

POLITECNICO DI MILANO

Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale



POLITECNICO
MILANO 1863

**L'ASSIMILAZIONE DELLA TEMPERATURA
SUPERFICIALE CON IL FILTRO DI KALMAN
PER AGGIORNARE I PARAMETRI E LO STATO
DI UN MODELLO IDROLOGICO**

Relatori: Prof. Chiara Corbari

Prof. Marco Mancini

Tesi di laurea di:

Matteo Quadrio Matr. 864172

Anno accademico 2016/2017

Ringraziamenti

Ringrazio innanzitutto la mia relatrice, Prof. Chiara Corbari, per avermi seguito e dato la possibilità a lavorare ad un progetto interessante e innovativo. Un caloroso ringraziamento va anche al Prof. Mancini per essersi sempre interessato al lavoro svolto.

Sintesi

Questa tesi rientra nel progetto SIM finanziato dall'UE nel quadro di WaterWorks2014 – Water Joint Programming Initiative quindi, analogamente al progetto, mira a sviluppare uno strumento operativo per la previsione in tempo reale delle esigenze di irrigazione delle colture al fine di supportare la gestione parsimoniosa dell'acqua e ottimizzare la pianificazione dell'irrigazione fornendo, sia in modo statico che dinamico in tempo reale, il comportamento dell'umidità del suolo ad alte risoluzioni spaziali e temporali. A tal scopo la tesi valuta l'utilizzo dell'assimilazione dei dati di temperatura superficiale e umidità del suolo, attuata attraverso un filtro di Kalman monodimensionale, per l'analisi delle caratteristiche di un terreno coltivato a mais a Livraga (LO) e per la correzione delle previsioni dei flussi di energia, dell'umidità del suolo e della temperatura superficiale ottenute attraverso un modello idrologico (FEST-EWB). Si sono inizialmente ricavati i parametri del suolo assimilando la temperatura superficiale poi, una volta trovati i parametri, è stata assimilata la temperatura superficiale, correggendo il calore latente e il calore dal suolo, e l'umidità del suolo aggiornando la stessa umidità. Per la correzione delle stime delle simulazioni idrologiche sono state utilizzate le osservazioni provenienti da una stazione eddy covariance situata sul campo. Sono inoltre proposte delle analisi con osservazioni a diverso passo temporale per simulare una situazione reale di scarsità di dati e valutare la reazione delle diverse variabili e l'utilità del processo di assimilazione.

Indice dei contenuti

L'ASSIMILAZIONE DELLA TEMPERATURA SUPERFICIALE CON IL FILTRO DI KALMAN PER AGGIORNARE I PARAMETRI E LO STATO DI UN MODELLO IDROLOGICO	I
RINGRAZIAMENTI	I
SINTESI.....	III
INDICE DEI CONTENUTI.....	V
CAPITOLO 1. INTRODUZIONE.....	9
CAPITOLO 2. MODELLO IDROLOGICO E DATI OSSERVATI.....	12
2.1 IL MODELLO IDROLOGICO FEST-EWB	12
2.1.1 <i>Il bilancio dell'acqua</i>	14
2.1.2 <i>Il bilancio dell'energia</i>	14
2.2 DATI OSSERVATI	16
CAPITOLO 3. METODI E CONCETTI DELL'ASSIMILAZIONE DEI DATI	19
3.1 METODI DI ASSIMILAZIONE DEI DATI	20
3.1.1 <i>Filtro di Kalman</i>	20
3.1.2 <i>Applicazione idrologica</i>	22
3.1.3 <i>Metodo semplificato</i>	25
CAPITOLO 4. ANALISI DI SENSITIVITÀ DEI PARAMETRI DEL SUOLO.....	26
4.1 ANALISI DI SENSITIVITÀ DEI PARAMETRI DEL SUOLO.....	26
4.2 ANALISI DI SENSITIVITÀ USANDO IL METODO DELLA SOMIGLIANZA.....	27
4.2.1 <i>Permeabilità satura</i>	27
4.2.2 <i>Profondità del suolo</i>	29
4.2.3 <i>Indice di Brooks e Corey</i>	31

4.2.4	<i>Resistenza stomatale minima</i>	32
4.2.5	<i>Emissività del suolo</i>	34
4.2.6	<i>Umidità del suolo residua</i>	35
4.2.7	<i>Umidità del suolo saturo</i>	37
4.2.8	<i>Riassunto analisi</i>	38
4.3	ANALISI SENSITIVITÀ DEI PARAMETRI DEL SUOLO VALUTANDO LA LORO DERIVATA NEL TEMPO	41
4.4	SENSITIVITÀ DEI PARAMETRI DEL MODELLO DEL FILTRO DI KALMAN	43

CAPITOLO 5. CALIBRAZIONE DEI PARAMETRI DEL SUOLO ATTRAVERSO

L'ASSIMILAZIONE DELLA TEMPERATURA SUPERFICIALE..... 46

5.1	CALIBRAZIONE DEI PARAMETRI DEL SUOLO IN UN PERIODO VEGETATO	47
5.1.1	<i>Resistenza stomatale minima</i>	47
5.1.2	<i>Permeabilità saturo</i>	50
5.1.3	<i>Altezza della vegetazione</i>	52
5.1.4	<i>Parametro correttivo della conduttività termica del suolo (β)</i>	54
5.1.5	<i>Parametro correttivo della T_{zero} (α)</i>	56
5.1.6	<i>Riassunto analisi</i>	58
5.2	CALIBRAZIONE DEI PARAMETRI DEL SUOLO IN UN PERIODO NON VEGETATO	62
5.2.1	<i>Parametro correttivo T_{zero} (α)</i>	62
5.2.2	<i>Resistenza del suolo</i>	64
5.2.3	<i>Riassunto analisi</i>	66

CAPITOLO 6. ASSIMILAZIONE DELLA LST ATTRAVERSO IL FILTRO DI KALMAN

CORREGGENDO IL CALORE LATENTE..... 69

6.1	SENSIVITÀ DELLA PERTURBAZIONE DELLE FORZANTI METEO	69
6.1.1	<i>Radiazione entrante ad onde corte</i>	69
6.1.2	<i>Temperatura dell'aria</i>	78
6.1.3	<i>Riassunto analisi</i>	86
6.2	CALIBRAZIONE DEI PARAMETRI DEL MODELLO DEL FILTRO DI KALMAN	87
6.2.1	<i>Periodo di suolo vegetato</i>	91
6.2.2	<i>Periodo di suolo non vegetato</i>	96
6.2.3	<i>Riassunto analisi</i>	99
6.3	ASSIMILAZIONE CON DIVERSO PASSO TEMPORALE	100
6.3.1	<i>Calibrazione parametri del filtro di Kalman</i>	100
6.3.2	<i>Riassunto analisi</i>	110
6.3.3	<i>Confronto risultati dell'assimilazione con diversi passi temporali di assimilazione</i>	111

6.3.4	<i>Riassunto analisi</i>	115
CAPITOLO 7. ASSIMILAZIONE DELLA LST ATTRAVERSO IL FILTRO DI KALMAN		
CORREGGENDO IL CALORE DAL SUOLO		116
7.1	CALIBRAZIONE DEI PARAMETRI DEL FILTRO DI KALMAN.....	116
7.1.1	<i>Periodo di suolo vegetato</i>	121
7.1.2	<i>Periodo di suolo non vegetato</i>	127
7.1.3	<i>Riassunto analisi</i>	131
CAPITOLO 8. ASSIMILAZIONE DELL'UMIDITÀ DEL SUOLO ATTRAVERSO IL FILTRO DI KALMAN		
KALMAN		132
8.1	CALIBRAZIONE DEI PARAMETRI DEL FILTRO DI KALMAN.....	132
8.1.1	<i>Periodo di suolo vegetato</i>	133
8.1.2	<i>Periodo di suolo non vegetato</i>	136
8.2	ASSIMILAZIONE CON DIVERSO PASSO TEMPORALE.....	138
8.2.1	<i>Calibrazione dei parametri del filtro di Kalman</i>	139
8.2.2	<i>Riassunto analisi</i>	146
8.2.3	<i>Confronto diretto dell'assimilazione a diversi passi temporali</i>	146
8.2.4	<i>Riassunto analisi</i>	148
CAPITOLO 9. ASSIMILAZIONE DELLA LST UTILIZZANDO UN METODO SEMPLIFICATO . 149		
CONCLUSIONI		156
RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI		159

CAPITOLO 1.

INTRODUZIONE

L'aumento della domanda di acqua e l'impatto dei cambiamenti climatici hanno recentemente rafforzato la necessità di migliorare la gestione delle risorse idriche, anche in quelle aree che tradizionalmente hanno un abbondante approvvigionamento idrico. Il più alto consumo di acqua è dedicato all'irrigazione per la produzione agricola, e così è in quest'area che gli sforzi devono essere concentrati per studiare possibili interventi (C. Corbari 2017).

La quantificazione dell'evapotraspirazione (ET) e dell'umidità del suolo (SM) è fondamentale per comprendere lo stato di un bacino idrografico o agricolo e la loro risposta alle forzanti atmosferiche, migliorando così le applicazioni nel campo di gestione delle risorse idriche come la definizione del fabbisogno idrico delle colture, la concessione dei diritti idrici e i sistemi in tempo reale per la gestione dell'irrigazione in modo sostenibile.

Questo può essere ottenuto attraverso la modellazione idrologica basata sul bilancio idrico e dell'energia in combinazione con dati di telerilevamento della temperatura della superficie terrestre (LST), che è una variabile collegata all'umidità del suolo e al flusso di calore latente (LE) (Noihlan e Planton 1989); (Famiglietti e Wood 1994); (Bastiaanssen, et al. 1998); (Su 2002); (Anderson, et al. 2004); (Corbari, Ravazzani e Mancini 2011).

Esistono diversi tipi di approcci per le stime dell'evapotraspirazione che utilizzano dati satellitari e al suolo come input:

- 1) Approccio residuo, che è quello più comune nei modelli che utilizzano la LST ricavate telerilevamento come parametro di input (Norman, Kustas e Humes 1995); (Bastiaanssen, et al. 1998); (Roerink e Menenti 2000); (Su 2002);
- 2) Calcolando tutti i termini del bilancio energetico. Questo metodo non è molto utilizzato nella comunità scientifica, e inoltre, la temperatura superficiale del suolo ricavata da satellite è

solitamente utilizzata per le tecniche di assimilazione dei dati (Famiglietti e Wood 1994); (Liang, Wood e Burges 1994).

Una revisione completa dei modelli che calcolano ET da dati di rilevamento a distanza è disponibile in Kalma et al. (2008).

Lo sviluppo ed il grado di raffinatezza dei modelli idrologici ci ha portato ad una situazione in cui questi possono teoricamente dare un contributo importante nel quantificare i flussi di massa e di energia alla scala aziendale e consortile dell'irrigazione (Famiglietti e Wood 1994); (Montaldo e Albertson 2001); (Gurtz, Jasper e Lang 2002) in modo da poter ottimizzare i processi di irrigazione nell'ottica della gestione intelligente della risorsa idrica. Il modello utilizzato in questa tesi è il FEST-EWB (Corbari, Ravazzani e Mancini 2011); (C. Corbari, J. A. Sobrino, et al. 2012) ed è un modello distribuito, ciò significa che il dominio di calcolo è discretizzato con una mesh di celle quadrate regolari all'interno delle quali ogni parametro è definito o calcolato. L'uso di questo tipo di modello richiede l'acquisizione di una grande quantità di dati. Il problema legato al loro utilizzo risiede proprio nella disponibilità di dati ed osservazioni. Questo perché variabili come evapotraspirazione ed umidità del suolo (variabile chiave per questi modelli) hanno una variazione spaziale elevata. L'importanza del problema di risoluzione spaziale nella modellazione idrologica è stata evidenziata nella comunità scientifica dagli anni '80 (Dooge 1986); (Sivapalan e Wood 1986); (Blöschl e Sivapalan 1995); (Wood 1995); (Wood 1998); (Su, Pelgrum e Menenti 199); (Kustas, et al. 2004). Quindi per poter rappresentare bene la situazione dal punto di vista idrologico in un'area avremmo bisogno di svariate stazioni di misura, ciò comporta problemi per lo più di natura economica. In alternativa un primo passo verso la riduzione di questi errori spaziali può essere fatto usando strumenti statistici "classici", come regressione lineare o metodi di correzione della media mobile che però hanno mostrato alcune lacune. Un secondo passo potrebbe essere l'utilizzo di misure da satellite. I problemi qui risiedono nella disponibilità di misure nel tempo, perché il satellite ruotando intorno alla Terra non è sempre visibile, e nella precisione della misura.

In entrambe le soluzioni proposte sono stati evidenziati alcuni problemi, a tal proposito nell'ultimo decennio sono stati sviluppati in diversi ambiti degli algoritmi di assimilazione dei dati

In ambito idrologico, la crescente disponibilità di osservazioni di LST ottenute per via termica promuove fortemente lo sviluppo della valutazione dell'ET attraverso l'utilizzo delle metodologie che si basano sulla risoluzione del bilancio energetico di superficie (SEB) (Cammalleri e Ciruolo 2012). Dato il successo degli schemi e delle tecniche di assimilazione sviluppati da meteorologi e oceanografi, essi sono stati introdotti anche nei problemi idrologici (McLaughlin 1985), in particolare per la caratterizzazione dell'evoluzione temporale di evapotraspirazione, umidità del suolo e precipitazione usando tecniche di filtraggio (Crow and Ryu 2009), (Gorenburg, McLaughlin e Entekhabi 2000), (Luo, et al. 2003), (Qin, et al. 2008) (Reichel, Entekhabi e McLaughlin 2001).

L'assimilazione dei dati è un processo di analisi in cui le informazioni osservate sono accumulate nello stato del modello di un modello numerico sfruttando i vincoli di coerenza con le leggi dell'evoluzione temporale e delle proprietà fisiche (Courtier 2001). Le informazioni provenienti dalle osservazioni vengono propagate dal modello idrologico che le utilizza come input. Quando sarà disponibile una nuova osservazione questa sarà utilizzata per aggiornare il risultato della simulazione del modello correggendolo, come mostra lo schema in Figura 2.1-1.

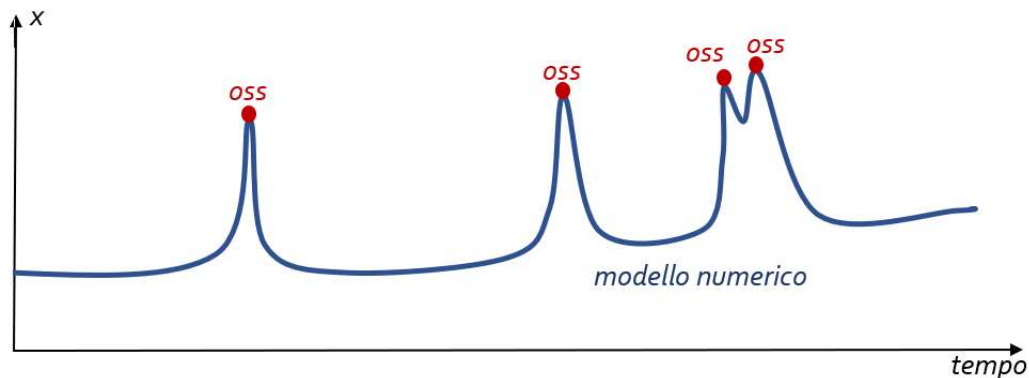


Figura 2.1-1 Esempio di lavoro di modello numerico con assimilazione dei dati.

La tecnica di assimilazione utilizzata nel corso di questa tesi è la tecnica del filtro di Kalman (Kalman 1960). A causa della forte natura non lineare dei processi idrologici, le tecniche di assimilazione dei dati implementate sono generalmente basate sulla versione ensemble della procedura di filtraggio di Kalman (Reichel, Entekhabi e McLaughlin 2001). Nell'ambito di questo lavoro di tesi verrà utilizzata la procedura del filtro di Kalman non nella sua versione ad ensemble ma in quella più tradizionale con un solo valore della variabile assimilata ad ogni istante temporale di assimilazione.

Il lavoro di tesi si suddivide in 3 macro aree, nella prima (CAPITOLO 4) si vanno a ricercare quali sono i parametri del suolo che influenzano il modello idrologico e che danno una risposta significativa alla procedura di assimilazione attraverso il filtro di Kalman; nella seconda (CAPITOLO 5) si vanno a calibrare, attraverso il procedimento di assimilazione dei dati con il filtro di Kalman, i parametri del suolo utilizzando delle osservazioni ricavate da una stazione *eddy covariance* in un campo di mais in provincia di Lodi, mentre nella terza si cerca di calibrare i parametri del filtro di Kalman andando ad assimilare la temperatura superficiale del suolo correggendo il calore latente (CAPITOLO 6) e il flusso di calore dal terreno (G) (CAPITOLO 7) oppure assimilando direttamente l'umidità del suolo (CAPITOLO 8). Si propone infine un confronto dell'assimilazione con il filtro di Kalman con un modello di assimilazione semplificato (Lakshmi 2000) (CAPITOLO 9).

CAPITOLO 2.

MODELLO IDROLOGICO E DATI OSSERVATI

2.1 Il modello idrologico FEST-EWB

Il modello utilizzato nel corso di questa tesi è il modello FEST-EWB Flash flood Event based Spatially distributed rainfall runoff Transformation–Energy and Water Balance. FEST-EWB è un modello di bilancio idrologico distribuito (Corbari, Ravazzani e Mancini 2011) ed è sviluppato a partire dal FEST-EWB (Mancini 1990); (Rabuffetti, et al. 2008); (Ravazzani, et al. 2008). Questo modello è in grado di calcolare i principali processi del ciclo idrologico: evapotraspirazione, infiltrazione, deflusso superficiale, deflusso sotto superficiale e la dinamica della neve (C. Corbari, G. Ravazzani, et al. 2009). Nel FEST-EWB, viene introdotto il modulo di bilancio energetico. Il modello è distribuito perciò il dominio di calcolo è discretizzato con una mesh di celle quadrate regolari nelle quali ogni parametro è definito o calcolato. L'uso di questo tipo di modello richiede l'acquisizione di una grande quantità di dati, il numero totale di parametri in gioco sarà dato dal numero delle grandezze usate per descrivere ogni singola cella elementare moltiplicato per il totale di celle presenti. Questa notevole mole di lavoro fornisce però una più accurata descrizione dei fenomeni.

Nella Figura 2.1-1 è riportato lo schema del modello idrologico completo. In particolare, i parametri di input del modello, circondati da un rettangolo con linee tratteggiate, sono: (1) le forzanti atmosferiche, come la temperatura dell'aria, la radiazione in arrivo a onde corte, la velocità del vento, la precipitazione, l'umidità dell'aria dalle stazioni di terra, che devono essere interpolati o ottenuti da modelli meteorologici, (2) il modello di elevazione digitale (DEM), (3) i parametri del suolo in mappe distribuite, come la conduttività idraulica satura, la capacità del campo o la profondità del suolo e (4)

i parametri riguardanti la vegetazione come l'indice di area fogliare e l'altezza della vegetazione, che possono essere recuperati da terra o da satellite.

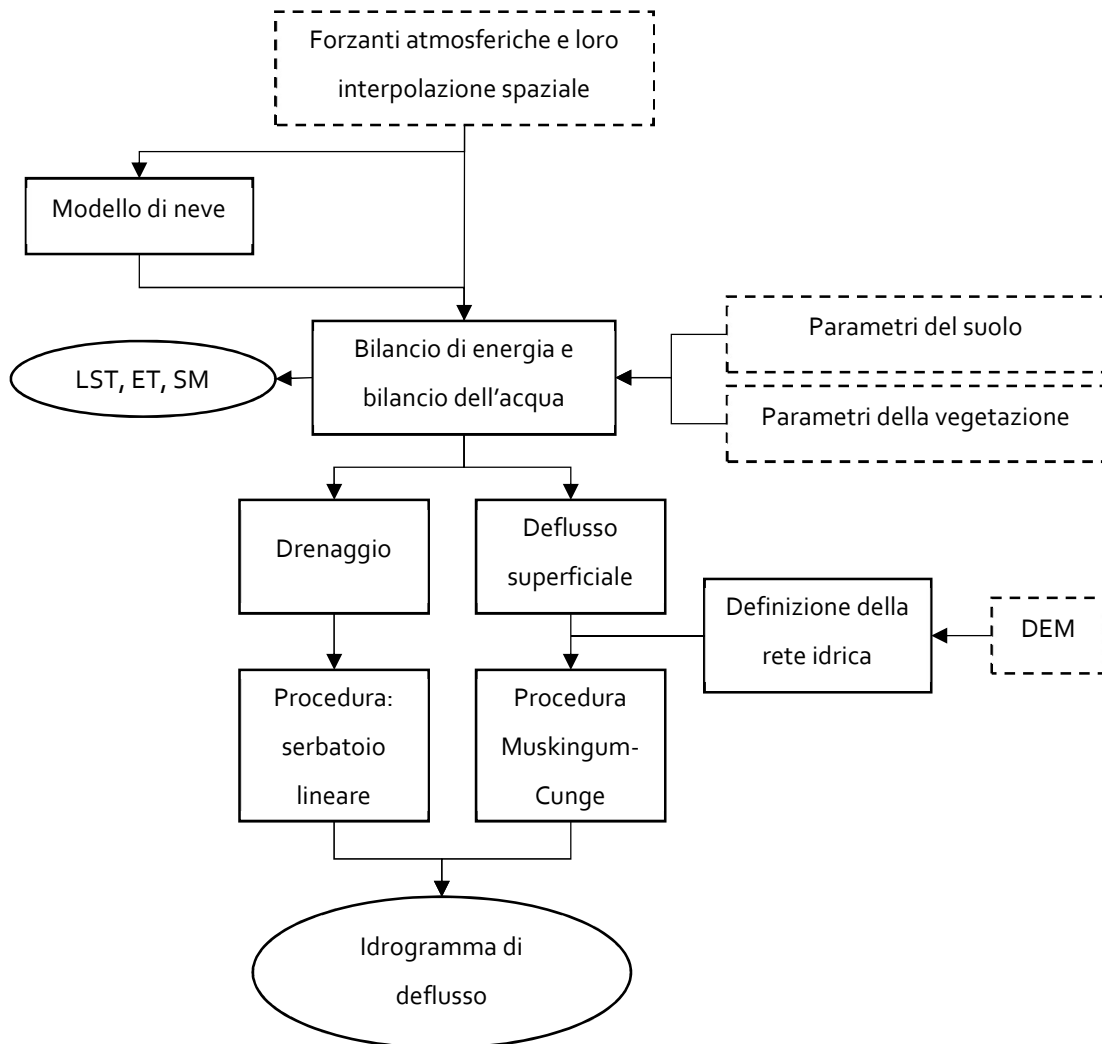


Figura 2.1-1 Schema del modello FEST-EWB.

In particolare, nel bilancio energetico tra la superficie del suolo, la vegetazione e la bassa atmosfera, tutti i termini sono calcolati e l'equazione è risolta cercando la RET, cioè quella temperatura superficiale del terreno che chiude l'equazione del bilancio energetico. Inoltre, l'approccio termodinamico RET risolve la maggior parte dei problemi dell'effettivo calcolo ET e SM. Infatti, consente al modello di evitare di calcolare l'ET effettiva come una funzione empirica dell'ET potenziale, analogamente alla funzione beta sviluppata da Parlange et al (1999).

2.1.1 Il bilancio dell'acqua

L'evoluzione SM per la cella generica nelle posizioni i e j è descritta dall'equazione del bilancio idrico:

$$\frac{\partial SM_{i,j}}{\partial t} = \frac{1}{dz_{i,j}} (P_{i,j} - R_{i,j} - PE_{i,j} - ET_{i,j}) \quad (1)$$

L'equazione del bilancio idrico è calcolata in ogni cella del dominio caratterizzata da un singolo strato di profondità del suolo dz , P [mm] rappresenta il tasso precipitazione, R [mm] il deflusso superficiale, PE [mm] il flusso di drenaggio ed ET [mm] il tasso di evapotraspirazione.

L'umidità del suolo nelle cellule coperte dalla neve è assunta invariante con il tempo.

2.1.2 Il bilancio dell'energia

Il bilancio energetico della superficie terrestre è una riformulazione della prima legge della termodinamica, che tratta la conservazione dell'energia, in cui l'energia totale di un sistema rimane la stessa anche se si verificano trasformazioni di energia.

L'equazione completa del bilancio energetico sulla superficie terrestre per la cella generica nelle posizioni i e j è espressa di seguito:

$$Rn_{i,j} - G_{i,j} - (H_s + H_c)_{i,j} - (LE_s + LE_c)_{i,j} = \frac{\Delta W}{\Delta t_{i,j}} \quad (2)$$

dove Rn rappresenta la radiazione netta, G il flusso di calore dal suolo, H_s il calore sensibile per il suolo nudo, H_c il calore sensibile per il suolo vegetato, LE_s il flusso di calore latente per il suolo nudo, LE_c quello per suolo vegetato e $\Delta W / \Delta t_{i,j}$ i flussi di stoccaggio, espresse tutte in $[W/m^2]$.

I termini di stoccaggio dell'energia $\Delta W / \Delta t_{i,j}$ sono spesso trascurabili, specialmente a scala di bacino con una bassa risoluzione spaziale; invece su scala locale il contributo di questi termini potrebbe essere significativo (Meyers e Hollinger 2004); (Jacobs, Heusinkveld e Holtslag 2008); (C. Corbari 2010)). Nel corso dell'intero lavoro di tesi essi saranno considerati trascurabili e quindi posti nulli. I termini dell'equazione del bilancio energetico sono descritti nelle sezioni seguenti.

Radiazione netta

La radiazione netta è la somma algebrica delle radiazioni in entrata e in uscita a onde corte e lunghe

$$Rn = R_s \cdot (1 - r) + \xi_c \sigma (Ta)^4 - \xi_s \sigma (RET)^4 \quad (3)$$

dove ξ_s [-] è l'emissività del suolo, Ta [K] la temperatura dell'aria, ξ_c [-] l'emissività dell'atmosfera, σ $[Wm^{-2}K^{-4}]$ la costante di Stefan-Boltzmann, r [-] l'albedo.

In letteratura esistono diverse equazioni per la descrizione dell'emissività dell'atmosfera, ξ_c , considerando chiaro e cielo nuvoloso con diversa frazione di copertura nuvolosa (Sedlar e Hock 2009). La radiazione netta a onde corte, $R_s \cdot (1 - r)$ coinvolta nei processi evaporativi viene calcolata considerando l'effetto della topografia (Mancini, Martinelli e Ravazzani 2005).

Flusso di calore dal suolo

Il flusso di calore del suolo è il calore modificato per la conduzione con il sottosuolo e viene valutato come

$$G = \left(\frac{g_{term}}{dz} \right) \cdot (RET - T_{soil}) \quad (4)$$

La conduttività termica del suolo g_{term} [$Wm^{-1}K^{-1}$], che dipende dalla tensione dell'acqua del suolo, viene valutata con l'equazione di McCumber-Pielke che calcola la tensione idrica del suolo in funzione dell'SM ((McCumber e Pielke 1981); (Peters-Lidard, et al. 1998)).

Flusso di calore sensibile

Il flusso di calore sensibile, che è l'energia termica trasferita tra la superficie e l'aria quando le loro temperature sono diverse, è considerato per suolo nudo, H_s , e per la vegetazione, H_c . La cella del dominio computazionale è caratterizzata da una frazione di vegetazione, f_v , per discriminare la percentuale di copertura della vegetazione. L'equazione di questo flusso verticale è

$$H_s + H_c = (1 - f_v) \cdot \frac{\rho_a \cdot c_p}{r_{abs}} \cdot (RET - T_a) + f_v \cdot \frac{\rho_a \cdot c_p}{r_a} \cdot (RET - T_a) \quad (5)$$

dove ρ_a [kgm^{-3}] è la densità dell'aria, c_p [$MJkg^{-1}K^{-1}$] la capacità termica specifica della biomassa, la resistenza aerodinamica r_a [sm^{-1}] regola il trasferimento di calore e vapore acqueo dalla superficie evapotraspirante all'aria sopra la chioma degli alberi. Le funzioni di correzione per la stabilità o l'instabilità atmosferica sono incluse usando il modello Thom (1975).

La resistenza aerodinamica per la frazione di vegetazione può essere calcolata usando la seguente formula:

$$r_a = \frac{\left[\ln \left(\frac{z_m - d}{z_{om}} \right) - \psi_m \cdot \left(\frac{z_m - d}{L} \right) \right] \cdot \left[\ln \left(\frac{z_h - d}{z_{oh}} \right) - \psi_h \cdot \left(\frac{z_h - d}{L} \right) \right]}{k^2 \cdot u} \quad (6)$$

dove z_m , d , z_{om} , z_h e z_{oh} [m] sono funzioni dell'altezza della vegetazione. In caso di terreno nudo, la resistenza aerodinamica, r_{abs} [sm^{-1}], dovrebbe essere calcolata usando la stessa equazione (19), ma z_m , d , z_{om} , z_h e z_{oh} [m] sono calcolati usando l'altezza della vegetazione come valore zero.

Flusso di calore latente

Il calore latente, che è il calore utilizzato nella fase di passaggio da un liquido a un gas, è considerato per suolo nudo, LE_s , e per la porzione vegetata, LE_c e nel FEST-EWB è calcolato come:

$$LE_c + LE_s = f_v \cdot \left(\frac{\rho_a \cdot c_p}{\gamma(r_a + r_c)} \right) \cdot (e^* - e_a) + (1 - f_v) \cdot \frac{\rho_a \cdot c_p}{\gamma \cdot (r_{abs} + r_s)} \cdot (e^* - e_a) \quad (7)$$

dove γ [MJkg^{-1}] è la costante psicometrica, e^* [Pa] la pressione del vapore di saturazione, è calcolata come una funzione del RET mentre la tensione di vapore, e_a [Pa], come una funzione di T_a . La resistenza della chioma r_c [sm^{-1}], che descrive la resistenza del flusso di vapore attraverso il raccolto traspirante, è espressa come (Jarvis 1976)

$$r_c = \frac{r_{smin}}{LAI} \cdot \frac{FC - WP}{\theta - WP} \quad (8)$$

La resistenza del suolo r_s [sm^{-1}] è la resistenza all'evaporazione della superficie del suolo (Sun 1982) ed è calcolata come:

$$r_s = 3.5 \cdot \left(\frac{\theta_{sat}}{\theta} \right)^{2.3} + 33.5 \quad (9)$$

Il calore latente di vaporizzazione e la densità dell'acqua collegano LE con l'ET (ms^{-1}) secondo la formula:

$$LE = \lambda \cdot \rho_w \cdot ET \quad (10)$$

dove λ [MJkg^{-1}] è il calore latente di vaporizzazione e ρ_w [kgm^{-3}] la densità dell'acqua.

2.2 Dati osservati

La misura delle variabili meteorologiche e idrologiche avviene attraverso l'utilizzo di una stazione micrometeorologica *eddy covariance* (Figura 2.2-1) posta all'interno di un campo coltivato a mais nel comune di Livraga un comune del territorio lombardo, più precisamente in provincia di Lodi. Le coordinate geografiche sono: latitudine 45.11 N, longitudine 9.34 E, altitudine 60 m s.l.m. Al fine di inquadrare al meglio il problema vengono date alcune di informazioni relative all'area di studio. Il territorio comunale si estende tra il fiume Lambro, che ne segna il confine a occidente, e il canale Venere che scorre nel mezzo del comune. Confina con i comuni di Ospedaletto Lodigiano, Brembio, Borghetto Lodigiano, Orio Litta e San Colombano al Lambro (quest'ultimo exclave della città metropolitana di Milano).

I dati, che sono stati utilizzati per validare la procedura del filtro di kalman e calibrarne i parametri, coprono il periodo che intercorre dal 25/05/2000 al 14/12/2000.

La misura delle forzanti meteo è utile in quanto esse dovranno essere utilizzate come input del modello idrologico, la misura dei flussi è utile per poter confrontare, a posteriori, la bontà del modello ma ancora più importante per utilizzare l'osservazione per il processo di assimilazione dei dati correggendo la previsione del flusso nel momento in cui si dispone di tale informazione.

La stazione possiede strumenti di Classe 1 per la misura della più variegata gamma di parametri sia in aria che nel sottosuolo di cui si propone ora una breve descrizione:

- 1) l'anemometro sonico tridimensionale (Young Model 81000) per la misura delle tre componenti cartesiane della velocità del vento,
- 2) il gas analyzer (LI-COR 7500) per la misura della concentrazione di vapore acqueo e anidride carbonica in atmosfera, accoppiato all'anemometro sonico permette di stimare, tramite la tecnica eddy covariance (Foken 2008), il calore latente e il calore sensibile,
- 3) il radiometro (CNR 1 Kipp & Zonen) per la misurazione della radiazione ad onde corte e lunghe incidente dal sole e dall'atmosfera, e riflessa e/o emessa dalla superficie del suolo,
- 4) l'IRTS (Infra Red Temperature Skin) della categoria IRR-P Apogee Instruments per la misura della temperatura della superficie del suolo,
- 5) il termo igrometro (HMP45C Campbell Scientific) per la misura dell'umidità e della temperatura dell'aria,
- 6) le sonde di umidità (CS616 Campbell Scientific), del tipo TDR (Time Domain Reflectometer) e permettono di calcolare il contenuto volumetrico di acqua nel terreno sfruttando la tecnica della riflettometria nel dominio del tempo,
- 7) l'heat flux plate (HFP01SC Hukseflux) per la misura dei flussi di calore nel suolo,
- 8) le termocoppie (105 T Campbell Scientific),
- 9) il pluviometro a bascula (ARG 100 Campbell Scientific) per il calcolo della pioggia.

Alla sommità del traliccio sono collocati il gas analyzer e l'anemometro sonico, a 4 m il radiometro e l'IRTS, a circa 3,30 m il termo igrometro.

I dati misurati dai vari strumenti (ciascuno dei quali caratterizzato da una propria frequenza di acquisizione) sono immagazzinati in un data logger (CR 5000 Campbell Scientific) e mediati su scala di 30 minuti. Il data logger è in grado anche di eseguire le prime operazioni riguardanti il calcolo delle covarianze necessarie per la stima dei flussi. Estremamente importante è la manutenzione e la pulizia della stazione al fine di garantirne il corretto funzionamento. Soprattutto la strumentazione ad alta frequenza (l'anemometro sonico e il gas analyzer) richiede una cura particolare. L'anemometro calcola la velocità del vento nelle tre componenti cartesiane attraverso il tempo di transito di segnali acustici tra un sensore emettitore ed uno ricevente. È importante che tra i due sensori non si interponga nessun ostacolo (ragnatele o quant'altro) al fine di ottenere una buona qualità del dato. Il

gas analyzer misura la concentrazione di vapore acqueo e di anidride carbonica in atmosfera sfruttando l'invio di segnali infrarossi attraverso un cammino ottico.

Nella fase di post processing è in primis necessario scartare i dati misurati dall'anemometro e dal gas analyzer in corrispondenza dei giorni piovosi. È da tenere in considerazione che anche nelle prime ore del mattino, durante il momento di formazione della rugiada, è possibile che si generi una patina d'acqua sul vetrino del gas analyzer e quindi i dati potrebbero essere affetti da errore.

Un altro aspetto di fondamentale importanza che è necessario considerare è che la stazione eddy covariance funziona solamente in presenza di turbolenza atmosferica. In condizioni di adiabaticità (condizioni neutre) i termini di covarianza tendono a zero cosicché risulta impossibile calcolare correttamente i flussi di calore latente e sensibile (Masseroni, et al. 2011).



Figura 2.2-1 Immagine della stazione eddy covariance in sito che fornisce i dati utilizzati nel corso di questo lavoro di tesi.

CAPITOLO 3.

METODI E CONCETTI DELL'ASSIMILAZIONE DEI DATI

L'assimilazione dei dati è un processo o tecnica di analisi in cui le informazioni osservate sono accumulate nello stato del modello sfruttando i vincoli di coerenza con le leggi dell'evoluzione temporale e delle proprietà fisiche (Courtier 2001). Come già detto nel capitolo introduttivo, la tecnica della *data assimilation*, si sviluppa in seguito ad una necessità di far fronte a problemi di distribuzione spaziale della misura che la statistica "classica" non riusciva a risolvere pienamente a causa dei frequenti cambiamenti nelle versioni dei modelli numerici di previsione e le alterazioni stagionali. Questi fattori, combinati con la necessità di serie estese di dati, mettono in discussione l'efficacia dei tradizionali metodi statistici in favore dei metodi di assimilazione dei dati (Galanis e Anadranistakis 2002).

Esistono due diversi tipi di assimilazione dei dati: (1) sequenziale, la quale implica la correzione delle variabili di stato del sistema (ad esempio temperatura o umidità del suolo) nel modello ogni qual volta siano disponibili le osservazioni; e (2) variazionale quando i parametri incogniti del modello vengono modificati utilizzando dei set di dati ottenuti in finestre temporali di alcuni giorni o settimane (Kalma, McVicar e McCabe 2008).

Lo stato del sistema è definito come un insieme di numeri necessari a rappresentare la situazione di un sistema in un determinato istante temporale. Formalmente i dati sono raccolti in una matrice colonna.

Un modello numerico invece determina come lo stato del modello in un determinato momento cambia nello stato del modello in un momento successivo. Lo stato del modello numerico non può essere determinato dalle sole osservazioni disponibili se il numero di osservazioni del sistema attuale

disponibile per l'analisi è di ordini di grandezza inferiore al numero di valori richiesti per specificare lo stato del modello. Viene dunque utilizzato il modello numerico per propagare le informazioni dalle osservazioni passate all'ora corrente. Questo viene poi combinato con le osservazioni del sistema attuale utilizzando un metodo di assimilazione dei dati.

