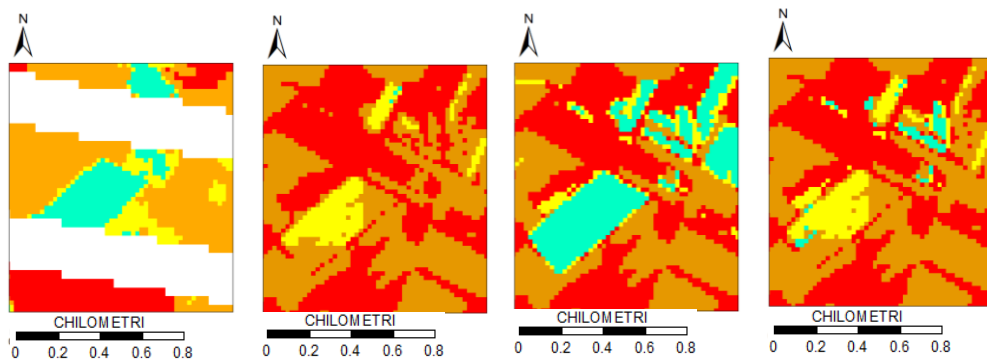


Figura 6.26: Ingrandimento campo 2: mappa satellite, irrigazione distribuita, aree vegetate, NDVI

Osservando gli ingrandimenti dei campi, si nota una migliore corrispondenza tra le temperature superficiali nelle mappe con irrigazione delle sole aree vegetate, dove i confini dei campi irrigati vengono meglio rappresentati.

## 6.1.2 Calcolo degli errori alla risoluzione spaziale di 30 m

Dopo aver confrontato i vari approcci per la distribuzione dell'irrigazione nel comprensorio, il metodo migliore è risultato quello con irrigazione distribuita nelle sole aree vegetate. Si riportano di seguito i risultati ottenuti dalla modellazione, confrontando, per ogni immagine, le medie delle differenze assolute tra i valori simulati e osservati da satellite, valutate in ogni pixel e suddivise in base alla stagione. Le differenze maggiori si ottengono in primavera ed estate, in accordo con quanto visto in precedenza.

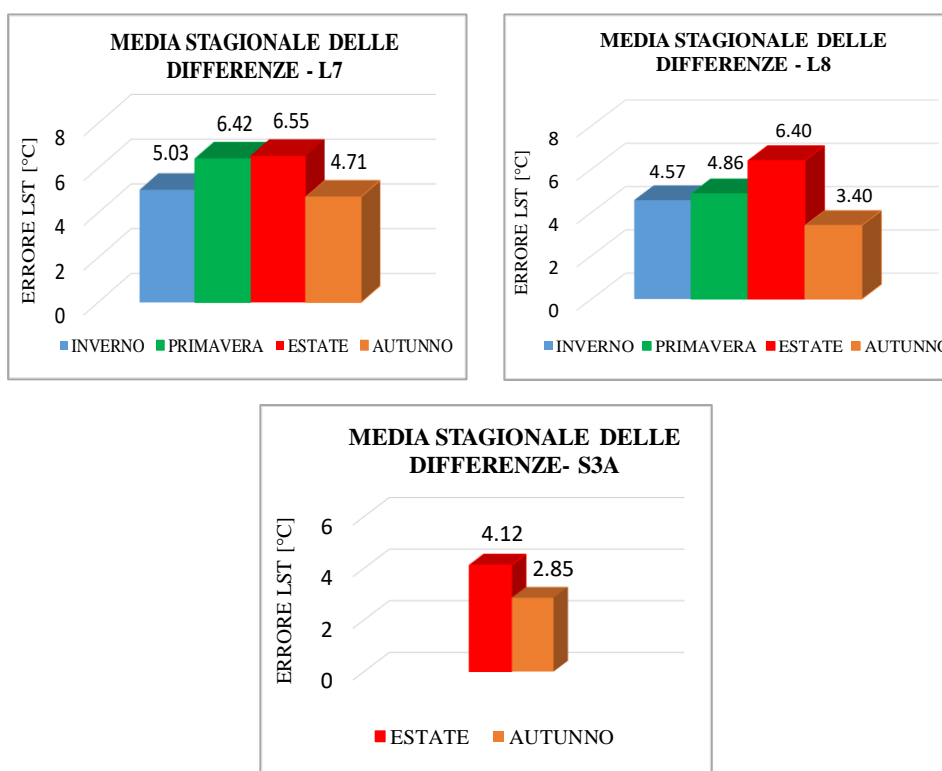
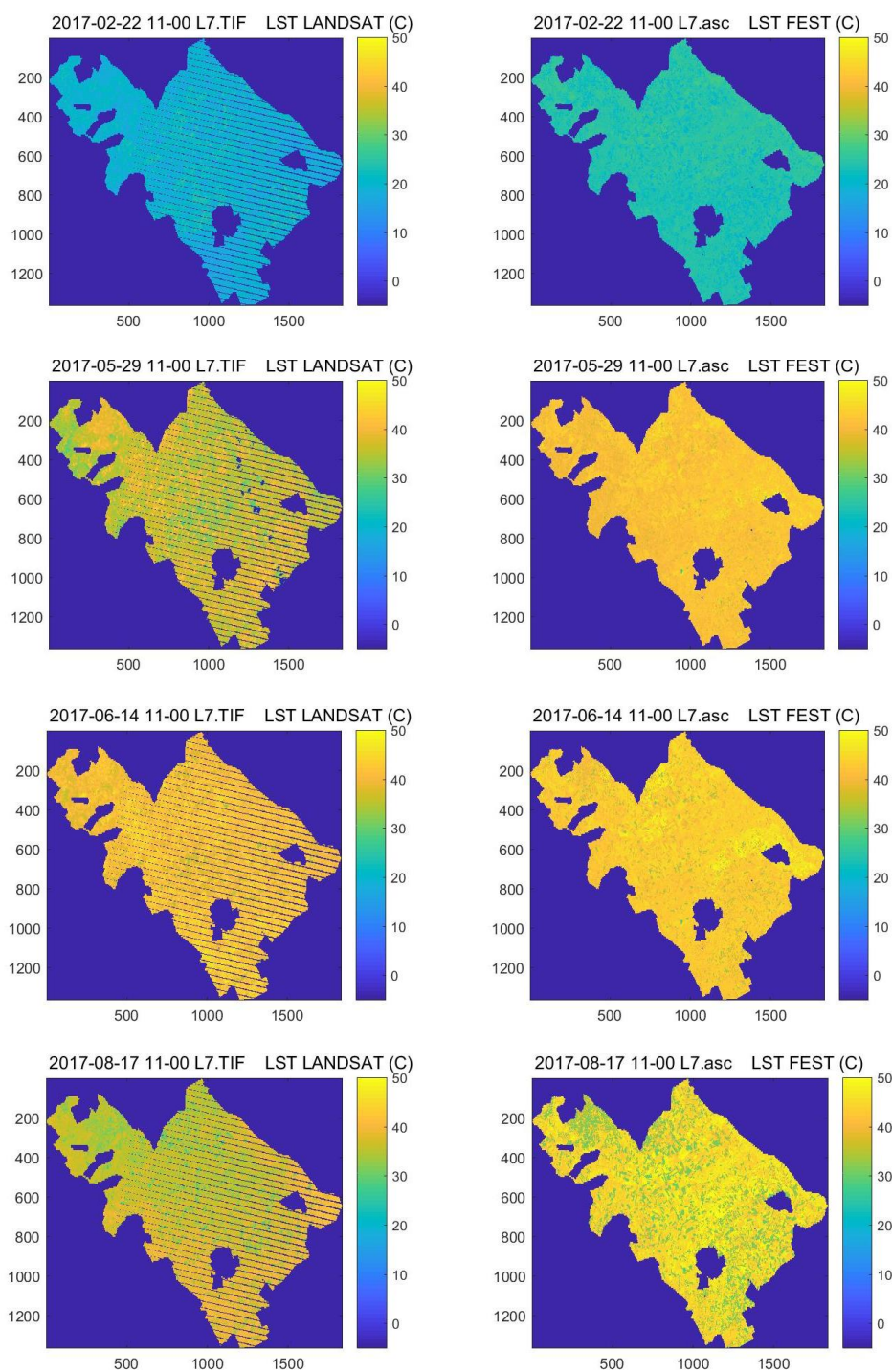


Figura 6.27: Medie stagionali delle differenze assolute valutate in ogni pixel per L7, L8 e S3A a 30 m

°C	INVERNO	PRIMAVERA	ESTATE	AUTUNNO	VALORE MEDIO
<b>L7</b>	5.03	6.42	6.55	4.71	5.86
<b>L8</b>	4.57	4.86	6.40	3.40	5.67
<b>S3A</b>	-	-	4.12	2.85	4.013

Tabella 6.1: Riepilogo valori delle differenze assolute valutate in ogni pixel per L7, L8 e S3A a 30 m

Le mappe osservate da satellite e quelle simulate dal FEST-EWB sono state tra loro confrontate nelle stesse date, in ordine per L7, L8 e S3A. Dai risultati si può notare come il modello sia stato in grado di ricostruire in modo abbastanza accurato la distribuzione delle temperature del comprensorio.



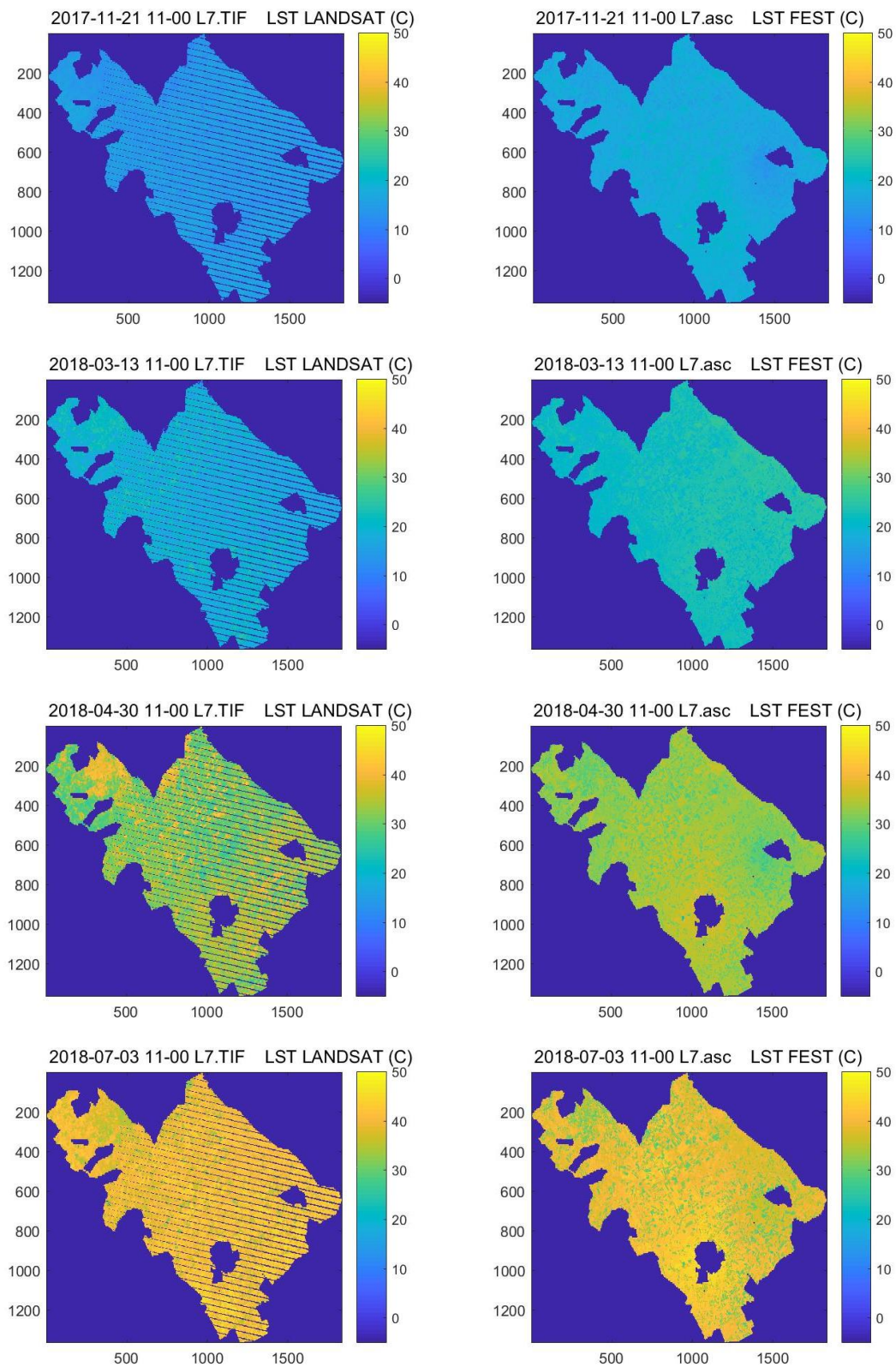
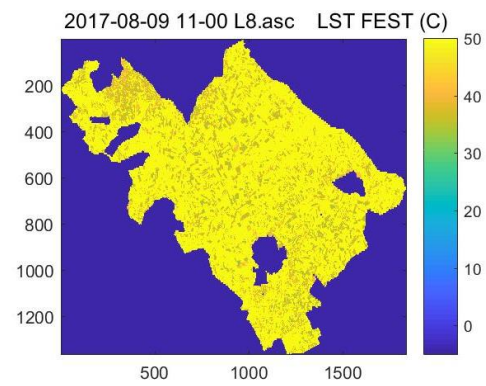
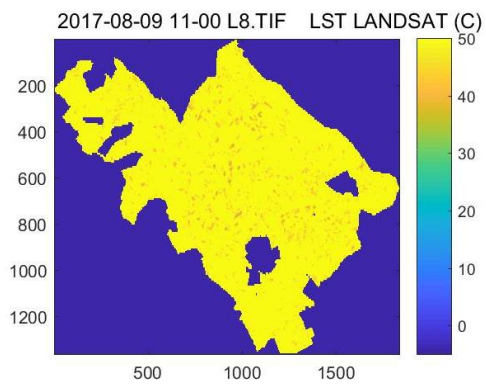
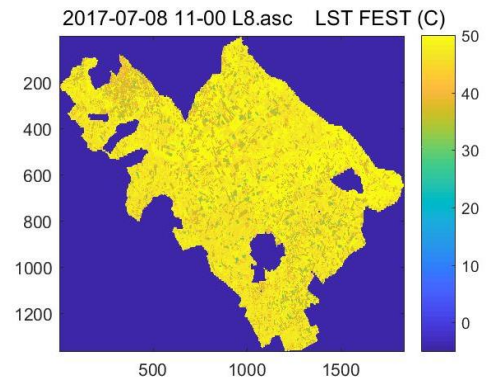
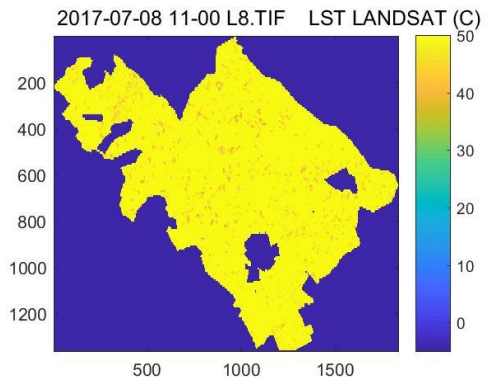
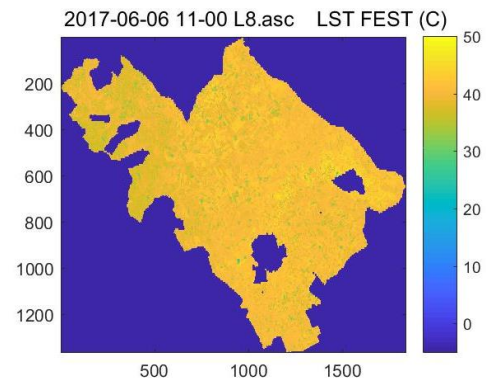
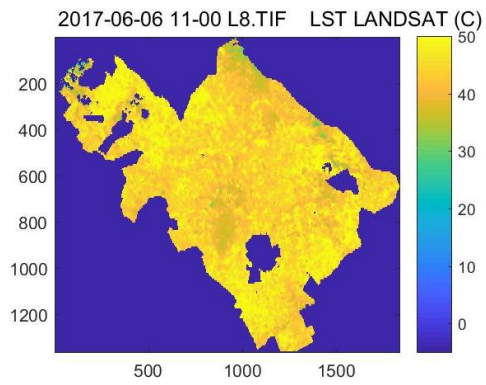
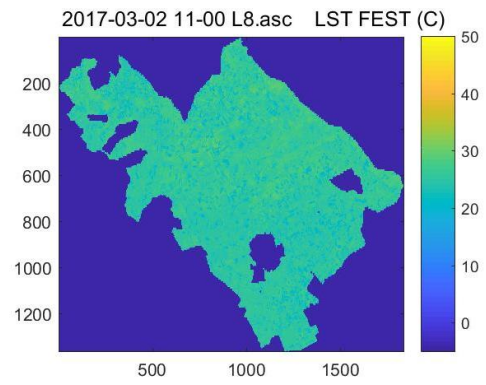
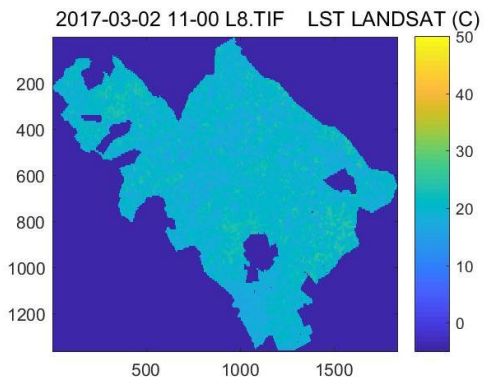


Figura 6.28: Confronto mappe LST Landsat 7 e FEST-EWB a 30 m





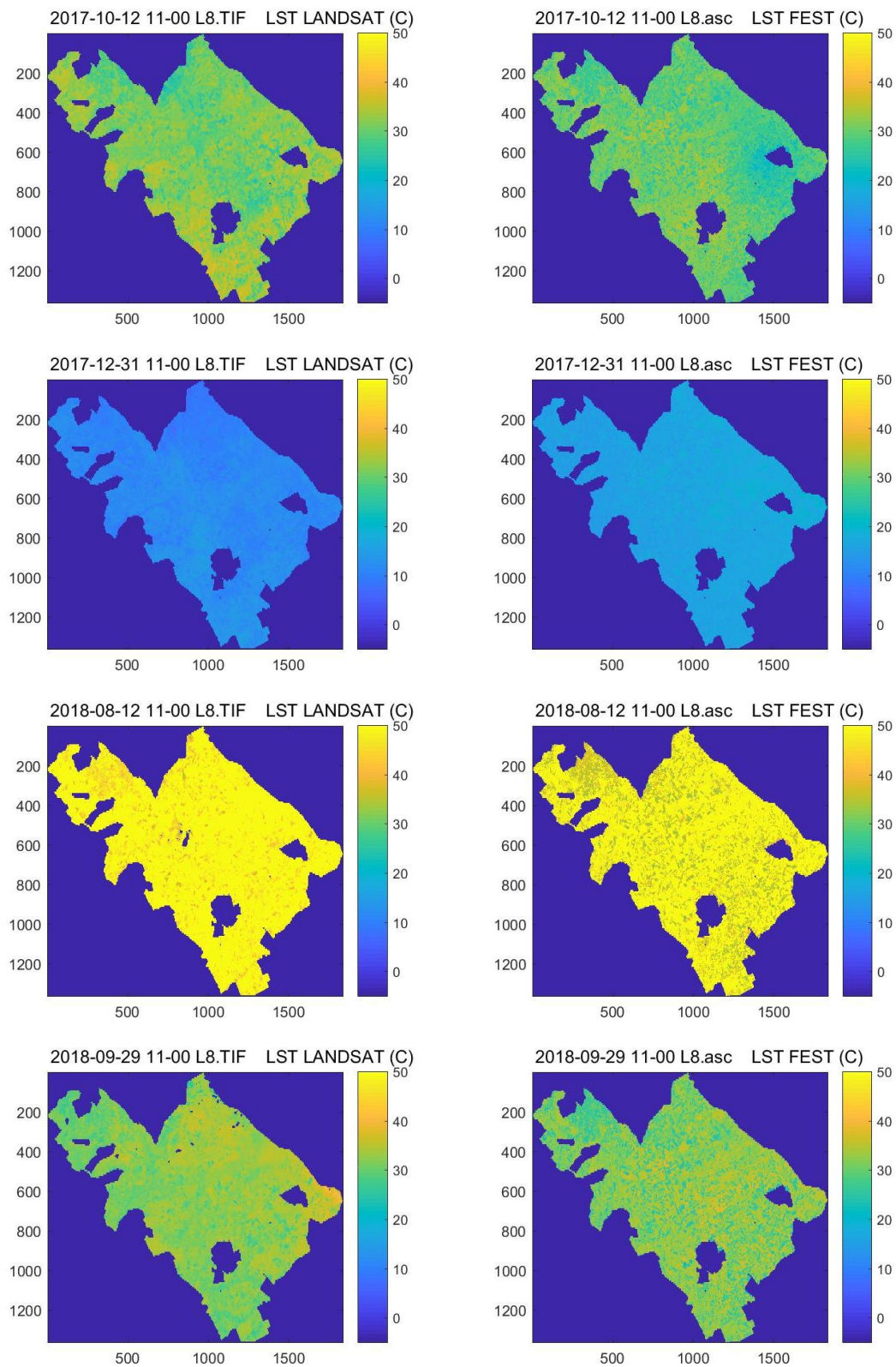
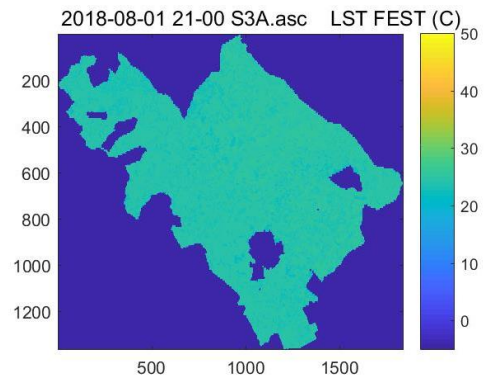
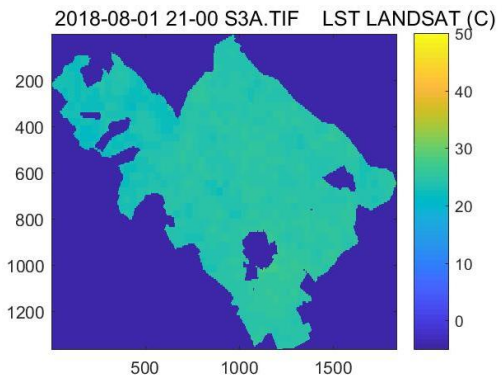
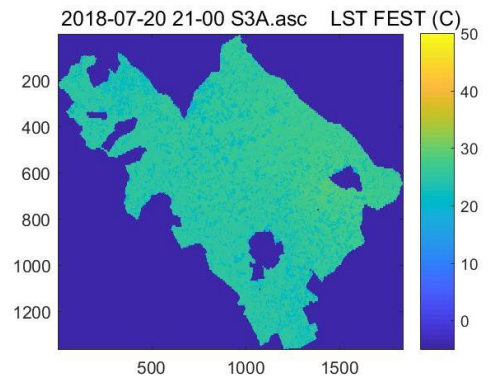
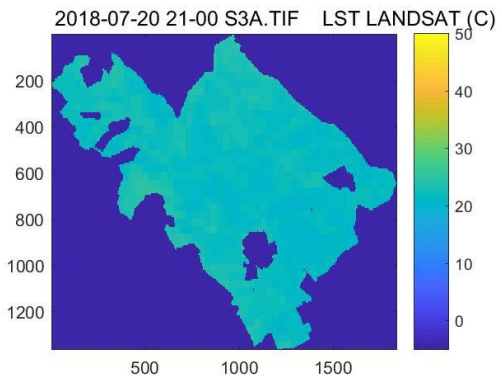
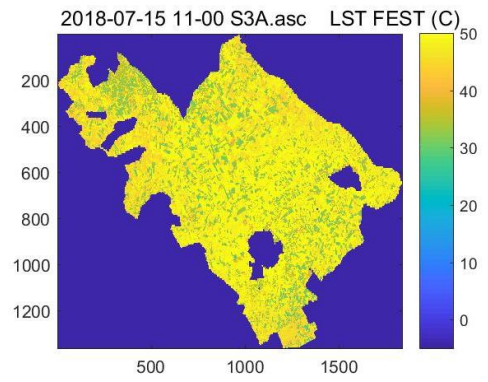
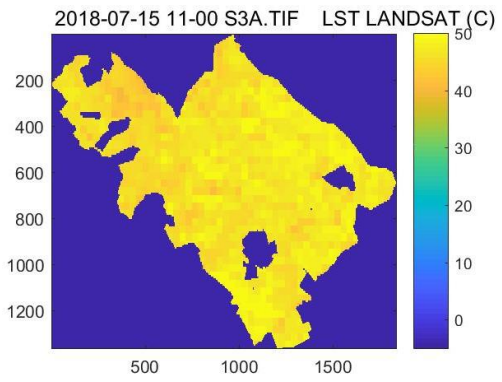
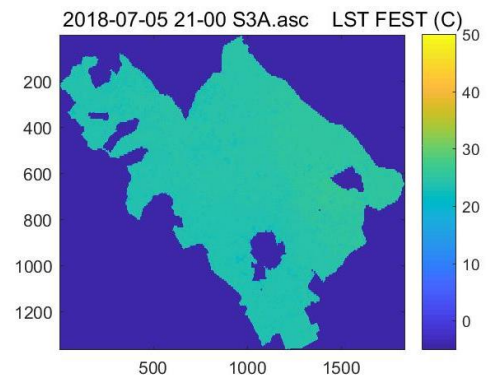
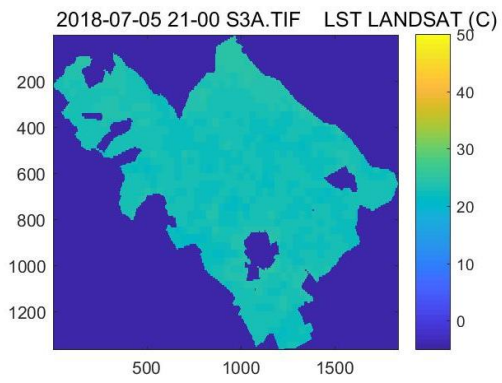


Figura 6.29: Confronto mappe LST Landsat 8 e FEST-EWB a 30 m





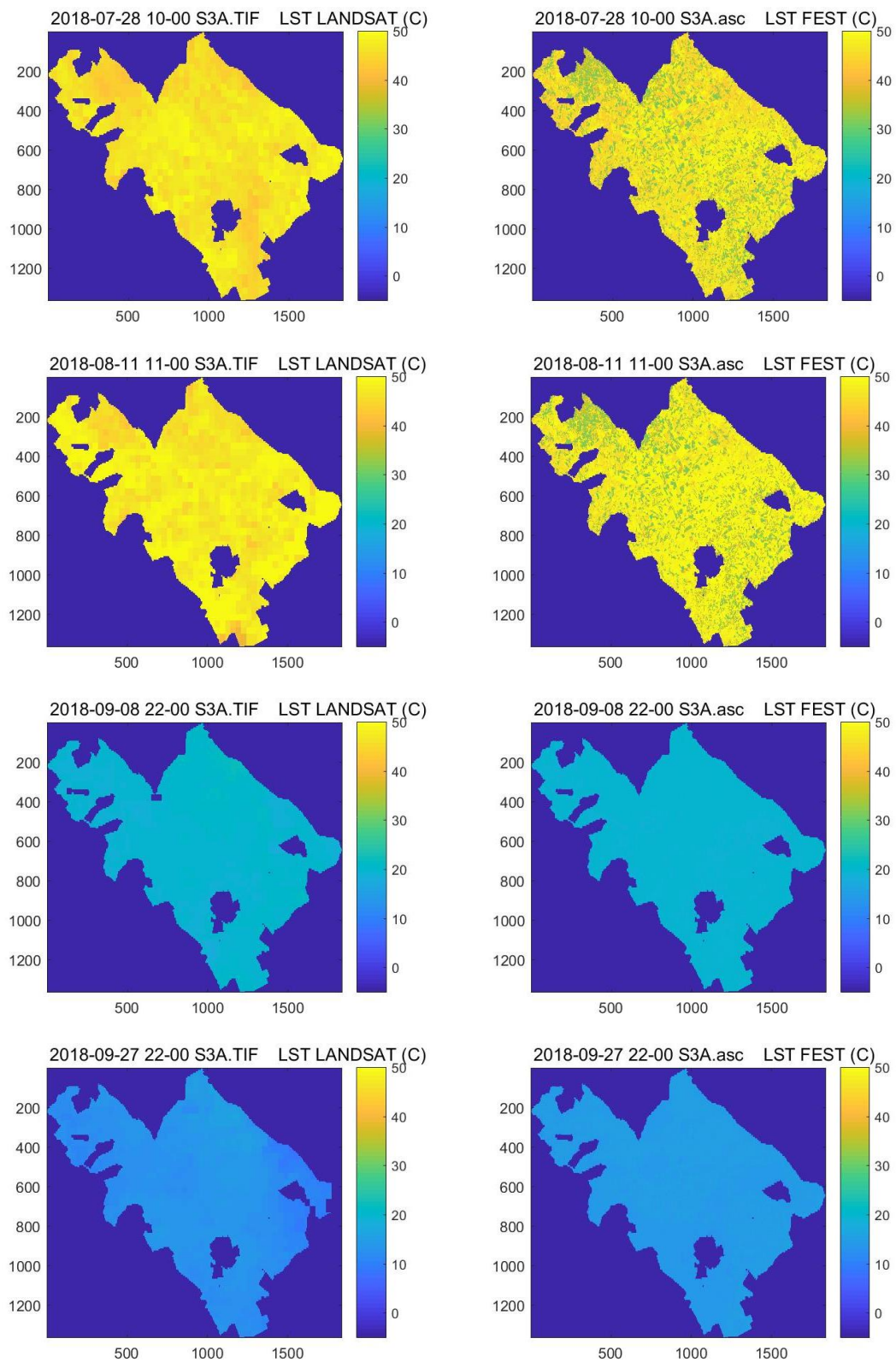


Figura 6.30: Confronto mappe LST Sentinel 3A e FESST-EWB a 30 m



## 6.2 Analisi alla risoluzione spaziale di 1 km

Le stesse analisi svolte a 30 m sono state ripetute anche alla risoluzione spaziale di 1 km per analizzare come il livello di dettaglio al suolo influisce sui risultati. Le mappe osservate dai satelliti sono state convertite ad 1 km con il software Matlab per poter effettuare il confronto con le mappe simulate dal FEST-EWB. Sono state quindi calcolate le medie delle immagini di LST simulate dal modello e osservate dai due satelliti Landsat e dal Sentinel. I valori di temperatura simulati dal FEST-EWB sono generalmente più bassi di qualche grado rispetto a quelli ottenuti a 30 m e questo è dovuto alla perdita di dettaglio che si verifica in seguito all'aggregazione di più celle, rendendo le differenze tra i valori osservati e simulati meno evidenti. L'andamento complessivo è comunque rispettato ed il confronto con i dati osservati è buono.