Per una data analisi, le osservazioni sono immagazzinate in un vettore delle osservazioni. Per poterle utilizzare nella procedura di analisi è necessario essere in grado di confrontarle con il vettore dello stato del sistema. La situazione migliore sarebbe quella in cui si ha a disposizione un'osservazione per ogni passo di calcolo del modello numerico, ognuna di esse può essere quindi considerata un valore dello stato del sistema. Se così fosse risulterebbe inutile l'assimilazione dei dati perché tanto varrebbe tenere il valore osservato invece che calcolarne uno con i modelli per poi assimilarlo utilizzando quello osservato. Nei casi reali, infatti, i dati a disposizione sono ridotti in termini numerici e, come già detto in precedenza, viene utilizzato un modello di assimilazione dei dati per propagare le informazioni agli istanti successivi.

Un altro concetto fondamentale che bisogna senz'altro tenere in considerazione è il fatto che esistono delle incertezze nelle osservazioni e nel modello stesso. Per rappresentare le incertezze si assume la presenza di un certo errore fra i vettori di cui si è a disposizione e le loro controparti esatte (Galanis e Anadranistakis 2002). Si vedrà nei paragrafi successivi come questi errori sono stati presi in considerazione.

3.1 Metodi di assimilazione dei dati

I principi dell'assimilazione dei dati hanno la loro rappresentazione con diversi metodi, nel corso di questa tesi sono stati utilizzati il filtro di Kalman (Galanis e Anadranistakis 2002) e un approccio semplificato (Lakshmi 2000).

3.1.1 Filtro di Kalman

Uno degli approcci più convenienti per quanto concerne l'assimilazione dei dati è l'uso del filtro di Kalman (vedi per esempio, (Brockwell e Davis 1987); (Kalman 1960); (Kalman e Bucy 1961)). Questa tecnica dà eccellenti risultati nella correzione di errori sistematici in qualsiasi tipo di previsione, basato sulla combinazione ricorsiva di recenti previsioni e osservazioni. Il vantaggio principale è il facile adattamento a qualsiasi modifica dei dati in uso.

Si consideri il vettore x_t , vettore stato del sistema, che denota un processo incognito al tempo t e y_t vettore delle osservazioni, quindi noto, al medesimo istante t . Si assume che il cambio dello stato sistema sia governato dall'equazione di sistema (*system equation*):

$$x_t = F_t \cdot x_{t-1} + w_t \quad (1)$$

Mentre la relazione fra il vettore delle osservazioni e il vettore incognito è data dall'equazione delle osservazioni (*observation equation*):

$$y_t = H_t \cdot x_t + v_t \quad (2)$$

Le matrici F_t e H_t note come matrice del sistema, la prima, e matrice delle osservazioni la seconda, sono determinate prima che il processo del filtro di Kalman abbia inizio. Così anche le matrici di covarianza W_t e V_t e i rispettivi vettori randomici w_t e v_t sono definiti a priori.

La teoria del filtro di Kalman fornisce una metodologia per la stima ricorsiva dell'incognita x_t e della sua matrice di covarianza P_t utilizzando tutti i valori osservati che si hanno a disposizione nel vettore y al tempo t e le informazioni sullo stato del sistema e sulla sua matrice di covarianza note al passo precedente $t - 1$. Detto questo, la miglior stima che possiamo avere per questi valori al tempo t è data dalle equazioni di previsione (*prediction equation*)

$$x_{t/t-1} = F_t \cdot x_{t-1} \quad (3)$$

$$P_{t/t-1} = F_t \cdot P_{t-1} \cdot F_t^T + W_t \quad (4)$$

Il nuovo valore dello stato del sistema sarà calcolato quando la nuova osservazione y_t sarà nota attraverso l'equazione di aggiornamento dello stato del sistema:

$$x_t = x_{t/t-1} + K_t \cdot (y_t - H_t \cdot x_{t/t-1}) \quad (5)$$

dove:

$$K_t = P_{t/t-1} \cdot H_t^T \cdot (H_t \cdot P_{t/t-1} \cdot H_t^T + V_t)^{-1} \quad (6)$$

è la matrice guadagno, parte cruciale del filtro. Questa determina quanto facilmente il filtro possa adattare una qualsiasi nuova condizione. Infine si aggiorna il valore della covarianza dello stato del sistema al tempo t .

$$P_t = (I - K_t \cdot H_t) \cdot P_{t/t-1} \quad (7)$$

Una delle più grandi difficoltà nel processo del filtro di Kalman è sicuramente la scelta del calcolo delle matrici di covarianza ovvero W_t e V_t . Come già detto in precedenza, la procedura più complessa ma allo stesso tempo più corretta sarebbe quella di assumere delle funzioni densità di probabilità, PDF, per ogni tipologia di errore. Molti studi propongono invece un approccio più semplice stimando la varianza W_t dell'equazione di sistema e V_t dell'equazione di osservazione basata sul campione di gli ultimi 7 valori di $w_t = x_t - x_{t-1}$ e $v_t = y_t - x_t$ rispettivamente. Altri li considerano indipendenti dal tempo, quindi senza la capacità di apportare modifiche più rapide a possibili cambiamenti esterni e per questo posti uguali a zero. Nel corso di questo studio si è deciso di porre la covarianza

dell'equazione di sistema pari a zero mentre quella dell'equazione d'osservazione pari all'errore sull'osservazione S_{oss} ; i vettori randomici w_t e v_t sono stati posti pari a zero.

3.1.2 Applicazione idrologica

Nell'ambito del lavoro di tesi proposto la tecnica del filtro di Kalman è stata applicata in diversi modi

- 1) calibrazione dei parametri del suolo attraverso l'assimilazione di LST;
- 2) aggiornamento dello stato sistema LE con assimilazione di LST;
- 3) aggiornamento dello stato sistema G con assimilazione di LST;
- 4) aggiornamento dello stato sistema SM con assimilazione di SM;

In generale (punti 1-4) si è scelto di considerare un solo parametro alla volta riducendo così la complessità del problema che passa da multivariato, con variabili che risultano essere vettori o matrici, ad un problema monodimensionale, dove scompare tutto quello che concerne il calcolo matriciale. La vera ragione dell'utilizzo del Kalman monodimensionale non risiede però unicamente in una trattazione più semplice ma anche nel fatto che i parametri del suolo, che andrebbero a comporre lo stato del sistema, risultano essere molto eterogenei fra loro e nel momento in cui si vanno ad incrociare nel calcolo matriciale questo porta ad errori sul valore finale dei parametri stessi. Nel caso 1, di calibrazione parametri con assimilazione di LST possiamo riscrivere le equazioni del filtro di Kalman adattandole ad un parametro generico nell'ambito del nostro studio.

$$x_{t/t-1} = x_{t-1} \quad (8)$$

$$H_t = \frac{ts_2 - ts_1}{dx} \quad (9)$$

$$y_t = H_t \cdot x_t \quad (10)$$

$$P_{t/t-1} = P_{t-1} = S_x \quad (11)$$

$$x_t = x_{t/t-1} + k_t \cdot (y_t - H_t \cdot x_{t/t-1}) \quad (12)$$

$$k_t = S_x \cdot H_t^T \cdot (H_t \cdot S_x \cdot H_t^T + S_{oss}) \quad (13)$$

Di particolare rilevanza è la definizione della matrice delle osservazioni H , che è definita come rapporto fra la differenza di due temperature ottenute risolvendo due bilanci d'energia i cui parametri in input sono gli stessi a meno di quello momentaneamente preso in esame, il quale sarà soggetto ad una perturbazione in un caso positiva mentre nell'altro negativa, pari alla metà di dx .

Nei casi di aggiornamento dello stato del sistema le equazioni del filtro di Kalman sono state riscritte nei seguenti modi.

Nel caso 2 lo stato del sistema x_t sarà calcolato come media fra due valori di calore latente uscenti da due simulazioni nelle quali sono state imposte delle variazioni di due forzanti meteo. Le forzanti in questione sono la radiazione e la temperatura dell'aria, le rispettive perturbazioni $d_{rad}[W/m^2]$ e d_{ta} [°C]

$$le_1(\pm d_{rad} \text{ AND } \pm d_{ta}) \quad (14)$$

$$le_2(\mp d_{rad} \text{ AND } \mp d_{ta}) \quad (15)$$

$$x_t = \frac{le_1 + le_2}{2} \quad (16)$$

Lo stato del sistema moltiplicato per la matrice delle osservazioni H_t , definita a priori rispetto alla procedura come:

$$H_t = \frac{le_1 - le_2}{d_{le}} \quad (17)$$

permette di calcolare il valore delle osservazioni, non appena il valore reale delle osservazioni sarà disponibile si potrà calcolare il nuovo valore dello stato del sistema. Si è deciso di definire il vettore delle osservazioni da confrontare con quelle calcolate dal modello in due diversi modi, nel primo si ricava un valore di calore latente da un modello residuale del bilancio energetico che prendendo in ingresso la temperatura del suolo calcola tutti i flussi e poi per differenza ricava il calore latente

$$LE_{res} = R_n - G - H \quad (18)$$

$$y_t = LE_{res} \quad (19)$$

nel secondo metodo invece si utilizzano direttamente i valori osservati di calore latente

$$y_t = LE_{obs} \quad (20)$$

Nel caso 3 di aggiornamento del sistema G lo stato del sistema x_t sarà calcolato come media fra due valori di calore dal suolo uscenti da due simulazioni nelle quali sono state imposte delle variazioni di due forzanti meteo. Le forzanti in questione sono la radiazione e la temperatura dell'aria, le rispettive perturbazioni $d_{rad}[W/m^2]$ e d_{ta} [°C]

$$g_1(\pm d_{rad} \text{ OR } \pm d_{ta}) \quad (21)$$

$$g_2(\mp d_{rad} \text{ OR } \mp d_{ta}) \quad (22)$$

$$x_t = \frac{g_1 + g_2}{2} \quad (23)$$

Lo stato del sistema moltiplicato per la matrice delle osservazioni H_t , definita a priori rispetto alla procedura come:

$$H_t = \frac{g_1 - g_2}{dg} \quad (24)$$

permette di calcolare il valore delle osservazioni, non appena il valore reale delle osservazioni sarà disponibile si potrà calcolare il nuovo valore dello stato del sistema. Si è deciso di definire il vettore delle osservazioni da confrontare con quelle calcolate dal modello in due diversi modi, nel primo si ricava un valore di calore dal suolo da un modello residuale che prendendo in ingresso la temperatura del suolo calcola tutti i flussi e poi per differenza ricava il calore dal suolo

$$G_{res} = R_n - LE - H \quad (25)$$

$$y_t = G_{res} \quad (26)$$

nel secondo metodo invece si utilizzano direttamente i valori osservati di calore dal suolo.

$$y_t = G_{obs} \quad (27)$$

Nel caso 4 di aggiornamento dello stato del sistema SM lo stato del sistema x_t sarà calcolato come media fra due valori di umidità del suolo uscenti da due simulazioni nelle quali sono state imposte delle variazioni di due forzanti meteo. Le forzanti in questione sono la radiazione e la temperatura dell'aria, le rispettive perturbazioni $d_{rad}[W/m^2]$ e $d_{ta}[°C]$.

$$sm_1(\pm d_{rad} \text{ AND } \pm d_{ta}) \quad (28)$$

$$sm_2(\mp d_{rad} \text{ AND } \mp d_{ta}) \quad (29)$$

$$x_t = \frac{sm_1 + sm_2}{2} \quad (30)$$

Lo stato del sistema moltiplicato per la matrice delle osservazioni H_t , definita a priori rispetto alla procedura come:

$$H_t = \frac{sm_1 - sm_2}{dsm} \quad (31)$$

permette di calcolare il valore delle osservazioni. Non appena il valore reale delle osservazioni sarà disponibile si potrà calcolare il nuovo valore dello stato del sistema. Si è deciso di definire il vettore delle osservazioni, da confrontare con quelle calcolate dal modello, utilizzando i valori osservati dalla stazione *eddy covariance* quindi:

$$y_t = SM_{obs} \quad (32)$$

3.1.3 Metodo semplificato

L'idea di base di questo metodo è che, data una temperatura superficiale, l'umidità del suolo verrà cambiata al fine di mantenere soddisfatto il bilancio dell'energia. Questo è possibile perché un cambio nella temperatura superficiale determina un cambiamento nei flussi di calore. La variazione del flusso di calore latente o dell'evaporazione cambia il contenuto di umidità nel suolo (Lakshmi 2000).

La temperatura superficiale è calcolata come media fra la temperatura osservata al suolo e la temperatura ottenuta attraverso il modello idrologico FEST-EWB

$$T_{ass} = \frac{RET + T_{oss}}{2} \quad (33)$$

dove RET [°C] è la temperatura di chiusura del bilancio e T_{oss} [°C] la temperatura osservata.

Si passa quindi al calcolo del calore latente attraverso un modello residuale che si basa sul concetto che un determinato flusso viene calcolato come differenza degli altri al fine di soddisfare il bilancio energetico.

$$LE = Rn - G - Hs \quad (34)$$

Quindi si calcola dunque la variazione di umidità del suolo, che permette di aggiornare quest'ultima ottenendo il valore l'umidità del suolo che mantiene soddisfatto il bilancio di energia.

$$\Delta sm = \frac{\Delta et \cdot dt}{z} \quad (35)$$

$$sm = sm + \Delta sm \quad (36)$$

dove Δet è la differenza tra il flusso d'evapotraspirazione [m/s] calcolata con il dato osservato e il flusso d'evapotraspirazione calcolato con la temperatura del metodo di assimilazione T_{ass} [°C], dt è il passo temporale [s] e z la profondità del suolo [m].

CAPITOLO 4.

ANALISI DI SENSITIVITÀ DEI PARAMETRI DEL SUOLO

4.1 Analisi di sensitività dei parametri del suolo

L'analisi di sensitività dei parametri del suolo viene eseguita utilizzando il filtro di Kalman facendo variare un singolo parametro alla volta. Per ovviare alle discrepanze tra i risultati del modello idrologico e le misure al suolo di LST e SM, si generano una serie di queste ultime variabili dal modello idrologico FEST-EWB, che serviranno successivamente come base del confronto per stabilire la sensitività di uno specifico parametro. Queste serie sono ottenute utilizzando come input le variabili meteo, citate nel capito riguardante il modello idrologico, e un fissato valore dei parametri del suolo quali permeabilità satura, profondità, emissività del suolo, resistenza stomatale minima, umidità del suolo a saturazione, umidità del suolo residua e l'indice di Brooks e Corey.

Si è ipotizzato di non conoscere il valore dei parametri utilizzati e imponendone a turno uno incognito. Attraverso l'assimilazione dei dati di temperatura del suolo, utilizzando la metodologia del filtro di Kalman, si è ottenuto un valore del parametro del terreno analizzato. Nella procedura del filtro di Kalman si è utilizzando come vettore delle osservazioni la serie di temperatura del suolo precedentemente creata con l'utilizzo del modello FEST-EWB. Il filtro ha dunque aggiornato il valore del parametro in esame cercando di rendere le temperature simulate con assimilazione dei dati simili a quelle senza assimilazione dei dati.

Si è trattato quindi di fare diversi test al fine di valutare quali di questi parametri hanno sensitività nei confronti del problema in esame. Si dice che un parametro ha sensitività quando, dopo l'assimilazione, esso ha valore uguale a quello utilizzato nella simulazione senza assimilazione.

Nei grafici di seguito si propone il confronto fra il valore utilizzato per la simulazione senza assimilazione dei dati e il valore simulato assimilando.

4.2 Analisi di sensitività usando il metodo della somiglianza

4.2.1 Permeabilità satura

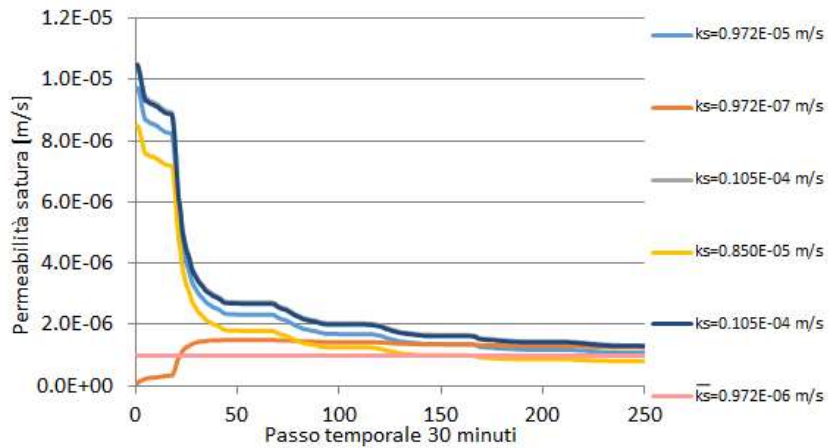


Figura 4.2-1 Andamento del parametro di permeabilità satura durante l'assimilazione, in rosa è riportato il valore del parametro utilizzato nella simulazione allo step zero.

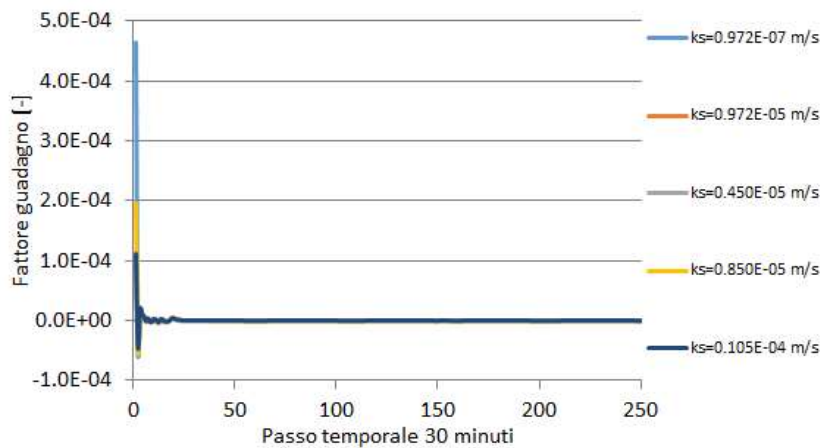


Figura 4.2-2 Andamento del fattore guadagno del filtro di Kalman.

Come già accennato nell'introduzione del capitolo, si dice che un parametro ha sensitività quando, dopo l'assimilazione, esso avrà valore uguale a quello utilizzato nella simulazione fatta allo step zero. È questo il caso della permeabilità satura infatti, come si può notare dalla Figura 4.2-1, tutte le diverse simulazioni si assestano al valore della simulazione fatta allo step zero dopo circa 250 passi. Con il filtro di Kalman si va ad ogni passo ad aggiornare il parametro preso in esame. Dalla Figura 4.2-2 si può notare come nei primi 20-30 passi temporali si ha un fattore di guadagno, che determina un

aggiornamento molto marcato dovuto alla forte differenza che si ha con il valore reale, quando questa differenza decresce si ha una diminuzione anche del fattore di guadagno.

Ad ogni step del filtro di Kalman il valore del parametro trovato viene inserito nel modello idrologico per valutare umidità e temperatura del suolo

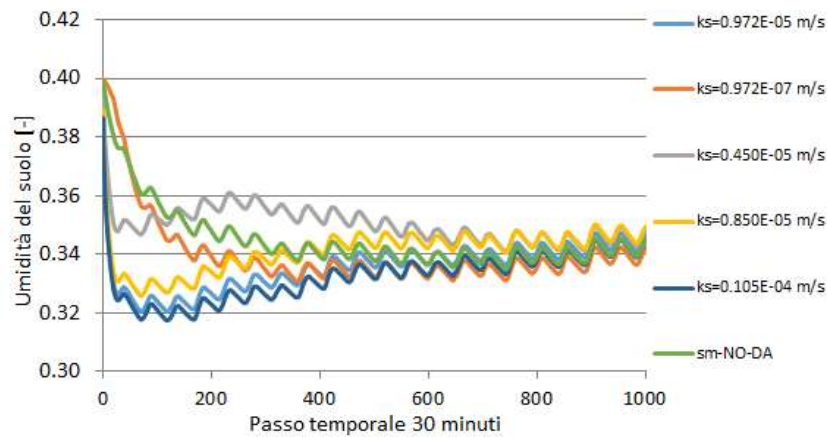


Figura 4.2-3 Confronto tra i valori di umidità del suolo ottenuti nella simulazione con assimilazione e i valori ottenuti nella simulazione senza assimilazione.

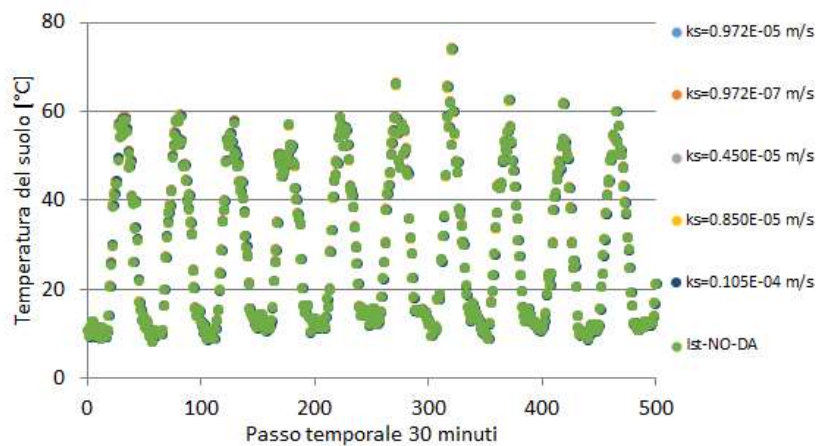


Figura 4.2-4 Confronto tra i valori di temperatura del suolo ottenuti nella simulazione con assimilazione e i valori ottenuti nella simulazione senza assimilazione.

Dall'analisi delle variabili di temperatura e umidità del suolo (Figura 4.2-3 e Figura 4.2-4) e del loro comportamento al variare della permeabilità satura, possiamo evidenziare che quest'ultima influenzi solamente l'umidità del suolo. Infatti la temperatura del suolo subisce una variazione minima rimanendo sostanzialmente pari a quella senza assimilazione. Dal grafico dell'umidità del suolo invece si nota come, inizialmente, l'umidità presenti delle variazioni compatibili con l'andamento della permeabilità per poi tendere ad un unico valore.

Sulla base di quanto detto per la permeabilità satura, si propongono ora i risultati per i rimanenti parametri e, al termine della presentazione, verrà fatto un riassunto dei test e tratte le dovute conclusioni.

4.2.2 Profondità del suolo

Risultati simili si ottengono poi per tutti gli altri parametri. La profondità del suolo influenza sia SM che LST.

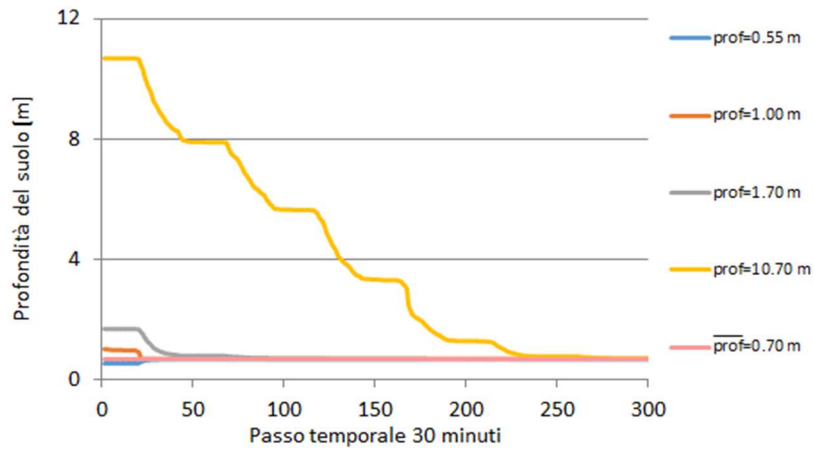


Figura 4.2-5 Andamento del parametro di profondità del suolo durante l'assimilazione, in rosa è riportato il valore del parametro utilizzato nella simulazione allo step zero.

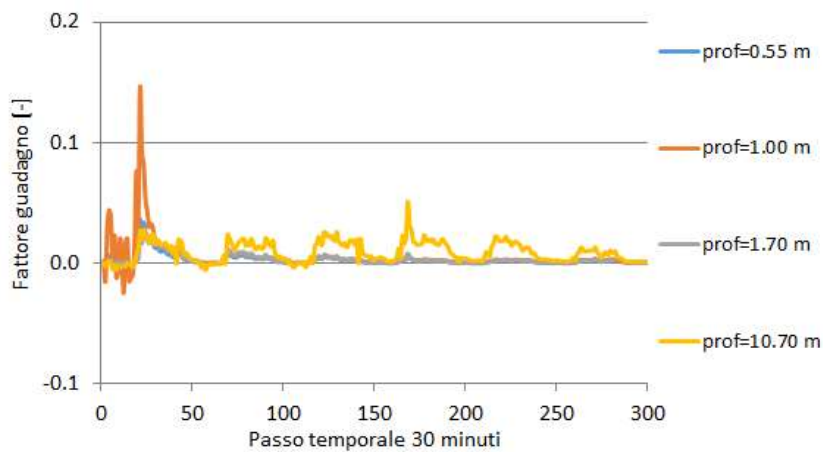


Figura 4.2-6 Andamento del fattore guadagno del filtro di Kalman.

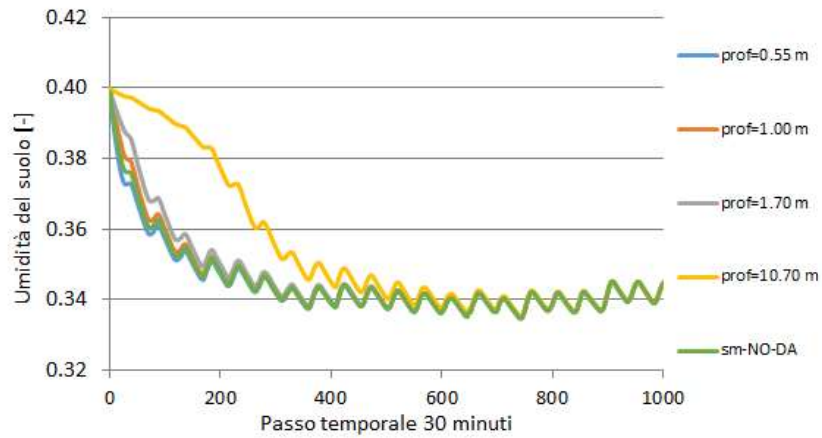


Figura 4.2-7 Confronto tra i valori di umidità del suolo ottenuti nella simulazione con assimilazione e i valori ottenuti nella simulazione senza assimilazione.

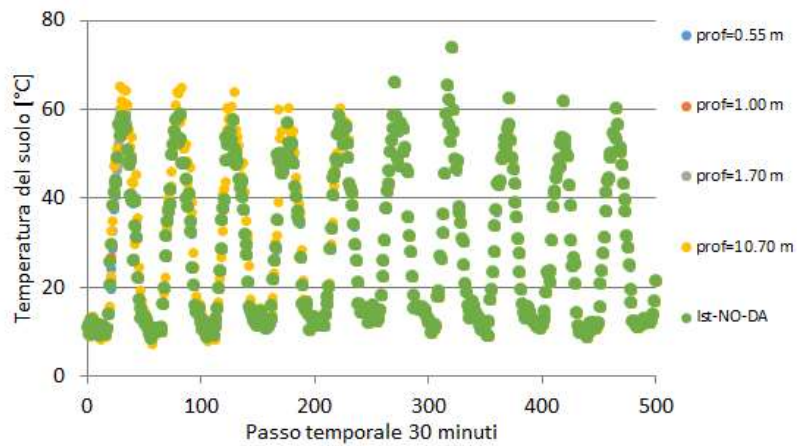


Figura 4.2-8 Confronto tra i valori di temperatura del suolo ottenuti nella simulazione con assimilazione e i valori ottenuti nella simulazione senza assimilazione.

4.2.3 Indice di Brooks e Corey

L'indice di Brooks e Corey influenza leggermente SM.

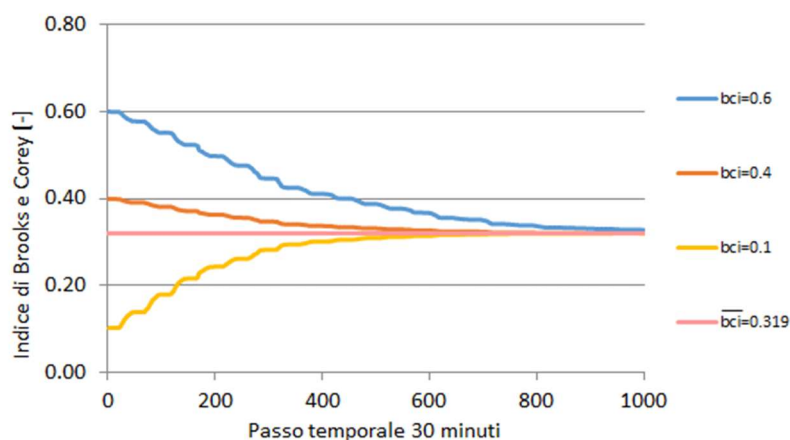


Figura 4.2-9 Andamento dell'indice di Brooks e Corey durante l'assimilazione, in rosa è riportato il valore del parametro utilizzato nella simulazione allo step zero.

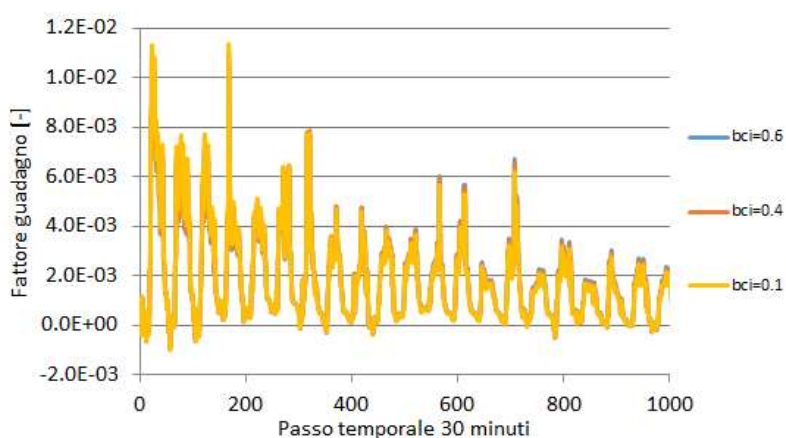


Figura 4.2-10 Andamento del fattore guadagno del filtro di Kalman.

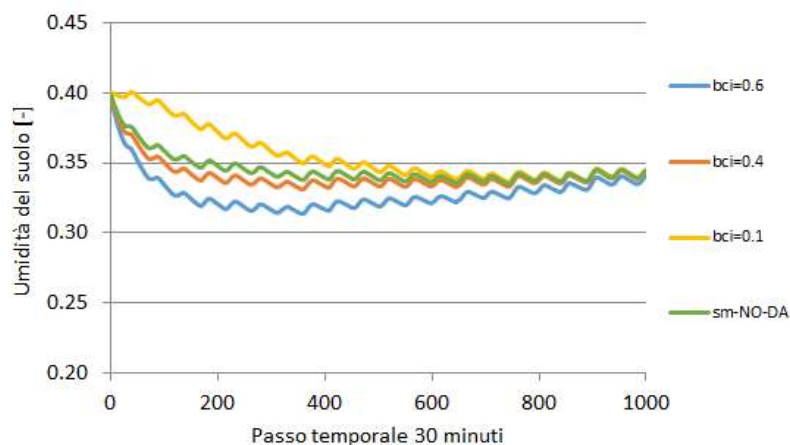


Figura 4.2-11 Confronto tra i valori di umidità del suolo ottenuti nella simulazione con assimilazione e i valori ottenuti nella simulazione senza assimilazione.

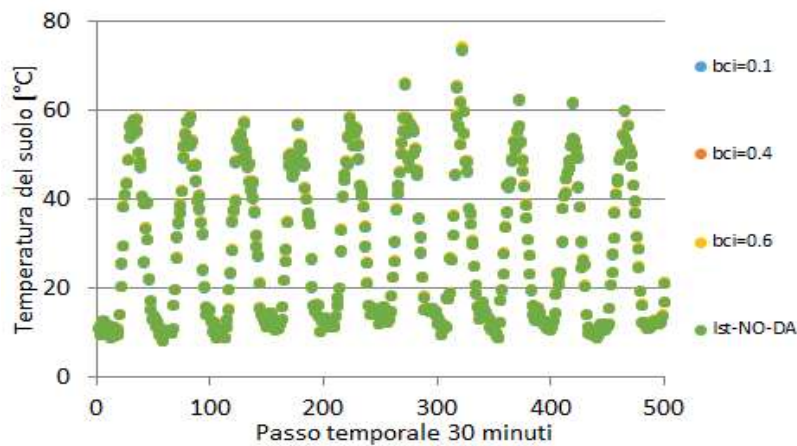


Figura 4.2-12 Confronto tra i valori di temperatura del suolo ottenuti nella simulazione con assimilazione e i valori ottenuti nella simulazione senza assimilazione.

4.2.4 Resistenza stomatale minima

La resistenza stomatale, rientrando nella stima dell'evapotraspirazione, si differenzia dagli altri parametri e ha un effetto più immediato sulla temperatura superficiale mentre agisce più lentamente sull'umidità del suolo in virtù anche della natura di quest'ultima.

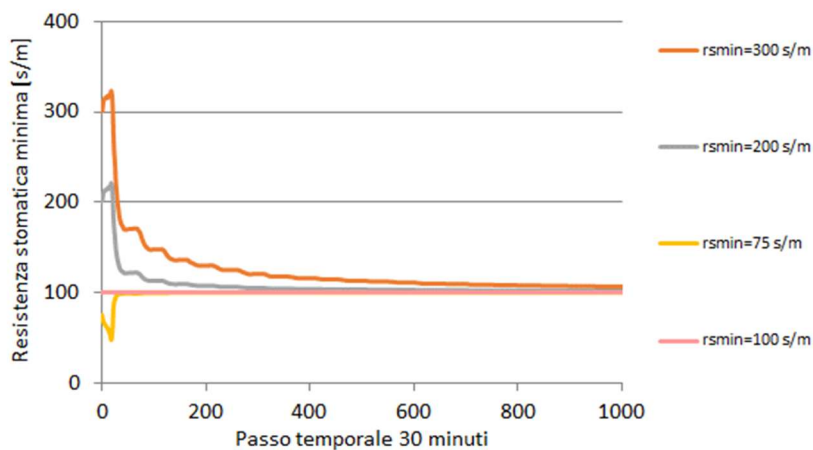


Figura 4.2-13 Andamento della resistenza stomatale minima durante l'assimilazione, in rosa è riportato il valore del parametro utilizzato nella simulazione allo step zero.

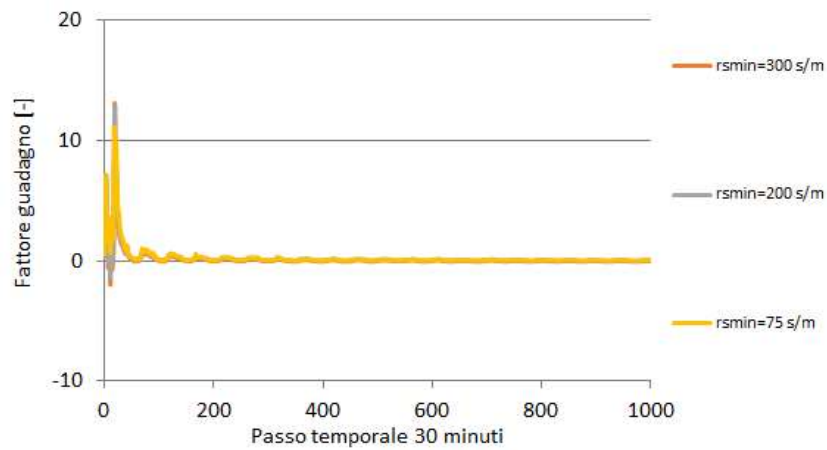


Figura 4.2-14 Andamento del fattore guadagno del filtro di Kalman.

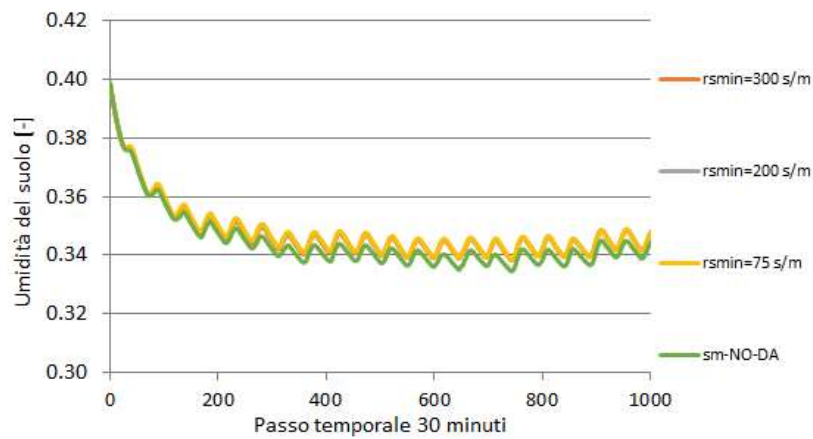


Figura 4.2-15 Confronto tra i valori di umidità del suolo ottenuti nella simulazione con assimilazione e i valori ottenuti nella simulazione senza assimilazione.