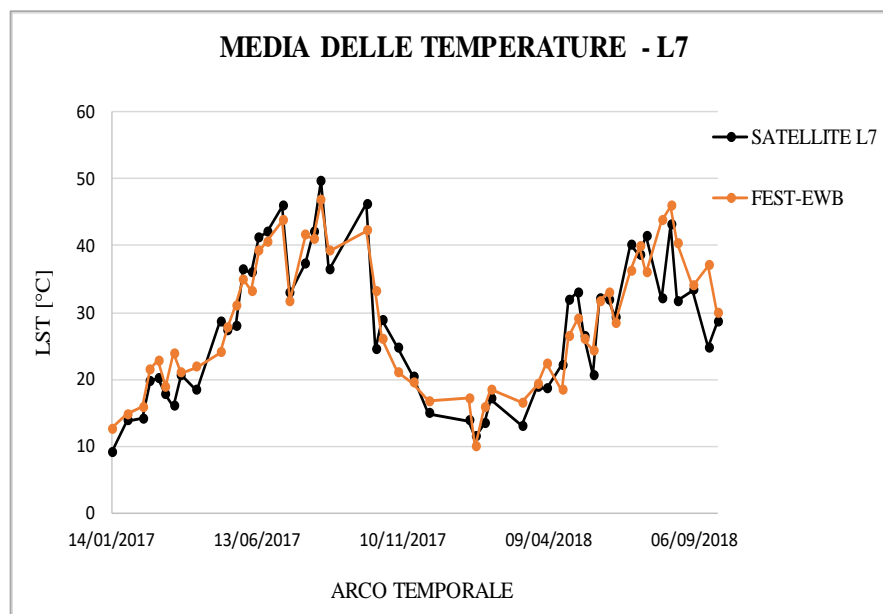


Figura 6.31: Confronto tra le medie di temperature delle immagini simulate dal FEST-EWB e quelle osservate dal satellite L7 a 1 km

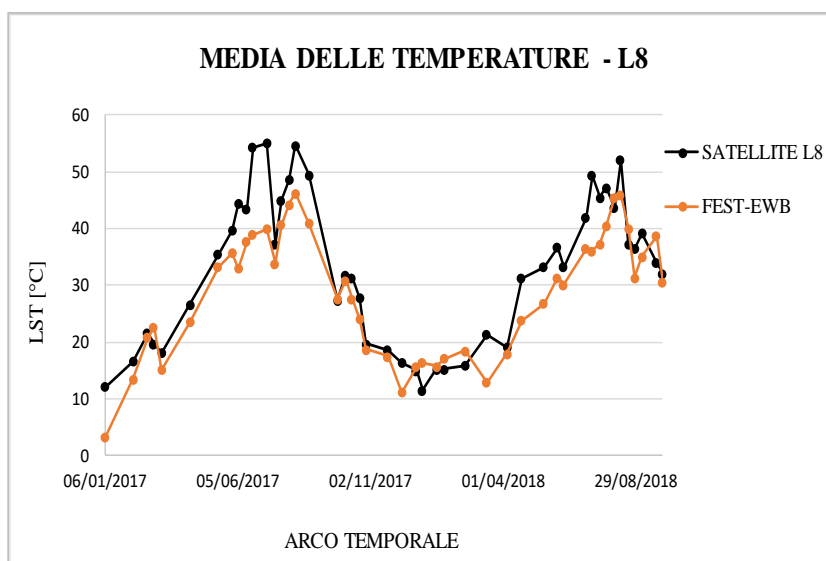


Figura 6.32: Confronto tra le medie di temperature delle immagini simulate dal FEST-EWB e quelle osservate dal satellite L8 a 1 km

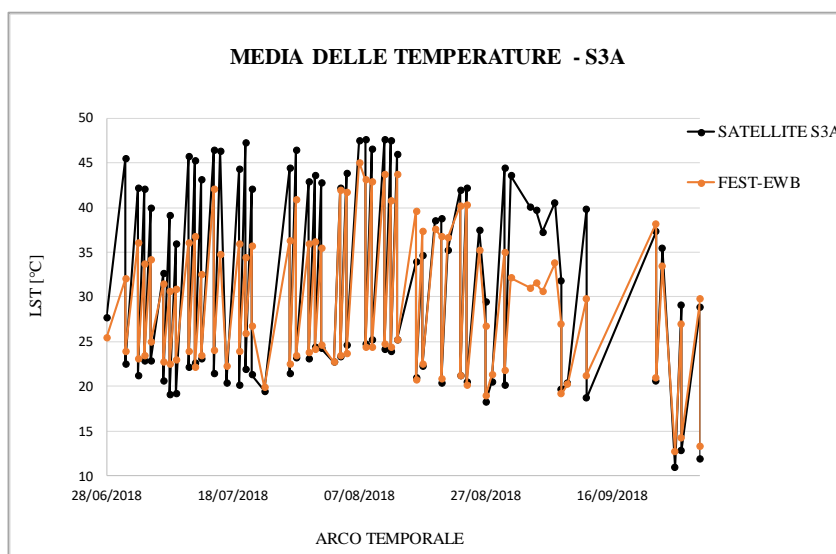


Figura 6.33: Confronto tra le medie di temperature delle immagini simulate dal FEST-EWB e quelle osservate dal satellite S3A a 1 km

Le medie delle differenze assolute tra i valori simulati e osservati da satellite, valutate in ogni pixel e suddivise in base alla stagione, sono riportate negli istogrammi in Figura 6.34. Le differenze maggiori si ottengono in primavera ed estate, in accordo con quanto ottenuto per la risoluzione di 30 m. Gli errori si riducono nel caso del

Landsat 7, mentre aumentano per gli altri due satelliti, probabilmente in relazione alla numerosità dei parametri in gioco ed alla loro distribuzione spaziale.

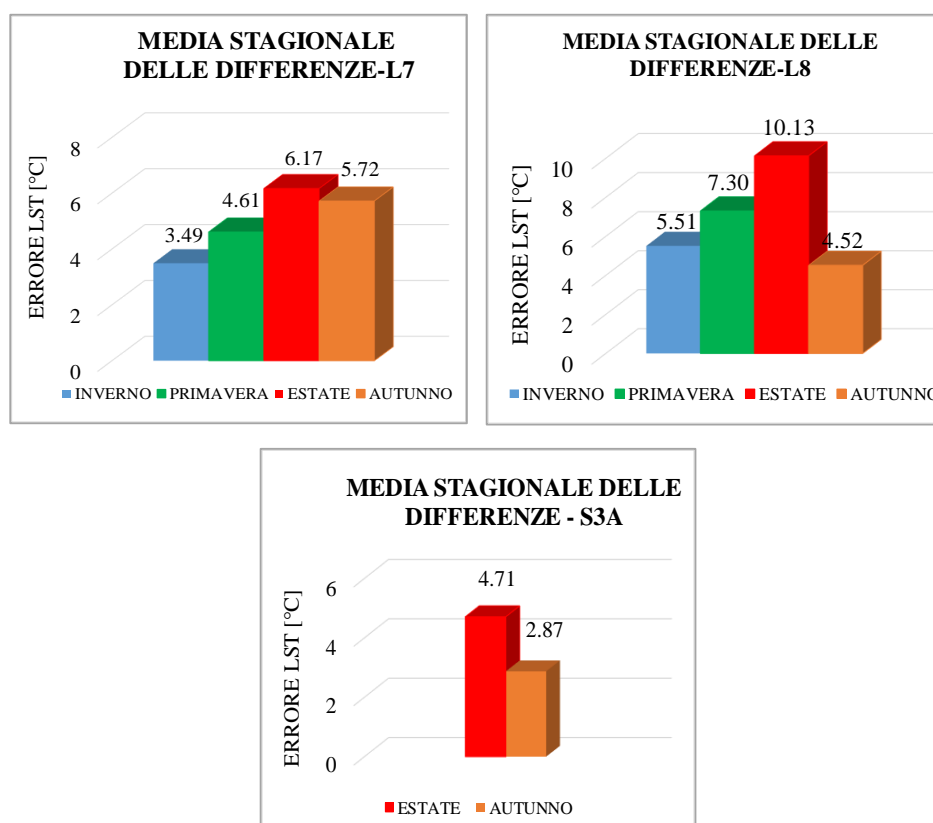


Figura 6.34: Medie stagionali delle differenze assolute valutate in ogni pixel per L7, L8 e S3A a 1 km

	INVERNO	PRIMAVERA	ESTATE	AUTUNNO	VALORE MEDIO
<b>L7</b>	3.49	4.61	6.16	5.71	4.94
<b>L8</b>	5.51	7.3	10.12	4.51	7.31
<b>S3A</b>	-	-	4.7	2.87	4.55

Tabella 6.3: Riepilogo valori delle differenze assolute valutate in ogni pixel per L7, L8 e S3A a 1km

Anche in questo caso viene riportato il confronto tra le mappe satellitari elaborate tramite il software Matlab e quelle simulate dal FEST-EWB.

I dati mancanti sono dovuti al campionamento effettuato per passare dalla risoluzione di 30 metri a quella di 1 km e dipendono sia dal sensore danneggiato del satellite L7 che dalla presenza delle nuvole; le mappe simulate dal modello invece, sempre a causa del ricampionamento, hanno richiesto un'ulteriore elaborazione in corrispondenza dei

bordi, dove è stato attribuito il valore medio di temperatura delle immagini, in modo da ricostruire la dimensione corretta delle mappe. Dall'analisi dei risultati si può notare come le mappe siano generalmente in buon accordo, anche se con un livello di dettaglio minore rispetto a quelle a 30 m.

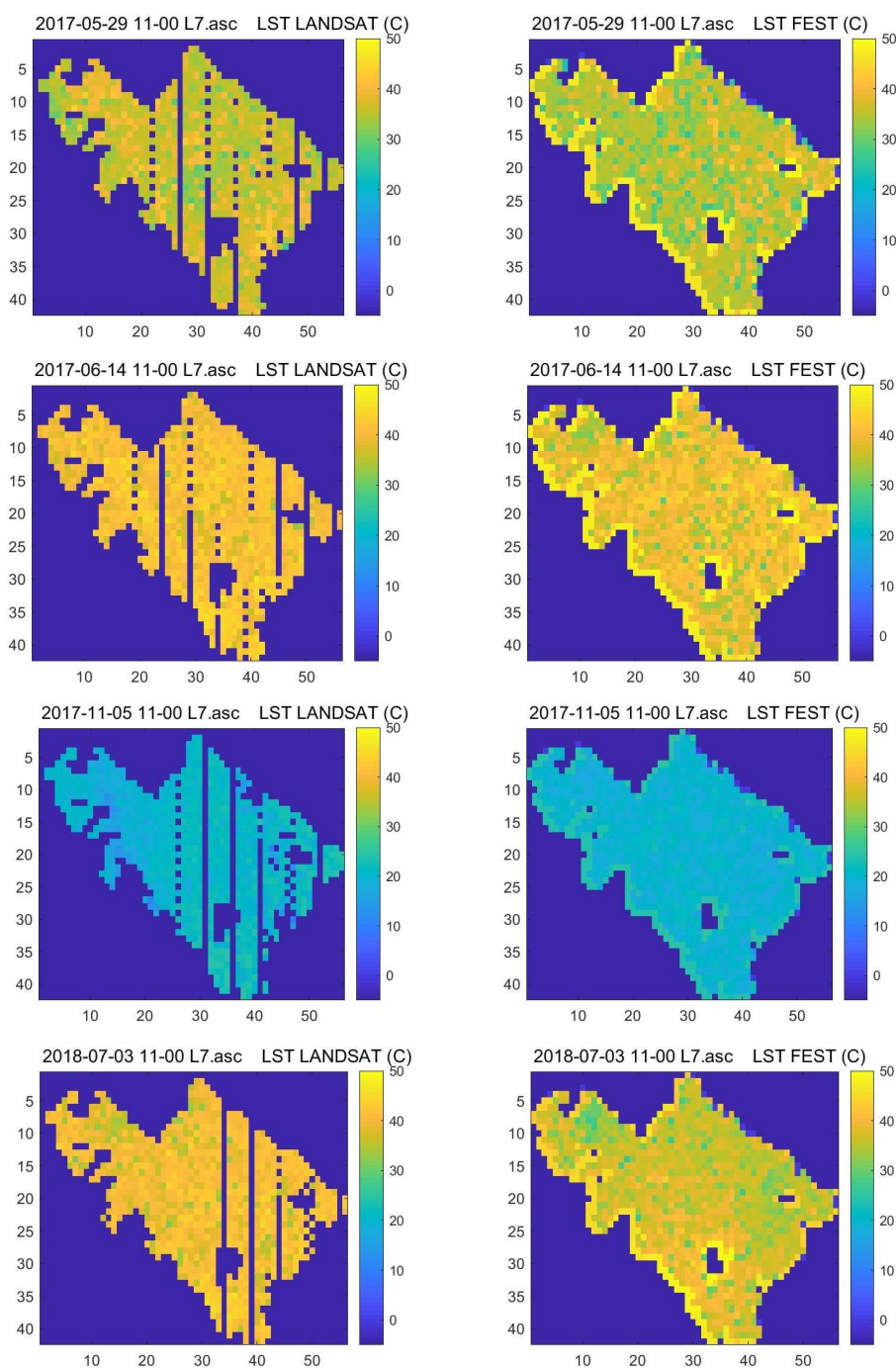


Figura 6.35: Confronto mappe LST Landsat 7 e FEST-EWB a 1 km

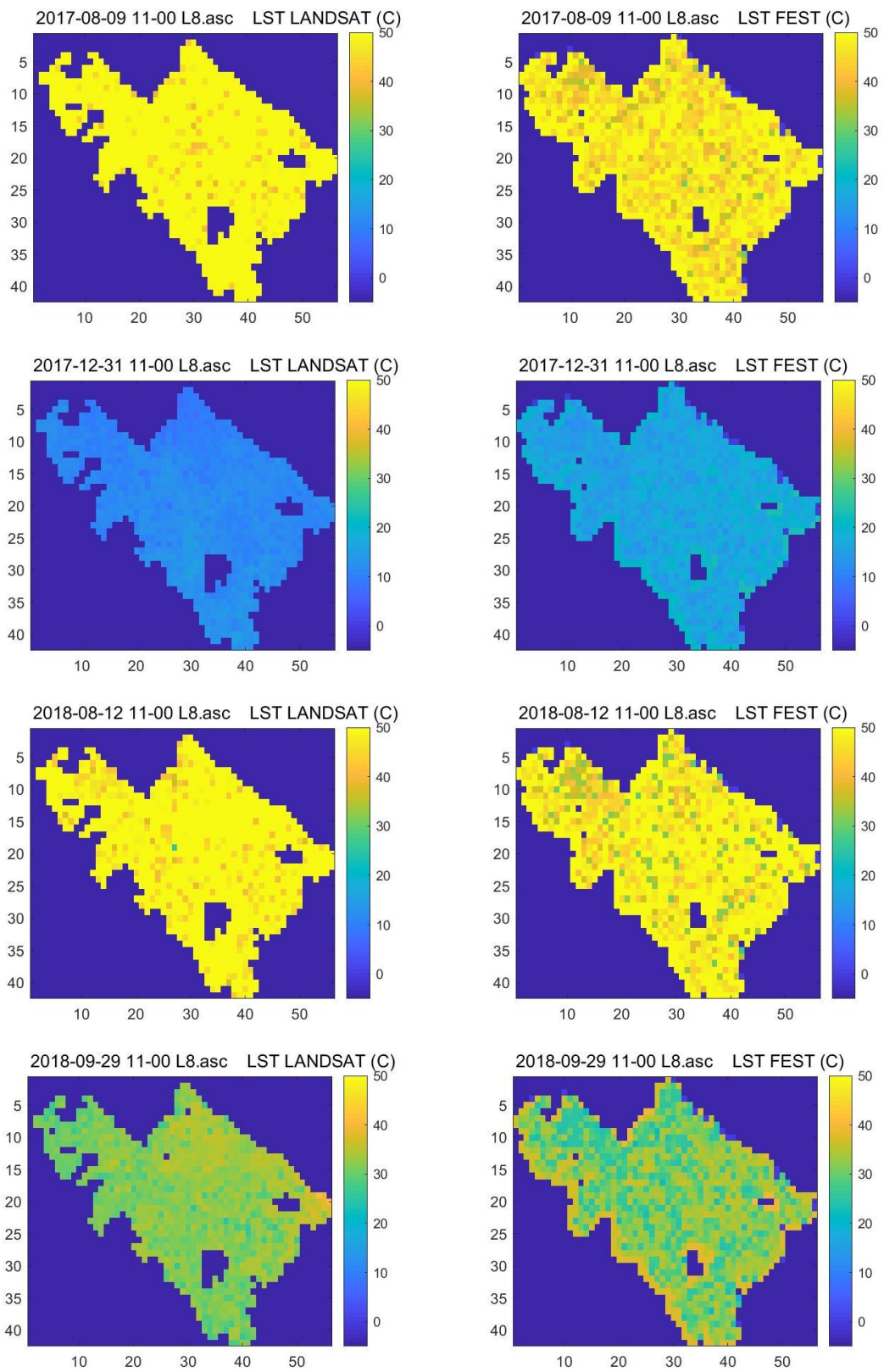


Figura 6.36: Confronto mappe LST Landsat 8 e FEST-EWB a 1 km



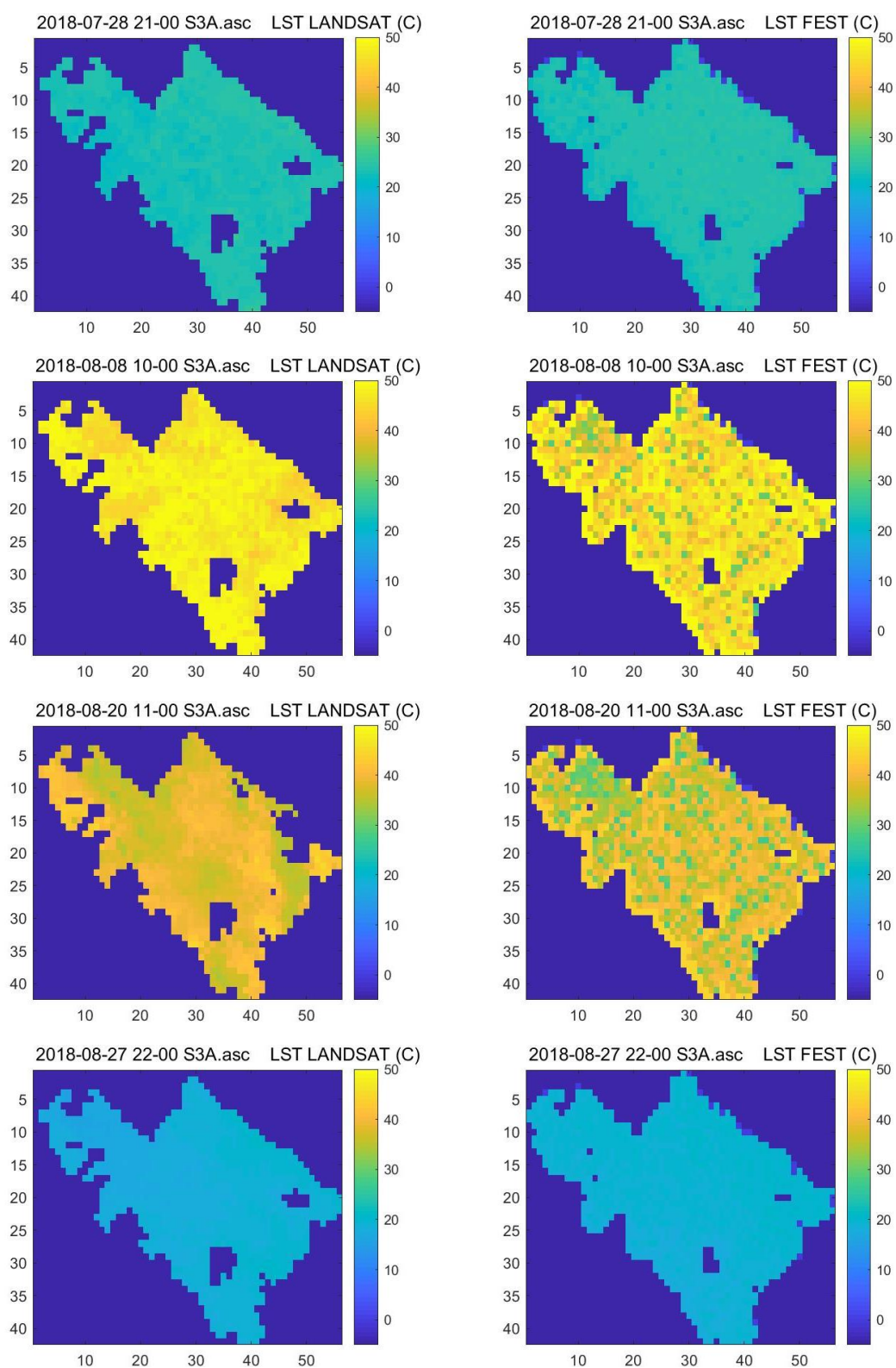


Figura 6.37: Confronto mappe LST Sentinel S3A e FET-EWB a 1km

### 6.3 Analisi alla risoluzione spaziale di 10 km

L'analisi è stata ripetuta anche alla risoluzione spaziale di 10 km. Trattandosi di un livello di dettaglio molto più basso rispetto ai casi precedenti, i dati osservati e simulati sono stati aggregati in celle ancora più grandi con conseguente perdita di informazione, che ha reso le differenze tra i due meno evidenti nel caso del Landsat 7. Per quanto riguarda invece il Landsat 8 e il Sentinel S3A si riscontrano delle diversità, probabilmente dovute dalla numerosità dei parametri in gioco ed alla loro distribuzione spaziale.

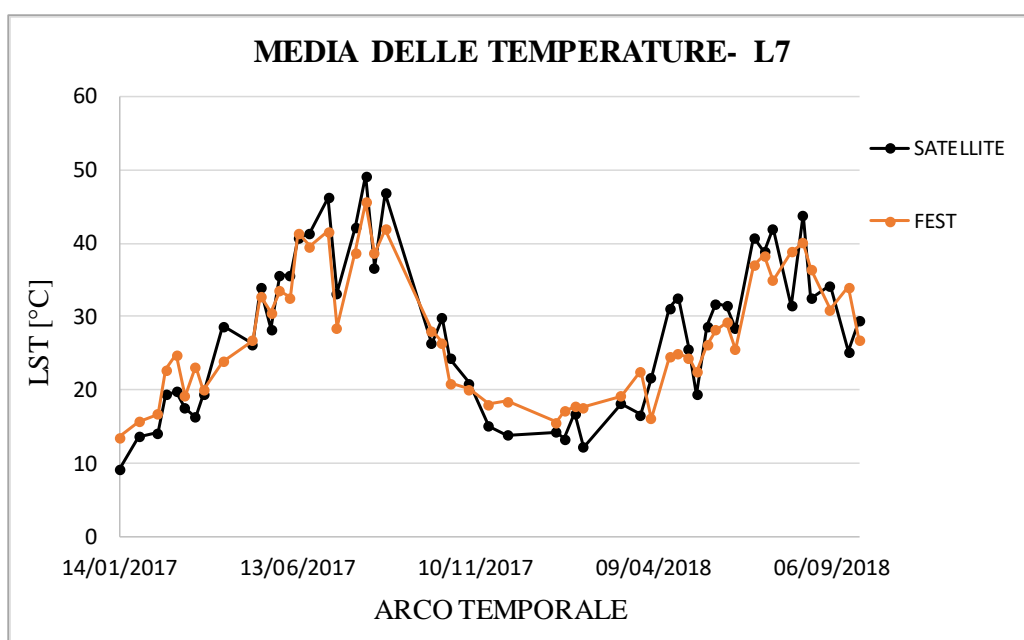


Figura 6.38: Confronto tra le medie di temperature delle immagini simulate dal FEST-EWB e quelle osservate dal satellite L7 a 10 km

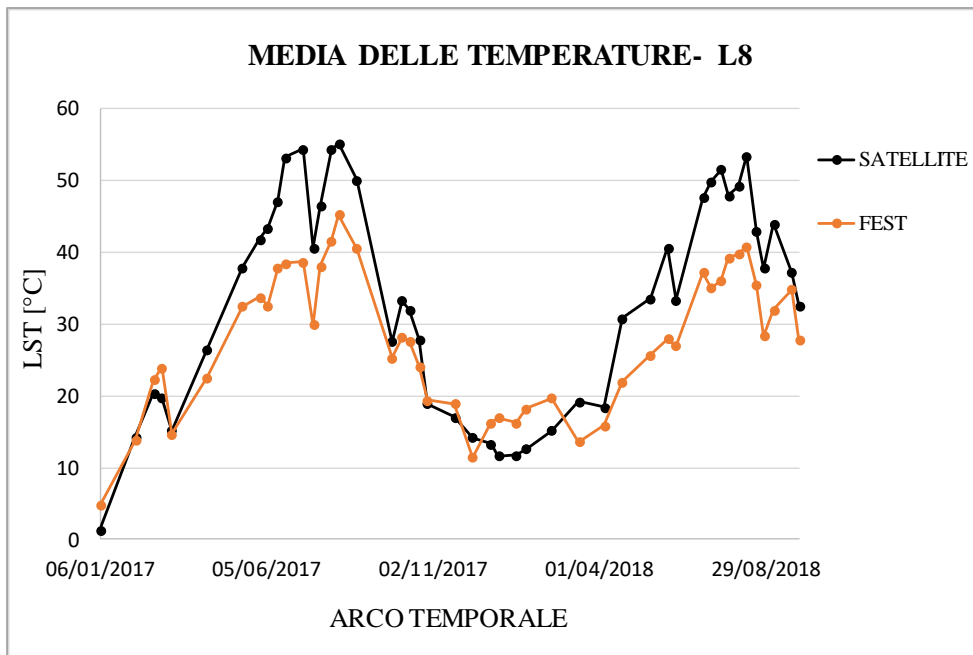


Figura 6.39: Confronto tra le medie di temperature delle immagini simulate dal FEST-EWB e quelle osservate dal satellite L8 a 10 km

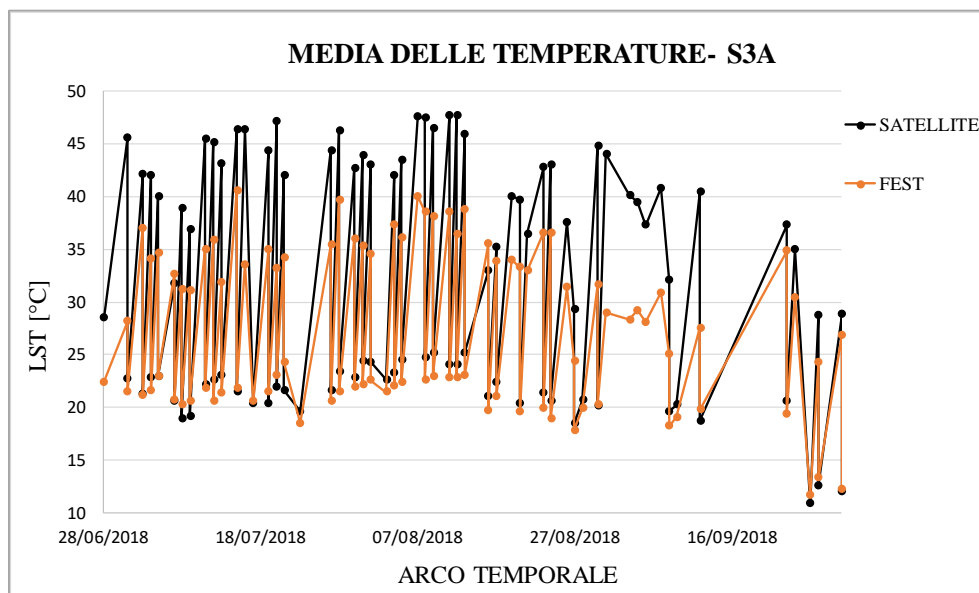


Figura 6.40: Confronto tra le medie di temperature delle immagini simulate dal FEST-EWB e quelle osservate dal satellite S3A a 10 km



Negli istogrammi riportati di seguito si osserva come gli errori aumentino rispetto alle risoluzioni di 30 m e 1 km e, anche in questo caso, le differenze maggiori tra le temperature si ottengono nei mesi primaverili ed estivi.