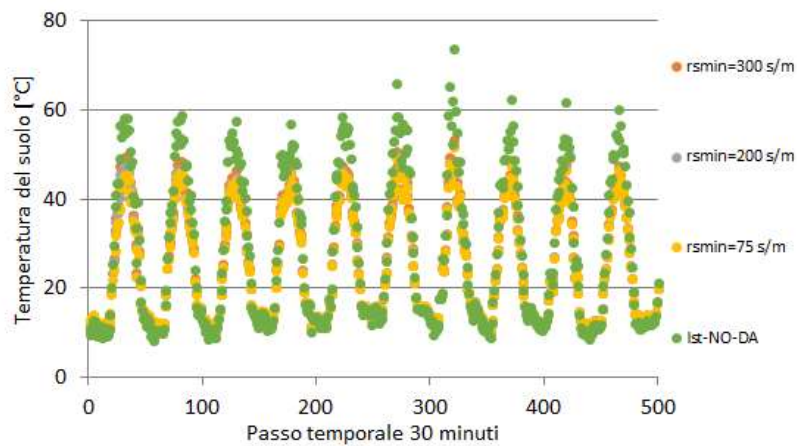


Figura 4.2-16 Confronto tra i valori di temperatura del suolo ottenuti nella simulazione con assimilazione e i valori ottenuti nella simulazione senza assimilazione.

4.2.5 Emissività del suolo

L'emissività del suolo ha un effetto simile alla resistenza stomatale.

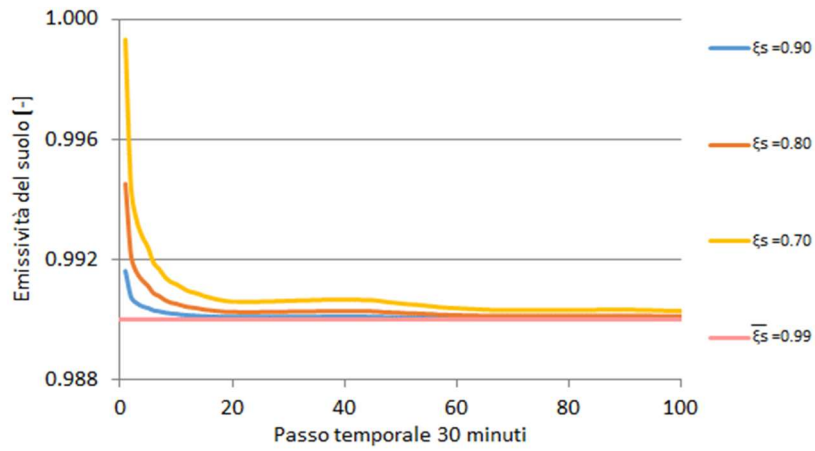


Figura 4.2-17 Andamento dell'emissività durante l'assimilazione, in rosa è riportato il valore del parametro utilizzato nella simulazione allo step zero.

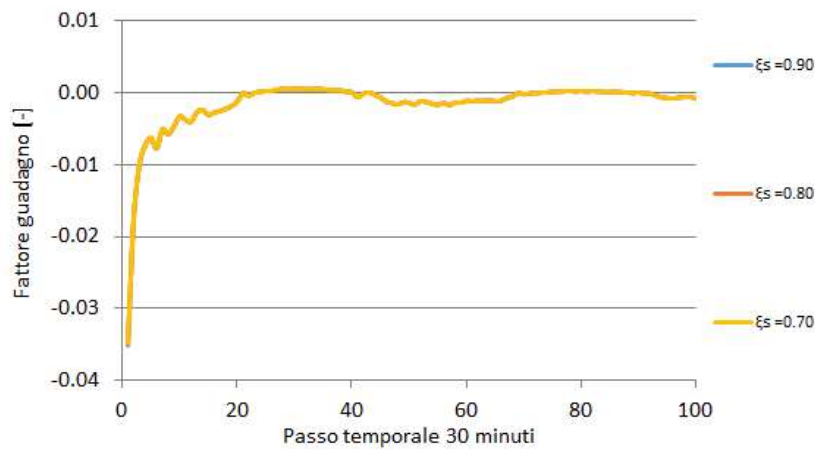


Figura 4.2-18 Andamento del fattore guadagno del filtro di Kalman.

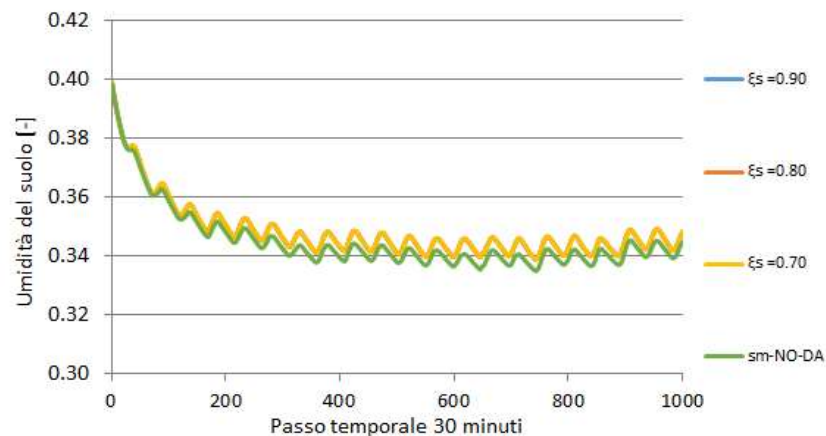


Figura 4.2-19 Confronto tra i valori di umidità del suolo ottenuti nella simulazione con assimilazione e i valori ottenuti nella simulazione senza assimilazione.

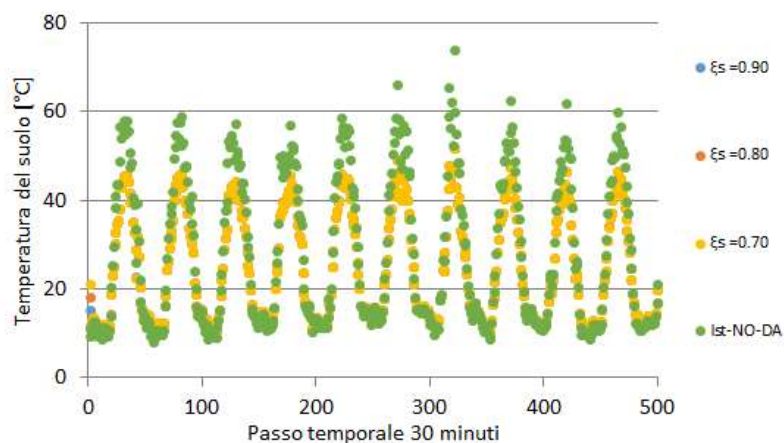


Figura 4.2-20 Confronto tra i valori di temperatura del suolo ottenuti nella simulazione con assimilazione e i valori ottenuti nella simulazione senza assimilazione.

4.2.6 Umidità del suolo residua

I parametri il cui aggiornamento non porta ad avvicinarsi al valore osservato del parametro, non mostrando un andamento convergente, sono quelli che si dice non essere sensibili alla LST. Come si può notare in Figura 4.2-21, l'umidità del suolo residua non converge e quindi non è sensibile a LST.

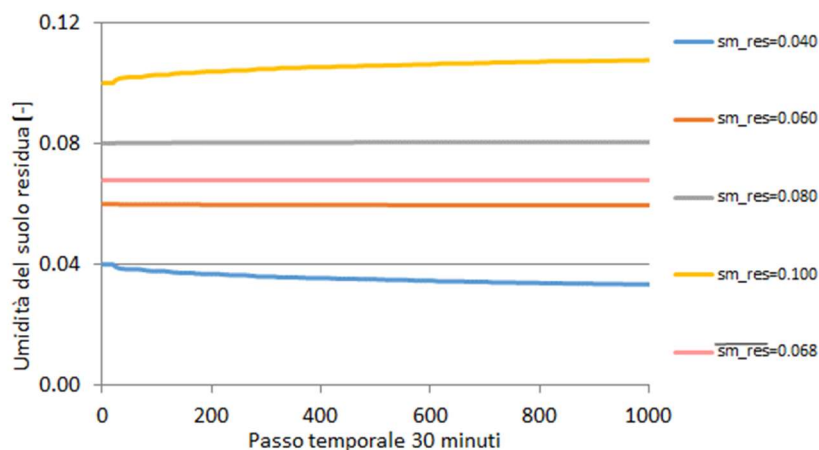


Figura 4.2-21 Andamento dell'umidità del suolo residua minima durante l'assimilazione, in rosa è riportato il valore del parametro utilizzato nella simulazione allo step zero.

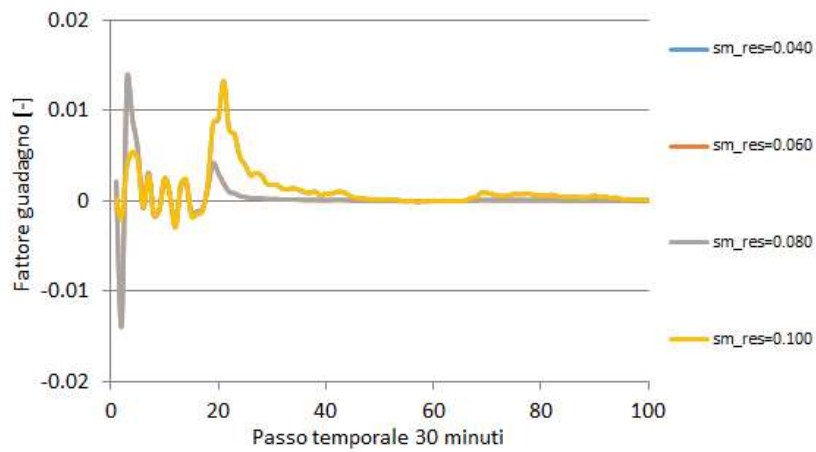


Figura 4.2-22 Andamento del fattore guadagno del filtro di Kalman.

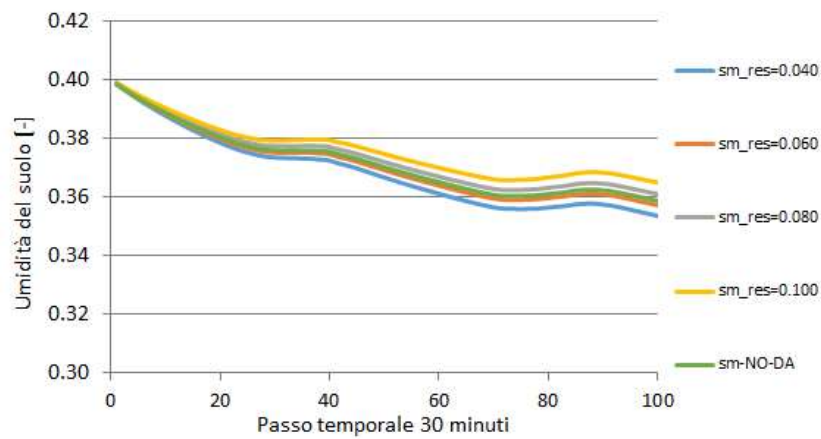


Figura 4.2-23 Confronto tra i valori di umidità del suolo ottenuti nella simulazione con assimilazione e i valori ottenuti nella simulazione senza assimilazione.

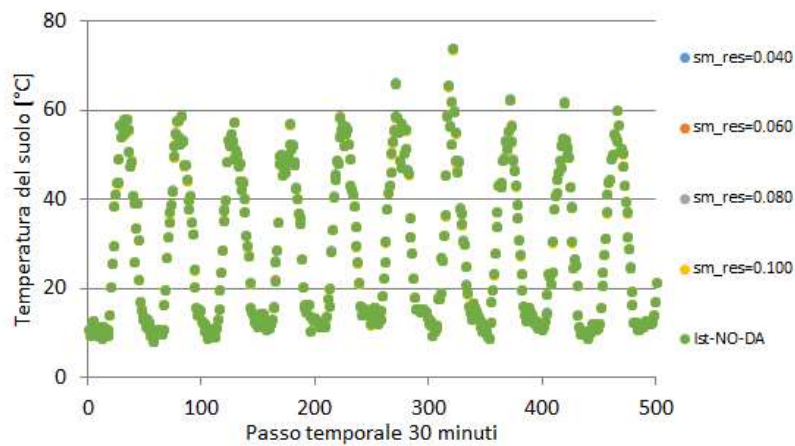


Figura 4.2-24 Confronto tra i valori di temperatura del suolo ottenuti nella simulazione con assimilazione e i valori ottenuti nella simulazione senza assimilazione.

4.2.7 Umidità del suolo saturo

Così come per l'umidità del suolo residua, anche l'umidità del suolo a saturo non presenta un andamento convergente (Figura 4.2-25) e quindi anch'essa si può dire non sensibile alla LST.

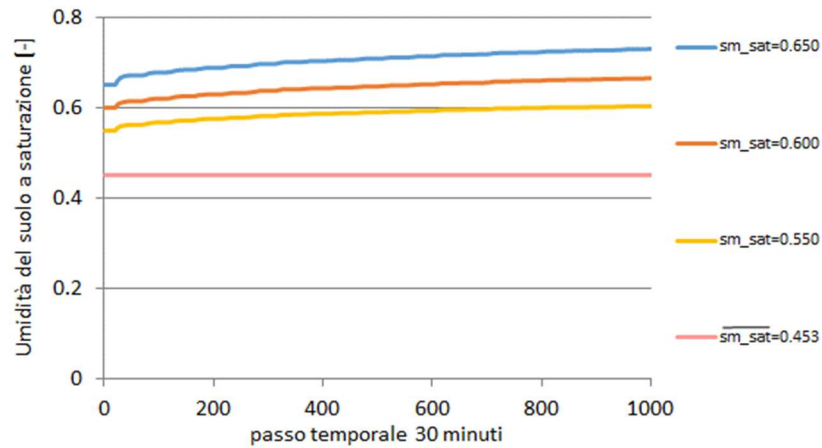


Figura 4.2-25 Andamento dell'umidità del suolo saturo durante l'assimilazione, in rosa è riportato il valore del parametro utilizzato nella simulazione allo step zero.

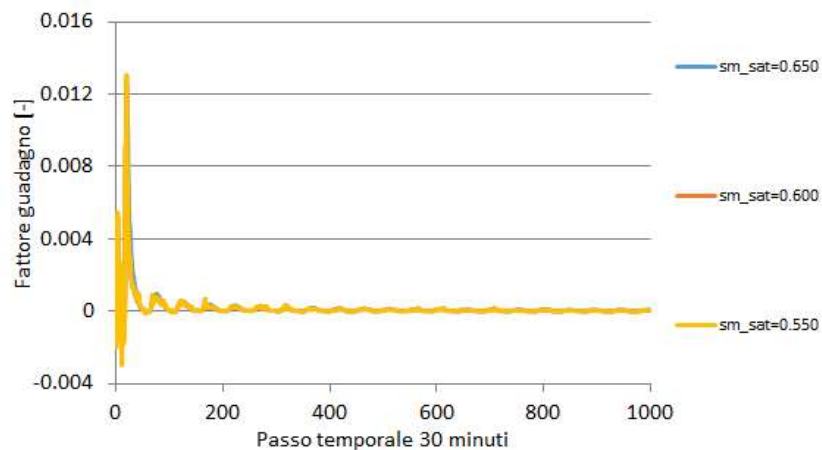


Figura 4.2-26 Andamento del fattore guadagno del filtro di Kalman.

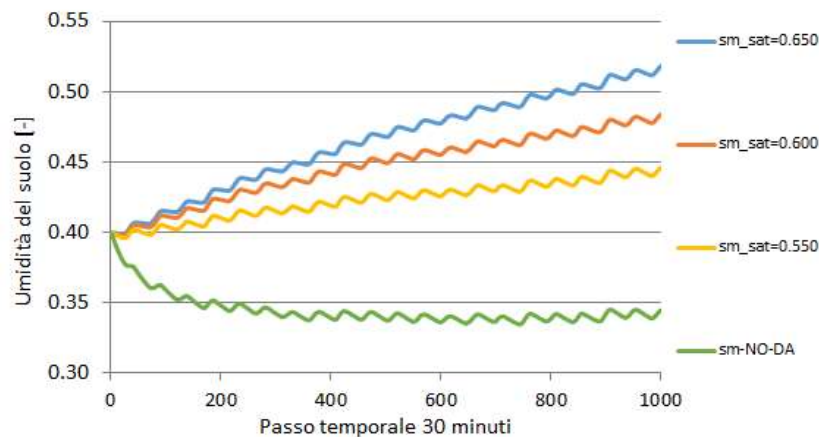


Figura 4.2-27 Confronto tra valori di umidità del suolo ottenuti nella simulazione con assimilazione e i valori ottenuti nella simulazione senza assimilazione.

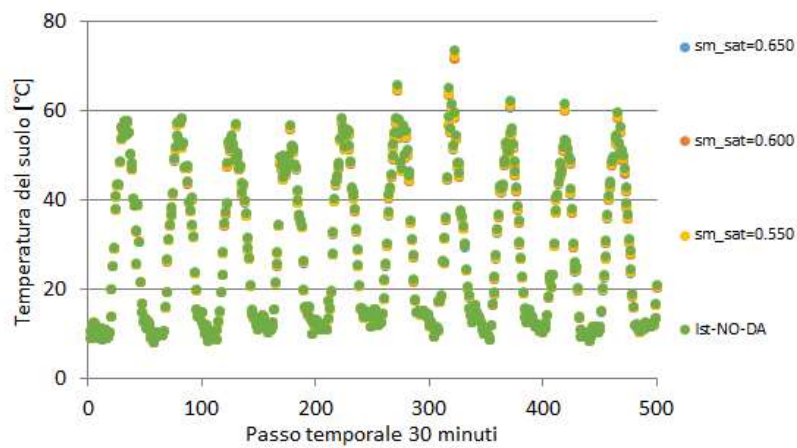


Figura 4.2-28 Confronto tra valori di temperatura del suolo ottenuti nella simulazione con assimilazione e i valori ottenuti nella simulazione senza assimilazione.

4.2.8 Riassunto analisi

Come precedentemente accennato i parametri il cui aggiornamento porta all'avvicinarsi sempre più al valore osservato del parametro (in questo caso quello simulato con il modello senza però assimilare), sono quelli che hanno sensitività per quanto riguarda lo studio condotto nell'ambito di questo lavoro. Si può quindi intuire che parametri quali l'umidità residua e quella a saturazione non hanno sensitività in quanto non cambiano, o subiscono cambiamenti che le fanno tendere al valore reale.

Al contrario mostrano la loro sensitività i parametri quali la permeabilità satura, la profondità del terreno, la resistenza stomatale minima, l'emissività del suolo e, anche se in maniera meno evidente, l'indice di Brooks e Corey.

In queste prime analisi ci si è limitati a far variare il valore iniziale dello stato del sistema, al fine di valutare quanto influisce sulla possibilità di convergenza partire da un valore distante più o meno da

quello che è il valore reale del parametro in esame. Si è dunque calcolato un indice che prende in considerazione la distanza fra il valore iniziale imposto allo stato del sistema e il valore reale del parametro e il tempo in cui lo stato del sistema subisce variazioni di una certa rilevanza, in altre parole quanto prima il parametro raggiunge il valore reale.

Per quanto riguarda temperatura e umidità del suolo, val la pena iniziare dicendo che diversi parametri influenzano in modo rilevante le diverse variabili, la permeabilità satura e l'indice di Brooks e Corey, difatti influiscono sull'umidità così come l'umidità residua e quella a saturazione, come si può facilmente intuire, mentre la profondità e la resistenza stomatale minima, invece influiscono maggiormente sulla temperatura. Per quanto riguarda l'emissività del suolo, invece, avendo un range di variazione molto limitato, la sua variazione non produce effetti rilevanti su entrambe le variabili.

Limitando l'analisi ai parametri che risultano essere sensitivi per il problema in esame si nota come dopo un primo momento di adattamento temperatura e umidità del suolo si assestano sui valori osservati. Di contro per i parametri che non convergono al termine della simulazione lo stesso risultato si ripercuote sulle variabili in esame.

Indici statistici

Al fine di valutare, non solo in termini qualitativi ma anche quantitativi, la bontà del processo di assimilazione si è pensato di calcolare un indice che tiene conto di due importanti fattori. Il primo, di natura temporale, riguarda quante assimilazioni servono al parametro affinché raggiunga il suo valore reale o più precisamente quando la differenza dei due è minore della varianza del parametro stesso. Il secondo invece indica quanto lontano è, rispetto al valore reale, il valore a cui il parametro è inizializzato prima di procedere con l'assimilazione. L'indice è poi calcolato come rapporto del secondo fattore sul primo e più il valore è alto migliore sarà la qualità dell'assimilazione.

Dato che si vuole valutare la bontà dell'assimilazione, risulta inutile calcolare l'indice per quei parametri che non mostrano convergenza, per questo è stato calcolato solo per la permeabilità satura, la profondità del suolo, la resistenza stomatale minima e l'indice di Brooks e Corey.

Tabella 4.2-1 Tabella per il calcolo dell'indice che rappresenta la bontà dell'assimilazione

Valore iniziale parametro	Passi temporali [-]	Lontananza [-]	Indice [-]
Permeabilità del suolo			
0.972E-05	230	10.0	0.042
0.972E-07	710	10.0	0.014
0.105E-04	412	10.8	0.026
0.405E-05	1041	4.2	0.004
0.850E-5	1292	8.7	0.007
Profondità del suolo			
10.7	508	15.3	0.030
1.7	218	2.4	0.011
0.55	34	1.3	0.045
1	21	1.4	0.095
Resistenza stomatale minima			
75	22	1.3	0.083
200	36	2.0	0.067
300	264	3.0	0.012
500	1344	5.0	0.004
Indice di Brooks e Corey			
0.4	518	1.3	0.002
0.1	469	3.2	0.007
0.6	910	1.9	0.002

4.3 Analisi sensitività dei parametri del suolo valutando la loro derivata nel tempo

Un secondo metodo per valutare la sensitività dei parametri è andare a calcolare la derivata dei parametri nel tempo. Di seguito si riporta il rapporto incrementale dei parametri analizzati.

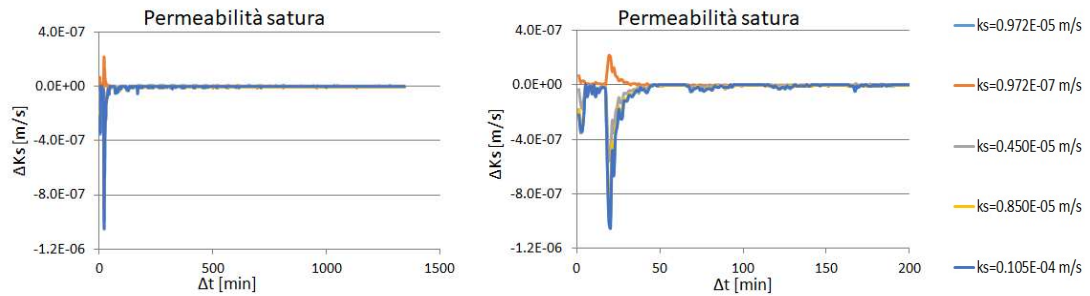


Figura 4.3-1 Derivata della permeabilità del suolo nel tempo, a destra un ingrandimento per rendere più comprensibile il grafico.

Le considerazioni che si possono fare sono abbastanza simili a quelle fatte in precedenza, anche qui si può notare come diversi parametri diano risposte differenti, in questo caso per la permeabilità del suolo bastano 200 step all'incirca per raggiungere un valore da cui non ci si discosta più.

Leggermente più lungo è invece il processo che porta a raggiungere valori costanti dell'indice di Brooks e Corey dove si impiegano 600-700 step temporali.

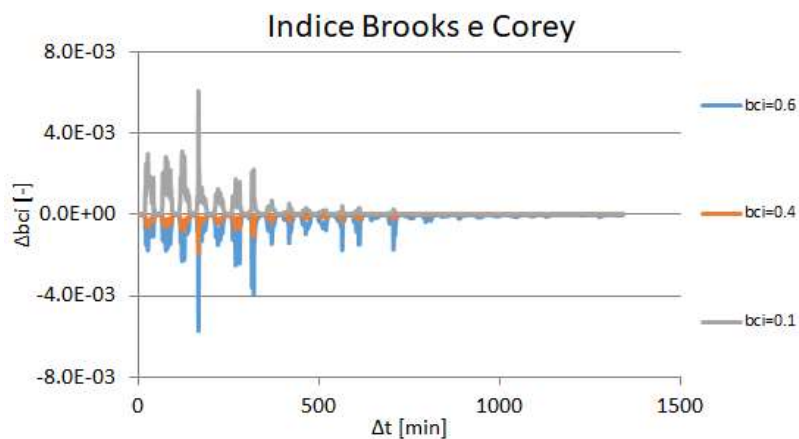


Figura 4.3-2 Derivata dell'indice di Brooks e Corey nel tempo.

Analogamente è possibile commentare anche gli altri parametri del suolo.

4.3

Analisi sensitività dei parametri del suolo valutando la loro derivata nel tempo

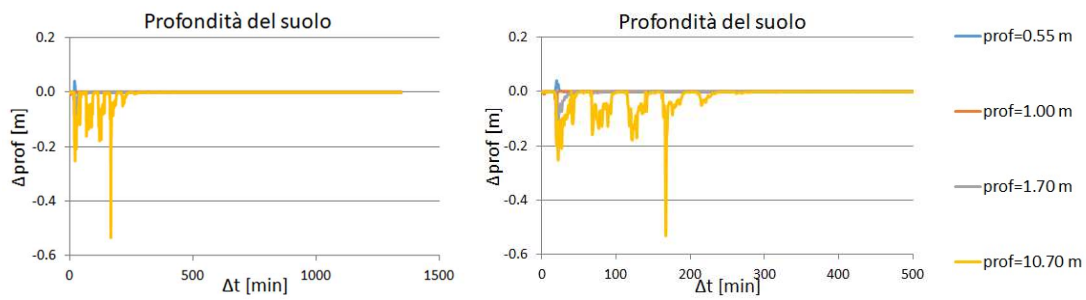


Figura 4.3-3 Derivata della profondità del suolo nel tempo, a destra un ingrandimento per rendere più comprensibile il grafico.

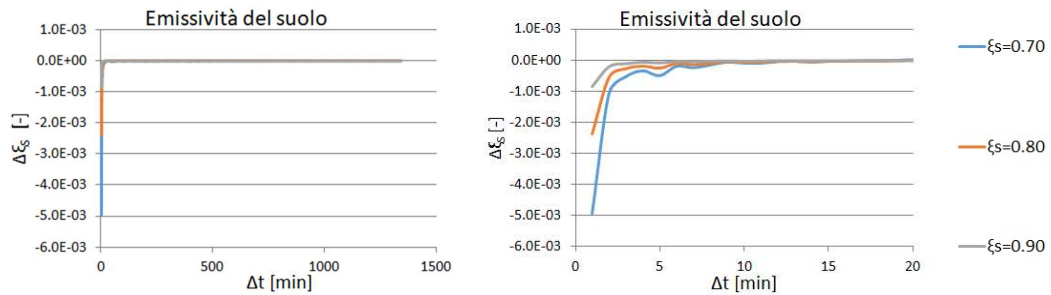


Figura 4.3-4 Derivata dell'emissività nel tempo, a destra un ingrandimento per rendere più comprensibile il grafico.

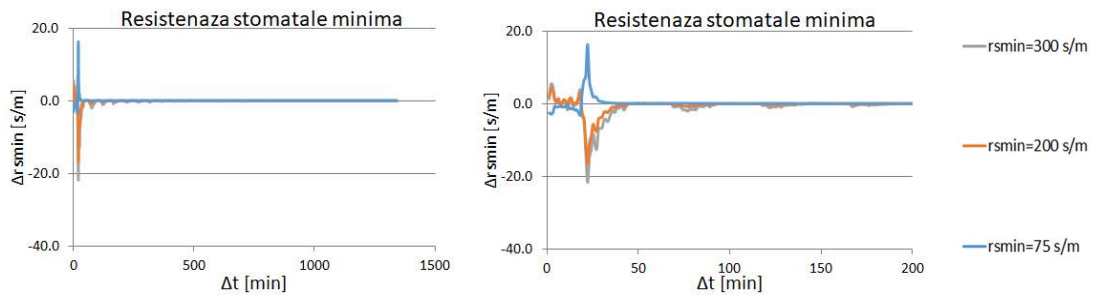


Figura 4.3-5 Derivata della resistenza stomatale minima nel tempo, a destra un ingrandimento per rendere più comprensibile il grafico.

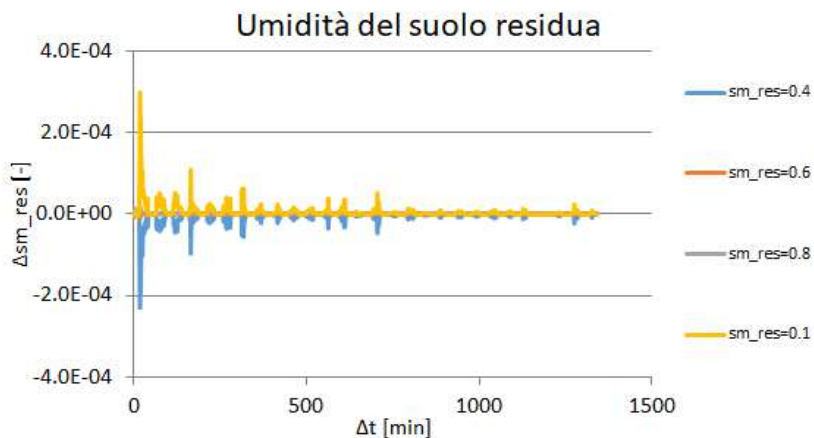


Figura 4.3-6 Derivata dell'umidità del suolo residua nel tempo.

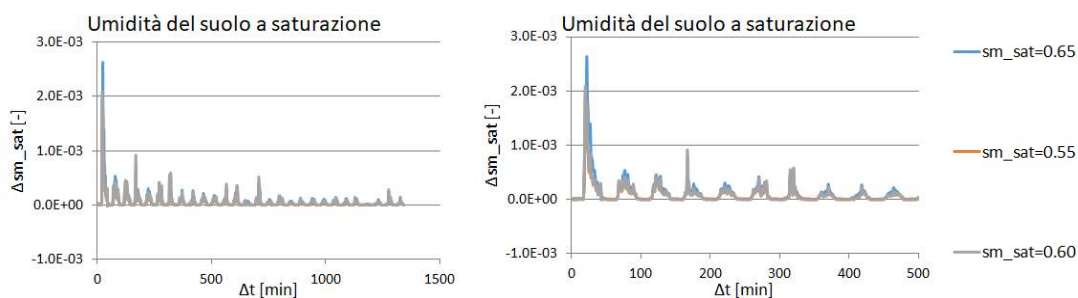


Figura 4.3-7 Derivata dell'umidità del suolo a saturazione nel tempo, a destra un ingrandimento per rendere più comprensibile il grafico.

Come si può notare la ciclicità dei giorni influenza anche la variazione dei parametri negli istanti temporali, non si ha quindi una correzione progressiva ma si mantiene una dipendenza dalla porzione della giornata. Se però si aumenta la scala di osservazione si nota come, al passare dei giorni, il trend è decrescente che termina una volta raggiunto lo zero. Ciò indica quindi che il parametro non sta più variando. Da notare che con l'utilizzo di questo metodo si perde però l'informazione di quando un parametro si assesta su un valore ma questi non è quello reale, mostrando una sensitività che risulta solo essere apparente perché la procedura del Kalman non riesce a dare un risultato corretto. Un esempio può essere il caso dell'umidità del suolo residua, i grafici mostrano infatti un andamento decrescente che si attesta sullo zero indice del fatto che il parametro ha raggiunto un valore da cui non si discosta più (*plateau*) ma come detto il valore raggiunto non coincide con quello reale.

4.4 Sensitività dei parametri del modello del filtro di Kalman

Lo step successivo per quanto riguarda questa fase è stato quello di modificare parametri del filtro di Kalman come l'errore sulla temperatura STs , la perturbazione imposta al parametro d , la varianza del parametro S e i valori iniziali di umidità del suolo sm_1 e sm_2 andando a cercare quali erano i parametri che più influenzavano la procedura. Questo è stato utile in quanto ha dato una prima idea sulla sensitività dei parametri e sui valori che devono assumere questi in virtù dello scopo finale che è rimasto sempre quello di ricavare i parametri del suolo reali.

Si è anche qui notato come alcuni di questi influiscono sulle prestazioni del modello condizionando sia il tempo in cui il parametro viene raggiunto sia l'effettivo raggiungimento (non sempre ottenuto a fronte di scelte molto insensate del parametro del modello vedi ad esempio Figura 4.4-3). Se per STs , sm_1 e sm_2 (Figura 4.4-1 e Figura 4.4-2) si è valutato che loro variazione non incide in maniera significativa sul risultato finale, lo stesso non si può dire della varianza del parametro Figura 4.4-4 e della variazione imposta Figura 4.4-3 i quali, in particolare il secondo, mostrano effettivamente risultati diversi a seconda dei valori a loro assegnati.

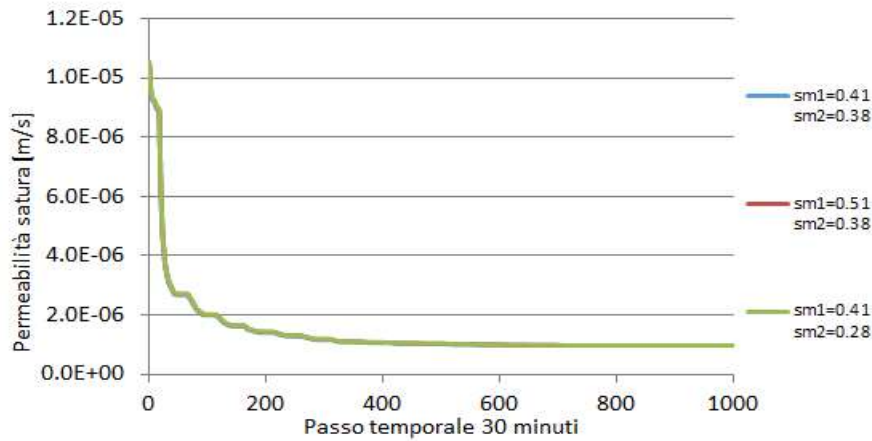


Figura 4.4-1 Andamento della permeabilità satura al variare dei valori iniziali di umidità del suolo.

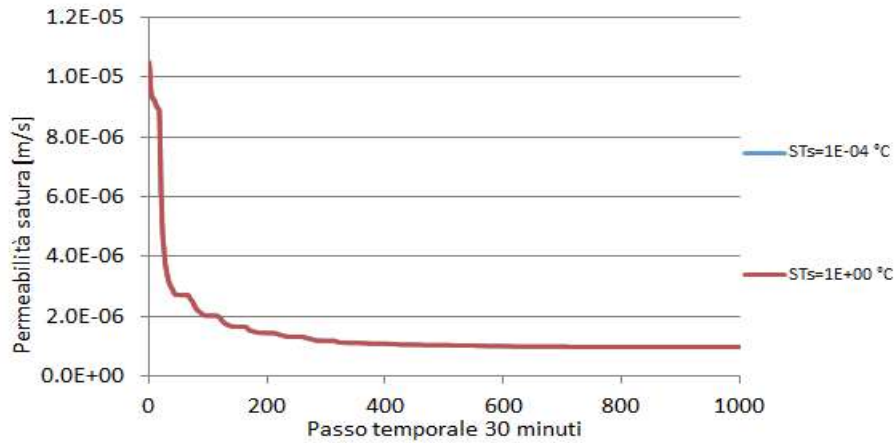


Figura 4.4-2 Andamento della permeabilità satura al variare dell'errore sulla temperatura.

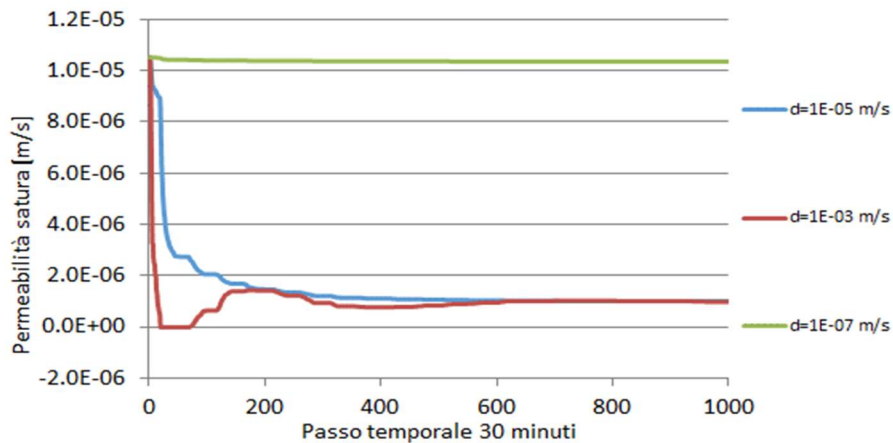


Figura 4.4-3 Andamento della permeabilità satura al variare della perturbazione imposta sul parametro.

Come prevedibile, l'aggiornamento della permeabilità satura diventa più marcato all'aumentare della perturbazione imposta alla stessa permeabilità satura.