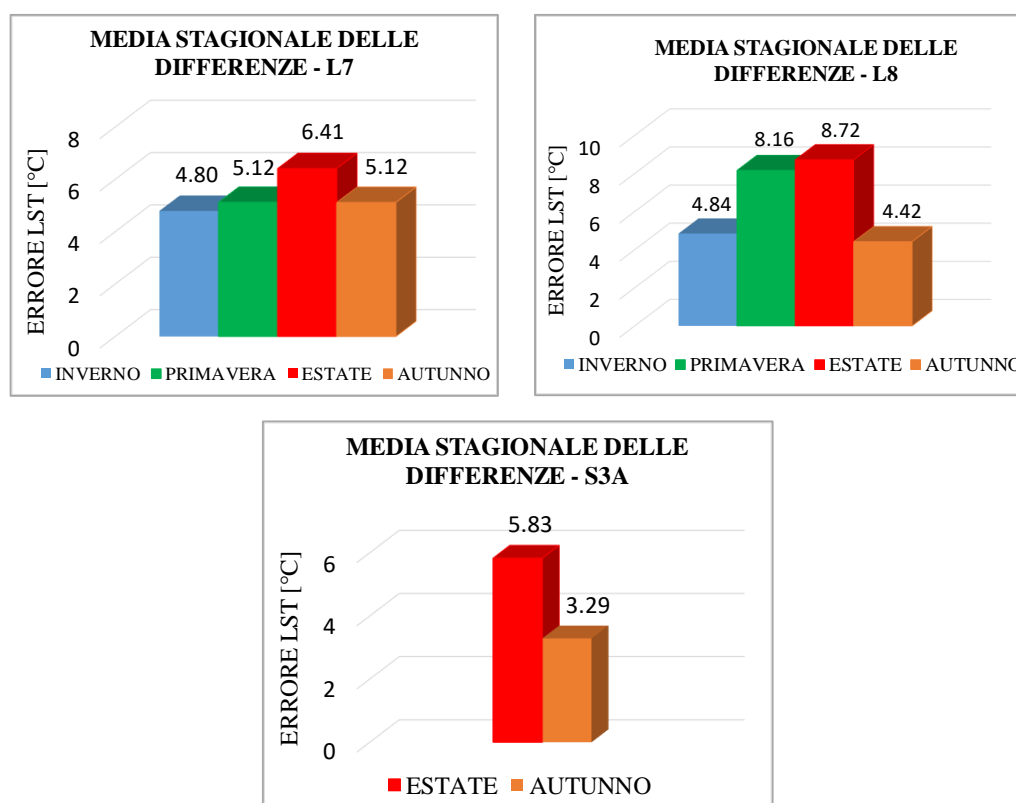


Figura 6.41: Medie stagionali delle differenze assolute valutate in ogni pixel per L7, L8 e S3A a 10 km

°C	INVERNO	PRIMAVERA	ESTATE	AUTUNNO	VALORE MEDIO
<b>L7</b>	4.80	5.12	6.41	5.12	5.39
<b>L8</b>	4.84	8.16	8.72	4.42	7.96
<b>S3A</b>	-	-	5.83	3.29	5.61

Tabella 6.4: Riepilogo valori delle differenze assolute valutate in ogni pixel per L7, L8 e S3A a 10 km

Vengono riportate anche le mappe di confronto tra temperature osservate e simulate a 10 km; anche in questo caso si può osservare un discreto accordo tra le mappe

simulate dal FEST-EWB e quelle osservate da satelliti, anche se le temperature di alcune celle sono differenti a causa della discretizzazione utilizzata.

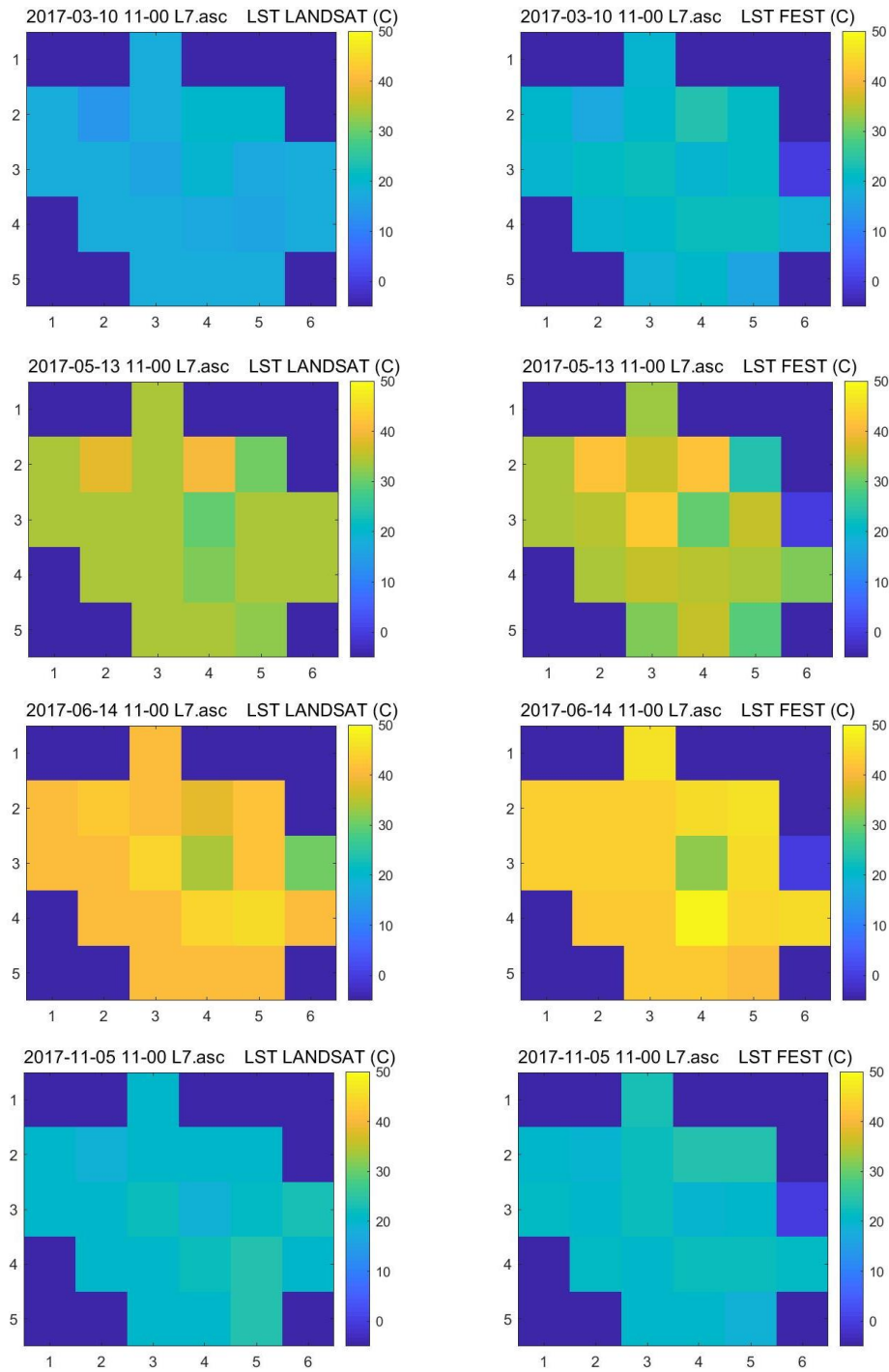


Figura 6.42: Confronto mappe LST Landsat 7 e FEST-EWB a 10 km

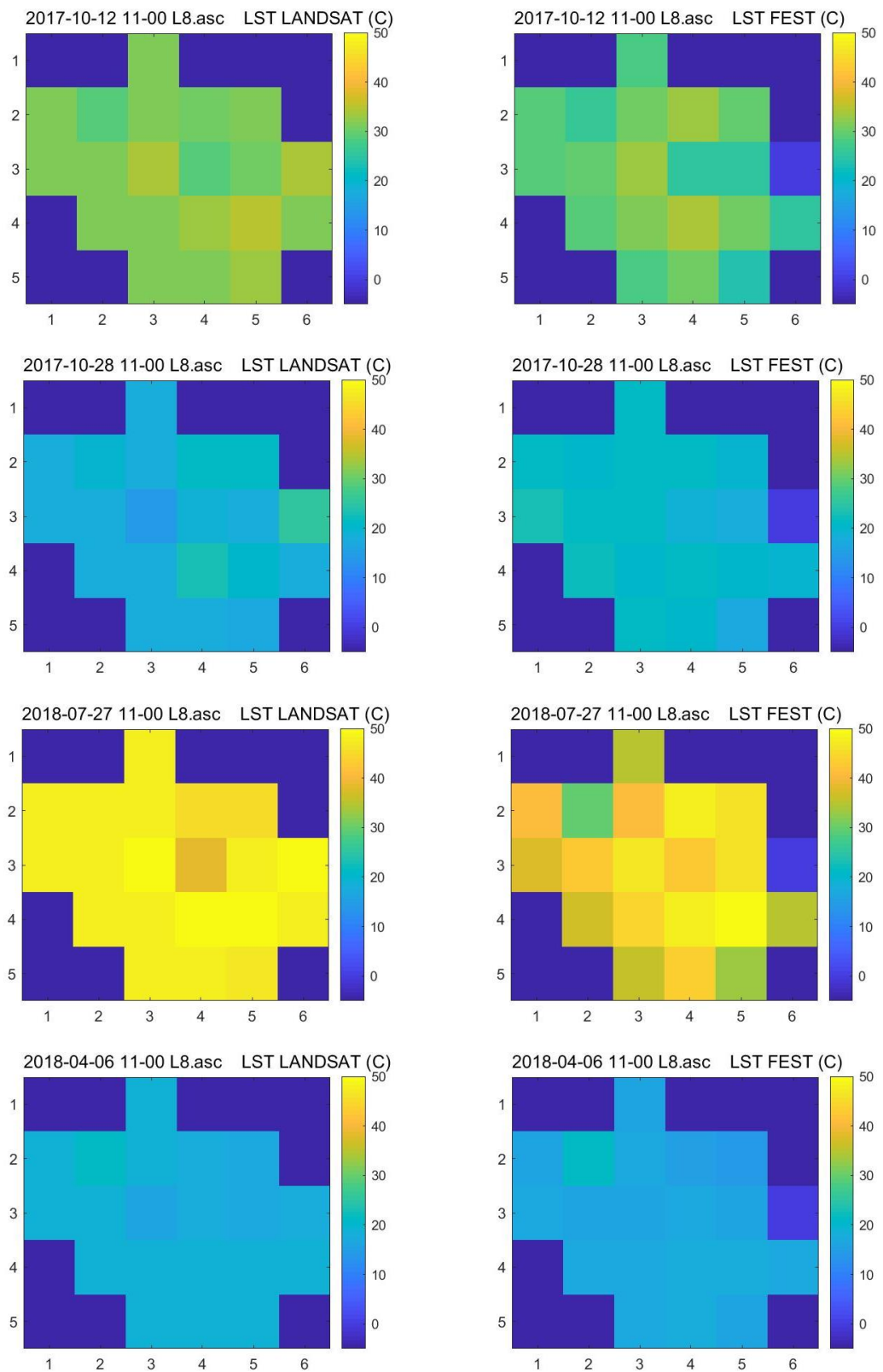


Figura 6.43: Confronto mappe LST Landsat 8 e FEST-EWB a 10 km

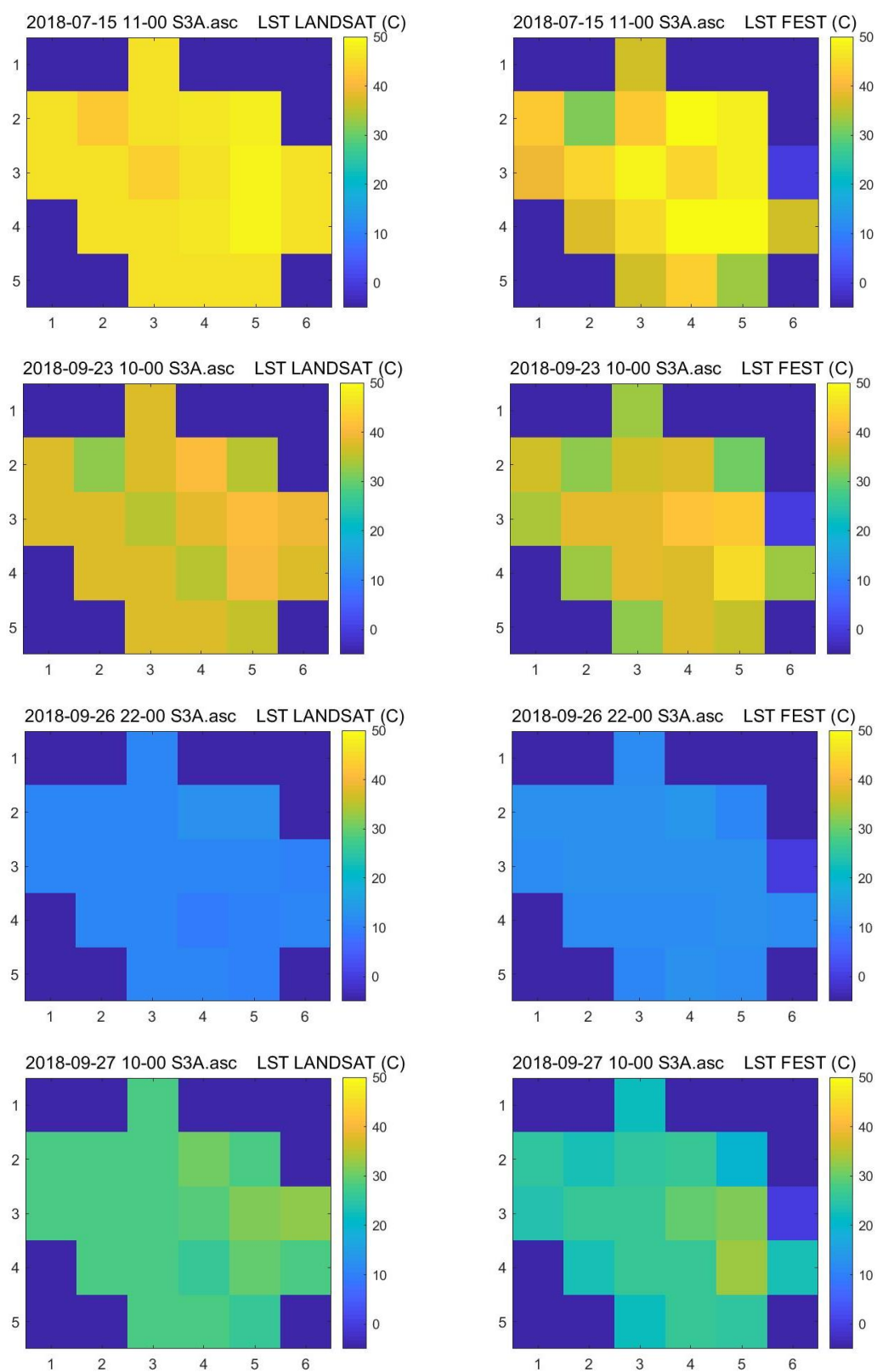


Figura 6.44: Confronto mappe LST Sentinel S3A e FET-EWB a 10 km

## 6.4 Confronto tra le risoluzioni spaziali di 30 m, 1 km e 10 km

I risultati ottenuti dal modello FEST-EWB per la stima della temperatura superficiale del suolo sono stati confrontati alle diverse risoluzioni spaziali. Nei grafici seguenti vengono evidenziate le differenze tra le simulazioni eseguite, rispettivamente per il Landsat 7, Landsat 8 e Sentinel 3A. L'errore è stato calcolato come differenza tra le temperature osservate dal satellite e quelle simulate dal modello. Vengono inoltre riportati in Tabella 6.4 i valori medi degli errori. Nella Figura 6.45 si può notare come nella simulazione a 30 m il FEST-EWB tenda a sovrastimare le temperature rispetto a quelle osservate da satellite, i valori sono infatti tendenzialmente negativi, intorno ad una media di circa -4 gradi. Alla risoluzione di 1 km, il livello di dettaglio più basso fa sì che l'errore oscilli intorno allo zero mentre, a 10 km, la risoluzione ancora più bassa fa aumentare l'intervallo di variabilità, con differenze nelle temperature fino ai 10 gradi e con picchi sia positivi che negativi che si compensano tra loro. Nelle Figure 6.46 e 6.47 gli errori aumentano con l'abbassamento della risoluzione al suolo, probabilmente dovuto dalla numerosità dei parametri in gioco ed alla loro distribuzione spaziale.

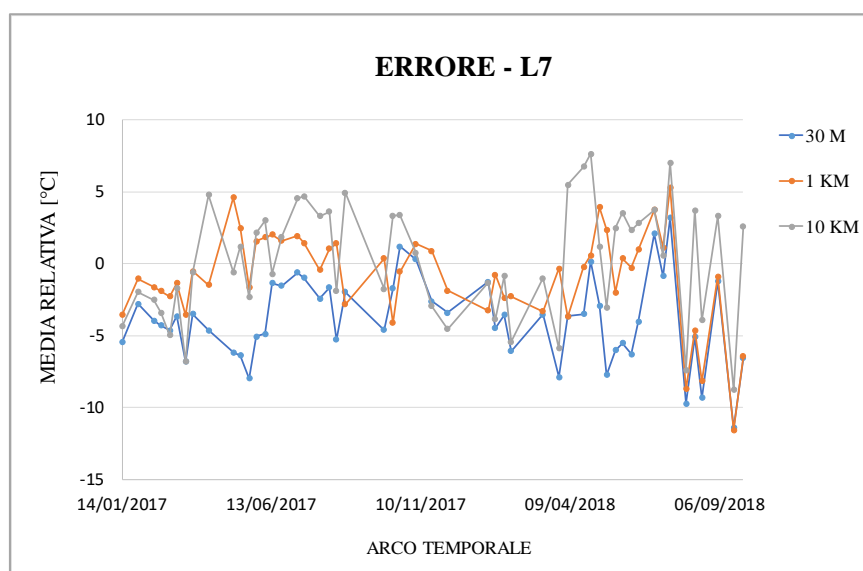


Figura 6.45: Errori a 30 m, 1 km e 10 km per L7

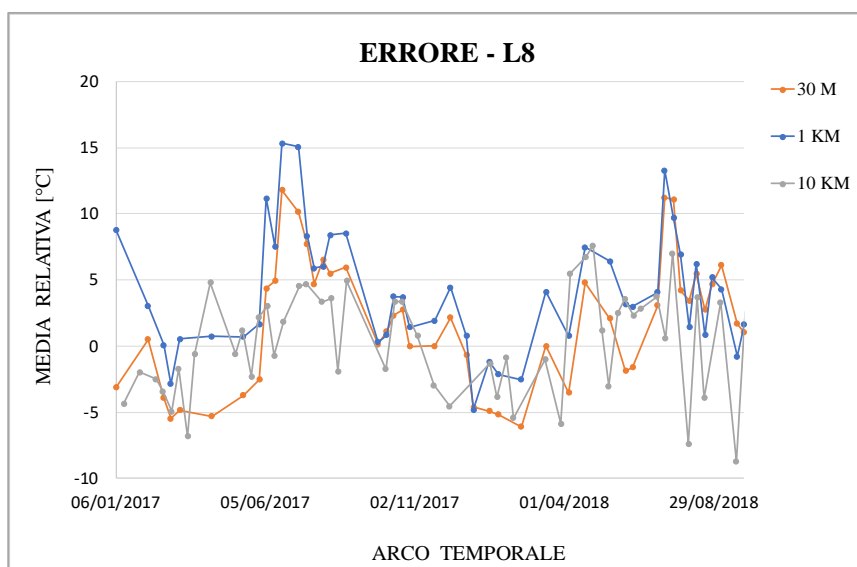


Figura 6.46: Errori a 30 m, 1 km e 10 km per L8

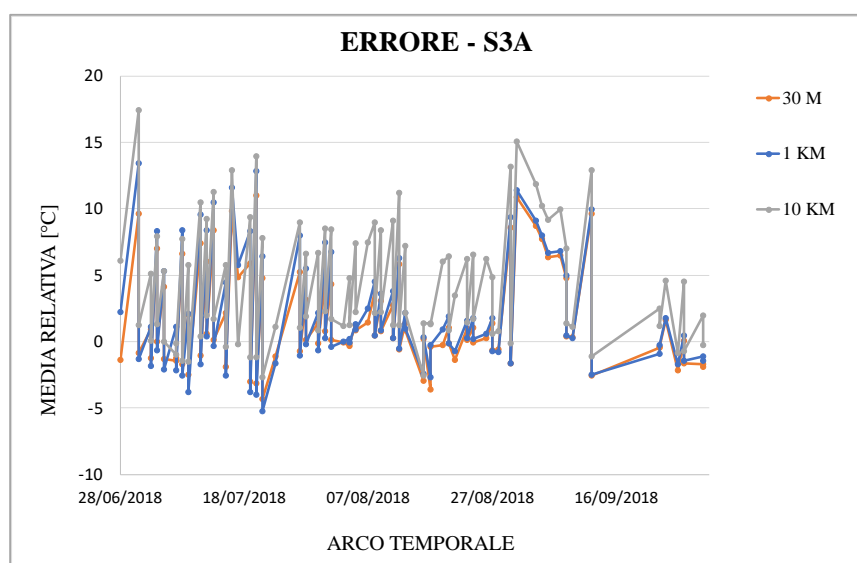


Figura 6.47: Errori a 30 m, 1 km e 10 km per S3A

° C	30 M	1 KM	10 KM
<b>L7</b>	-3.88	-0.90	0.23
<b>L8</b>	1.62	3.98	5.55
<b>S3A</b>	1.64	2.14	4.36

Tabella 6.5: Valori medi degli errori

Si riportano 3 esempi di confronti tra le mappe osservate dai satelliti e quelle simulate dal modello FEST-EWB alle risoluzioni di 30 m, 1 km e 10 km. Le mappe sono riferite alle date 14/06/2017, 31/12/2017 e 20/07/2018. Anche in questo caso si può osservare come abbassando la risoluzione si perdono alcune informazioni, ma la distribuzione complessiva delle temperature resta simile.