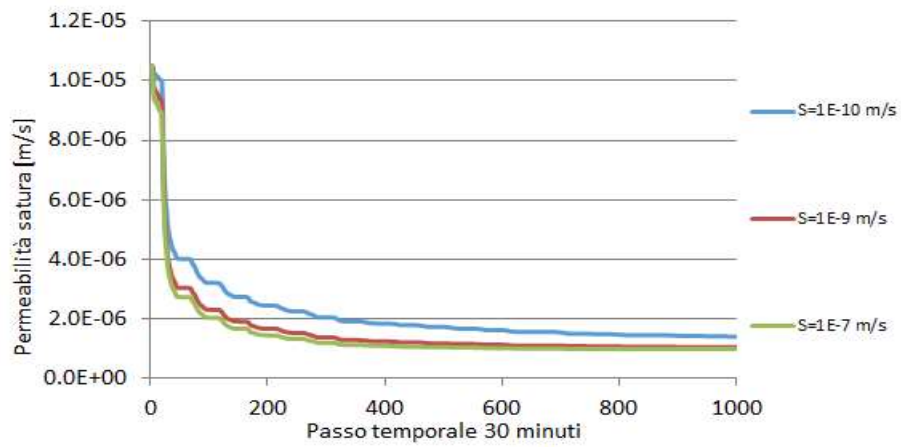


Figura 4.4-4 Andamento della permeabilità satura al variare della varianza del parametro
Si noti che più la varianza è grande più l'aggiornamento è marcato.

CAPITOLO 5.

CALIBRAZIONE DEI PARAMETRI DEL SUOLO ATTRAVERSO L'ASSIMILAZIONE DELLA TEMPERATURA SUPERFICIALE

In questa seconda fase l'obiettivo sarà quello di determinare i parametri del suolo attraverso l'assimilazione dei dati di temperatura. Il codice e la procedura utilizzata sono analoghi a quelli della fase precedente con la differenza che ora le temperature non sono più quelle simulate con il modello FEST-EWB ma quelle misurate puntualmente dalla stazione *eddy covariance*.

Si metterà a turno un parametro incognito e, assimilando i dati di temperatura del suolo, si cercherà di definire il set di parametri del suolo che porta alla miglior rappresentazione dei valori osservati di LST, SM e LE. Dopo aver ricavato il valore di un parametro lo si fissa a questo nuovo valore e si procede con il cambiarne un altro. Si andranno a testare solamente quei parametri che si è riscontrato avere una sensibilità rilevante per questo problema.

5.1 Calibrazione dei parametri del suolo in un periodo vegetato

5.1.1 Resistenza stomatale minima

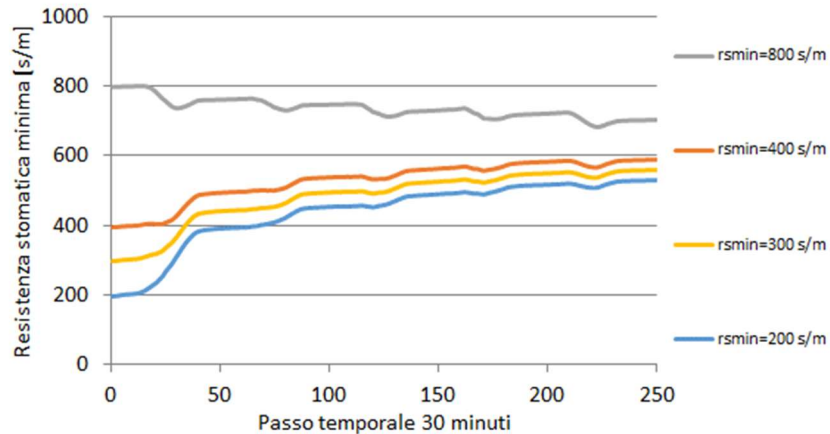


Figura 5.1-1 Andamento della resistenza stomatale minima durante il processo di aggiornamento fatto con il filtro di Kalman.

Il primo parametro preso in analisi è la resistenza stomatale minima. Gli spaghetti rappresentano diverse simulazioni che si differenziano per il valore iniziale della resistenza stomatale. I valori iniziali sono stati scelti casualmente sapendo il range di valori ammissibili per la resistenza stomatale. Attraverso l'aggiornamento del parametro questa tenderà ad avere il valore tale da produrre le temperature il più vicino possibile alle osservate. Senza imporre un limite fisico al parametro, dal processo di assimilazione si otterrebbe che la resistenza stomatale minima dovrebbe avere un valore intorno ai 700 s/m (Figura 5.1-1) che risulta decisamente troppo alto, si è deciso dunque di imporre il limite fisico e attribuire ad essa il valore di 400 s/m.

In Figura 5.1-2 è riportato l'andamento del fattore di guadagno che, come già visto nel paragrafo di descrizione del filtro di Kalman, determina l'aggiornamento del parametro in esame.

È interessante vedere come il guadagno abbia valori più alti per i primi istanti di assimilazioni per poi diminuire con il crescere del passo temporale. Questo conferma che più si è distanti dal valore ottimale più l'aggiornamento è importante, man mano che si tende al valore corretto l'aggiornamento tende ad avere valori sempre più bassi ed irrilevanti. La ciclicità dell'andamento invece è dovuta al ripetersi dei periodi di giorno e notte.

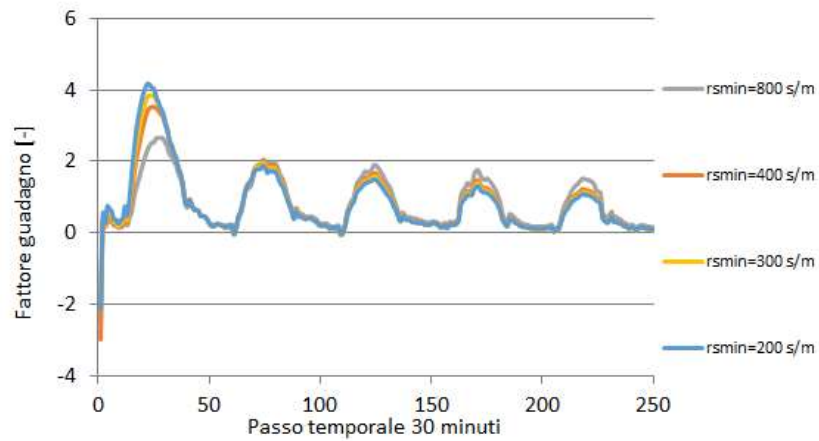


Figura 5.1-2 Andamento del fattore di guadagno del filtro di Kalman durante il processo di aggiornamento.

Di seguito si riportano i valori delle variabili quali temperatura del suolo, umidità del suolo e calore latente, ottenute nel corso di questo processo. Si può notare che il calore latente (Figura 5.1-5) e la temperatura del suolo (Figura 5.1-3) sono influenzati dalla variazione della resistenza stomatale minima mentre questa non influisce sull'umidità del suolo infatti non mostra segni di variazione evidenti (Figura 5.1-4).

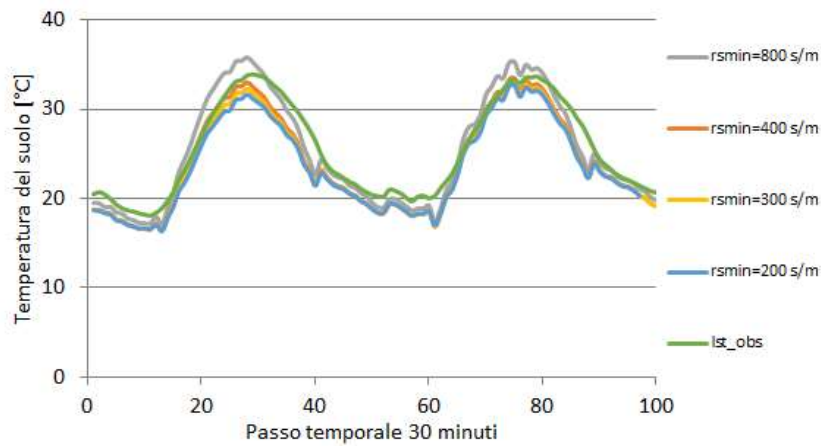


Figura 5.1-3 Andamento della temperatura del suolo al variare del valore iniziale del parametro durante il processo di aggiornamento.

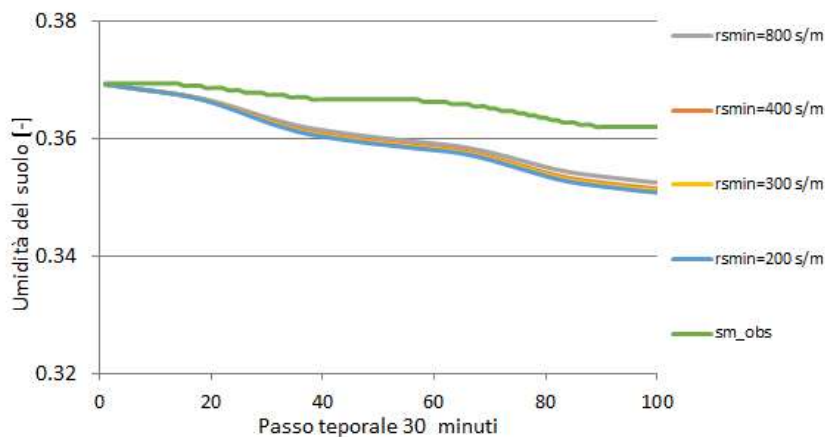


Figura 5.1-4 Andamento dell'umidità del suolo al variare del valore iniziale del parametro durante il processo di aggiornamento

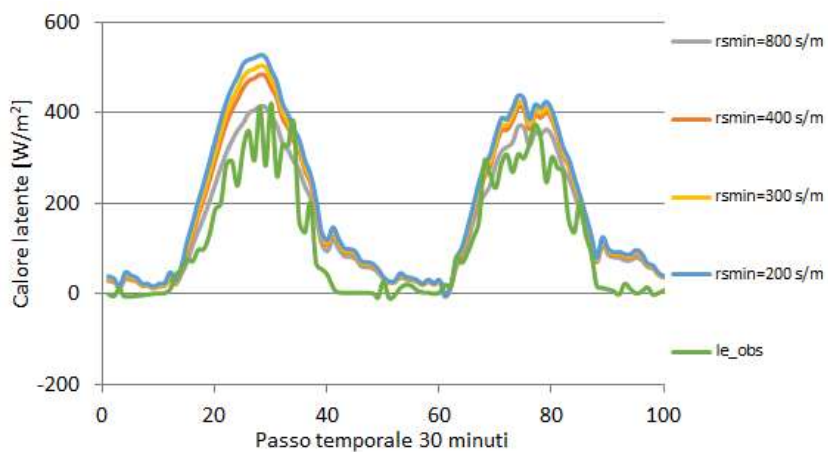


Figura 5.1-5 Andamento del calore latente al variare del valore iniziale del parametro durante il processo di aggiornamento

Sulla base di quanto detto per la resistenza stomatale minima si propongono ora i risultati per i rimanenti parametri.

5.1.2 Permeabilità satura

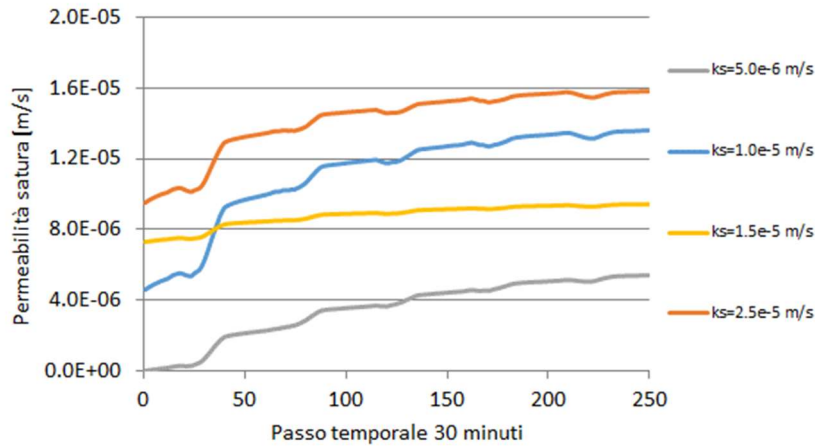


Figura 5.1-6 Andamento della permeabilità satura durante il processo di aggiornamento fatto con il filtro di Kalman.

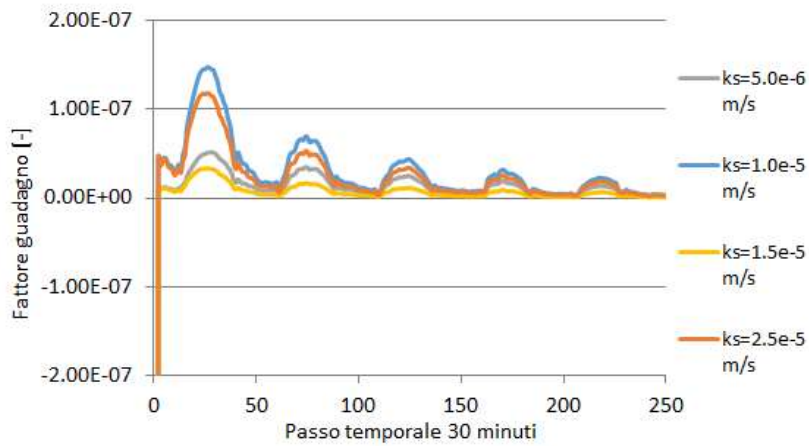


Figura 5.1-7 Andamento del fattore di guadagno del filtro di Kalman durante il processo di aggiornamento.

Se per l'aggiornamento del parametro i commenti risultano essere analoghi a quelli fatti per la resistenza stomatale minima, per le variabili del modello idrologico, invece, è possibile notare dei cambiamenti. Infatti si può notare che la temperatura del suolo e il calore latente (Figura 5.1-8 e Figura 5.1-10) non subiscono variazioni, questo perché non sono influenzate dalla permeabilità satura che però influisce sull'umidità del suolo facendola variare (Figura 5.1-9).

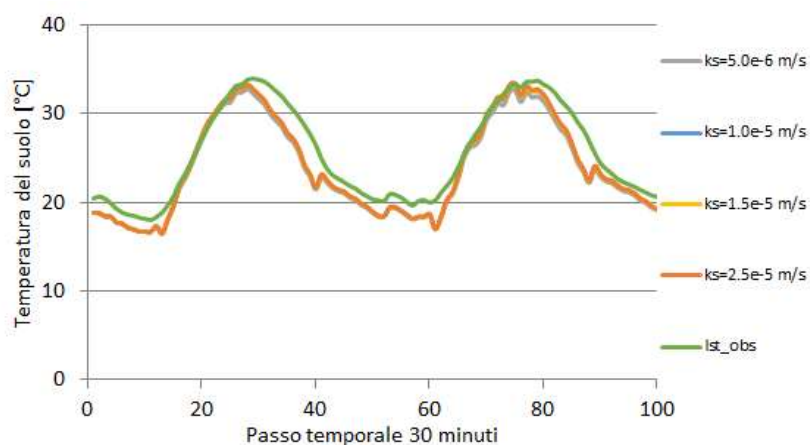


Figura 5.1-8 Andamento della temperatura del suolo al variare del valore iniziale del parametro durante il processo di aggiornamento.

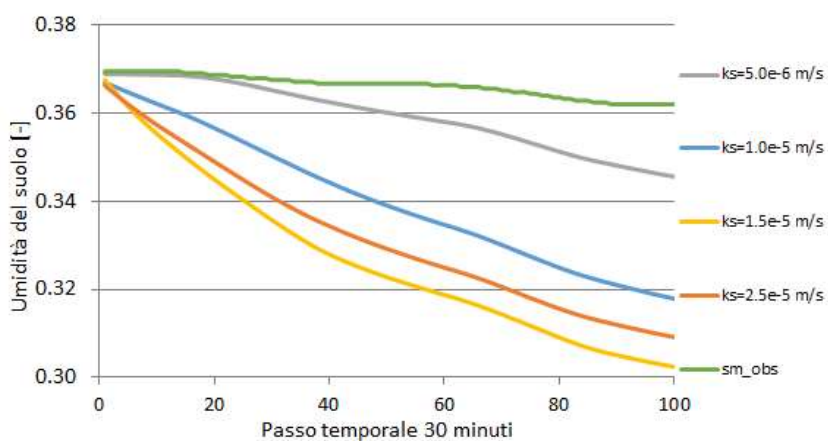


Figura 5.1-9 Andamento dell'umidità del suolo al variare del valore iniziale del parametro durante il processo di aggiornamento.

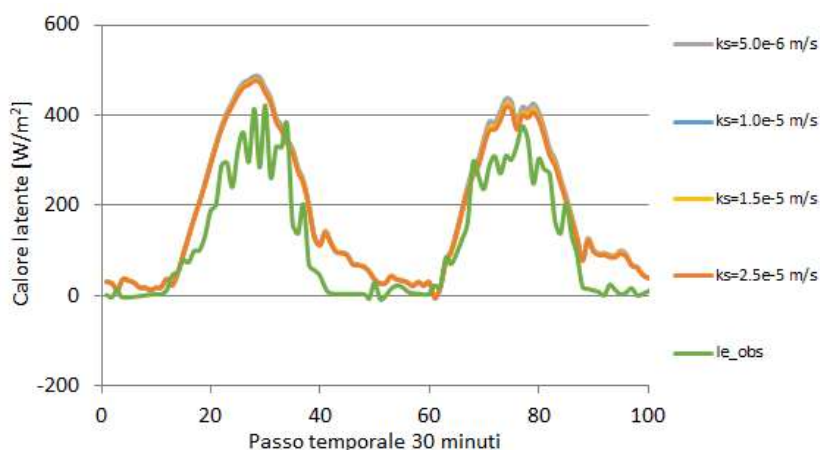


Figura 5.1-10 Andamento del calore latente al variare del valore iniziale del parametro durante il processo di aggiornamento.

In questo caso un ruolo importante nella scelta del valore del parametro l'ha avuto il modo in cui rappresenta le altre variabili del modello idrologico, oltre alla temperatura che viene assimilata. Infatti

è stato scelto un valore di $Ks = 6.00 \cdot 10^{-6} m/s$ perché oltre ad essere un valore a cui più o meno tende il parametro a valle degli aggiornamenti è quello che rappresenta meglio temperatura del suolo, calore latente ed umidità.

5.1.3 Altezza della vegetazione

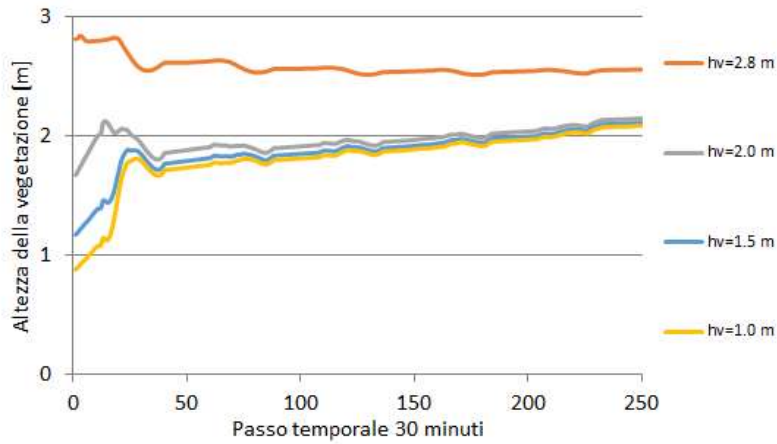


Figura 5.1-11 Andamento dell'altezza di vegetazione durante il processo di aggiornamento fatto con il filtro di Kalman.

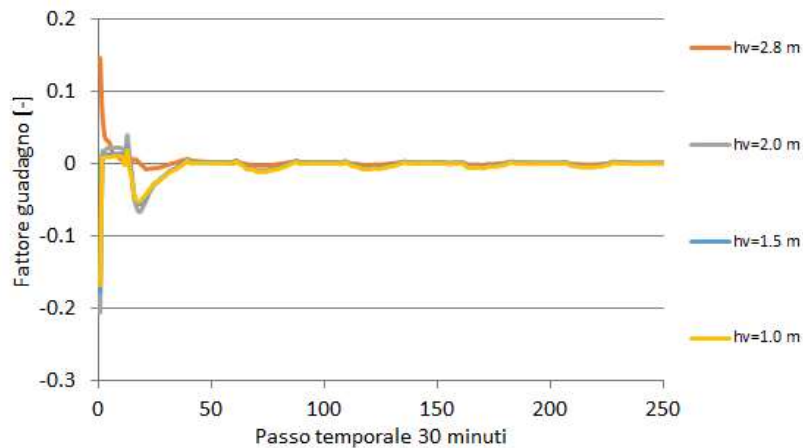


Figura 5.1-12 Andamento del fattore di guadagno del filtro di Kalman durante il processo di aggiornamento.

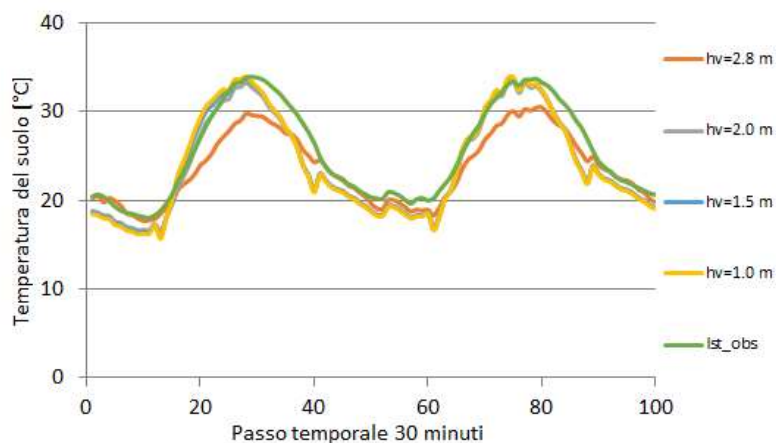


Figura 5.1-13 Andamento della temperatura del suolo al variare del valore iniziale del parametro durante il processo di aggiornamento.

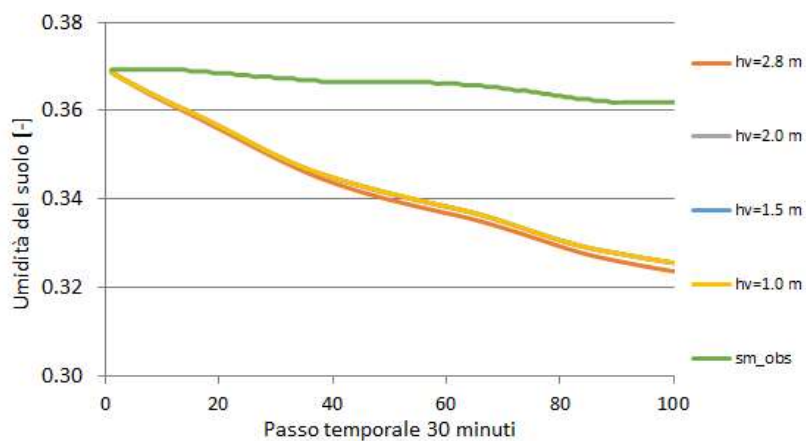


Figura 5.1-14 Andamento dell'umidità del suolo al variare del valore iniziale del parametro durante il processo di aggiornamento.

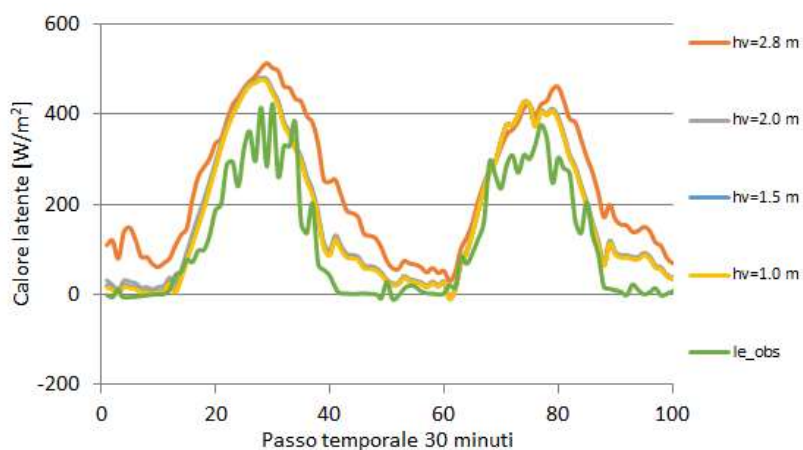


Figura 5.1-15 Andamento del calore latente al variare del valore iniziale del parametro durante il processo di aggiornamento.

5.1.4 Parametro correttivo della conduttività termica del suolo (β)

Il parametro β è stato inserito nel calcolo della conduttività termica del suolo come fattore addizionale come mostra la seguente formula:

$$g_{thermc} = 418.6 \cdot 0.00041 + \beta$$

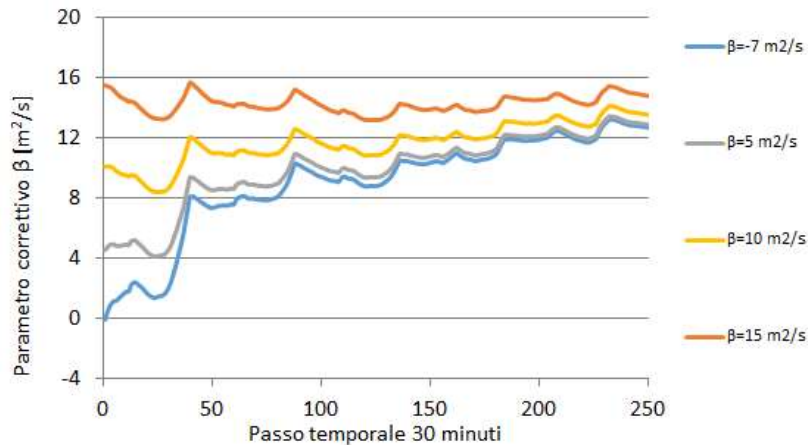


Figura 5.1-16 Andamento del parametro correttivo β durante il processo di aggiornamento fatto con il filtro di Kalman

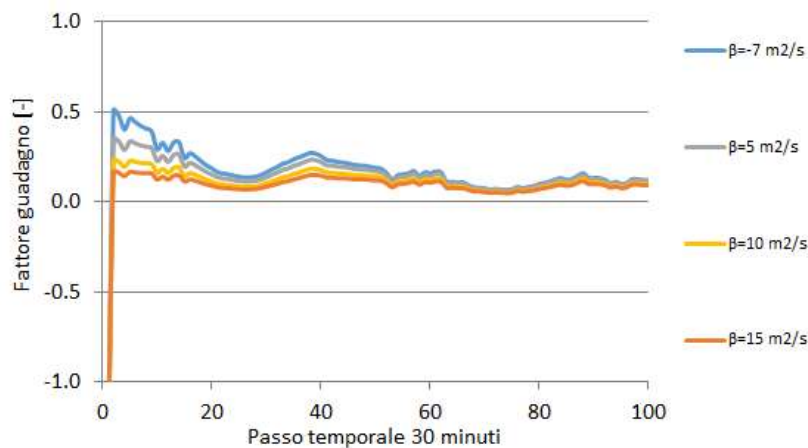


Figura 5.1-17 Andamento del fattore di guadagno del filtro di Kalman durante il processo di aggiornamento.

Senza imporre un limite fisico al parametro, dal processo di assimilazione si otterrebbe che il parametro di correzione dovrebbe avere valori intorno agli $11 \text{ m}^2/\text{s}$, ciò risulta incompatibile con i limiti fisici della conduttività termica, per questo si è deciso di imporre il limite fisico e attribuire al parametro un valore nullo. Questa scelta è dettata anche dal fatto che valori diversi di questo parametro e quindi di conduttività non influenzano più di tanto le variabili del modello come si vedrà nelle figure Figura 5.1-18, Figura 5.1-19 e Figura 5.1-20.

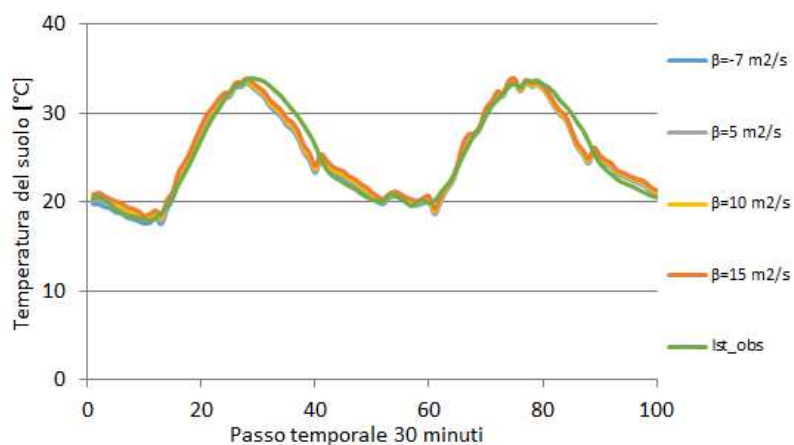


Figura 5.1-18 Andamento della temperatura del suolo al variare del valore iniziale del parametro durante il processo di aggiornamento.

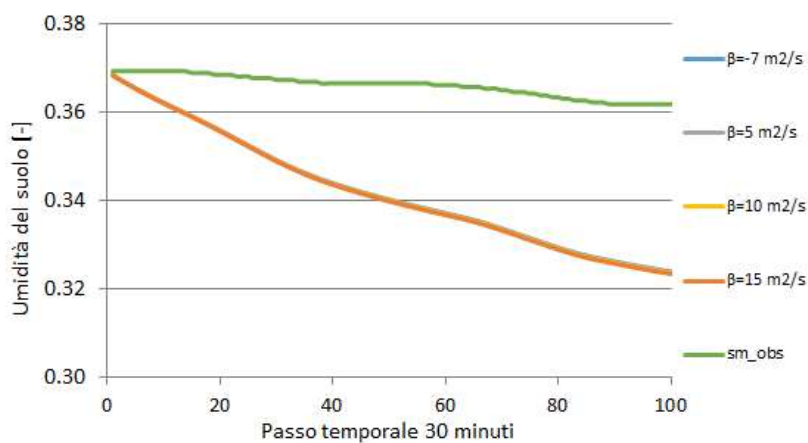


Figura 5.1-19 Andamento dell'umidità del suolo al variare del valore iniziale del parametro durante il processo di aggiornamento.

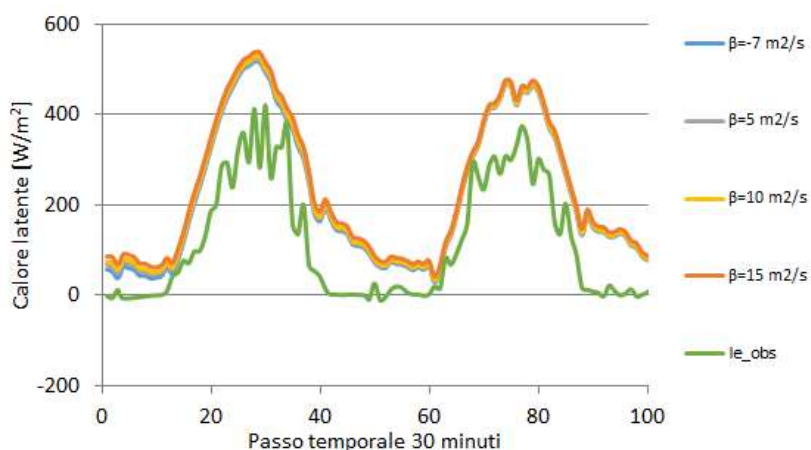


Figura 5.1-20 Andamento del calore latente al variare del valore iniziale del parametro durante il processo di aggiornamento.

5.1.5 Parametro correttivo della Tzero (α)

Il parametro α lo ritroviamo nel calcolo della Tzero utilizzata per calcolare il flusso di calore nel suolo G come mostrano le seguenti formule:

$$T_{zero} = T_a - \alpha \cdot \sin(\pi/2) + 273.15$$
$$G = (g_{thermc}/dz) \cdot (T_s - T_{zero})$$

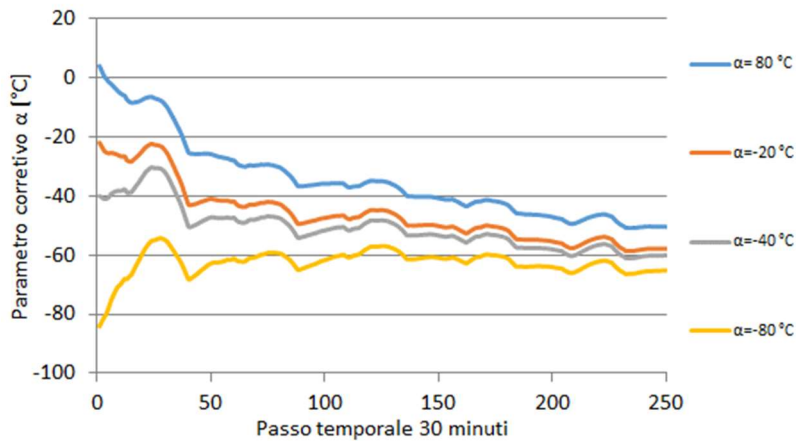


Figura 5.1-21 Andamento del parametro correttivo α durante il processo di aggiornamento fatto con il filtro di Kalman.

Senza imporre un limite fisico al parametro, dal processo di assimilazione si otterrebbe che il parametro di correzione dovrebbe avere valori intorno ai -60 °C, ciò risulta incompatibile con i limiti fisici, per questo si è deciso di imporre il limite fisico e attribuire al parametro il valore di -15°C. Inoltre anche qui l'aggiornamento del parametro si ferma dopo una ventina di istanti temporali (Figura 5.1-22).

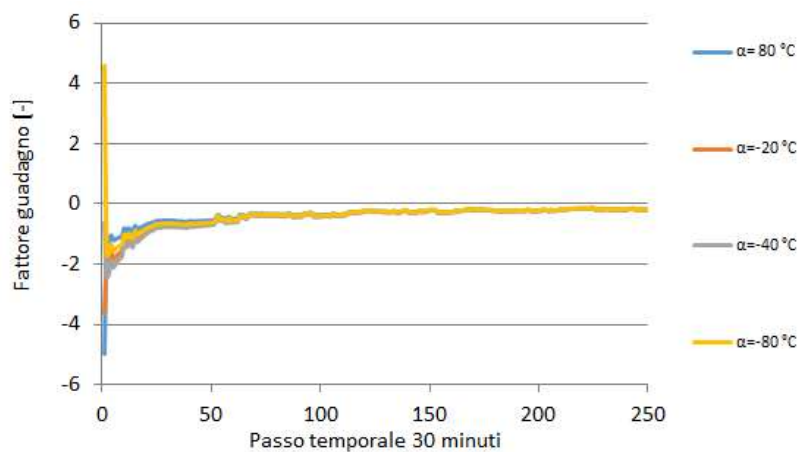


Figura 5.1-22 Andamento del fattore di guadagno del filtro di Kalman durante il processo di aggiornamento.

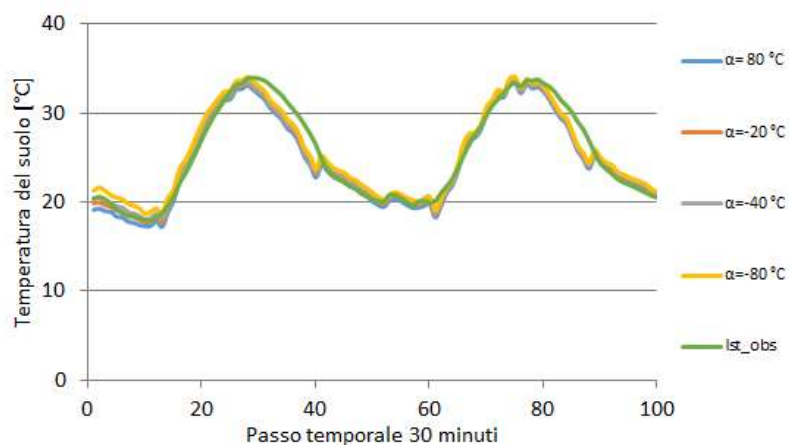


Figura 5.1-23 Andamento della temperatura del suolo al variare del valore iniziale del parametro durante il processo di aggiornamento.

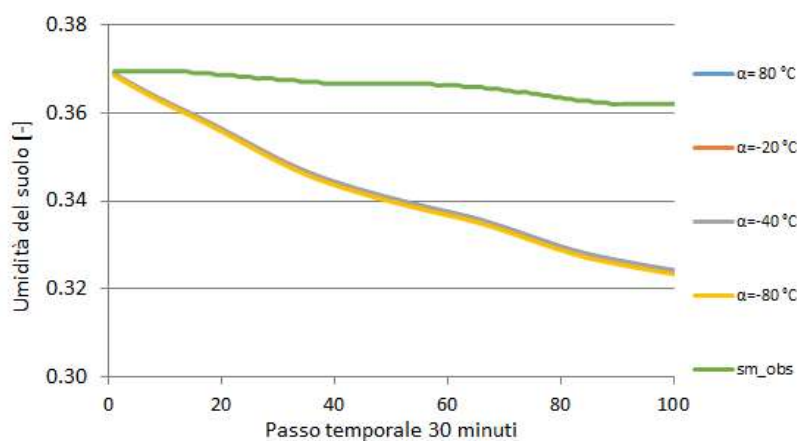


Figura 5.1-24 Andamento dell'umidità del suolo al variare del valore iniziale del parametro durante il processo di aggiornamento.