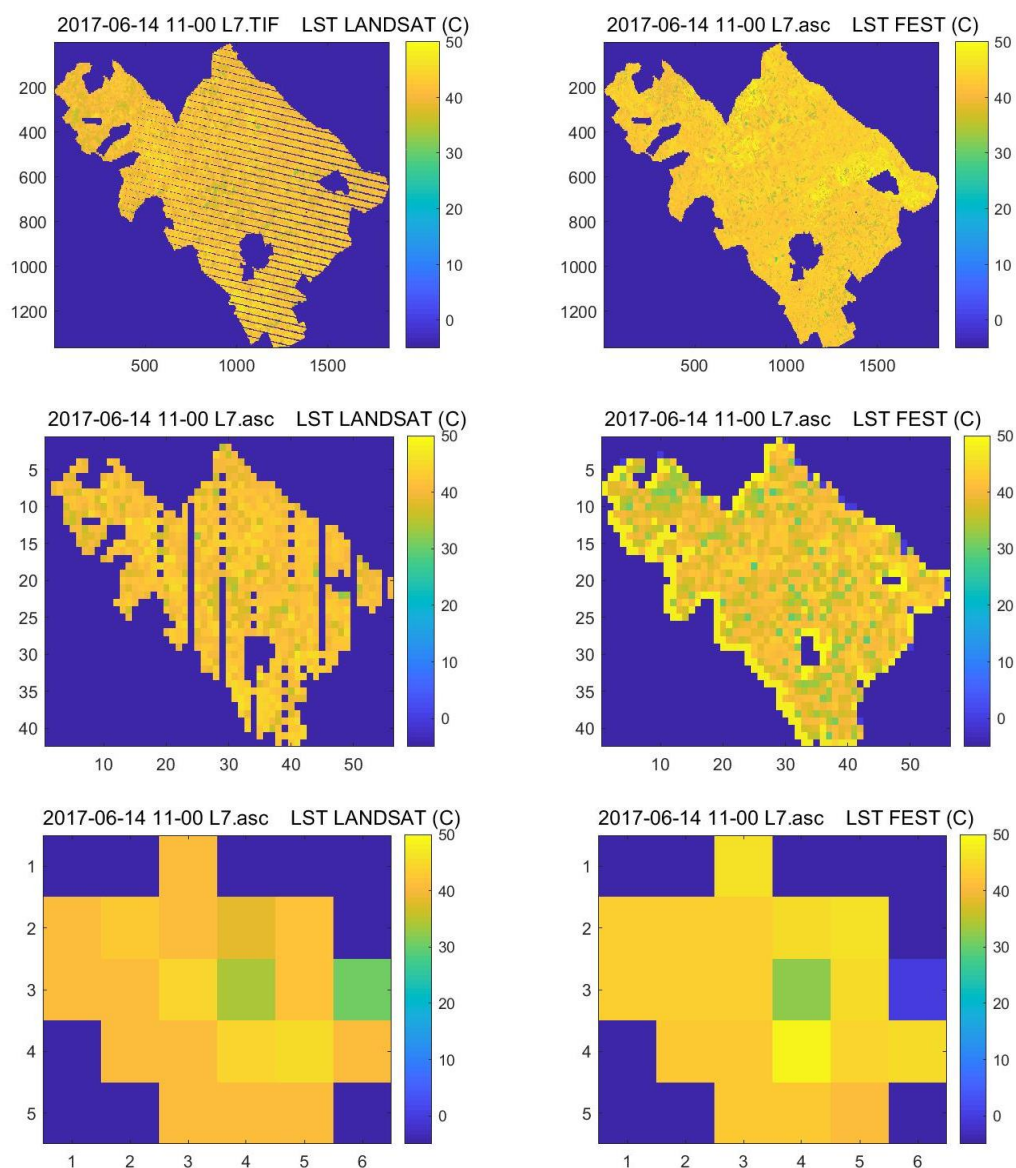


Figura 6.48: Confronto mappe LST Landsat 7 e FEST-EWB a 30 m, 1 km e 10 km

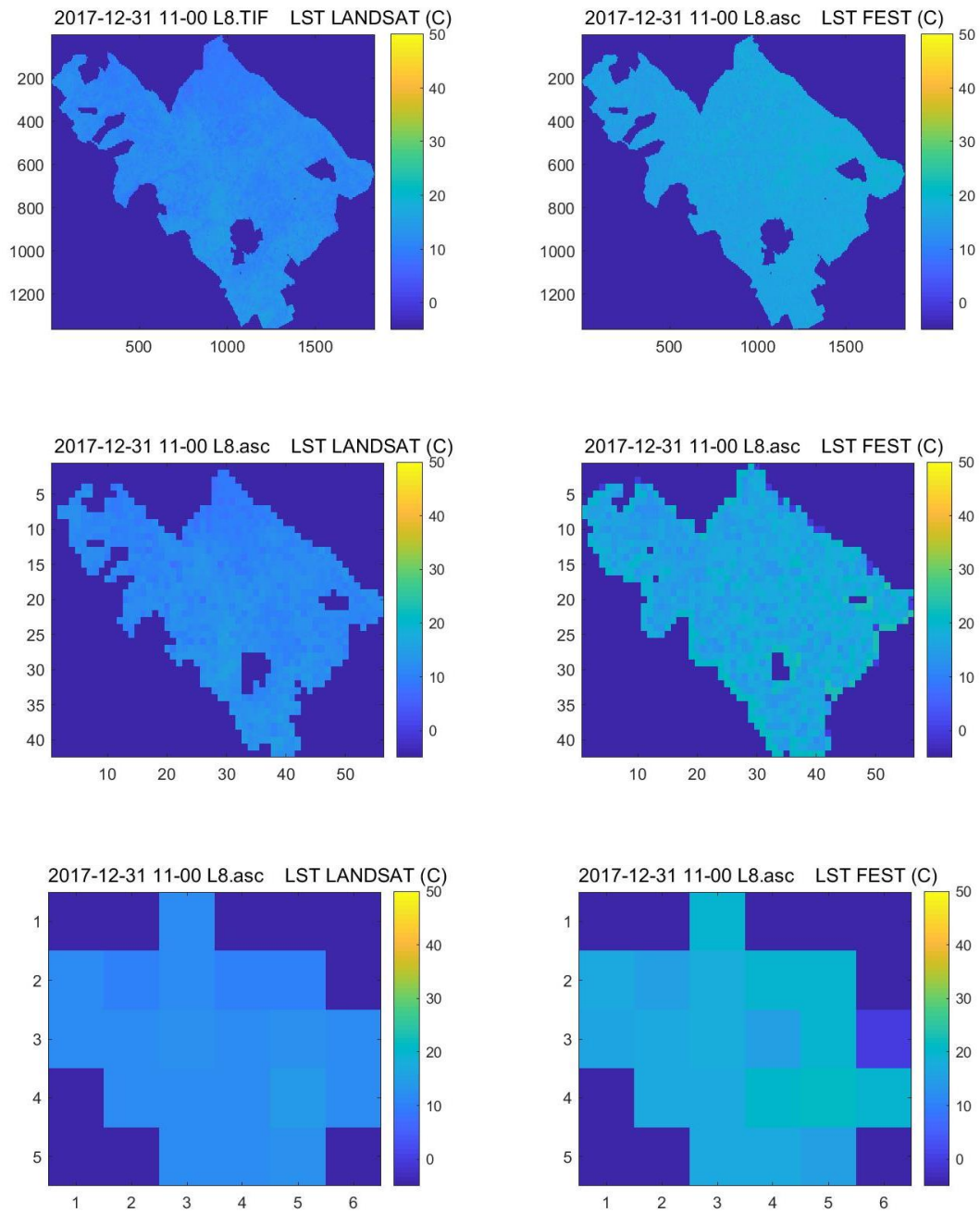


Figura 6.49: Confronto mappe LST Landsat 8 e FEST-EWB a 30 m, 1 km e 10 km



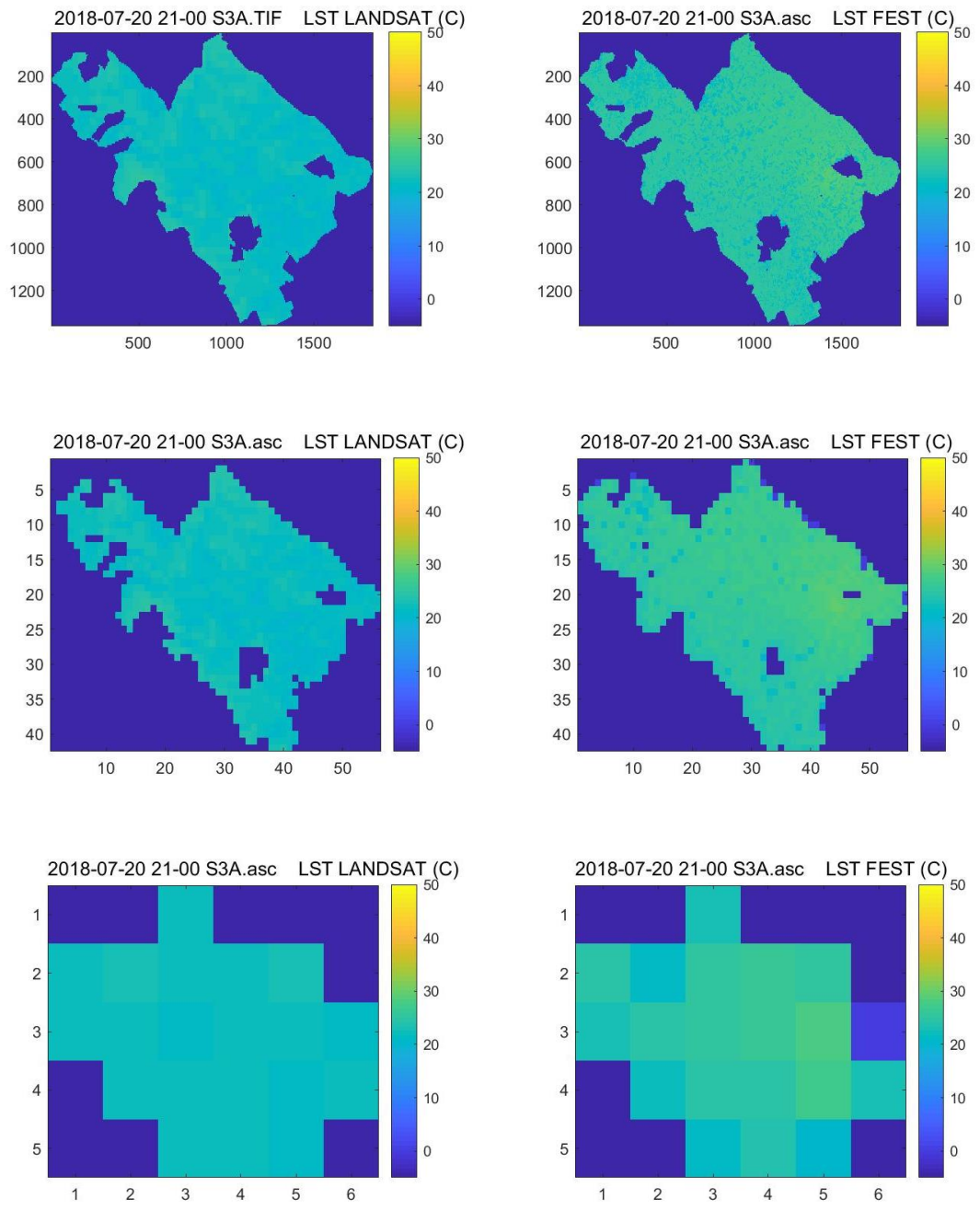


Figura 6.50: Confronto mappe LST Sentinel 3A e FESST-EWB a 30 m, 1 km e 10 km

Sono stati inoltre confrontati i risultati delle simulazioni del FEST-EWB relativi ai flussi di umidità del suolo, evapotraspirazione e percolazione alle diverse risoluzioni spaziali di 30 m, 1 km, 10 km. L'umidità del suolo è strettamente legata all'evapotraspirazione e alla percolazione in modo inversamente proporzionale, l'aumento di una variabile comporta infatti la diminuzione dell'altra e viceversa. Dall'analisi dei risultati si può notare come l'umidità diminuisca per risoluzione più basse, mentre l'evapotraspirazione e la percolazione aumentino; la percolazione a 10 km si comporta invece diversamente a causa di un'aggregazione di celle più elevata che non consente di distinguere l'eterogeneità dei parametri del suolo e della vegetazione.

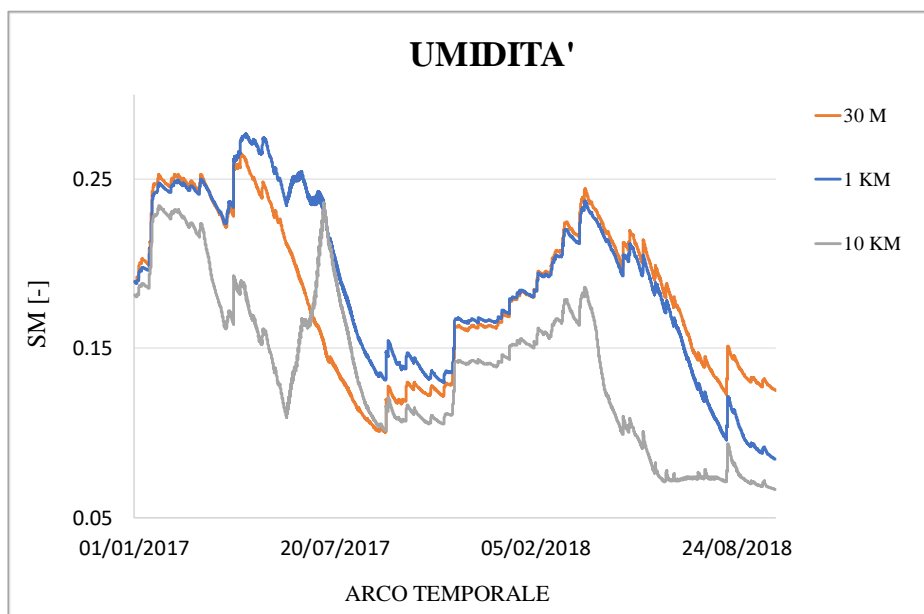


Figura 6.51: Confronto umidità simulata dal FEST-EWB a 30 m, 1 km, 10 km

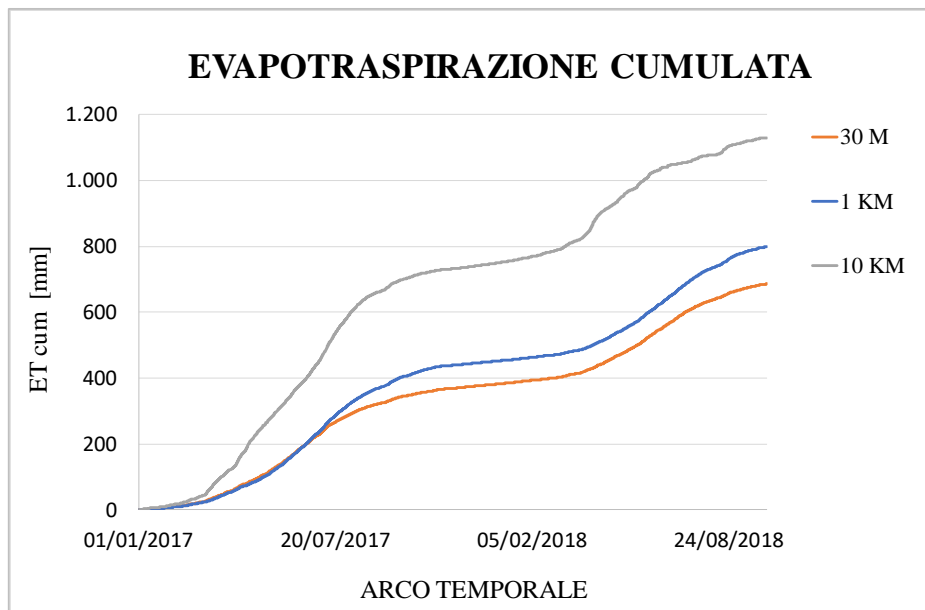


Figura 6.52: Confronto evapotraspirazione cumulata simulata dal FEST-EWB a 30 m, 1 km, 10 km

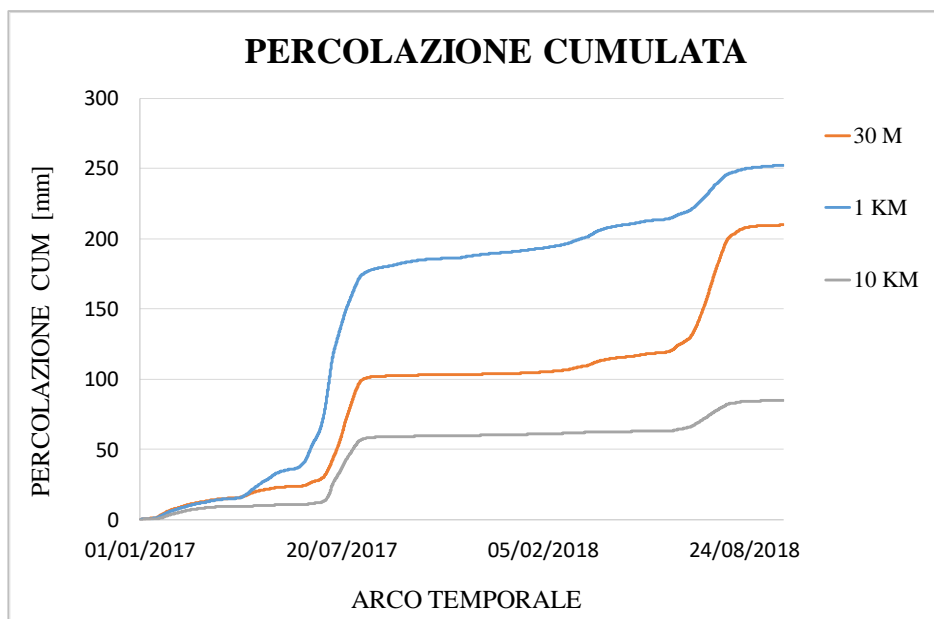


Figura 6.53: Confronto percolazione cumulata simulata dal FEST-EWB a 30 m, 1 km, 10 km

### 6.4.1 Confronto alla stazione Eddy Covariance

Sono state infine confrontate le simulazioni puntuali del FEST-EWB relative all'umidità del suolo in corrispondenza del campo coltivato a pomodoro e grano analizzato nel Capitolo 5. I risultati fanno riferimento alle diverse risoluzioni spaziali di 30 m, 1 km, 10 km e sono state comparate con le misure osservate dalla stazione Eddy Covariance (Figura 6.54 e Figura 6.55). Le simulazioni a 1 km e 10 km sono caratterizzate da un andamento differente rispetto ai dati osservati e richiedono quindi una calibrazione. Le simulazioni a 30 m, essendo già state calibrate nel Capitolo 5, sono invece in accordo con le misure della stazione.

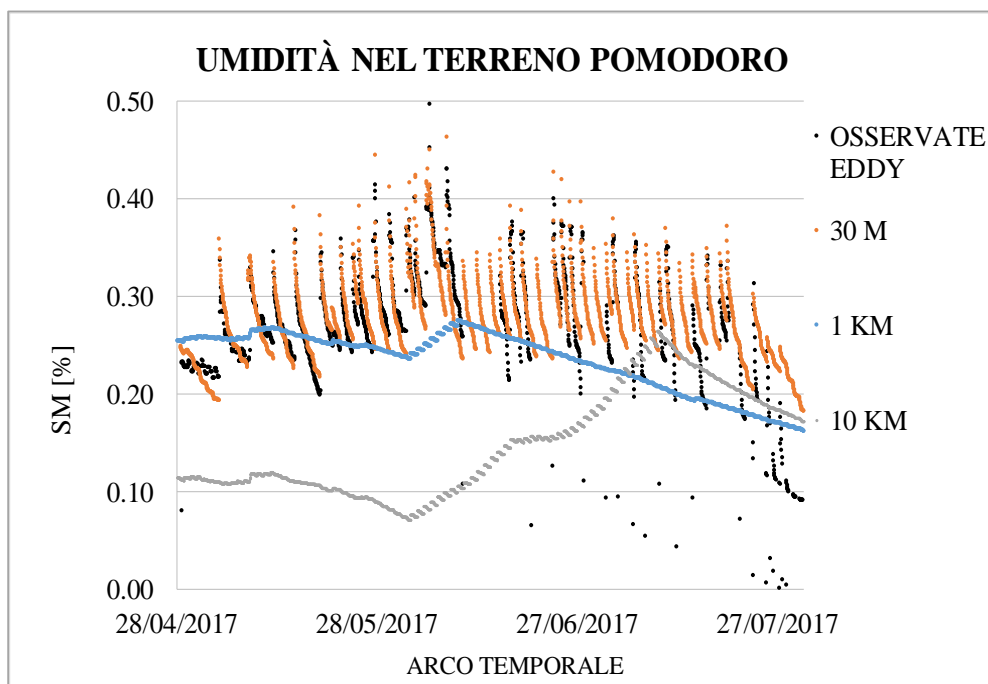


Figura 6.54: Confronto puntuale dell'umidità del terreno osservata e simulata a 30 m, 1 km e 10 km. Campo pomodoro

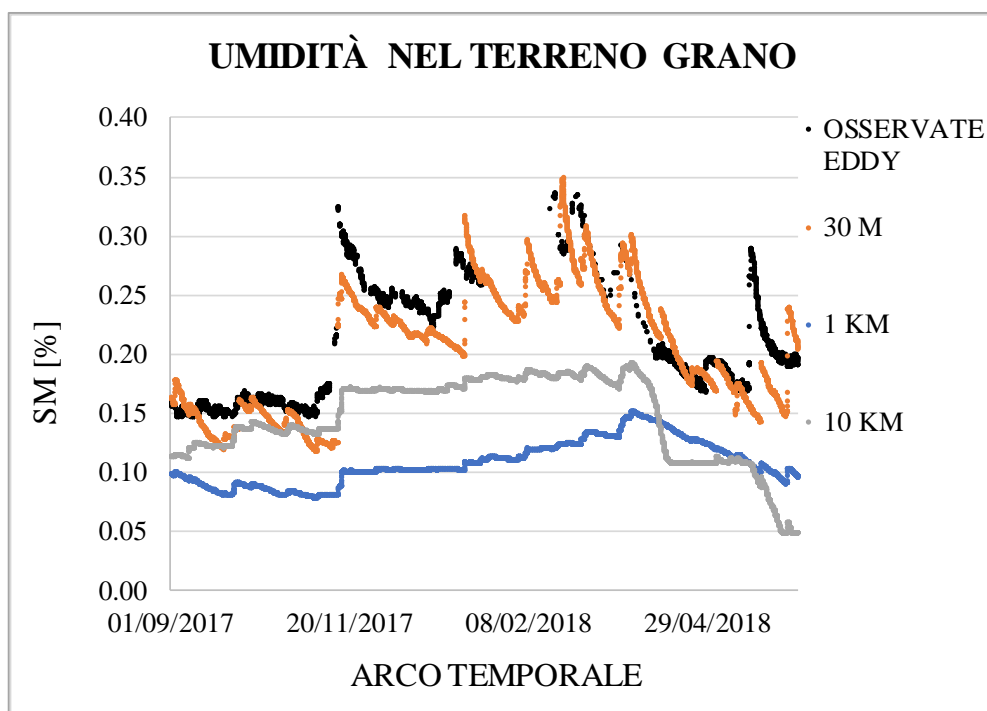


Figura 6.55: Confronto puntuale dell'umidità del terreno osservata e simulata a 30 m, 1 km e 10 km. Campo grano

Vengono anche riportati i confronti tra le temperature osservate dalla stazione Eddy Covariance, quelle misurate dai satelliti L7, L8 e S3A e quelle simulate dal modello FEST-EWB puntualmente nel campo precedentemente analizzato (Figura 6.56).

I dati di temperatura osservati dalla Eddy Covariance sono tendenzialmente più bassi sia delle misure da satellite che delle simulazioni del modello, che pertanto tendono a sovrastimare quanto osservato dalla stazione. Il FEST-EWB simula comunque bene l'andamento delle temperature misurate da satellite e, in accordo con quanto visto a scala di bacino, sovrastima in alcuni casi le temperature misurate dal Landsat 7 e sottostima, specialmente nei mesi estivi, quelle del Landsat 8 e del Sentinel 3A. Non avendo però a disposizione un numero così elevato di dati in quanto le misure non sono sempre disponibili dalla stazione o dal satellite nello stesso giorno, il confronto puntuale risulta meno dettagliato rispetto a quello a scala di bacino e fortemente influenzato dalla numerosità dei dati e dalla scelta del punto di misura.