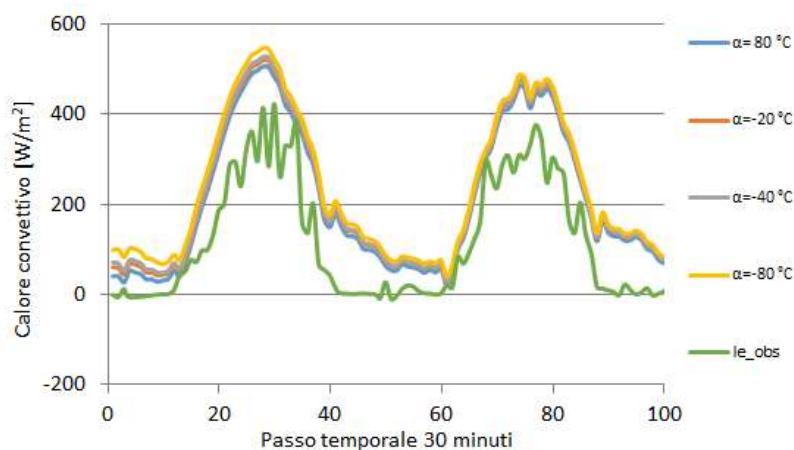


Figura 5.1-25 Andamento del calore latente al variare del valore iniziale del parametro durante il processo di aggiornamento.

5.1.6 Riassunto analisi

Prima di riassumere l'analisi è utile far notare, come mostrato dalle figure 5.1-1, 5.1-6, 5.1-11, 5.1-16, 5.1-21, che i parametri non mostrano una netta convergenza. Questo perché in precedenza si confrontavano valori simulati con altri valori simulati dallo stesso modello annullando così l'errore del modello, ora il confronto è fatto con dati osservati e l'errore risulta essere presente.

Si propone ora una tabella riassuntiva di questa serie di analisi in cui si possono vedere tutte le variazioni fatte ai parametri in ordine temporale. Alcuni sono stati analizzati più volte al fine di avere una stima migliore e più certa del parametro perché andando a cambiarne uno alla volta è possibile che con un certo set di parametri un dato parametro assuma determinati valori, andando poi a modificare il set nei test successivi è possibile che lo stesso parametro ne assuma di differenti.

Tabella 5.1-1 Tabella riassuntiva della sequenza dei processi di assimilazione

	Valori iniziali	DA r_{Smin}	DA k_s	DA h_v	DA β	DA α	DA β	DA r_{Smin}
r_{Smin} [s/m]	200	400 (750)	400	400	400	400	400	400
k_s [m/s]	9.72E-07	9.72E-07	6.00E-06	6.00E-06	6.00E-06	6.00E-06	6.00E-06	6.00E-06
h_v [m]	2	2	2	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1
β [m ² /s]	0	0	0	0	0 (11)	0	0 (12)	0
α [°C]	0	0	0	0	22	-15 (-60)	-15	-15

Risultati e confronto con simulazione senza assimilazione

Di seguito si propongono i grafici con i risultati riguardanti temperatura, calore latente e umidità del suolo andando a confrontare il valore osservato (in verde) con i valori ottenuti da due simulazioni, una con i parametri originali non calibrati (in arancione), e l'altra invece con i valori dei parametri ricavati dalla calibrazione (in blu).

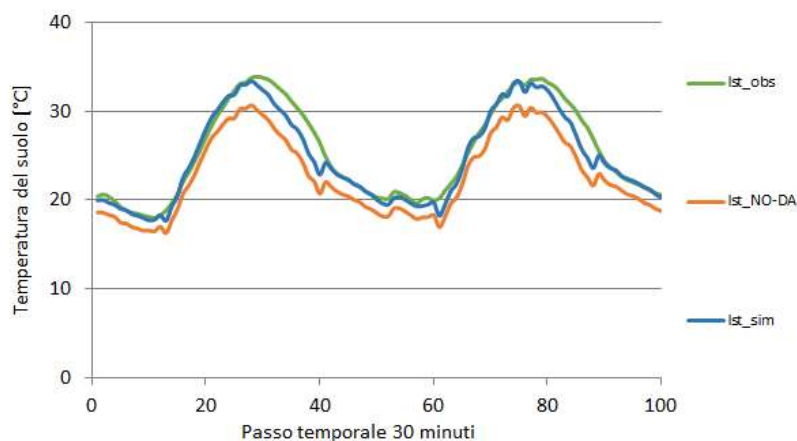


Figura 5.1-26 Temperatura del suolo - Confronto tra prima e dopo la calibrazione dei parametri attraverso l'assimilazione dei dati

Per quanto riguarda la temperatura (Figura 5.1-26), qualitativamente si può notare come la simulazione con i parametri calibrati presenta valori più simili a quelli osservati rispetto a quelli ottenuti con i parametri non calibrati.

Così anche per il calore latente (Figura 5.1-27) si può notare un leggero miglioramento, mentre per quanto riguarda l'umidità del suolo (Figura 5.1-28) si registra un allontanamento dalle osservate che però non mette in discussione tutta quanta l'analisi in quanto la sua entità è abbastanza ridotta.

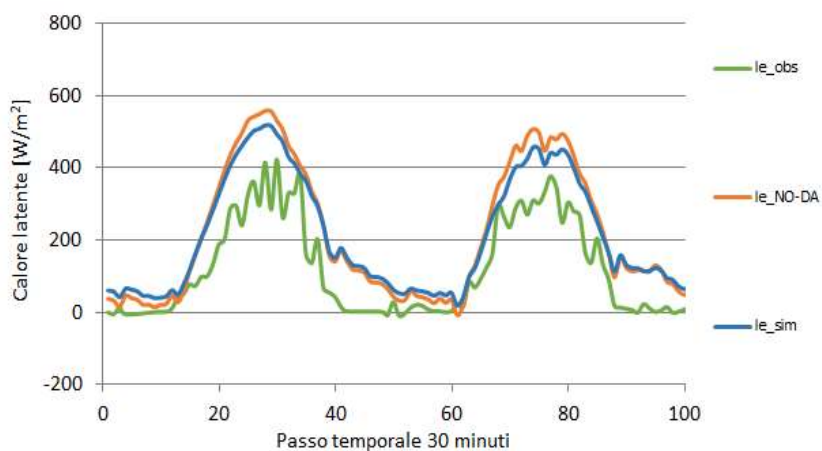


Figura 5.1-27 Calore latente - Confronto prima e dopo calibrazione dei parametri attraverso l'assimilazione dei dati

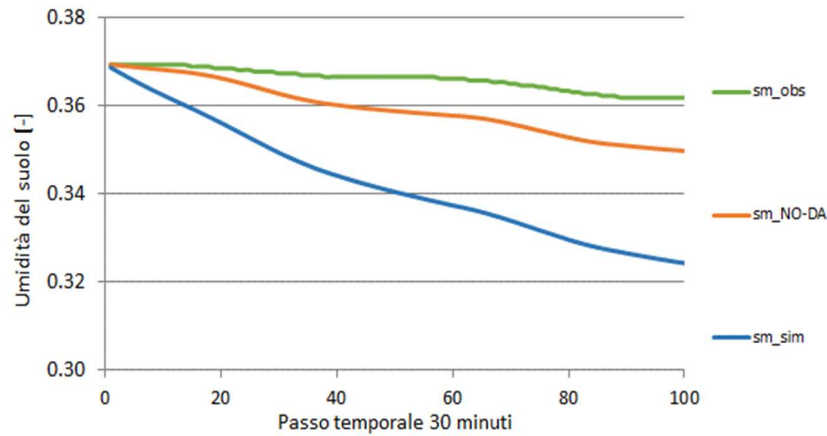


Figura 5.1-28 Umidità del suolo - Confronto prima e dopo calibrazione dei parametri attraverso l'assimilazione dei dati

Queste considerazioni di tipo qualitativo trovano conferma negli indici calcolati. Gli indici scelti per analizzare le simulazioni sono l'errore medio (ME), l'errore medio assoluto (MAE), l'errore quadratico medio ($RMSE$), la deviazione standard (S), scaled absolute residual mean ($SARM$) e l'errore quadratico normalizzato (RN).

$$ME = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i$$

$$MAE = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n |x_i|$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i^2}$$

$$RN = \frac{RMSE}{x_{MAX} - x_{MIN}}$$

$$S = \frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - ME)^2$$

$$SARM = \frac{MAE}{x_{MAX} - x_{MIN}}$$

Si propongono di seguito le tabelle riassuntive di questi indici per le tre variabili prese in considerazione e si propone il confronto fra quelli calcolati per le simulazioni dopo aver calibrato i parametri attraverso l'assimilazione dei dati e prima della calibrazione dei parametri.

Tabella 5.1-2 Temperatura del suolo – Confronto tra gli indici calcolati prima e dopo la calibrazione dei parametri.

	NO-DA	DA	
ME	2.88	0.76	°C
MAE	2.88	1.08	°C
RMSE	3.21	1.49	°C
RN	0.19	0.09	-
S	2.05	1.64	°C
SARM	0.17	0.06	-

Tabella 5.1-3 Calore latente- Confronto tra gli indici calcolati prima e dopo la calibrazione dei parametri.

	NODA	DA	
ME	-104	-89	W/m ²
MAE	104	89	W/m ²
RMSE	124	101	W/m ²
RN	0.26	0.21	-
S	4537	2213	W/m ²
SARM	0.22	0.18	-

Tabella 5.1-4 Umidità del suolo - Confronto tra gli indici calcolati prima e dopo la calibrazione dei parametri.

	NODA	DA	
ME	0.01	0.03	-
MAE	0.01	0.03	-
RMSE	0.01	0.04	-
RN	0.35	1.17	-
S	1E-05	1E-04	-
SARM	0.33	1.11	-

Come mostrato dai grafici, gli indici migliorano dopo la calibrazione per quanto riguarda la temperatura del suolo e il calore latente mentre peggiorano sull'umidità del suolo.

5.2 Calibrazione dei parametri del suolo in un periodo non vegetato

Al fine di rendere completa l'analisi si è deciso di analizzare anche un periodo temporale in cui la vegetazione non fosse presente. Avendo già calibrato i parametri legati al terreno, in questa fase si è deciso di andare a calibrare alcuni fattori che influenzano il calcolo della resistenza del suolo, quindi dell'evaporazione, e il calcolo del calore dal suolo G.

5.2.1 Parametro correttivo Tzero (α)

Il parametro α è presente nel calcolo della Tzero come mostra la seguente formula:

$$T_{zero} = T_a - \alpha \cdot \sin(3.14/2) + 273.15$$

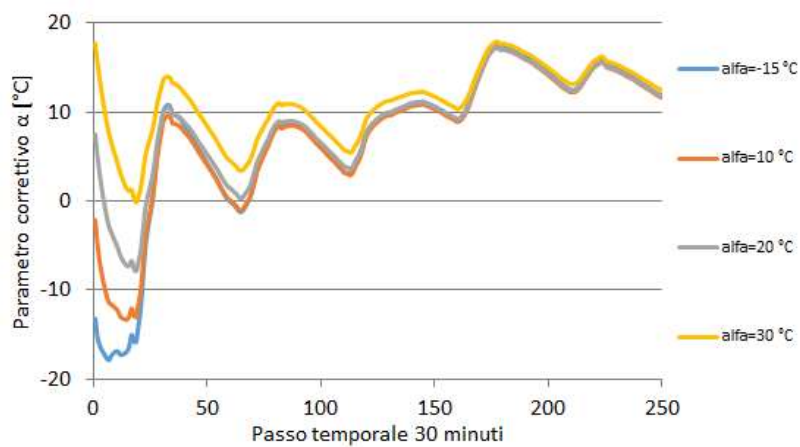


Figura 5.2-1 Andamento del parametro correttivo α durante il processo di aggiornamento fatto con il filtro di Kalman.

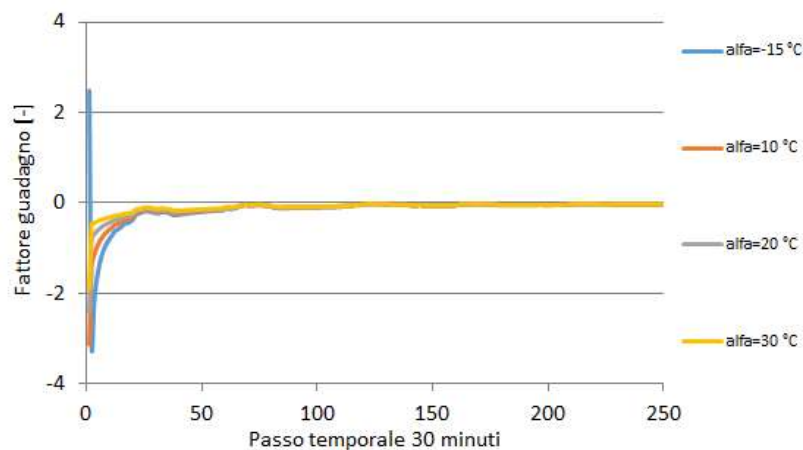


Figura 5.2-2 Andamento del fattore di guadagno del filtro di Kalman durante il processo di aggiornamento.

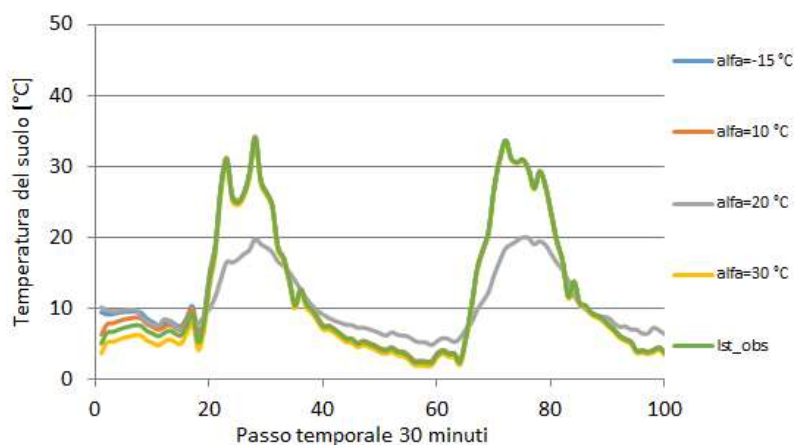


Figura 5.2-3 Andamento della temperatura del suolo al variare del valore iniziale del parametro durante il processo di aggiornamento.

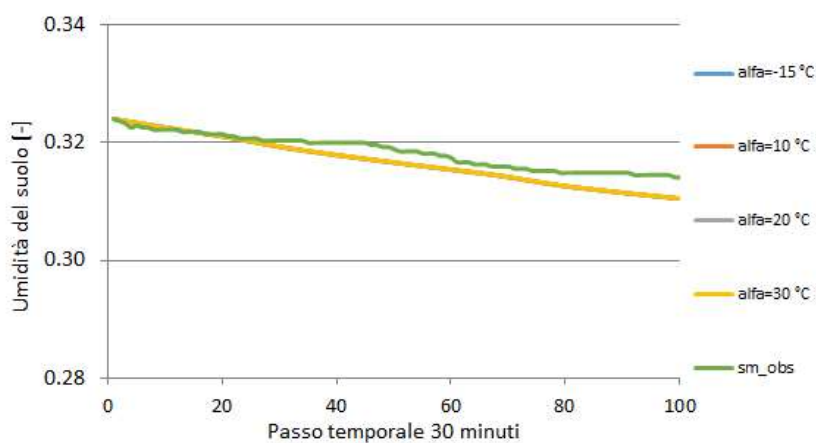


Figura 5.2-4 Andamento dell'umidità del suolo al variare del valore iniziale del parametro durante il processo di aggiornamento.

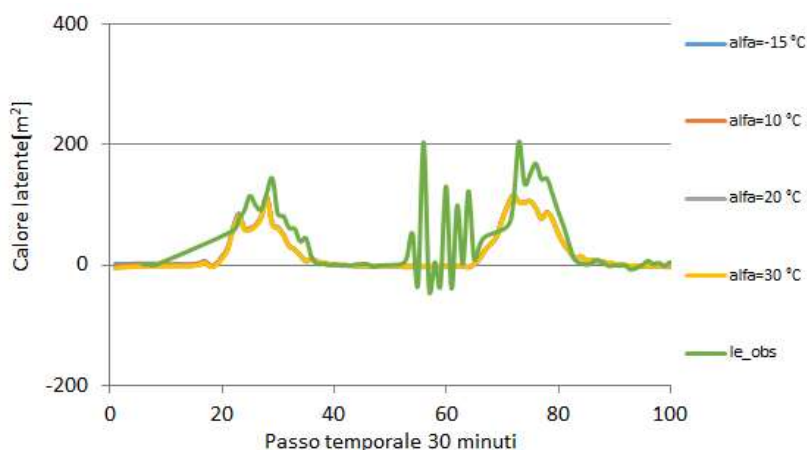


Figura 5.2-5 Andamento del calore latente al variare del valore iniziale del parametro durante il processo di aggiornamento.

5.2.2 Resistenza del suolo

Vista la forte influenza della resistenza stomatale minima in ambito vegetato, si è deciso di calibrare la resistenza del suolo all'evaporazione in ambito non vegetato, più precisamente ciò che è stato preso in esame è il parametro a_3 che rientra nel seguente modo nel calcolo della resistenza del suolo.

$$rs = a_1 \cdot \left(\frac{sms}{ums_1} \right)^{a_2} + a_3 + 500$$

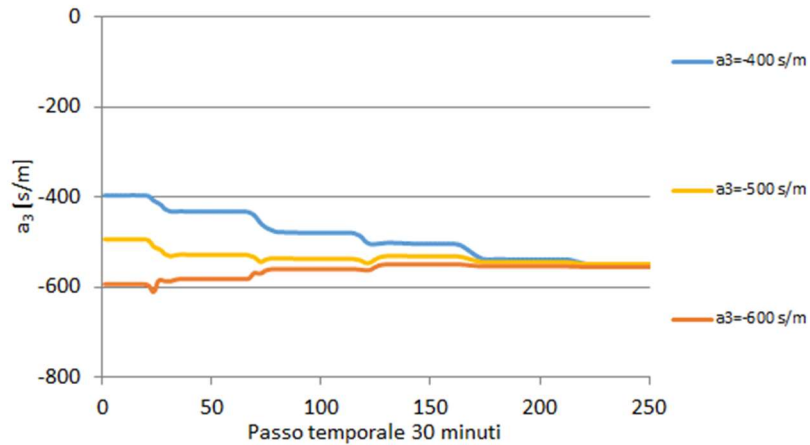


Figura 5.2-6 Andamento del parametro a_3 della resistenza del suolo durante il processo di aggiornamento fatto con il filtro di Kalman.

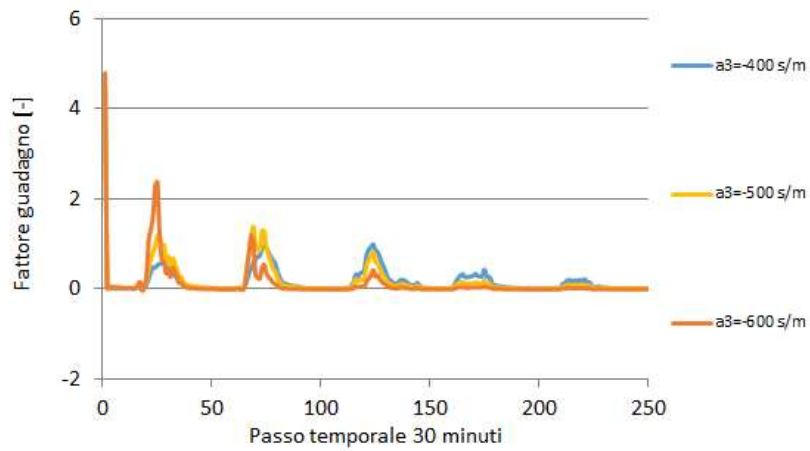


Figura 5.2-7 Andamento del fattore di guadagno del filtro di Kalman durante il processo di aggiornamento.

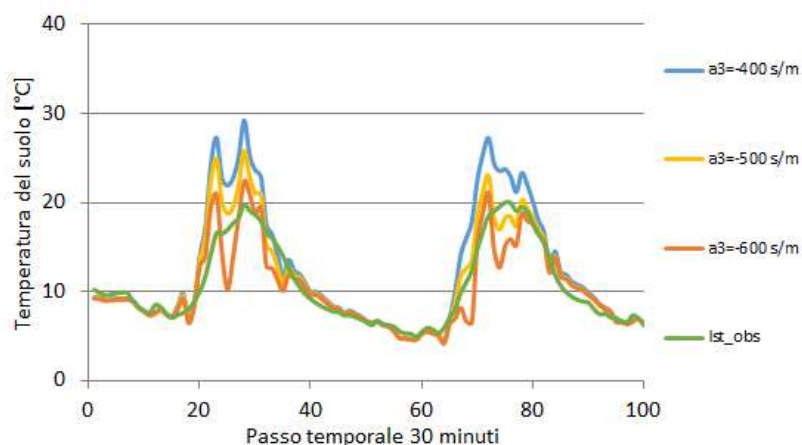


Figura 5.2-8 Andamento della temperatura del suolo al variare del valore iniziale del parametro durante il processo di aggiornamento.

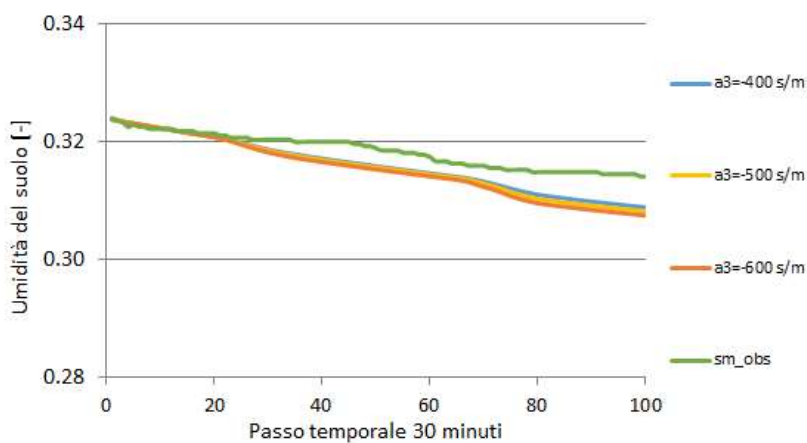


Figura 5.2-9 Andamento dell'umidità del suolo al variare del valore iniziale del parametro durante il processo di aggiornamento.

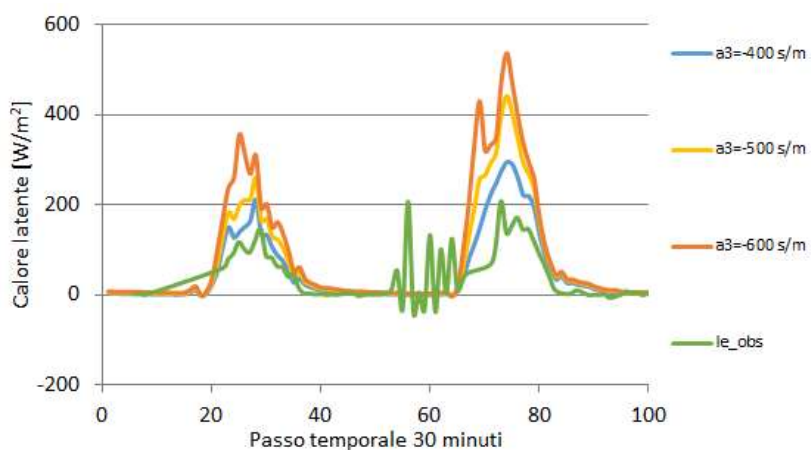


Figura 5.2-10 Andamento del calore latente al variare del valore iniziale del parametro durante il processo di aggiornamento.

5.2.3 Riassunto analisi

Avendo già trovato i parametri del suolo calibrando nel periodo di suolo vegetato, per il periodo con suolo nudo si sono calibrati solamente il parametro α , legato al calcolo del flusso di calore dal suolo, che si è trovato essere pari a 12 °C e il parametro a_3 , legato alla resistenza del suolo, che si è trovato essere pari a -500 s/m.

Di seguito si propongono i risultati di temperatura, calore latente e umidità del suolo andando a confrontare il valore osservato con i valori ottenuti da due simulazioni, una con i parametri originali, non calibrati, e l'altra invece con i valori dei parametri ricavati dalla calibrazione.

Risultati e confronto con simulazione senza assimilazione

Vengono qui proposti i risultati di temperatura, calore latente e umidità del suolo andando a confrontare il valore osservato (in verde) con i valori ottenuti da due simulazioni, una con i parametri originali non calibrati (in arancio), e l'altra invece con i valori dei parametri ricavati dalla calibrazione (in blu).

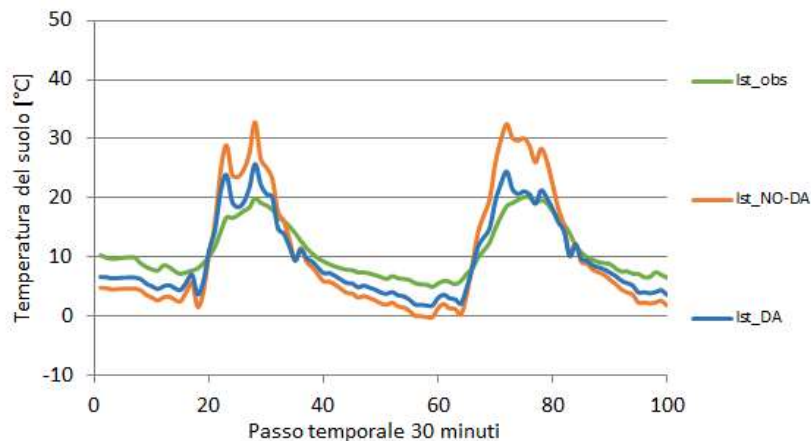


Figura 5.2-11 Temperatura del suolo - Confronto prima e dopo calibrazione dei parametri attraverso l'assimilazione dei dati

Confrontando i grafici della temperatura superficiale Figura 5.1-26 con la Figura 5.2-11 si nota che per suolo nudo si ha una variazione più grande, indice di un processo più intenso. Non si può dire lo stesso per il calore latente dove in entrambi i casi non risulta essere ben rappresentato (Figura 5.1-27 e Figura 5.2-12).

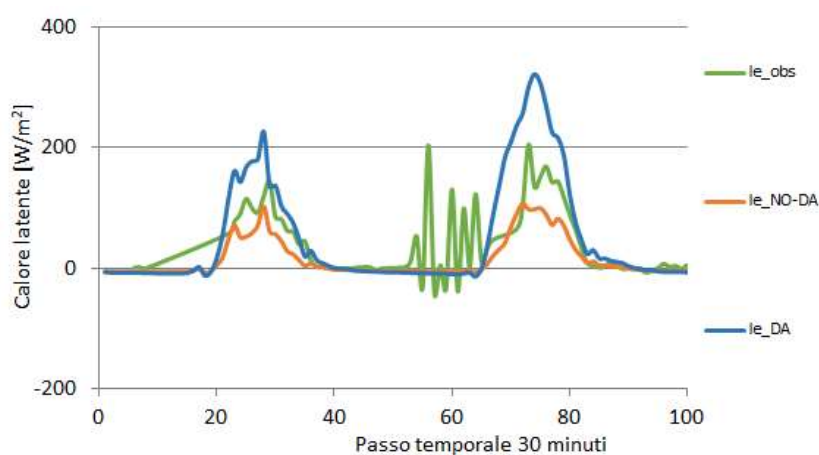


Figura 5.2-12 Calore latente - Confronto tra prima e dopo calibrazione dei parametri attraverso l'assimilazione dei dati

Per l'umidità del suolo invece si nota che, mentre nel periodo di suolo vegetato si aveva un peggioramento della stima, Figura 5.1-28, nel caso di suolo nudo i valori con e senza assimilazione risultano molto simili Figura 5.2-13.

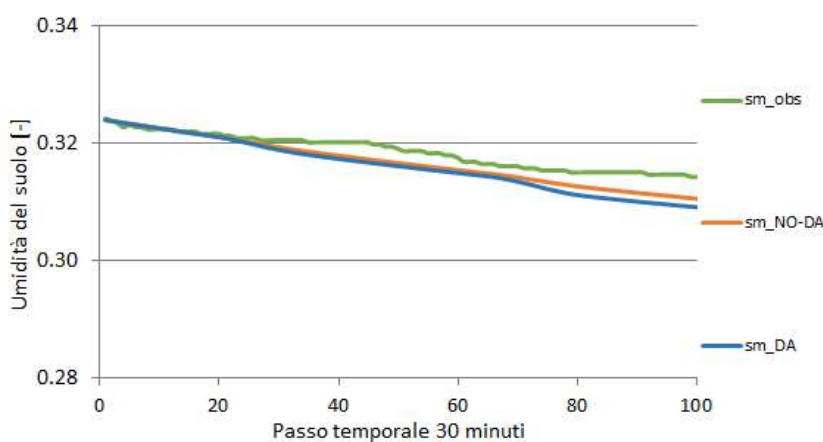


Figura 5.2-13 Umidità del suolo - Confronto tra prima e dopo calibrazione dei parametri attraverso l'assimilazione dei dati

Si propone ora, come per il caso di suolo vegetato, il calcolo di alcuni indici statistici.

Tabella 5.2-1 Temperatura del suolo – Confronto tra gli indici calcolati prima e dopo la calibrazione dei parametri

	NODA	DA	
ME	-0.15	0.49	°C
MAE	5.11	2.85	°C
RMSE	6.35	3.64	°C
RN	0.33	0.19	-
S	40.45	13.05	°C
SARM	0.26	0.15	-

Tabella 5.2-2 Calore latente – Confronto tra gli indici calcolati prima e dopo la calibrazione dei parametri

	NODA	DA	
ME	13	-28	W/m ²
MAE	25	41	W/m ²
RMSE	43	65	W/m ²
RN	0.11	0.16	-
S	1723	3515	W/m ²
SARM	0.06	0.10	-

Tabella 5.2-3 Umidità del suolo – Confronto tra gli indici calcolati prima e dopo la calibrazione dei parametri

	NODA	DA	
ME	0.01	0.01	-
MAE	0.01	0.01	-
RMSE	0.01	0.01	-
RN	0.39	0.52	-
S	1E-05	2E-05	-
SARM	0.33	0.44	-

Sia dalla consultazione dei grafici che dalla lettura delle tabelle degli indici si evince che la temperatura del suolo risulta essere migliorata dalla calibrazione mentre calore latente ed umidità del suolo leggermente peggiorati.

Allo scopo di migliorare questo risultato nei prossimi capitoli saranno presentate alcune soluzioni che si basano sull'assimilare la temperatura correggendo il di calore latente (CAPITOLO 6) e il calore dal terreno (CAPITOLO 7) e sull'assimilare direttamente l'umidità del suolo (CAPITOLO 8), in modo da avere una rappresentazione corretta delle variabili del modello idrologico ma anche della temperatura del suolo.

CAPITOLO 6.

ASSIMILAZIONE DELLA LST ATTRAVERSO IL FILTRO DI KALMAN CORREGGENDO IL CALORE LATENTE

Con i parametri del suolo calibrati e fissati il passo successivo è quello di andare ad assimilare la temperatura superficiale per modificare la variabile di stato calore latente. Ciò è possibile in quanto le due variabili risultano essere collegate nel bilancio di energia. Prima di procedere con la presentazione dei risultati si riportano di seguito passi fondamentali della procedura di inizializzazione del filtro di Kalman.

6.1 Sensività della perturbazione delle forzanti meteo

Inizialmente si è studiata la sensitività delle perturbazioni della forzante meteo (radiazione o temperatura dell'aria) sul filtro di Kalman al fine di valutare la configurazione che rappresenta al meglio la situazione reale.

6.1.1 Radiazione entrante ad onde corte

Inizialmente si è perturbato solamente la radiazione entrante ad onde corte, con $drad$ tra 50 W/m^2 e 300 W/m^2 . Si suddivide il paragrafo in due sottoparagrafi in modo da evidenziare le due metodologie presentate precedentemente.

Assimilazione del calore latente osservato

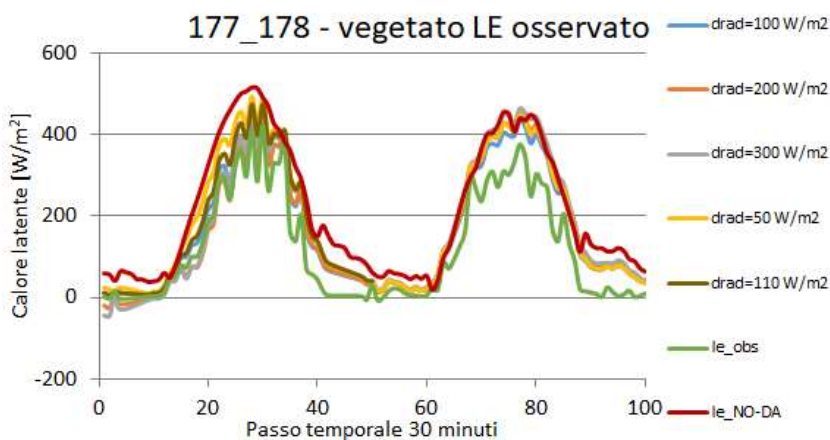


Figura 6.1-1 Confronto tra il calore latente osservato e quello prima e dopo il processo di assimilazione con il filtro di Kalman. Giorni 177-178.

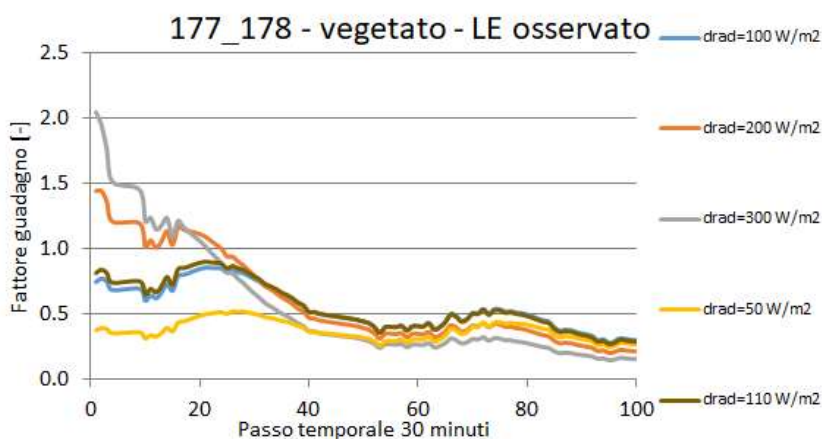


Figura 6.1-2 Andamento del fattore di guadagno del filtro di Kalman. Giorni 177-178.

Le figure Figura 6.1-1 e Figura 6.1-2 mostrano come il processo del filtro di Kalman sia utile a migliorare la stima del calore latente rispetto ad una situazione precedente all'assimilazione dei dati (le_NO-DA).

Si vede che perturbazioni diverse determinano diverse stime del calore latente, in quanto il parametro di perturbazione agisce direttamente sull'aggiornamento dello stato del sistema.

Si nota inoltre che il contributo dell'assimilazione dopo il primo giorno risulta essere ininfluente, difatti il grafico del fattore di guadagno del filtro di Kalman presenta valori notevolmente più bassi dopo il cinquantesimo passo temporale, di conseguenza anche le variabili non subiranno notevoli aggiornamenti stanziandosi su un valore simile a quello ricavato senza assimilazione.

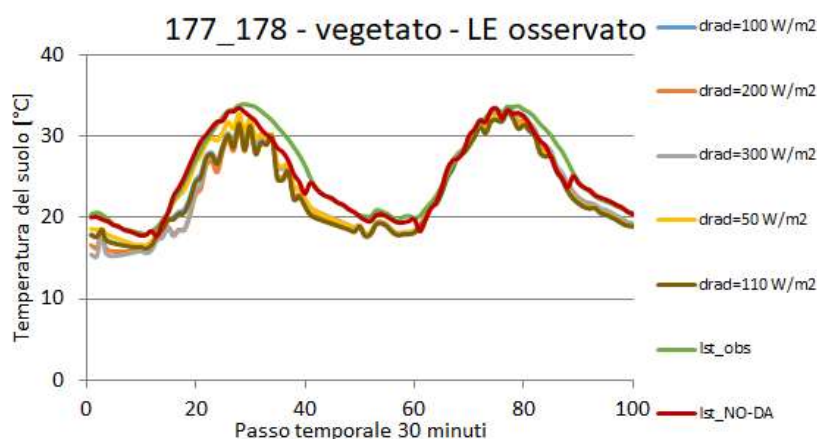


Figura 6.1-3 Confronto tra la temperatura del suolo osservata e quella prima e dopo il processo di assimilazione con il filtro di Kalman. Giorni 177-178.

La temperatura del suolo (Figura 6.1-3) è stata calcolata a valle del processo di aggiornamento del calore latente cercando quale fosse la temperatura che portava ad avere quel valore di calore latente ricavato. Dal grafico si può notare che inizialmente i valori di temperatura si discostano da quello osservato più di quanto lo faccia la simulazione senza assimilazione. Questo perché la simulazione senza assimilazione è un ricavato degli step precedenti dove si era assimilata la temperatura del suolo facendo variare i parametri del terreno portando così ad avere determinati valori di calore latente differenti da quelli trovati a valle di questa assimilazione. Andando dunque a ricavare la temperatura partendo da valori differenti è del tutto normale aspettarsi che l'andamento risultante sia leggermente diverso da quello calcolato in precedenza.

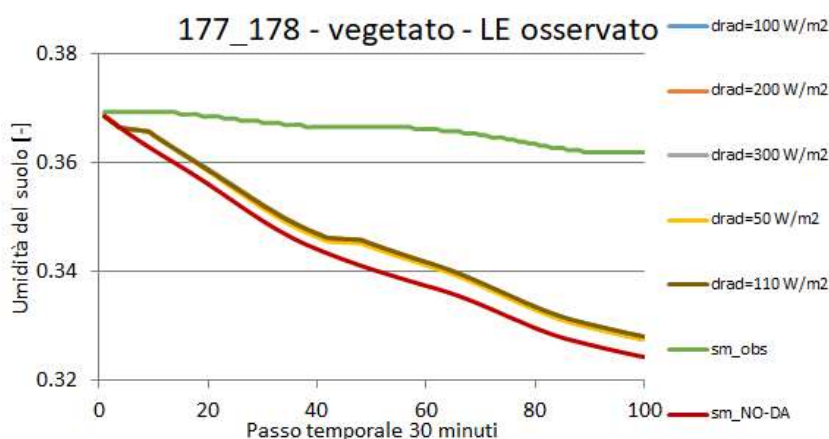


Figura 6.1-4 Confronto tra l'umidità del suolo osservata e quella prima e dopo il processo di assimilazione con il filtro di Kalman. Giorni 177-178.

L'umidità del suolo (Figura 6.1-4) non risulta essere particolarmente influenzata né dalla variazione del parametro di perturbazione né dal processo di assimilazione assestandosi sui valori della simulazione senza assimilazione.

Assimilazione del calore latente residuale

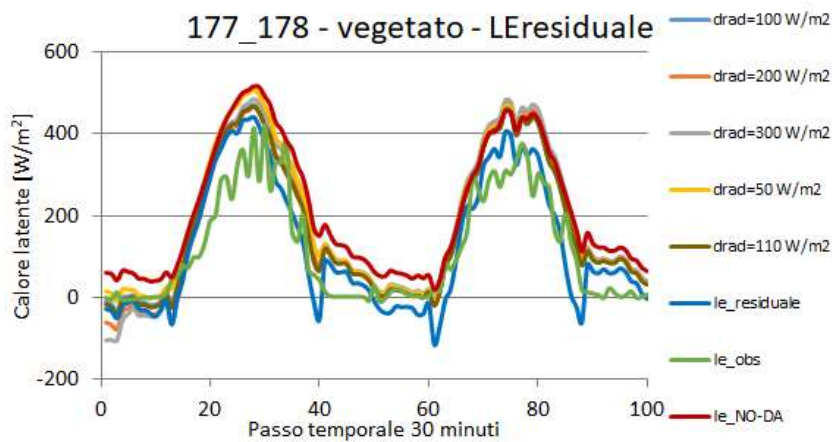


Figura 6.1-5 Confronto tra il calore latente osservato, quello ottenuto con il modello residuale e quello prima e dopo il processo di assimilazione con il filtro di Kalman. Giorni 177-178.

Si noti come, utilizzando il calore latente residuale si perdono le informazioni sui picchi (Figura 6.1-5) mentre utilizzando il calore osservato queste vengono mantenute (Figura 6.1-1). Questo è dovuto al fatto che ovviamente anche il calore latente residuale proviene da un modello e non è l'osservazione. Questo contribuisce al fatto che i risultati ottenuti assimilando con LE residuale siano peggiori di quelli ottenuti assimilando con LE osservato.

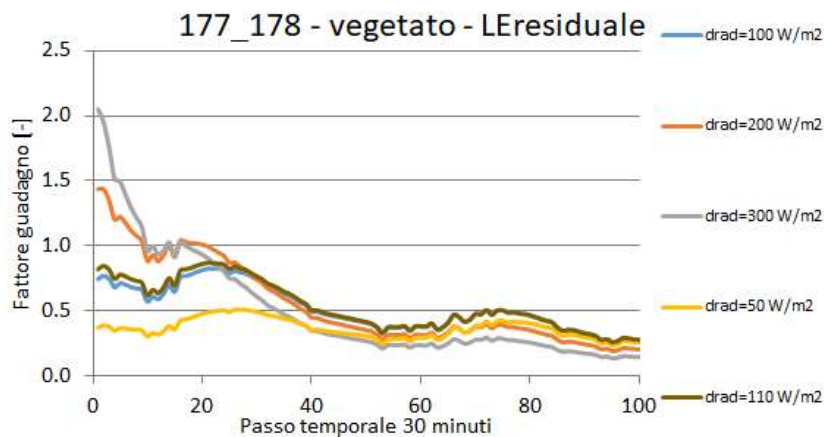


Figura 6.1-6 Andamento del fattore di guadagno del filtro di Kalman. Giorni 177-178.

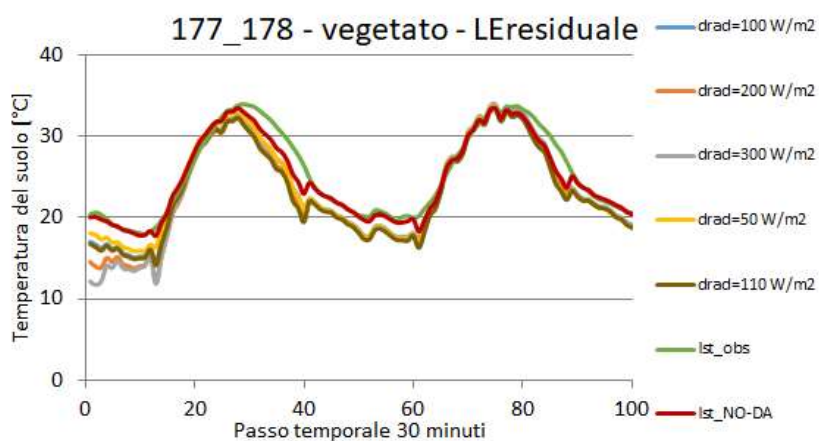


Figura 6.1-7 Confronto tra la temperatura del suolo osservata e quella prima e dopo il processo di assimilazione con il filtro di Kalman. Giorni 177-178.

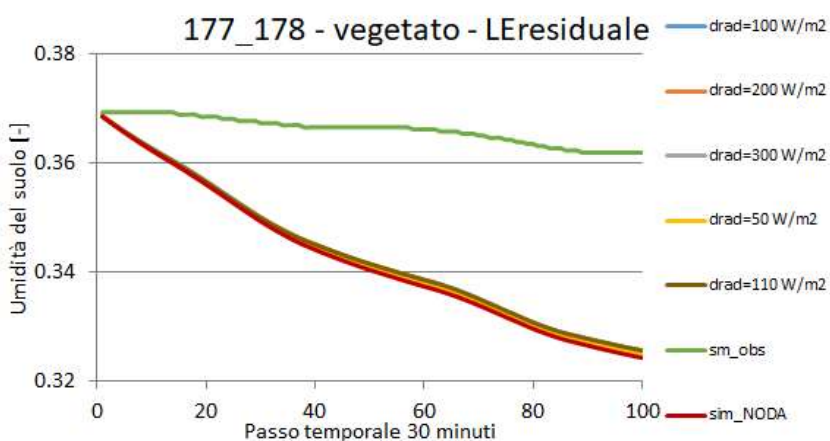


Figura 6.1-8 Confronto tra l'umidità del suolo osservata e quella prima e dopo il processo di assimilazione con il filtro di Kalman. Giorni 177-178.

Le considerazioni che si possono trarre sono analoghe al caso di assimilazione con calore latente osservato. Come già fatto notare, l'utilizzo del calore latente residuale comporta un peggioramento dei risultati rispetto all'utilizzo diretto dell'osservazione direttamente, questo è senz'altro dovuto al fatto che il modello residuale presenta lui stesso degli errori e che questi errori vengano trasportati anche all'interno del processo di assimilazione.

Confronto delle due metodologie su altre date

Sono qui riportate altre date sulle quali sono state effettuate le medesime analisi per rafforzare la validità dello studio.

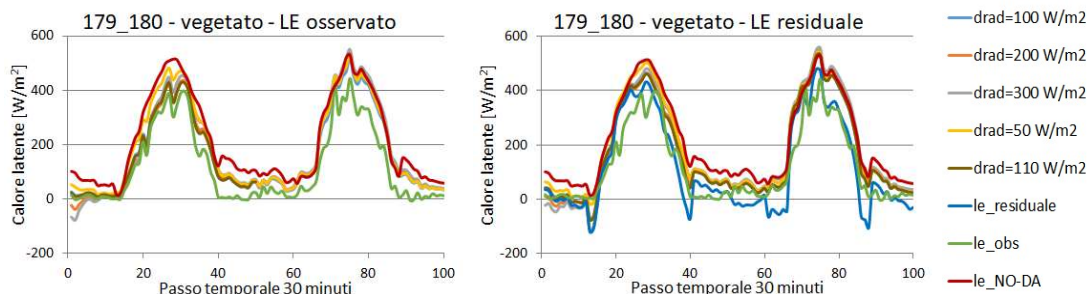


Figura 6.1-9 Confronto tra il calore latente osservato, quello calcolato con il modello residuale e quello prima e dopo il processo di assimilazione con il filtro di Kalman. Giorni 179-180.

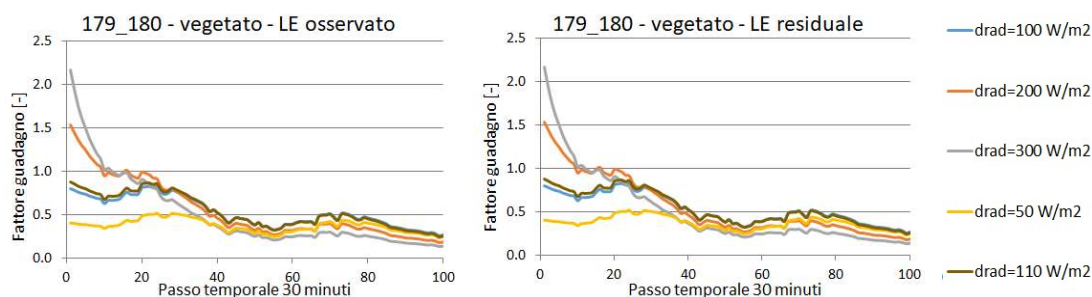


Figura 6.1-10 Andamento del fattore di guadagno del filtro di Kalman. Giorni 179-180.

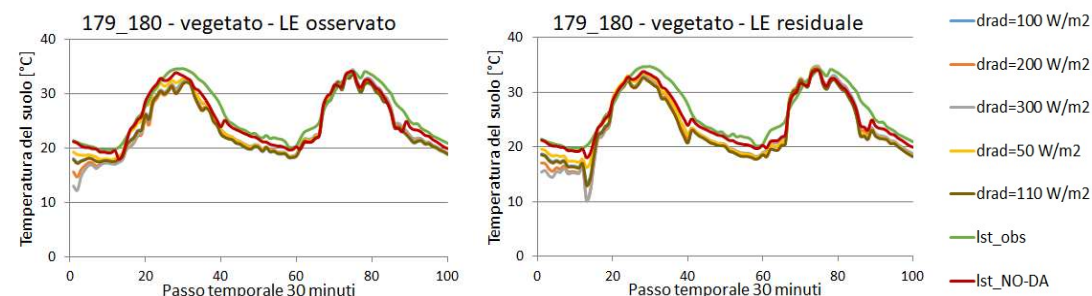


Figura 6.1-11 Confronto tra la temperatura del suolo osservata e quella prima e dopo il processo di assimilazione con il filtro di Kalman. Giorni 179-180.

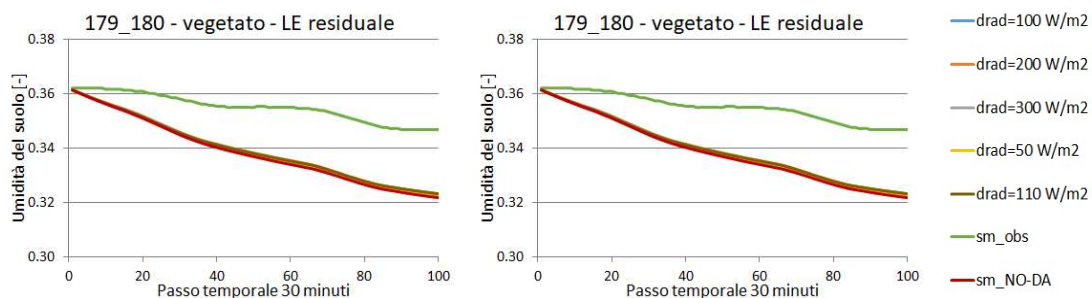


Figura 6.1-12 Confronto tra l'umidità del suolo osservata e quella prima e dopo il processo di assimilazione con il filtro di Kalman. Giorni 179-180.

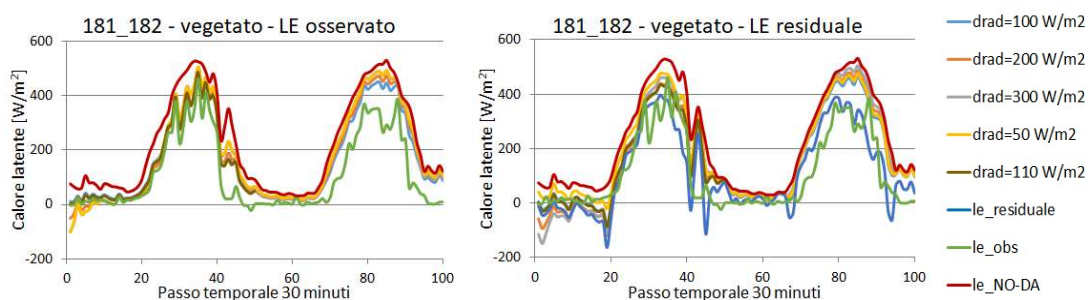


Figura 6.1-13 Confronto tra il calore latente osservato, quello calcolato con il modello residuale e quello prima e dopo il processo di assimilazione con il filtro di Kalman. Giorni 181-182.

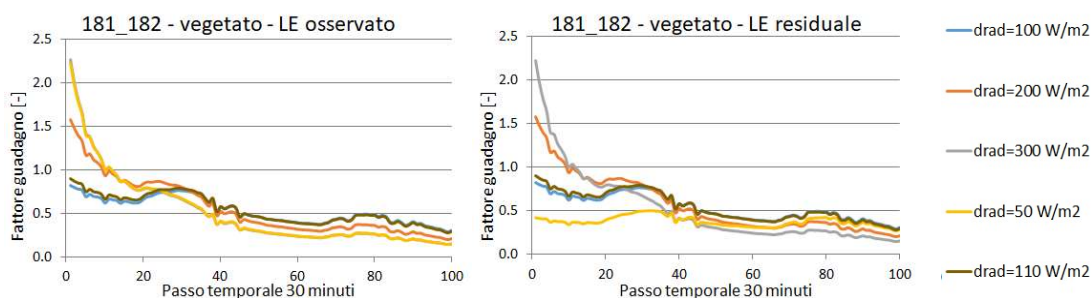


Figura 6.1-14 Andamento del fattore di guadagno del filtro di Kalman. Giorni 181-182.

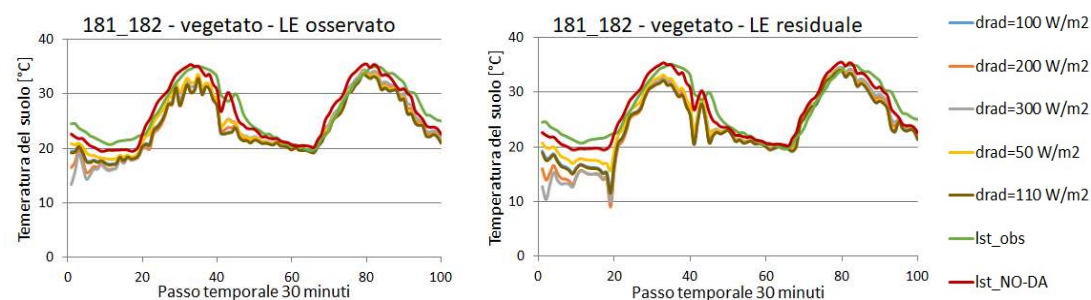


Figura 6.1-15 Confronto tra la temperatura del suolo osservata e quella prima e dopo il processo di assimilazione con il filtro di Kalman. Giorni 181-182.

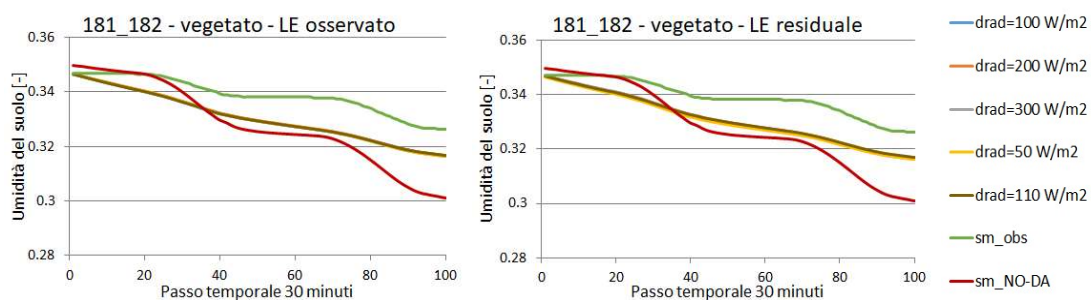


Figura 6.1-16 Confronto tra l'umidità del suolo osservata e quella prima e dopo il processo di assimilazione con il filtro di Kalman. Giorni 181-182.

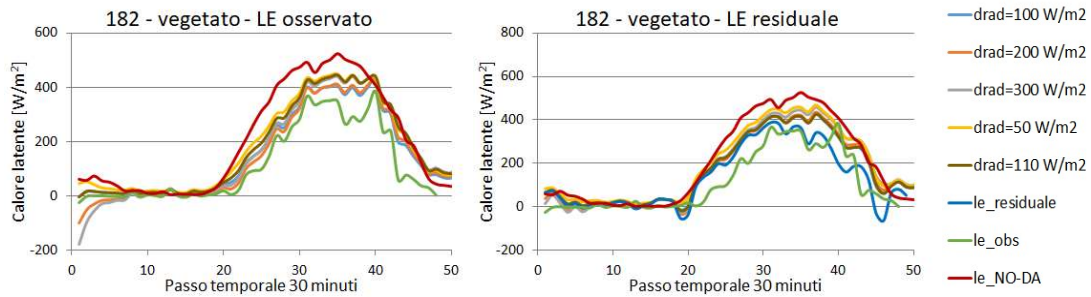


Figura 6.1-17 Confronto tra il calore latente osservato, quello calcolato con il modello residuale e quello prima e dopo il processo di assimilazione con il filtro di Kalman. Giorno 182.

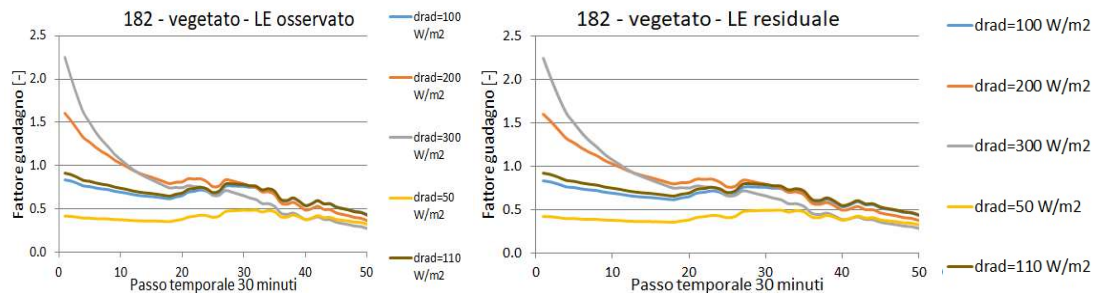


Figura 6.1-18 Andamento del fattore di guadagno del filtro di Kalman. Giorno 182.

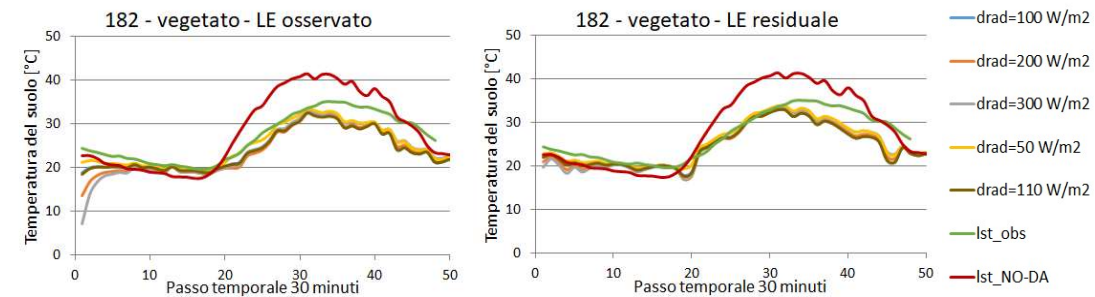


Figura 6.1-19 Confronto tra la temperatura del suolo osservata e quella prima e dopo il processo di assimilazione con il filtro di Kalman. Giorno 182.

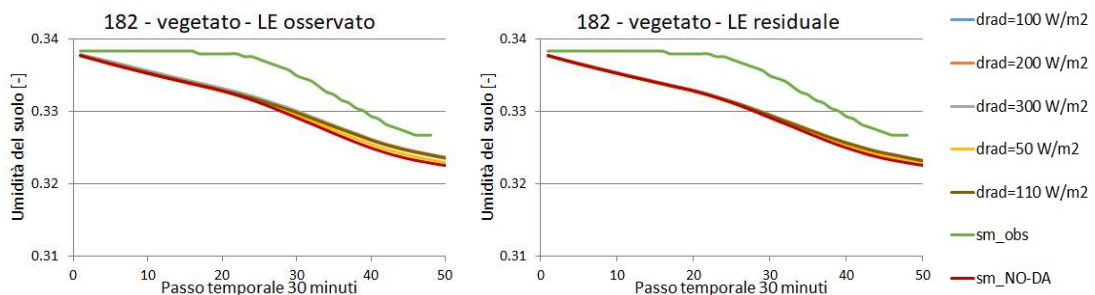


Figura 6.1-20 Confronto tra l'umidità del suolo osservata e quella prima e dopo il processo di assimilazione con il filtro di Kalman. Giorno 182.

Le considerazioni traibili dall'analisi di queste date sono analoghe a quelle tratte per i giorni 177-178 e soprariportate, si rimanda perciò ai sottoparagrafi *Assimilazione del calore latente osservato* e *Assimilazione del calore latente residuale*.

Indici statistici

Nelle tabelle sottostanti sono riportati alcuni indici statistici (scarto quadratico medio, errore medio e deviazione standard) riferiti al calore latente per avere anche una valutazione quantitativa di quale sia la miglior configurazione del parametro *drad*. Per ogni cella il numero a sinistra è il valore dell'indice in uno specifico giorno o nel periodo indicato, quello a destra, in grigio, rappresenta la variazione percentuale dell'indice rispetto al valore assunto nella simulazione di origine che si è scelto essere quella con $drad = 100 \text{ W/m}^2$. La variazione sarà quindi quanto l'indice si discosta dal valore ottenuto per $drad = 100 \text{ W/m}^2$.

Tabella 6.1-1 A sinistra le tabelle che riassumono i risultati ottenuti con il calore latente osservato a destra quelle dei risultati ottenuti con il calore latente ricavato dal modello residuale. L'indice calcolato è riferito al giorno sottolineato quando ce ne sono due.

Tabella per $drad=100 \text{ W/m}^2$				
Giorno	RMSE [W/m^2]	ME [W/m^2]	S [W/m^2]	
177	44	-37	25	-
179	45	-39	23	-
<u>181-182</u>	54	-42	35	-
<u>181-182</u>	85	-71	72	-
<u>181-182</u>	71	-57	51	-
182	55	-43	35	-

Tabella per $drad=100 \text{ W/m}^2$				
Giorno	RMSE [W/m^2]	ME [W/m^2]	S [W/m^2]	
177	89	-56	70	-
179	69	-46	53	-
<u>181-182</u>	79	-32	73	-
<u>181-182</u>	102	-82	83	-
<u>181-182</u>	91	-57	76	-
182	82	-61	56	-

Tabella per variazioni di $drad$ del +100% ($drad=200 \text{ W/m}^2$)				
Giorno	RMSE [W/m^2]	ME [W/m^2]	S [W/m^2]	
177	43	-21	39	54%
179	46	-29	36	53%
<u>181-182</u>	57	-34	47	37%
<u>181-182</u>	101	-84	85	18%
<u>181-182</u>	82	-59	61	20%
182	59	-35	48	38%

Tabella per variazioni di $drad$ del +100% ($drad=200 \text{ W/m}^2$)				
Giorno	RMSE [W/m^2]	ME [W/m^2]	S [W/m^2]	
177	89	-45	78	11%
179	71	-35	62	17%
<u>181-182</u>	87	-17	86	17%
<u>181-182</u>	113	-93	94	13%
<u>181-182</u>	101	-55	87	14%
182	82	-58	58	511%

Tabella per variazioni di $drad$ del +200% ($drad=300 \text{ W/m}^2$)				
Giorno	RMSE [W/m^2]	ME [W/m^2]	S [W/m^2]	
177	59	-31	51	102%
179	62	-38	49	109%
<u>181-182</u>	74	-41	62	78%
<u>181-182</u>	112	-93	94	31%
<u>181-182</u>	95	-67	67	32%
182	79	-43	66	88%

Tabella per variazioni di $drad$ del +200% ($drad=300 \text{ W/m}^2$)				
Giorno	RMSE [W/m^2]	ME [W/m^2]	S [W/m^2]	
177	103	-53	89	27%
179	82	-43	71	33%
<u>181-182</u>	100	-23	97	32%
<u>181-182</u>	122	-101	102	24%
<u>181-182</u>	112	-62	86	14%
182	93	-67	65	17%

Tabella per variazioni di drad del -50% (drad=50 W/m ²)					Tabella per variazioni di drad del -50% (drad=50 W/m ²)								
Giorno	RMSE [W/m ²]	ME [W/m ²]	S [W/m ²]		Giorno	RMSE [W/m ²]	ME [W/m ²]	S [W/m ²]					
177	86	94%	-75	103%	42	69%	111	25%	-86	52%	72	2%	
179	77	70%	-69	76%	35	48%	90	30%	-73	60%	54	1%	
<u>181-182</u>	75	38%	-42	-1%	62	80%	<u>181-182</u>	95	21%	-65	104%	70	-4%
<u>181-182</u>	114	33%	-95	33%	96	33%	<u>181-182</u>	107	5%	-87	7%	88	7%
<u>181-182</u>	96	35%	-68	20%	63	23%	<u>181-182</u>	101	12%	-76	34%	69	-10%
182	86	56%	-72	-66%	47	35%	182	102	25%	-82	-36%	61	9%

Tabella per variazioni di drad del +10% (drad=110 W/m ²)					Tabella per variazioni di drad del +10% (drad=110 W/m ²)								
Giorno	RMSE [W/m ²]	ME [W/m ²]	S [W/m ²]		Giorno	RMSE [W/m ²]	ME [W/m ²]	S [W/m ²]					
177	41	-8%	-33	-12%	25	0%	177	88	-2%	-53	-6%	70	0%
179	43	-6%	-36	-8%	23	0%	179	68	-2%	-43	-7%	53	1%
<u>181-182</u>	52	-4%	-39	-7%	34	-1%	<u>181-182</u>	78	-1%	-28	-12%	74	0%
<u>181-182</u>	86	1%	-72	1%	72	1%	<u>181-182</u>	102	1%	-83	1%	84	1%
<u>181-182</u>	71	0%	-56	-2%	45	-12%	<u>181-182</u>	91	0%	-55	-3%	73	-4%
182	53	-4%	-40	7%	34	-2%	182	80	-2%	-59	3%	55	-1%

A conferma di quanto visto con i grafici, i risultati ottenuti usando il modello residuale sono peggiori a causa degli errori intrinseci ad esso. Le date 181-182 e 182 confermano il fatto che gli effetti del processo di assimilazione si esauriscono dopo circa un giorno (48 step). Difatti gli indici calcolati sul giorno 182 sono nettamente migliori quando questo è il primo giorno di assimilazione.

6.1.2 Temperatura dell'aria

Assimilazione del calore latente osservato

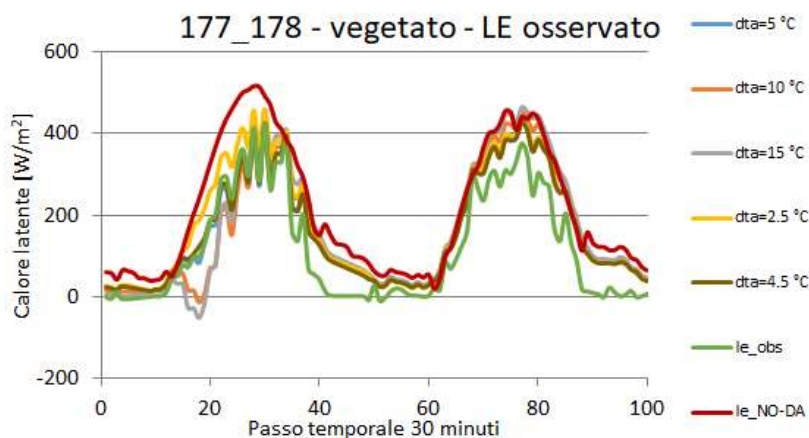


Figura 6.1-21 Confronto tra il calore latente osservato e quello prima e dopo il processo di assimilazione con il filtro di Kalman. Giorni 177-178.

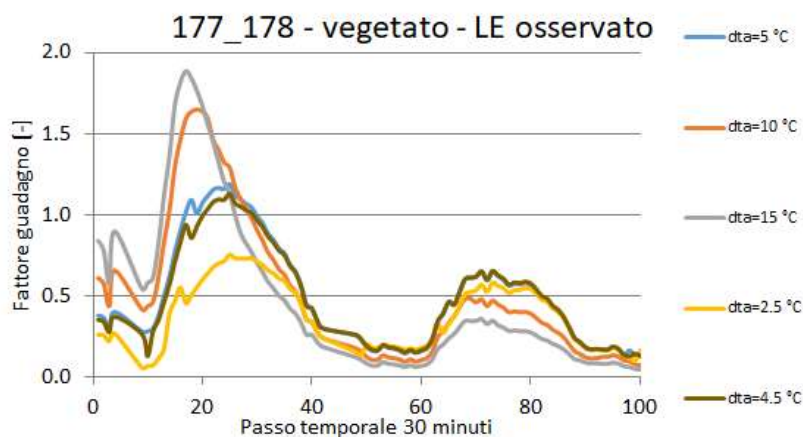


Figura 6.1-22 Andamento del fattore di guadagno del filtro di Kalman. Giorni 177-178.

Così come per la radiazione, anche per la temperatura dell'aria si può notare che il processo del filtro di Kalman aiuta a migliorare la stima del calore latente (Figura 6.1-21) rispetto ad una situazione precedente all'assimilazione dei dati (le-NO-DA) e anche qui dopo il primo giorno il contributo dell'assimilazione risulta essere ininfluenza, difatti tutte le simulazioni presentano valori simili a quella senza assimilazione.

Si nota inoltre che perturbazioni diverse determinano diverse stime del calore latente, in quanto il parametro di perturbazione agisce direttamente sull'aggiornamento dello stato del sistema.

Anche qui dopo circa una cinquantina di step temporali si nota che il contributo dell'assimilazione risulta essere ininfluenza, difatti i valori del fattore guadagno (Figura 6.1-22 Andamento del fattore di guadagno del filtro di Kalman. Giorni 177-178.) sono minori una volta superato il primo giorno.

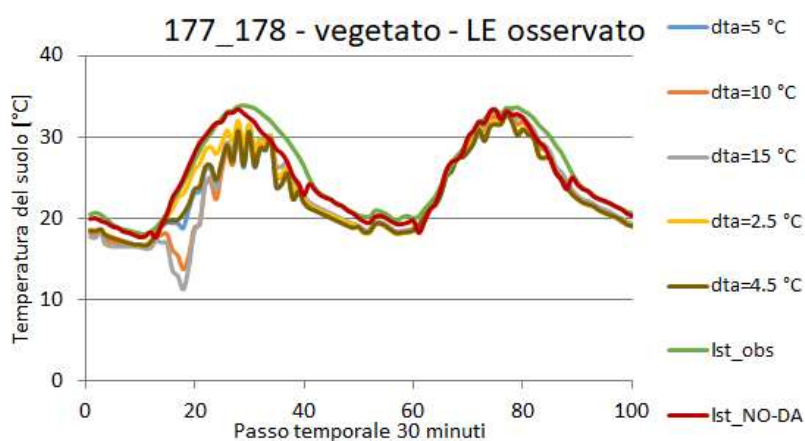


Figura 6.1-23 Confronto tra la temperatura del suolo osservata e quella prima e dopo il processo di assimilazione con il filtro di Kalman. Giorni 177-178.

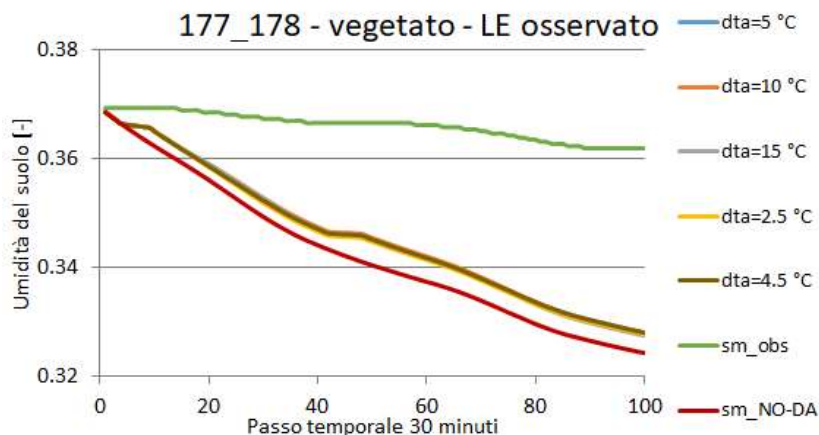


Figura 6.1-24 Confronto tra l'umidità del suolo osservata e quella prima e dopo il processo di assimilazione con il filtro di Kalman. Giorni 177-178.

Anche per le variabili quali la temperatura (Figura 6.1-23) e l'umidità del suolo valgono i discorsi fatti in precedenza riguardo l'umidità che anche qui non risulta essere influenzata dalla variazione della forzante meteo (Figura 6.1-24).

Assimilazione con calore latente residuale

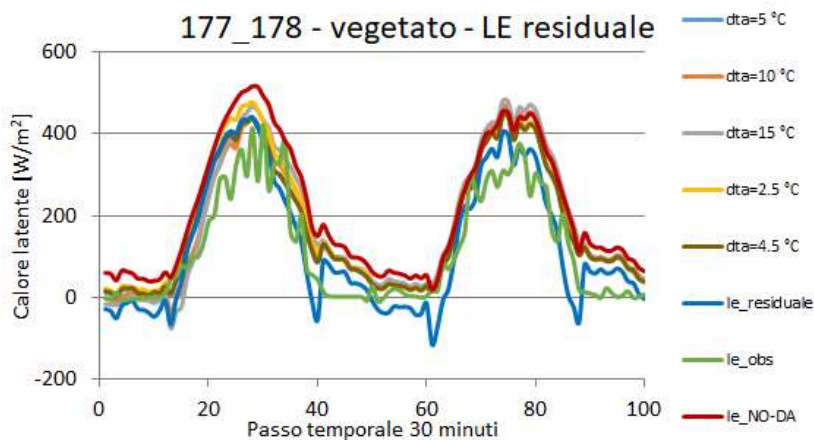


Figura 6.1-25 Confronto tra il calore latente osservato, quello ottenuto con il modello residuale e quello prima e dopo il processo di assimilazione con il filtro di Kalman. Giorni 177-178.

Si noti come utilizzando il calore latente residuale si perdono le informazioni sui picchi (Figura 6.1-25) mentre utilizzando il calore osservato queste vengono mantenute (Figura 6.1-21). Questo è dovuto al fatto che ovviamente anche il calore latente residuale proviene da un modello e non è l'osservazione. Questo ovviamente contribuisce al fatto che i risultati ottenuti assimilando con LE residuale siano peggiori di quelli ottenuti assimilando con LE osservato.

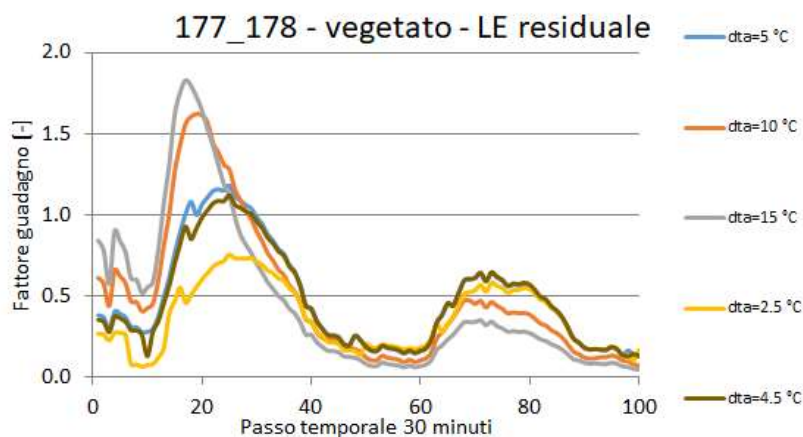


Figura 6.1-26 Andamento del fattore di guadagno del filtro di Kalman. Giorni 177-178.