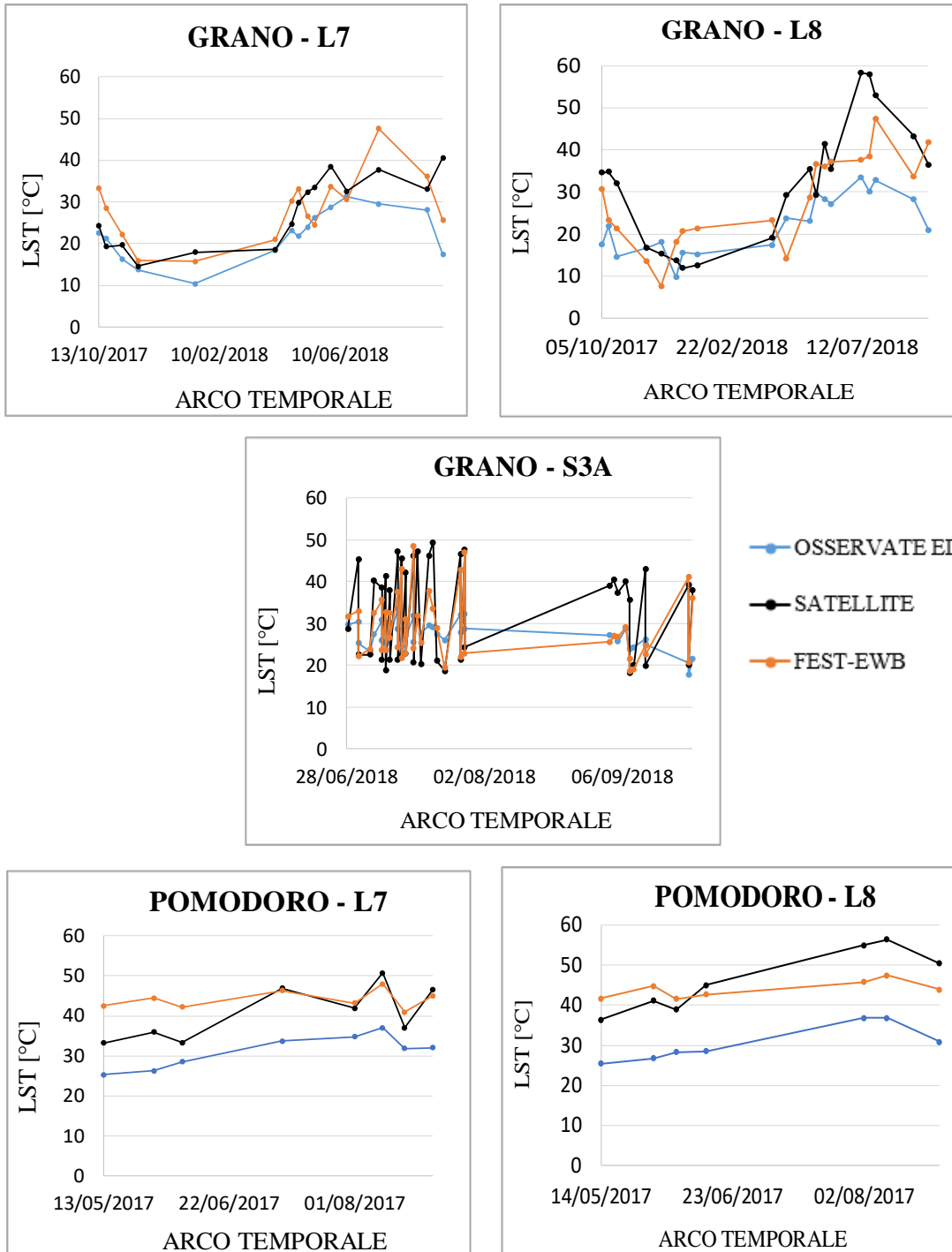


Figura 6.56: Confronto LST osservate da Eddy, misurate dai satelliti e simulate dal FEST-EWB

## 6.5 Irrigazione con metodologia SIM

La metodologia SIM è stata applicata anche a scala di bacino, quindi estesa all'intero comprensorio del Sud Fortore. In accordo con quanto ottenuto puntualmente, l'applicazione del metodo ha consentito di risparmiare un notevole quantitativo d'acqua, passando dai 2304 mm con irrigazione osservata ai 1694 mm con irrigazione SIM, dati cumulati per le stagioni irrigue 2017 e 2018. Si riporta in Figura 6.57 la distribuzione dell'irrigazione e In Tabella 6.5 il dato cumulato di irrigazione, evapotraspirazione, percolazione e pioggia.

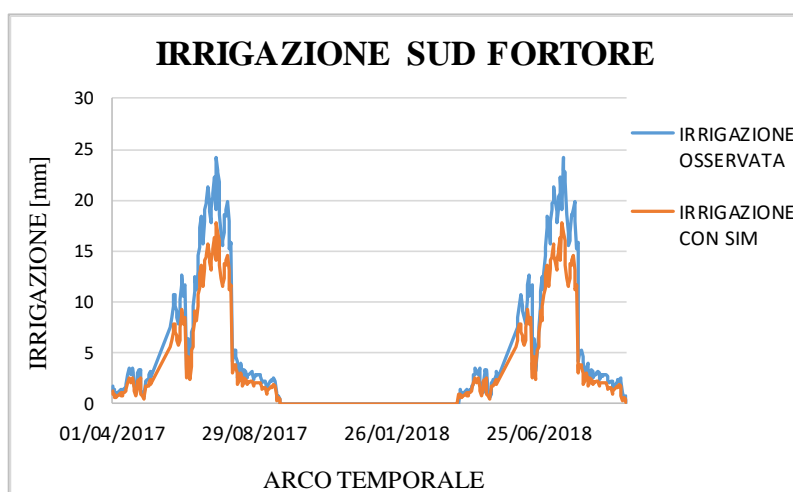


Figura 6.57: Irrigazione Sud Fortore osservata e con metodologia SIM

	FEST-EWB con irrigazione osservata		FEST-EWB con SIM	
	2017	2018	2017	2018
<b>Irrigazione cum [mm]</b>	1151.9	1150.4	847.0	845.9
<b>ET cum [mm]</b>	381.8	303.8	701.0	319.0
<b>Percolazione cum [mm]</b>	43.2	17.9	40.8	57.5
<b>Pioggia [mm]</b>	402.0	283.5	402.0	283.5

Tabella 6.6: Irrigazione, Evapotraspirazione, Percolazione e Pioggia cumulati negli anni 2017 e 2018, simulate dal FEST-EWB con irrigazione osservata e con SIM





## CONCLUSIONI

In questo elaborato di tesi è stata analizzata un'ampia area situata nella Regione Puglia, denominata comprensorio del Sud Fortore, facente parte del Consorzio per la Bonifica della Capitanata. L'area è caratterizzata da una fiorente attività agricola ma anche da una scarsità della risorsa idrica a scopo irriguo, che richiede quindi, specialmente nei mesi estivi, la previsione e la gestione sempre più efficiente dell'uso dell'acqua. È proprio in questo contesto che sono state effettuate alcune analisi per valutare i fabbisogni idrici delle colture, offrendo una strumentazione in grado di prevedere i quantitativi d'acqua necessari ad ottimizzare la resa agricola, limitando gli sprechi.

Il primo studio ha riguardato la calibrazione a scala locale del modello idrologico FEST-EWB (Mancini 1990; Ravazzani 2001; Corbari 2011) in corrispondenza di un campo in cui le colture di pomodoro e grano si sono alternate negli anni 2017 e 2018. I parametri del suolo e della vegetazione sono stati modificati cercando la combinazione che più si avvicinasse ai valori osservati dalla stazione Eddy Covariance, situata nel campo analizzato. Le simulazioni del modello idrologico hanno permesso di valutare l'andamento dei flussi idrologici ed energetici di umidità del suolo (SM), radiazione netta incidente (Rn), calore latente (LE), calore sensibile (H), flusso di calore sotterraneo (G) e temperatura superficiale del suolo (LST).

Il processo di calibrazione ha avuto effetti positivi sul calore latente, che risulta in buon accordo con i dati osservati, e sull'umidità del suolo che è la variabile caratterizzata dal miglioramento più marcato. Le simulazioni dei restanti flussi sono

rimaste simili a quelle con i parametri originari, con sottostima per la radiazione netta incidente e sovrastima per il flusso di calore sotterraneo nel caso del pomodoro e per il calore sensibile nel caso del grano, probabilmente a causa di errori di misura della stazione Eddy Covariance e del legame tra i flussi nel bilancio energetico.

Successivamente è stata applicata la metodologia SIM per ottimizzare la gestione dell'irrigazione, definendo, tramite il concetto di soglia irrigua, i tempi e i quantitativi di fornitura idrica evidenziando le differenze tra pomodoro e grano. Per il pomodoro sono stati risparmiati oltre 1300 mm di acqua, passando da 1625 mm a 307.8 mm utilizzati, dimezzando inoltre il numero di irrigazioni. Nel caso del grano, invece, i vantaggi del metodo SIM sono stati meno evidenti a causa della tipologia di coltura che richiede un ridotto supporto idrico, ma è stato comunque possibile ridurre il consumo di acqua da 74 mm a 25.92 mm, irrigando solo una volta in tutta la stagione. Il secondo studio è stato effettuato a scala di bacino ed ha riguardato la validazione del modello FEST-EWB per gli anni 2017 e 2018, sulla base di parametri del suolo e della vegetazione già calibrati in un lavoro di tesi precedente (De Pedrini, 2017). Le immagini di temperatura superficiale del suolo (LST) simulate dal FEST-EWB sono state quindi confrontate con quelle fornite dai satelliti Landsat e Sentinel.

L'analisi è stata implementata a diverse risoluzioni spaziali al suolo, partendo da un livello di dettaglio elevato pari a 30 m per poi scalare a risoluzioni più basse pari a 1 km e 10 km. In questo modo si è potuto verificare la possibilità di utilizzare gli stessi parametri iniziali anche in aree in cui non si ha disponibilità dettagliata dei dati.

Alla risoluzione di 30 m il modello è stato in grado di ricostruire in modo abbastanza accurato la distribuzione delle temperature del comprensorio, con una generale sovrastima evidenziata dal confronto con i dati del Landsat 7 ed una sottostima nel caso di Landsat 8 e Sentinel 3A, specialmente nei mesi estivi.

Alla risoluzione di 1 km l'aggregazione delle celle ha comportato la perdita di informazione, rendendo le differenze tra i valori osservati e simulati meno evidenti.

Alla risoluzione di 10 km si ottengono invece gli errori maggiori, probabilmente a causa dalla numerosità dei parametri in gioco ed alla loro distribuzione spaziale, che questo livello di dettaglio non riesce a discretizzare correttamente.

Il FEST-EWB è stato comunque in grado di simulare in modo abbastanza corretto l'andamento delle temperature del comprensorio anche alle risoluzioni più basse, con una distribuzione complessiva delle temperature simile a quella osservata dai satelliti. La metodologia SIM è stata applicata anche a scala di bacino e ha consentito di risparmiare anche in questo caso un notevole quantitativo d'acqua, passando dai 2304 mm con irrigazione osservata ai 1694 mm con irrigazione SIM, dati cumulati per le stagioni irrigue 2017 e 2018.

Il modello risulta quindi calibrato e validato correttamente nell'area di studio e la sua integrazione con metodologia di SIM ha permesso di ridurre e ottimizzare i quantitativi d'acqua per l'irrigazione sia scala puntuale che a scala di bacino.



## BIBLIOGRAFIA

- Anderson MC, Norman JM, Diak GR, Kustas WP, Mecikalski JR. 1997. A two-source time-integrated model for estimating surface fluxes using thermal infrared remote sensing. *Remote Sensing of Environment* **60**: 195–216.
- Bastiaanssen WGM, Menenti M, Feddes RA, Holtslag AAM. 1998. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL), 1. Formulation. *Journal of Hydrology* **212–213**: 198–212.
- Cabelguenne, M., Debaeke, P., Puech, J., Bosc, N., 1997. Real time irrigation management using the EPICPHASE model and weather forecasts. *Agric. Water. Manage.* 32 (3), 227–238.
- Ceppi, A., Ravazzani, G., Corbari, C., Salerno, R., Meucci, S., Mancini, M., 2014. Real time drought forecasting system for irrigation management. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 18, 3353–3366.
- C. Corbari, M. Mancini (2014). 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.
- C. Corbari, G. Ravazzani, M. Mancini (2011). A distributed thermodynamic model for energy and mass balance computation: FEST-EWB. *Hydrological Processes*, 2011 - Wiley Online Library, 25, 1443-1452.
- C. Corbari et al. (2018). Smart irrigation forecast using satellite LANDSAT data and meteo-hydrological modeling. *Agricultural Water Management*, 212, 283-294
- Famiglietti, J. S., and E. F. Wood, 1994: Multiscale modelling of spatially variable water and energy balance processes. *Water Resour. Res.*, 30, 3061–3078, doi:10.1029/94WR01498.
- FAO Sala Stampa (2012). L'acqua sfida del secolo: <http://www.fao.org/newsroom/it/focus/2007/1000521/index.html>

- Giacomelli A, Bacchiega U, Troch P, Mancini M. 1995. Evaluation of surface soil moisture by means of SAR remote sensing techniques and conceptual modelling. *Journal of Hydrology* 166: 445–459.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC): [http://www.ipcc.ch/publications\\_and\\_data/publications\\_and\\_data.shtml](http://www.ipcc.ch/publications_and_data/publications_and_data.shtml)
- Kalma, J. D., T. R. McVicar, and M. F. McCabe, 2008: Estimating land surface evaporation: A review of methods using remotely sensed surface temperature data. *Surv. Geophys.*, 29, 421–469, doi:10.1007/s10712-008-9037-z.
- Marco Mancini, Chiara Corbari, Alessandro Ceppi, Gabriele Lombardi (2016): Soil moisture and evapotranspiration real time forecast for irrigation water needs
- Norman JM, Kustas WP, Humes KS. 1995. Source approach for estimating soil and vegetation energy fluxes in observations of directional radiometric surface temperature. *Agricultural and Forest Meteorology* 77: 263–293.
- Progetto SIM (Smart Irrigation from Soil Moisture Forecast Using Satellite and Hydro-Meteorological Modelling): <http://www.sim.polimi.it/>
- Rapporto Unesco 2016 delle Nazioni Unite sullo sviluppo delle risorse idriche mondiali:  
<http://unesdoc.unesco.org/images/0024/002440/244041ita.pdf>
- Roerink, G. J., Z. Su, and M. Menenti, 2000: S-SEBI: A simple remote sensing algorithm to estimate the surface energy balance. *Phys. Chem. Earth*, 25B, 147–157, doi:10.1016/S1464-1909(99)00128-8.
- Su Z. 2002. The Surface Energy Balance System (SEBS) for estimation of turbulent heat fluxes. *Hydrology and Earth System Sciences* 6(1): 85–99.