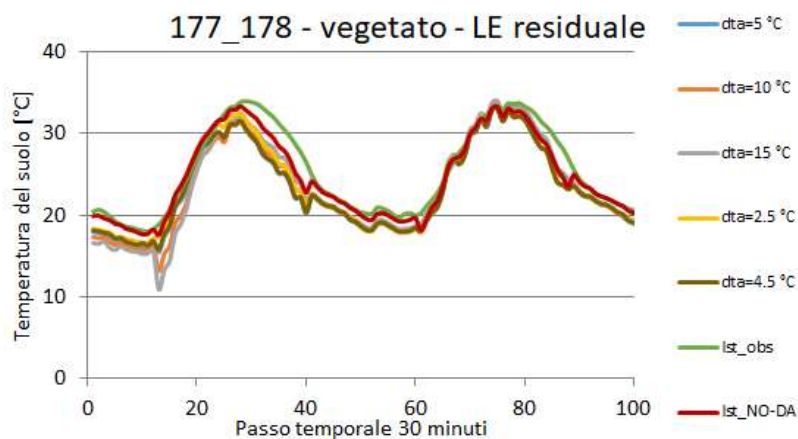


Figura 6.1-27 Confronto tra la temperatura del suolo osservata e quella prima e dopo il processo di assimilazione con il filtro di Kalman. Giorni 177-178.

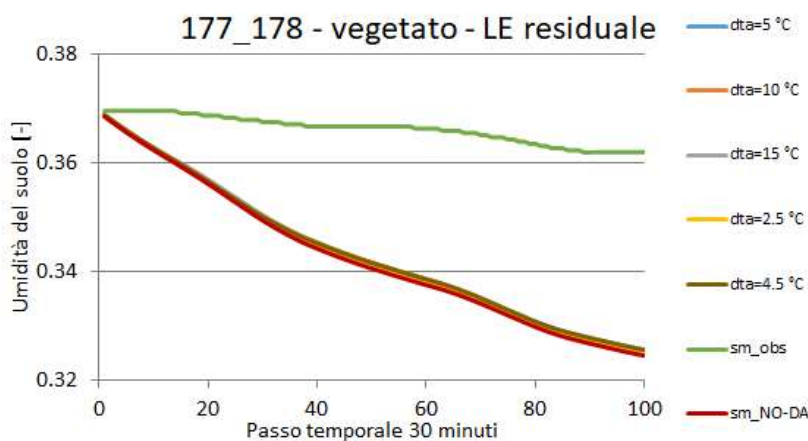


Figura 6.1-28 Confronto tra l'umidità del suolo osservata e quella prima e dopo il processo di assimilazione con il filtro di Kalman. Giorni 177-178.

Le considerazioni che si possono trarre sono analoghe al caso di assimilazione con calore latente osservato. Come già fatto notare, l'utilizzo del calore latente residuale comporta un peggioramento

dei risultati rispetto all'utilizzo dell'osservazione direttamente, questo è senz'altro dovuto al fatto che il modello residuale presenta lui stesso degli errori e che questi errori vengano trasportati anche all'interno del processo di assimilazione.

Confronto delle due metodologie su altre date

Sono qui riportate altre date sulle quali sono state effettuate le medesime analisi per rafforzare la validità dello studio.

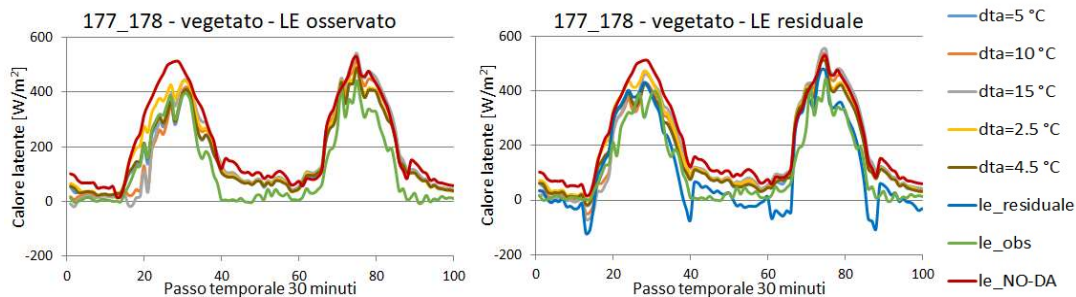


Figura 6.1-29 Confronto tra il calore latente osservato, quello calcolato con il modello residuale e quello prima e dopo il processo di assimilazione con il filtro di Kalman. Giorni 179-180.

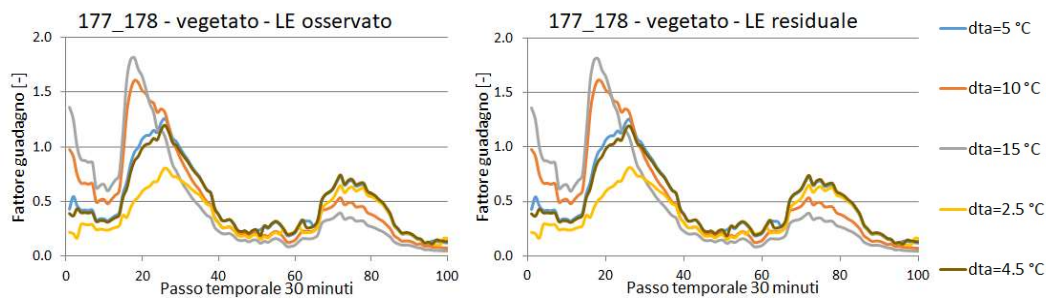


Figura 6.1-30 Andamento del fattore di guadagno del filtro di Kalman. Giorni 179-180.

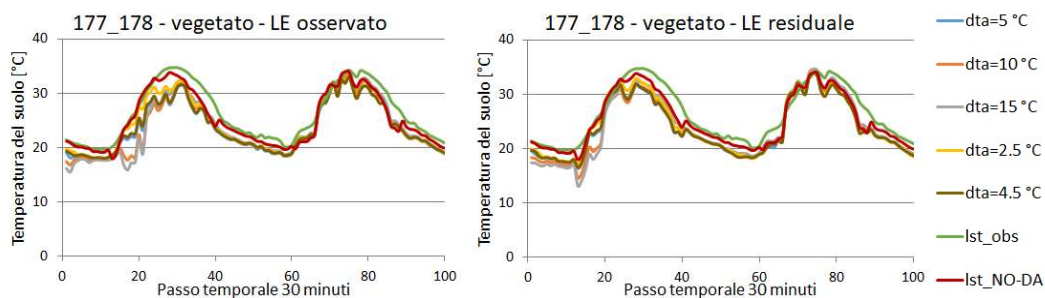


Figura 6.1-31 Confronto tra la temperatura del suolo osservata e quella prima e dopo il processo di assimilazione con il filtro di Kalman. Giorni 179-180.

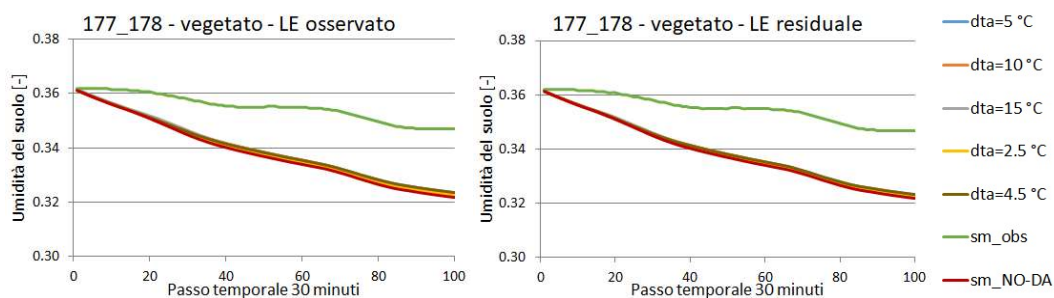


Figura 6.1-32 Confronto tra l'umidità del suolo osservata e quella prima e dopo il processo di assimilazione con il filtro di Kalman. Giorni 179-180.

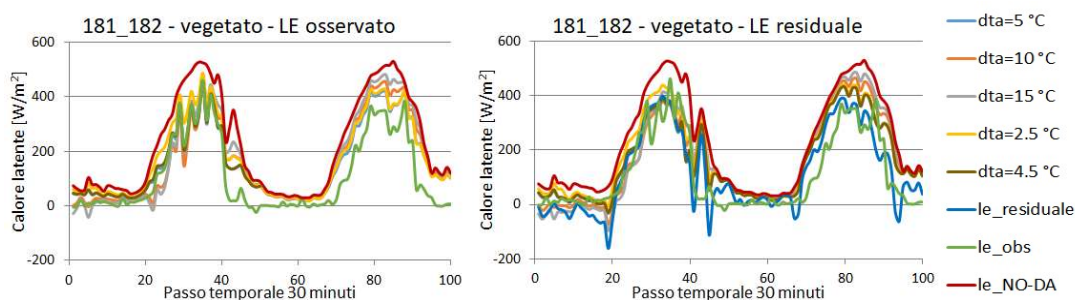


Figura 6.1-33 Confronto tra il calore latente osservato, quello calcolato con il modello residuale e quello prima e dopo il processo di assimilazione con il filtro di Kalman. Giorni 181-182.

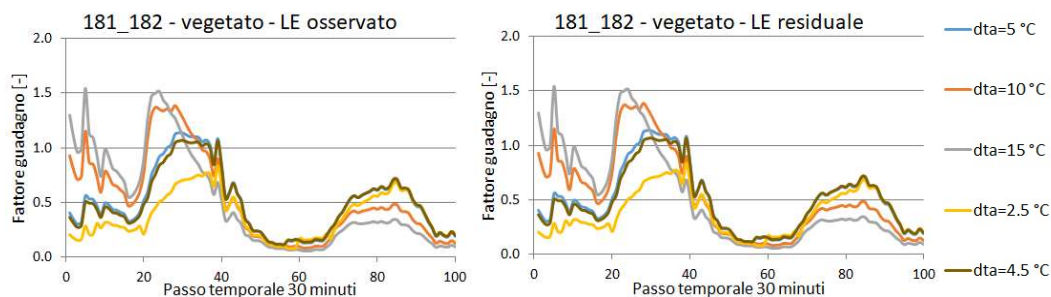


Figura 6.1-34 Andamento del fattore di guadagno del filtro di Kalman. Giorni 181-182.

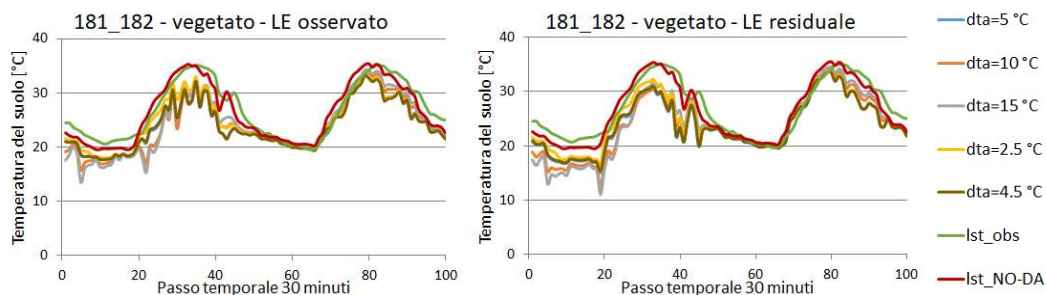


Figura 6.1-35 Confronto tra la temperatura del suolo osservata e quella prima e dopo il processo di assimilazione con il filtro di Kalman. Giorni 181-182.

6.1

Sensività della perturbazione delle forzanti meteo

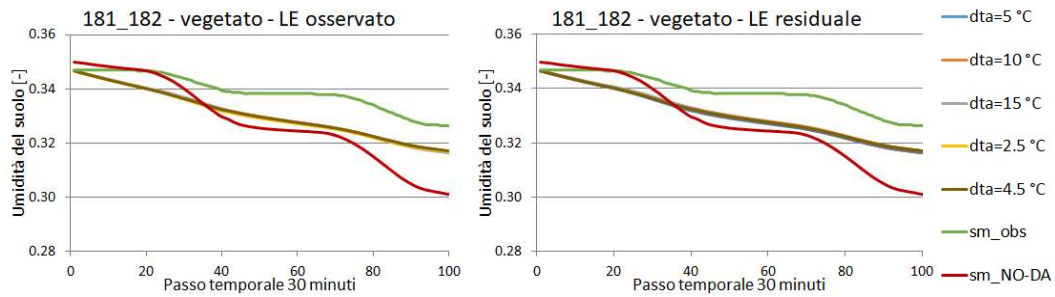


Figura 6.1-36 Confronto tra l'umidità del suolo osservata e quella prima e dopo il processo di assimilazione con il filtro di Kalman. Giorni 181-182.

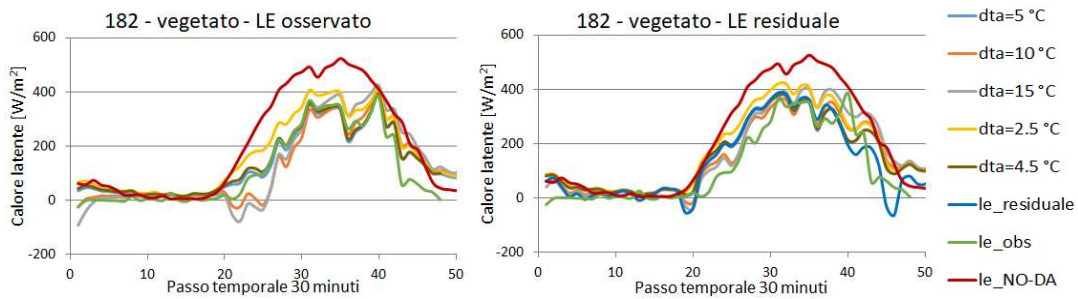


Figura 6.1-37 Confronto tra il calore latente osservato, quello calcolato con il modello residuale e quello prima e dopo il processo di assimilazione con il filtro di Kalman. Giorno 182.

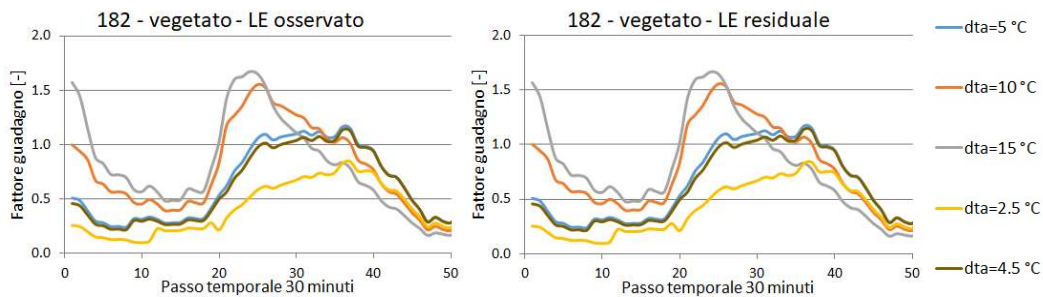


Figura 6.1-38 Andamento del fattore di guadagno del filtro di Kalman. Giorno 182.

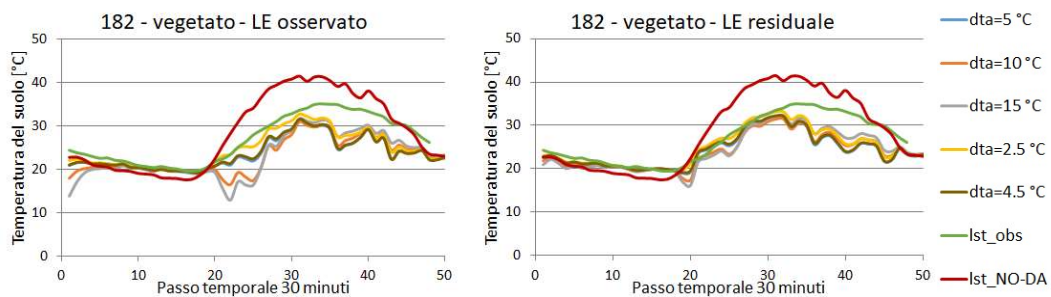


Figura 6.1-39 Confronto tra la temperatura del suolo osservata e quella prima e dopo il processo di assimilazione con il filtro di Kalman. Giorno 182.

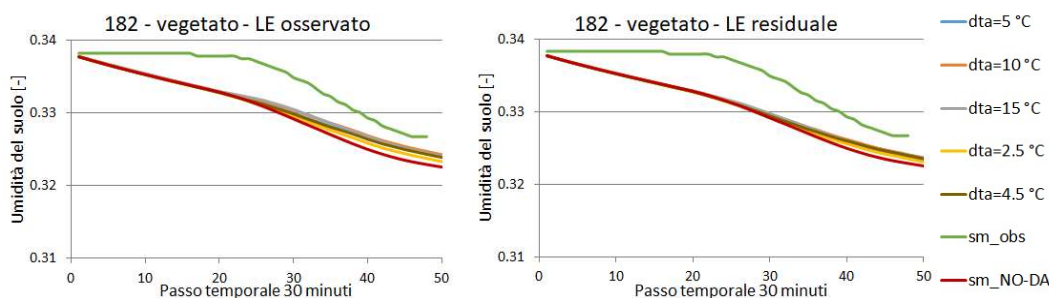


Figura 6.1-40 Confronto tra l'umidità del suolo osservata e quella prima e dopo il processo di assimilazione con il filtro di Kalman. Giorno 182.

Le considerazioni traibili dall'analisi di queste date sono analoghe a quelle effettuate per i giorni 177-178 e soprariportate, si rimanda perciò ai sottoparagrafi *Assimilazione del calore latente osservato* e *Assimilazione con calore latente residuale*.

Indici statistici

Così come per la radiazione anche qui sono riportate delle tabelle contenenti il calcolo alcuni indici statistici (scarto quadratico medio, errore medio e deviazione standard) riferiti al calore latente per avere anche una valutazione quantitativa di quale sia la miglior configurazione del parametro *dta*. Per ogni cella il numero a sinistra è il valore dell'indice in uno specifico giorno o nel periodo indicato, quello a destra, in grigio, rappresenta la variazione percentuale dell'indice rispetto al valore assunto nella simulazione di origine che si è scelto essere quella con $dta = 5^{\circ}\text{C}$. La variazione sarà quindi quanto l'indice si discosta dal valore ottenuto per $dta = 5^{\circ}\text{C}$.

Tabella 6.1-2 A sinistra le tabelle che riassumono i risultati ottenuti con il calore latente osservato a destra quelle dei risultati ottenuti con il calore latente ricavato dal modello residuale. L'indice calcolato è riferito al giorno sottolineato quando ce ne sono due.

Tabella per $dta=5^{\circ}\text{C}$					Tabella per $dta=5^{\circ}\text{C}$								
Giorno	RMSE [W/m ²]	ME [W/m ²]	S [W/m ²]		Giorno	RMSE [W/m ²]	ME [W/m ²]	S [W/m ²]					
177	41	-	-18	-	39	-	74	-	-47	-	59	-	
179	46	-	-27	-	38	-	59	-	-41	-	44	-	
<u>181-182</u>	46	-	-27	-	40	-	<u>181-182</u>	76	-	-20	-	75	-
181-182	75	-	-65	-	66	-	181-182	93	-	-75	-	76	-
<u>181-182</u>	62	-	-46	-	52	-	<u>181-182</u>	85	-	-48	-	76	-
182	41	-	-21	-	38	-	182	70	-	-41	-	58	-

Tabella per variazioni di dta del +100% ($dta=10^{\circ}\text{C}$)					Tabella per variazioni di dta del +100% ($dta=10^{\circ}\text{C}$)								
Giorno	RMSE [W/m ²]	ME [W/m ²]	S [W/m ²]		Giorno	RMSE [W/m ²]	ME [W/m ²]	S [W/m ²]					
177	69	66%	-3	-86%	69	80%	177	73	-2%	-39	-16%	62	6%
179	62	35%	-15	-46%	60	60%	179	60	1%	-32	-21%	51	16%
<u>181-182</u>	57	24%	-16	-40%	56	41%	<u>181-182</u>	77	2%	-7	-67%	78	4%
181-182	96	29%	-82	27%	83	27%	181-182	108	16%	-90	20%	91	20%
<u>181-182</u>	79	27%	-49	7%	67	28%	<u>181-182</u>	94	11%	-48	2%	84	10%
182	57	37%	-7	67%	57	50%	182	64	-9%	-37	9%	52	-10%

Tabella per variazioni di dta del +200% (dta=15°C)					Tabella per variazioni di dta del +200% (dta=15°C)				
Giorno	RMSE [W/m ²]	ME [W/m ²]	S [W/m ²]		Giorno	RMSE [W/m ²]	ME [W/m ²]	S [W/m ²]	
177	82	99%	-11	-36%	82	113%			
179	72	58%	-21	-22%	69	83%			
<u>181-182</u>	70	51%	-22	-16%	65	64%			
<u>181-182</u>	111	49%	-95	46%	96	46%			
<u>181-182</u>	93	49%	-59	28%	60	15%			
182	71	72%	-14	35%	69	80%			

Tabella per variazioni di dta del -50% (dta=2.5°C)					Tabella per variazioni di dta del -50% (dta=2.5°C)				
Giorno	RMSE [W/m ²]	ME [W/m ²]	S [W/m ²]		Giorno	RMSE [W/m ²]	ME [W/m ²]	S [W/m ²]	
177	66	60%	-59	234%	30	-22%			
179	65	42%	-59	119%	26	-32%			
<u>181-182</u>	67	46%	-58	118%	34	-13%			
<u>181-182</u>	78	5%	-69	6%	69	6%			
<u>181-182</u>	73	18%	-63	38%	42	-20%			
182	65	56%	-56	-167%	32	-16%			

Tabella per variazioni di dta del -10% (dta=4.5°C)					Tabella per variazioni di dta del +100% (dta=4.5°C)				
Giorno	RMSE [W/m ²]	ME [W/m ²]	S [W/m ²]		Giorno	RMSE [W/m ²]	ME [W/m ²]	S [W/m ²]	
177	41	-2%	-23	31%	34	-13%			
179	46	0%	-31	16%	33	-11%			
<u>181-182</u>	47	1%	-31	15%	36	-10%			
<u>181-182</u>	73	-2%	-64	-2%	64	-2%			
<u>181-182</u>	61	-1%	-47	3%	40	-24%			
182	42	1%	-26	-22%	33	-12%			

Anche in questo caso si evidenzia che i risultati ottenuti attraverso il modello residuale sono peggiori a causa degli errori intrinseci ad esso e che gli effetti del processo di assimilazione si esauriscono dopo circa un giorno.

6.1.3 Riassunto analisi

Per la radiazione si evince che i risultati migliori si ottengono imponendo una perturbazione $drad = 100 \text{ W/m}^2$, per quanto riguarda la temperatura dell'aria imponendo una perturbazione $dta = 5^\circ\text{C}$. Perturbando la radiazione sembra che si producano variazioni leggermente maggiori di quelle ottenute perturbando la temperatura dell'aria, non essendoci però una netta prevalenza risulta difficile determinare se ce ne sia una dominante tra le due. Per questo motivo si è scelto nei prossimi step di perturbarle entrambe nello stesso momento.

6.2 Calibrazione dei parametri del modello del filtro di Kalman

Kalman

Obiettivo di questo paragrafo è quello di andare a calibrare i parametri del modello del filtro di Kalman sempre attraverso l'assimilazione del calore latente. I parametri selezionati sono l'errore sulla misura del calore latente STs , l'errore sul calcolo del calore latente Sle e il parametro di perturbazione dle . La calibrazione verrà fatta anche in questo caso per tentativi, si è dunque scelto un set di parametri che è stato imposto alla simulazione di riferimento e a turno se ne andrà a variare uno di questi per sceglierne il valore che porta il miglior risultato.

I parametri scelti per la simulazione di riferimento *Run1* sono:

Tabella 6.2-1 Parametri della simulazione di riferimento

	STs [W/m^2]	Sle [W/m^2]	dle [W/m^2]	$drad$ [W/m^2]	dta [$^{\circ}C$]
<i>Run1</i>	50	2500	2000	100	5

Di seguito sono riportati dei grafici rappresentativi di alcuni test fatti nel processo di calibrazione sempre facendo riferimento alle due metodologie, calore latente osservato o ottenuto con modello residuale.

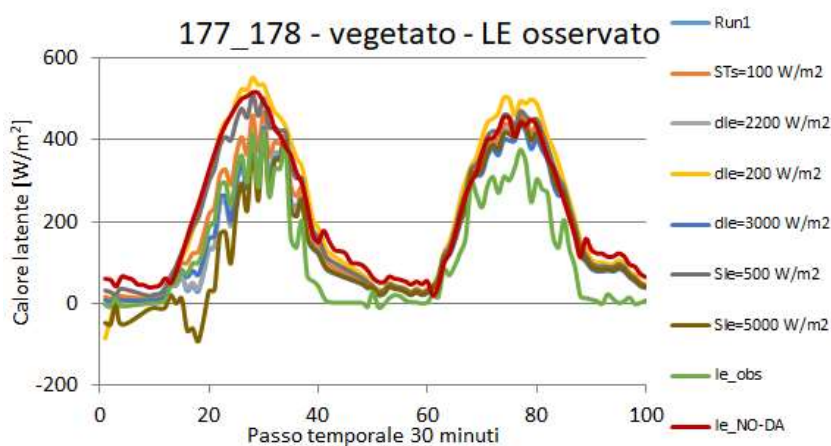


Figura 6.2-1 Confronto tra il calore latente osservato e quello prima e dopo il processo di assimilazione con il filtro di Kalman. Giorni 177-178.

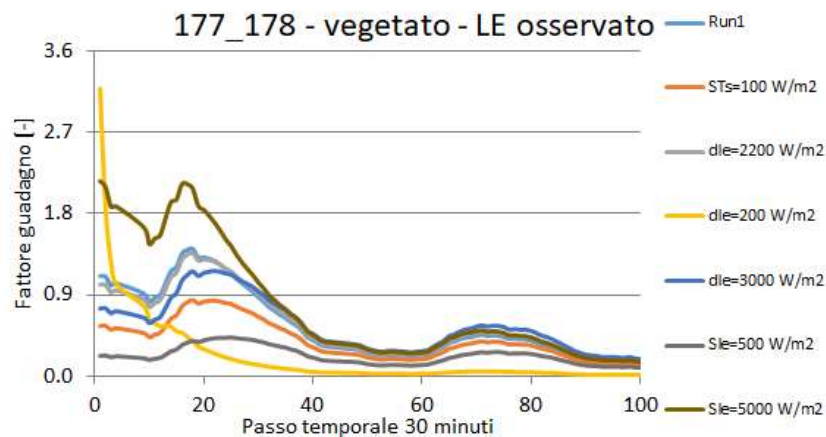


Figura 6.2-2 Andamento del fattore di guadagno del filtro di Kalman. Giorni 177-178.

Come mostrato in Figura 6.2-1 e Figura 6.2-2 i parametri scelti influenzano il risultato, a seconda del valore assegnato si ottengono risultati diversi dal processo di assimilazione. Le considerazioni più evidenti sono legate all'utilità del filtro di Kalman e all'importanza dell'assimilazione dei dati in termini di durata, infatti anche qui il fattore di guadagno assume valori molto più bassi dopo il primo giorno di assimilazione.

In Figura 6.2-3 si mostrano i risultati per la temperatura del suolo, la quale viene calcolata a valle del processo di assimilazione quindi cercando quella temperatura che determina il valore di LE aggiornato; per ulteriori spiegazioni si rimanda al paragrafo 6.1.1.

Infine l'umidità del suolo (Figura 6.2-4) la quale non sembra mostrare alcuna variazione per effetto dell'assimilazione dei dati.

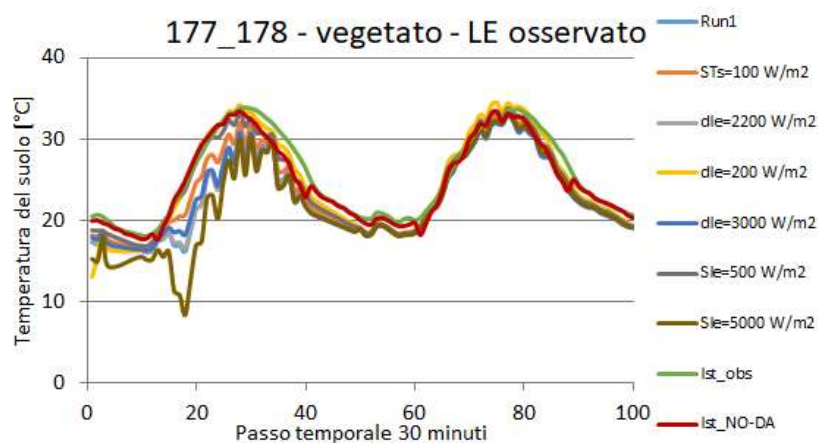


Figura 6.2-3 Confronto tra la temperatura del suolo osservata e quella prima e dopo il processo di assimilazione con il filtro di Kalman. Giorni 177-178.

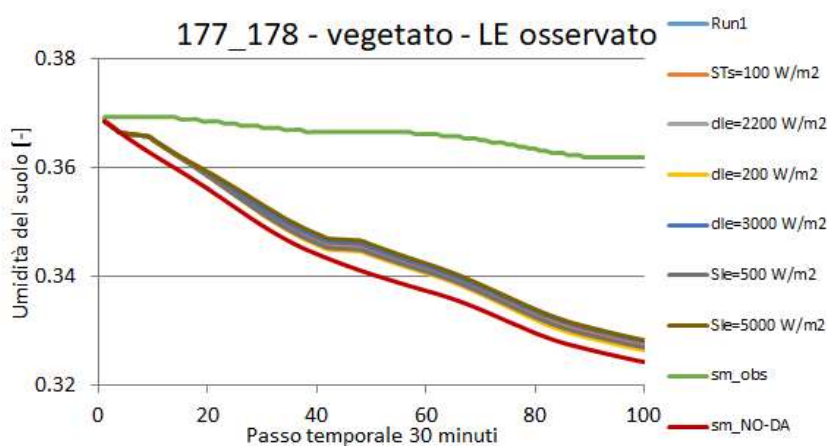


Figura 6.2-4 Confronto tra l'umidità del suolo osservata e quella prima e dopo il processo di assimilazione con il filtro di Kalman. Giorni 177-178.

Nelle figure seguenti invece si mostrano i risultati ottenuti utilizzando il calore latente ottenuto dal modello residuale.

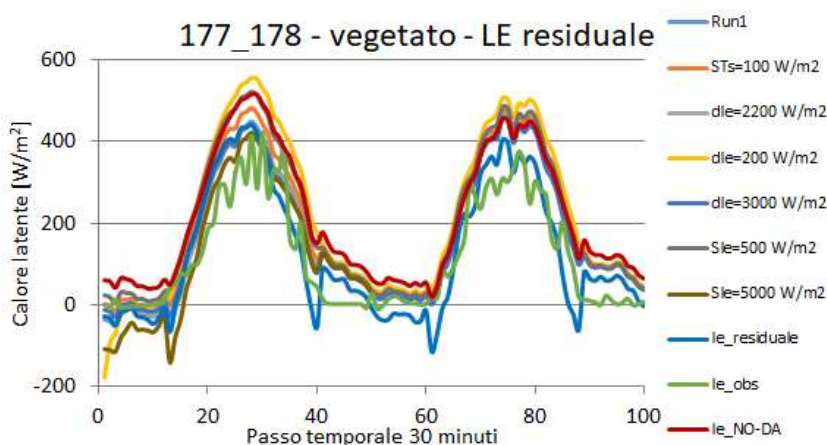


Figura 6.2-5 Confronto tra il calore latente osservato, quello ottenuto con il modello residuale e quello prima e dopo il processo di assimilazione con il filtro di Kalman. Giorni 177-178.

Anche in questo caso si nota che l'utilizzo del modello residuale comporta alcuni errori in più rispetto all'utilizzo dell'osservato, si perde infatti l'informazione sui picchi dell'osservato.

Per i commenti relativi alle figure Figura 6.2-6, Figura 6.2-7 e Figura 6.2-8 si rimanda a quanto detto in precedenza per l'assimilazione utilizzando il calore latente osservato.

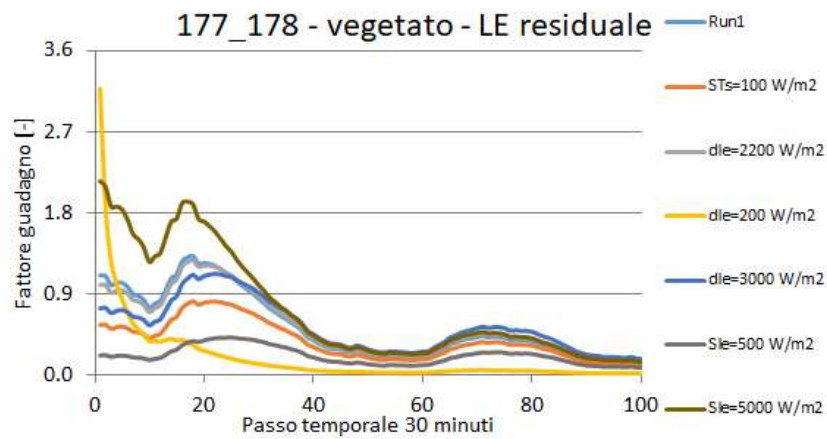


Figura 6.2-6 Andamento del fattore di guadagno del filtro di Kalman. Giorni 177-178.

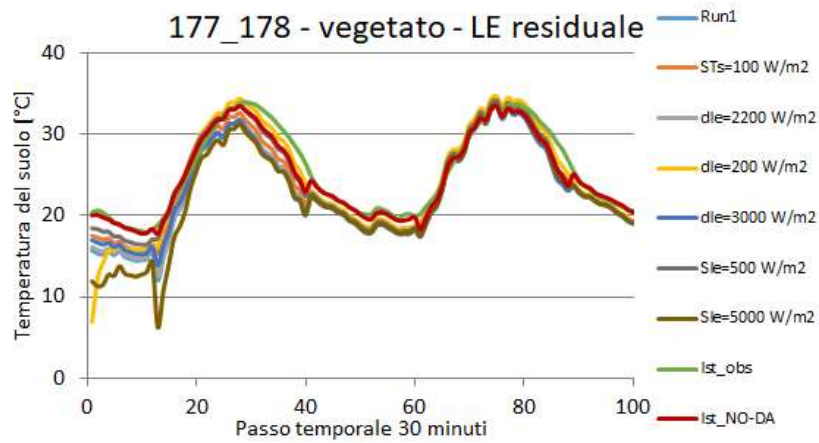


Figura 6.2-7 Confronto tra la temperatura del suolo osservata e quella prima e dopo il processo di assimilazione con il filtro di Kalman. Giorni 177-178.

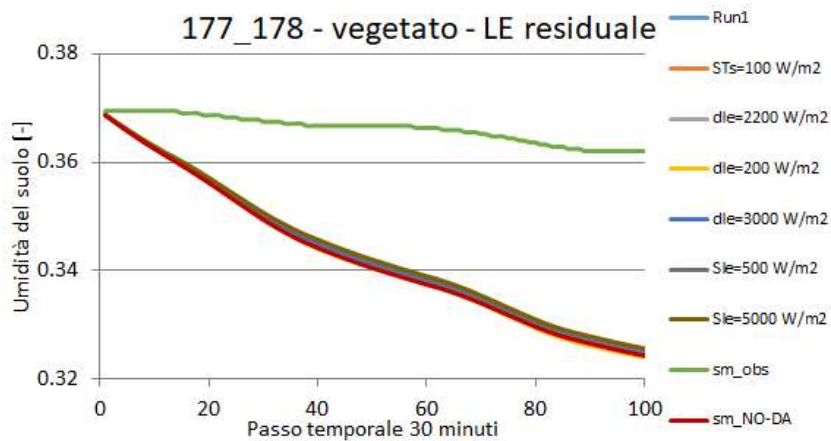


Figura 6.2-8 Confronto tra l'umidità del suolo osservata e quella prima e dopo il processo di assimilazione con il filtro di Kalman. Giorni 177-178.

6.2.1 Periodo di suolo vegetato

Il confronto delle due metodologie e la scelta del set di parametri migliore vengono ampliati facendo i medesimi test su altre date considerandone alcune in un periodo vegetato ed altre in un periodo non vegetato.

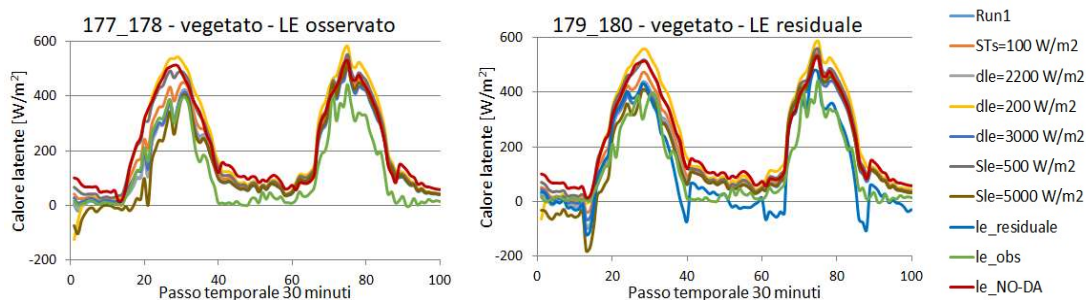


Figura 6.2-9 Confronto tra il calore latente osservato, quello ottenuto con il modello residuale e quello prima e dopo il processo di assimilazione con il filtro di Kalman. Giorni 179-180.

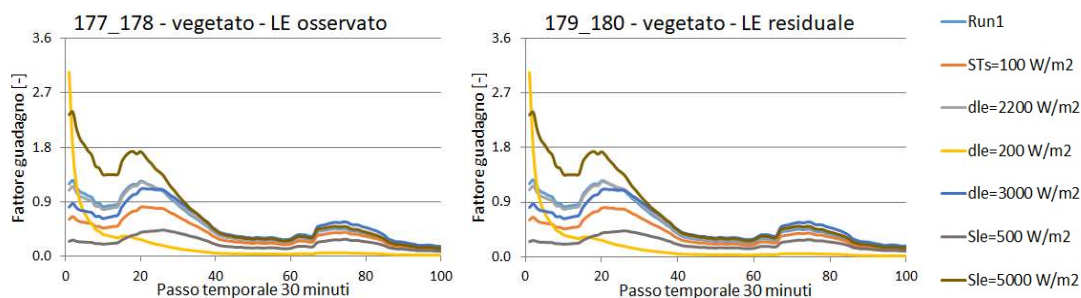


Figura 6.2-10 Andamento del fattore di guadagno del filtro di Kalman. Giorni 179-180.

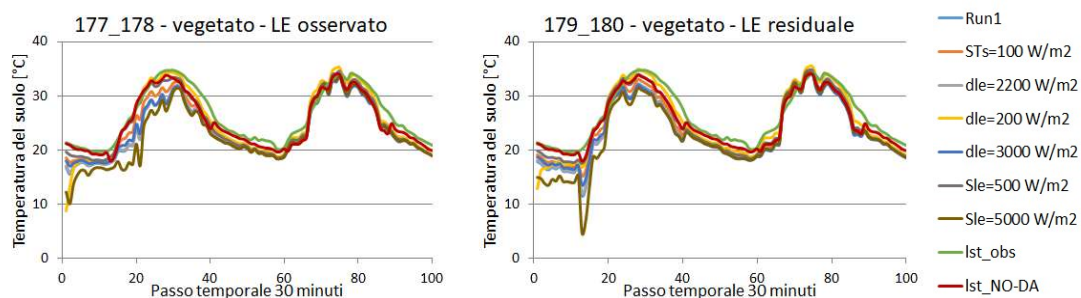


Figura 6.2-11 Confronto tra la temperatura del suolo osservata e quella prima e dopo il processo di assimilazione con il filtro di Kalman. Giorni 179-180.

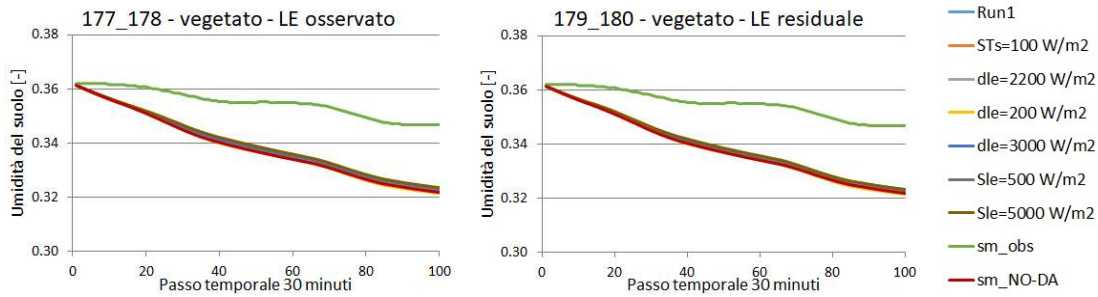


Figura 6.2-12 Confronto tra l'umidità del suolo osservata e quella prima e dopo il processo di assimilazione con il filtro di Kalman. Giorni 179-180.

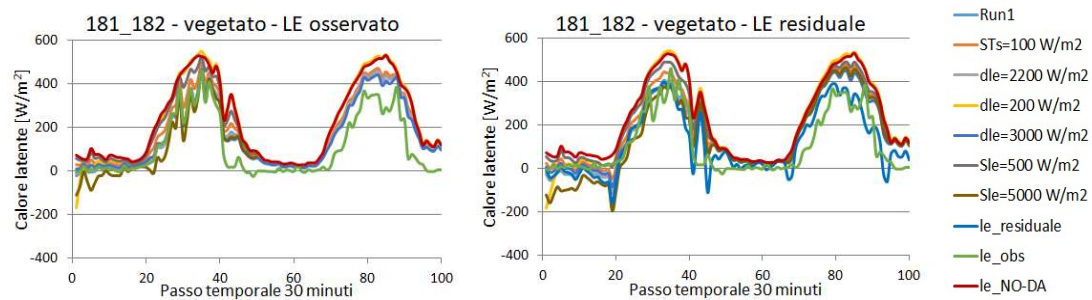


Figura 6.2-13 Confronto tra il calore latente osservato, quello ottenuto con il modello residuale e quello prima e dopo il processo di assimilazione con il filtro di Kalman. Giorni 181-182.

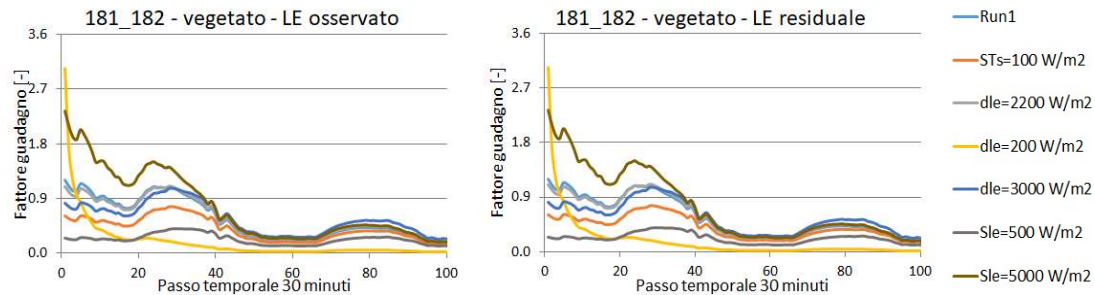


Figura 6.2-14 Andamento del fattore di guadagno del filtro di Kalman. Giorni 179-180.

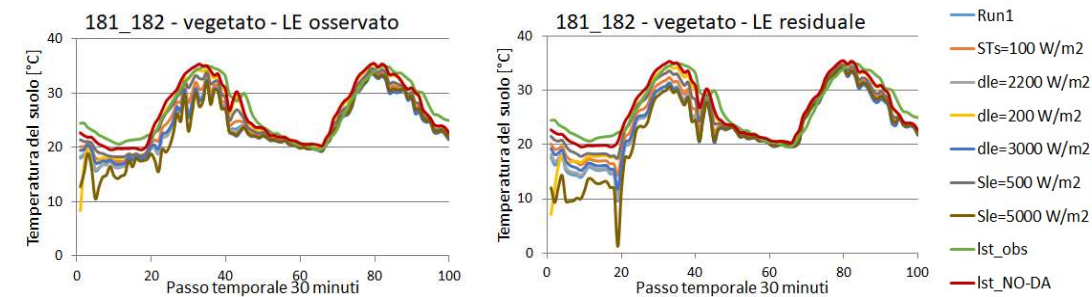


Figura 6.2-15 Confronto tra la temperatura del suolo osservata e quella prima e dopo il processo di assimilazione con il filtro di Kalman. Giorni 181-182.

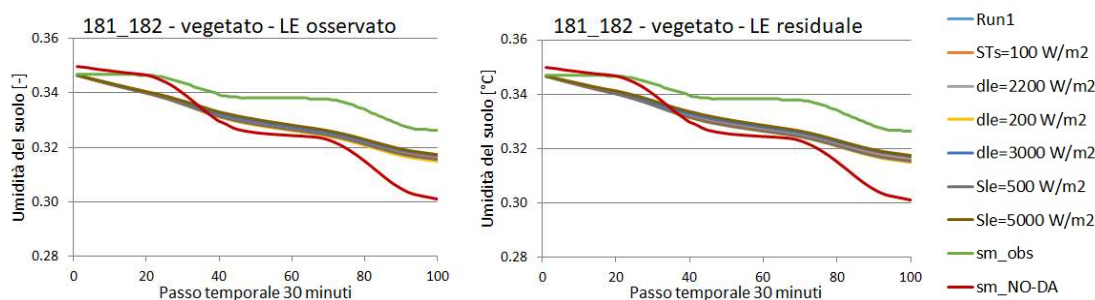


Figura 6.2-16 Confronto tra l'umidità del suolo osservata e quella prima e dopo il processo di assimilazione con il filtro di Kalman. Giorni 181-182.

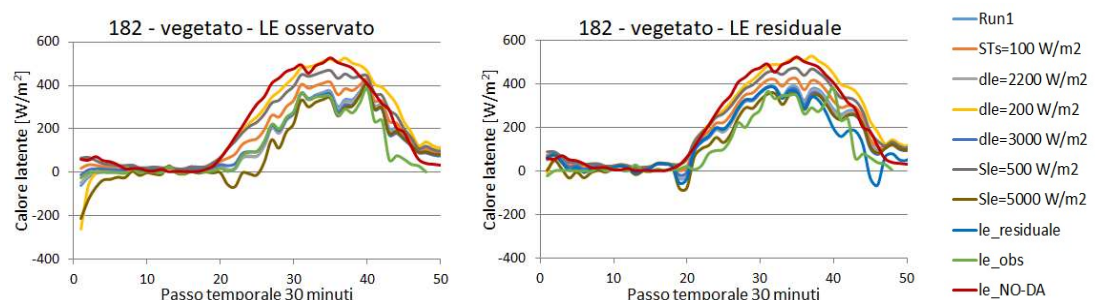


Figura 6.2-17 Confronto tra il calore latente osservato, quello ottenuto con il modello residuale e quello prima e dopo il processo di assimilazione con il filtro di Kalman. Giorno 182.

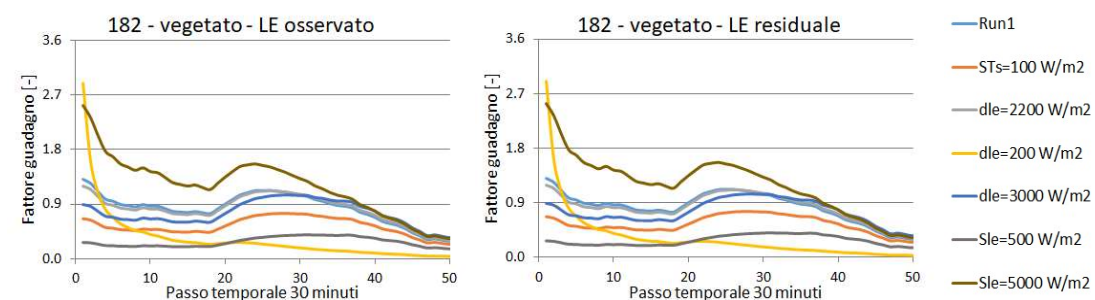


Figura 6.2-18 Andamento del fattore di guadagno del filtro di Kalman. Giorno 182.

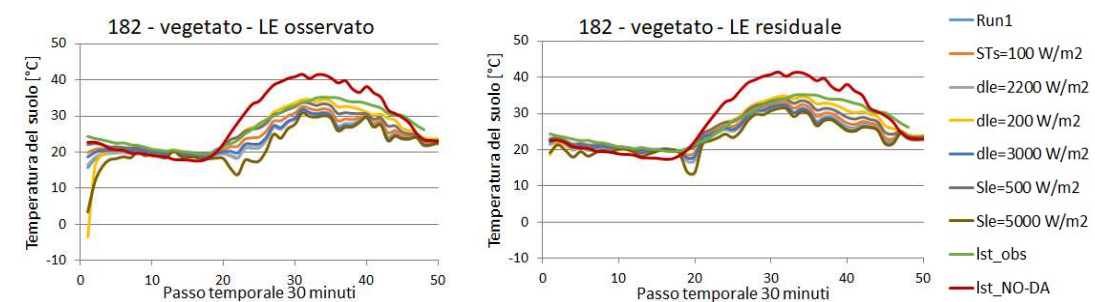


Figura 6.2-19 Confronto tra la temperatura del suolo osservata e quella prima e dopo il processo di assimilazione con il filtro di Kalman. Giorno 182.

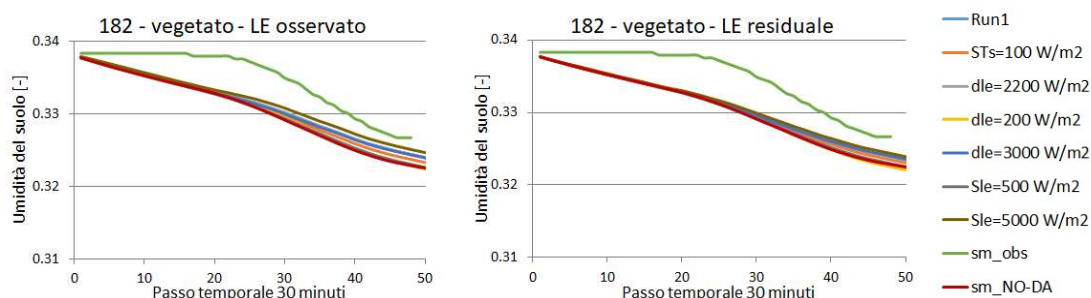


Figura 6.2-2o Confronto tra l'umidità del suolo osservata e quella prima e dopo il processo di assimilazione con il filtro di Kalman. Giorno 182.

Indici statistici

Si sono calcolati degli indici statistici (scarto quadratico medio, errore medio e deviazione standard) sul calore latente che sono rappresentativi delle varie simulazioni, al fine di valutare anche quantitativamente quale sia il set di parametri del filtro di Kalman che fornisce i risultati migliori.

Tabella 6.2-2 A sinistra le tabelle che riassumono i risultati ottenuti con il calore latente osservato a destra quelle dei risultati ottenuti con il calore latente ricavato dal modello residuale. L'indice calcolato è riferito al giorno sottolineato quando ce ne sono due.

Tabella Sle=2500 W/m ² dle=2000 W/m ² STs=50 W/m ² drad=100 W/m ² dta=5 °C				
Giorno	RMSE [W/m ²]	ME [W/m ²]	S [W/m ²]	
177	51	-10	51	-
179	48	-21	43	-
<u>181-182</u>	50	-23	44	-
<u>181-182</u>	96	-82	82	-
<u>181-182</u>	77	-52	55	-
182	45	-18	40	-

Tabella Sle=2500 W/m ² dle=2000 W/m ² STs=50 W/m ² drad=100 W/m ² dta=5 °C				
Giorno	RMSE [W/m ²]	ME [W/m ²]	S [W/m ²]	
177	80	-40	70	-
179	63	-31	55	-
<u>181-182</u>	80	-8	79	-
<u>181-182</u>	109	-90	91	-
<u>181-182</u>	95	-49	79	-
182	69	-45	52	-

Tabella per variazioni di STs del +100% (STs=100 W/m ²)				
Giorno	RMSE [W/m ²]	ME [W/m ²]	S [W/m ²]	
177	62	-50	37	-27%
179	61	-52	32	-24%
<u>181-182</u>	68	-53	44	0%
<u>181-182</u>	103	-87	88	7%
<u>181-182</u>	87	-70	52	-7%
182	64	-51	39	-1%

Tabella per variazioni di STs del +100% (STs=100 W/m ²)				
Giorno	RMSE [W/m ²]	ME [W/m ²]	S [W/m ²]	
177	97	-70	68	-4%
179	78	-60	50	-8%
<u>181-182</u>	85	-45	74	-6%
<u>181-182</u>	114	-94	95	5%
<u>181-182</u>	100	-70	75	-6%
182	87	-68	56	7%

Tabella per variazioni di dle del +10% (dle=2200 W/m ²)				
Giorno	RMSE [W/m ²]	ME [W/m ²]	S [W/m ²]	
177	48	-10	48	-5%
179	46	-20	40	-5%
<u>181-182</u>	48	-23	41	-7%
<u>181-182</u>	93	-79	80	-3%
<u>181-182</u>	74	-51	66	19%
182	42	-18	36	-8%

Tabella per variazioni di dle del +10% (dle=2200 W/m ²)				
Giorno	RMSE [W/m ²]	ME [W/m ²]	S [W/m ²]	
177	78	-40	68	-3%
179	61	-31	53	-4%
<u>181-182</u>	78	-9	76	-3%
<u>181-182</u>	107	-88	89	-2%
<u>181-182</u>	93	-48	84	5%
182	68	-43	51	-2%

Tabella per variazioni di dle del -90% (dle=200 W/m ²)						
Giorno	RMSE [W/m ²]		ME [W/m ²]		S [W/m ²]	
177	136	165%	-108	957%	85	67%
179	121	154%	-95	358%	76	78%
<u>181-182</u>	130	159%	-94	308%	92	108%
<u>181-182</u>	141	47%	-118	45%	119	45%
<u>181-182</u>	136	77%	-106	103%	73	33%
182	133	198%	-94	409%	96	140%

Tabella per variazioni di dle del -90% (dle=200 W/m ²)						
Giorno	RMSE [W/m ²]		ME [W/m ²]		S [W/m ²]	
177	150	87%	-108	171%	106	50%
179	124	97%	-97	209%	79	43%
<u>181-182</u>	134	68%	-85	908%	106	34%
<u>181-182</u>	143	31%	-119	32%	120	32%
<u>181-182</u>	138	45%	-102	108%	89	11%
182	134	96%	-107	141%	82	58%

Tabella per variazioni di dle del +50% (dle=3000 W/m ²)						
Giorno	RMSE [W/m ²]		ME [W/m ²]		S [W/m ²]	
177	40	-23%	-15	43%	37	-27%
179	40	-15%	-24	14%	33	-22%
<u>181-182</u>	43	-15%	-25	10%	35	-21%
<u>181-182</u>	83	-14%	-71	-13%	72	-13%
<u>181-182</u>	66	-14%	-48	-8%	45	-18%
182	36	-18%	-21	16%	30	-25%

Tabella per variazioni di dle del +50% (dle=3000 W/m ²)						
Giorno	RMSE [W/m ²]		ME [W/m ²]		S [W/m ²]	
177	76	-5%	-43	7%	64	-9%
179	59	-7%	-35	10%	48	-12%
<u>181-182</u>	74	-7%	-14	68%	73	-7%
<u>181-182</u>	100	-9%	-81	-10%	82	-10%
<u>181-182</u>	88	-8%	-48	-3%	74	-7%
182	68	-1%	-44	2%	53	1%

Tabella per variazioni di Sle del -80% (Sle=500 W/m ²)						
Giorno	RMSE [W/m ²]		ME [W/m ²]		S [W/m ²]	
177	105	104%	-92	808%	51	0%
179	94	98%	-85	309%	41	-3%
<u>181-182</u>	101	101%	-85	270%	55	25%
<u>181-182</u>	115	20%	-98	20%	99	20%
<u>181-182</u>	108	41%	-91	75%	58	6%
182	101	126%	-86	365%	54	35%

Tabella per variazioni di Sle del -80% (Sle=500 W/m ²)						
Giorno	RMSE [W/m ²]		ME [W/m ²]		S [W/m ²]	
177	124	55%	-102	156%	71	1%
179	104	64%	-89	183%	54	-2%
<u>181-182</u>	108	36%	-82	863%	71	-9%
<u>181-182</u>	123	12%	-102	14%	103	14%
<u>181-182</u>	115	21%	-92	87%	70	-12%
182	113	64%	-93	-110%	64	22%

Tabella per variazioni di Sle del +100% (Sle=5000 W/m ²)						
Giorno	RMSE [W/m ²]		ME [W/m ²]		S [W/m ²]	
177	87	69%	33	319%	82	62%
179	68	43%	13	-62%	68	58%
<u>181-182</u>	60	19%	10	-67%	60	36%
<u>181-182</u>	92	-4%	-78	-4%	79	-4%
<u>181-182</u>	78	1%	-34	-35%	70	27%
182	65	46%	18	195%	63	59%

Tabella per variazioni di Sle del +100% (Sle=5000 W/m ²)						
Giorno	RMSE [W/m ²]		ME [W/m ²]		S [W/m ²]	
177	83	4%	-5	-86%	84	19%
179	70	11%	0	-101%	71	30%
<u>181-182</u>	102	28%	34	-505%	97	23%
<u>181-182</u>	106	-3%	-87	-3%	88	-3%
<u>181-182</u>	104	9%	-27	-46%	101	27%
182	59	-14%	-21	52%	56	7%

Tabella per variazioni di Sle del -10% (STs=2250 W/m ²)						
Giorno	RMSE [W/m ²]		ME [W/m ²]		S [W/m ²]	
177	50	-4%	-17	63%	47	-7%
179	48	0%	-26	24%	40	-5%
<u>181-182</u>	52	3%	-28	21%	44	0%
<u>181-182</u>	97	1%	-82	1%	83	1%
<u>181-182</u>	78	1%	-55	5%	55	-1%
182	46	2%	-24	29%	39	-1%

Tabella per variazioni di Sle del -10% (STs=2250 W/m ²)						
Giorno	RMSE [W/m ²]		ME [W/m ²]		S [W/m ²]	
177	82	2%	-45	12%	69	-1%
179	64	2%	-36	15%	54	-2%
<u>181-182</u>	79	-1%	-14	71%	78	0%
<u>181-182</u>	110	1%	-91	1%	92	1%
<u>181-182</u>	95	0%	-53	7%	80	1%
182	71	3%	-48	8%	53	1%

Tabella per variazioni di STs del +10% (STs=55 W/m ²)						Tabella per variazioni di STs del +10% (STs=55 W/m ²)							
Giorno	RMSE [W/m ²]	ME [W/m ²]	S [W/m ²]	RMSE [W/m ²]	ME [W/m ²]	S [W/m ²]	RMSE [W/m ²]	ME [W/m ²]	S [W/m ²]	RMSE [W/m ²]	ME [W/m ²]	S [W/m ²]	
177	50	-3%	-16	57%	48	-6%	82	2%	-44	11%	70	-1%	
179	47	0%	-25	22%	41	-4%	64	2%	-36	13%	54	-1%	
<u>181-182</u>	51	2%	-27	19%	44	0%	<u>181-182</u>	79	-1%	-14	64%	79	0%
<u>181-182</u>	97	1%	-82	-1%	83	1%	<u>181-182</u>	110	0%	-91	1%	92	1%
<u>181-182</u>	78	1%	-55	5%	55	-1%	<u>181-182</u>	95	0%	-52	6%	81	1%
182	45	2%	-23	26%	40	-1%	182	71	3%	-48	7%	53	2%

Ciò che questi indici mostrano è il fatto che piccole variazioni, dell'ordine del 10% non portano a variazioni consistenti dell'indice, occorrono infatti variazioni più consistenti per apprezzare dei cambiamenti. Inoltre si ha la conferma che i risultati ottenuti attraverso il modello residuale sono peggiori a causa degli errori intrinseci ad esso, difatti i valori delle tabelle di destra sono peggiori di quelli delle tabelle a sinistra. Anche le considerazioni fatte sull'influenza dell'aggiornamento in termini di durata trovano un riscontro in queste tabelle. Basti guardare ancora il giorno 182, quando esso si trova ad essere il primo giorno di assimilazione presenta valori degli indici molto migliori rispetto a quando è il secondo giorno di assimilazione.

6.2.2 Periodo di suolo non vegetato

Analogamente al caso di suolo vegetato si è scelto di fare dei test anche per delle date in un periodo di suolo nudo al fine di rendere più completa e corretta l'analisi.

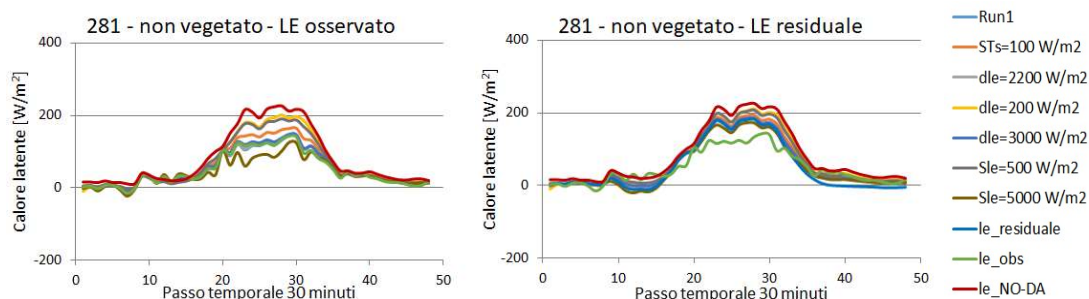


Figura 6.2-21 Confronto tra il calore latente osservato, quello ottenuto con il modello residuale e quello prima e dopo il processo di assimilazione con il filtro di Kalman. Giorno 281.

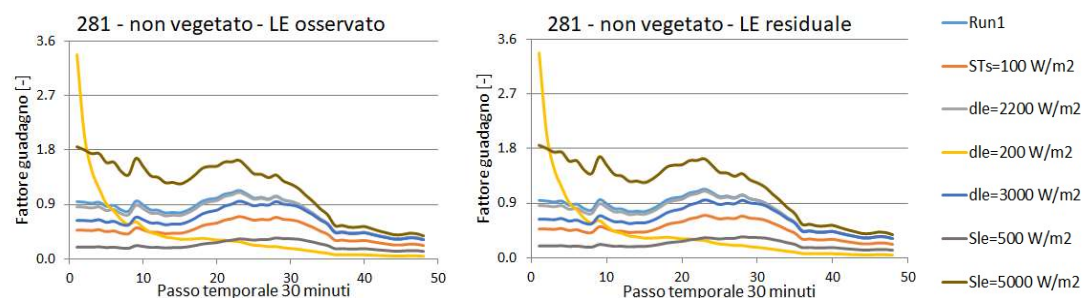


Figura 6.2-22 Andamento del fattore di guadagno del filtro di Kalman. Giorno 281.

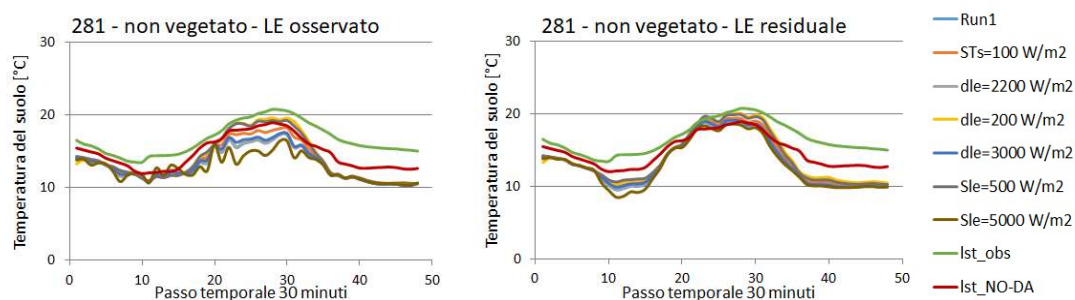


Figura 6.2-23 Confronto tra la temperatura del suolo osservata e quella prima e dopo il processo di assimilazione con il filtro di Kalman. Giorno 281.

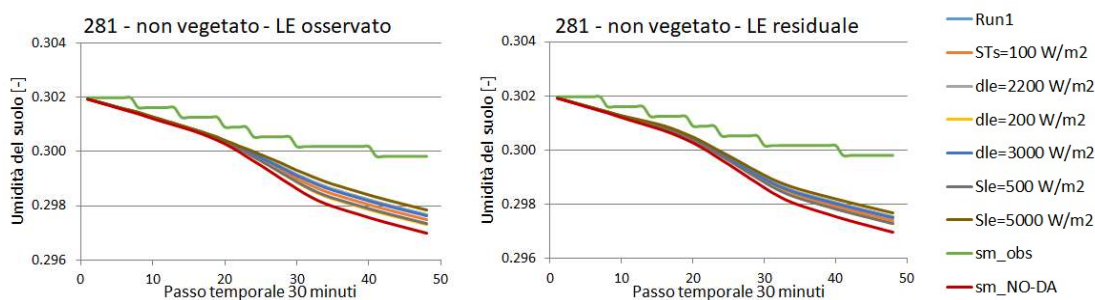


Figura 6.2-24 Confronto tra l'umidità del suolo osservata e quella prima e dopo il processo di assimilazione con il filtro di Kalman. Giorno 281.

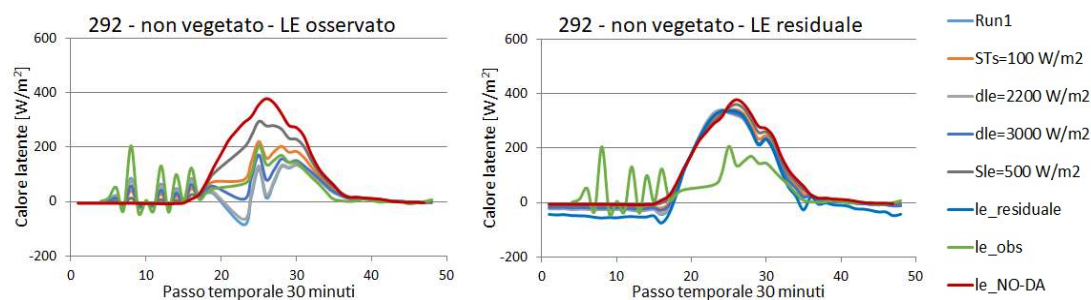


Figura 6.2-25 Confronto tra il calore latente osservato, quello ottenuto con il modello residuale e quello prima e dopo il processo di assimilazione con il filtro di Kalman. Giorno 292.

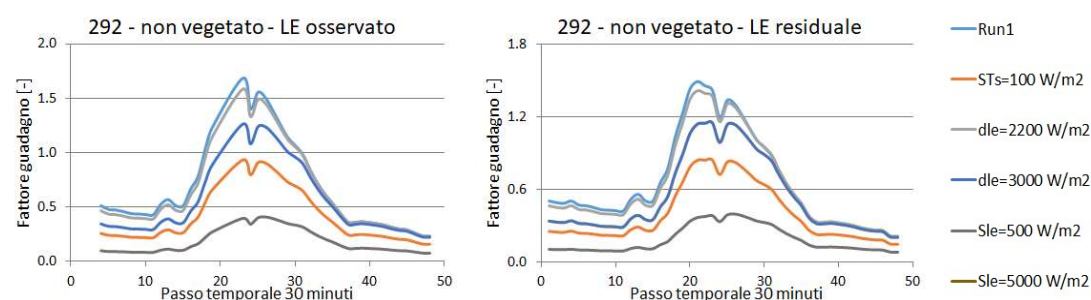


Figura 6.2-26 Andamento del fattore di guadagno del filtro di Kalman. Giorno 292

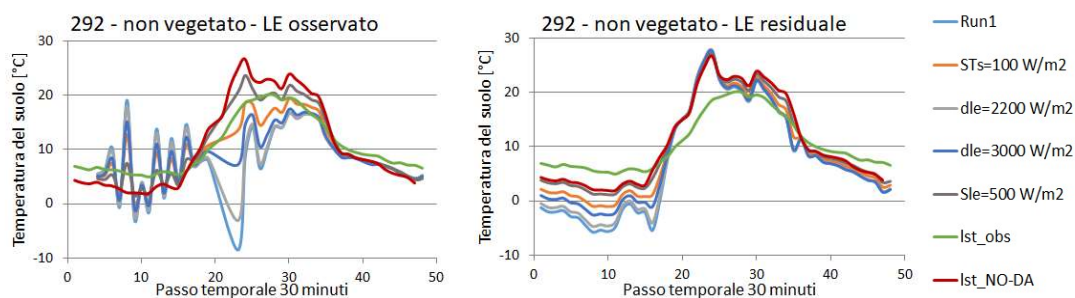


Figura 6.2-27 Confronto tra la temperatura del suolo osservata e quella prima e dopo il processo di assimilazione con il filtro di Kalman. Giorno 292.

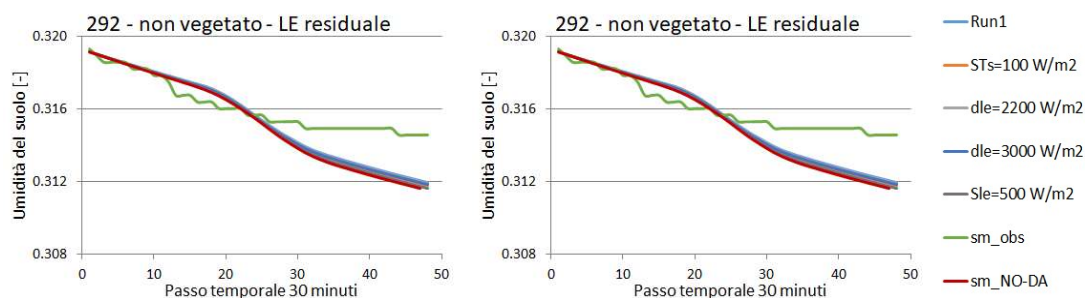


Figura 6.2-28 Confronto tra l'umidità del suolo osservata e quella prima e dopo il processo di assimilazione con il filtro di Kalman. Giorno 292.

Si fa notare come in questa ultima data ci siano due simulazioni in meno, quella rinominata $dle = 200 \text{ W/m}^2$ e quella rinominata $Sle = 5000 \text{ W/m}^2$ a causa del fatto che il codice di calcolo non riusciva ad arrivare a convergenza. Si è dunque preferito, essendo due simulazioni con valori estremi, non inserirle piuttosto che modificare il valore del parametro perdendo dunque il significato del confronto con le altre date.

Indici statistici

Si sono calcolati degli indici statistici (scarto quadratico medio, errore medio e deviazione standard) sul calore latente che sono rappresentativi delle varie simulazioni, al fine di valutare anche quantitativamente quale sia il set di parametri del filtro di Kalman che dà i risultati migliori.

Tabella 6.2-3 A sinistra le tabelle che riassumono i risultati ottenuti con il calore latente osservato a destra quelle dei risultati ottenuti con il calore latente ricavato dal modello residuale.

Tabella $Sle=2500 \text{ W/m}^2$ $dle=2000 \text{ W/m}^2$ $STs=50 \text{ W/m}^2$ $drad=100 \text{ W/m}^2$ $dta=5 \text{ }^\circ\text{C}$					Tabella $Sle=2500 \text{ W/m}^2$ $dle=2000 \text{ W/m}^2$ $STs=50 \text{ W/m}^2$ $drad=100 \text{ W/m}^2$ $dta=5 \text{ }^\circ\text{C}$					
Giorno	RMSE [W/m^2]	ME [W/m^2]	S [W/m^2]		Giorno	RMSE [W/m^2]	ME [W/m^2]	S [W/m^2]		
281	5	-	-1	-	5	-	26	-	-7	-
292	48	-	20	-	44	-	98	-	-13	-

Tabella per variazioni di STs del +100% (STs=100 W/m ²)					Tabella per variazioni di STs del +100% (STs=100 W/m ²)				
Giorno	RMSE [W/m ²]	ME [W/m ²]	S [W/m ²]		Giorno	RMSE [W/m ²]	ME [W/m ²]	S [W/m ²]	
281	15	218%	-9	620%	12	154%			
292	42	-12%	-2	-111%	43	-3%			

Tabella per variazioni di dle del +10% (dle=2200 W/m ²)					Tabella per variazioni di dle del +10% (dle=2200 W/m ²)				
Giorno	RMSE [W/m ²]	ME [W/m ²]	S [W/m ²]		Giorno	RMSE [W/m ²]	ME [W/m ²]	S [W/m ²]	
281	5	-4%	-1	23%	5	10%			
292	45	-6%	18	-8%	42	-4%			

Tabella per variazioni di dle del -90% (dle=200 W/m ²)					Tabella per variazioni di dle del -90% (dle=200 W/m ²)				
Giorno	RMSE [W/m ²]	ME [W/m ²]	S [W/m ²]		Giorno	RMSE [W/m ²]	ME [W/m ²]	S [W/m ²]	
281	31	570%	-17	1307%	26	456%			
292	-	-	-	-	-	-			

Tabella per variazioni di dle del +50% (dle=3000 W/m ²)					Tabella per variazioni di dle del +50% (dle=3000 W/m ²)				
Giorno	RMSE [W/m ²]	ME [W/m ²]	S [W/m ²]		Giorno	RMSE [W/m ²]	ME [W/m ²]	S [W/m ²]	
281	6	30%	-3	185%	5	6%			
292	37	-21%	11	-46%	36	-17%			

Tabella per variazioni di Sle del -80% (Sle=500 W/m ²)					Tabella per variazioni di Sle del -80% (Sle=500 W/m ²)				
Giorno	RMSE [W/m ²]	ME [W/m ²]	S [W/m ²]		Giorno	RMSE [W/m ²]	ME [W/m ²]	S [W/m ²]	
281	28	489%	-16	1204%	23	379%			
292	73	52%	-21	-206%	70	61%			

Tabella per variazioni di Sle del +100% (Sle=5000 W/m ²)					Tabella per variazioni di Sle del +100% (Sle=5000 W/m ²)				
Giorno	RMSE [W/m ²]	ME [W/m ²]	S [W/m ²]		Giorno	RMSE [W/m ²]	ME [W/m ²]	S [W/m ²]	
281	16	235%	7	-679%	14	198%			
292	-	-	-	-	-	-			

Analoghe considerazioni al caso vegetato si possono trarre per il caso non vegetato.

6.2.3 Riassunto analisi

Per quanto riguarda la scelta del set migliore di parametri bisogna innanzitutto fare alcune piccole premesse. Sicuramente il periodo, vegetato o non vegetato, ma anche il giorno scelto risulta essere influente sulla bontà del modello di rappresentare l'osservato. Difatti confrontando gli indici calcolati sui diversi giorni all'interno di una singola tabella vediamo che questi assumono valori nettamente differenti l'uno con l'altro.

Ciò che però è di maggior interesse per quanto riguarda la nostra analisi è che, trascurando qualche situazione particolare, possiamo affermare che il set di parametri $STs = 50 W/m^2$, $Sle = 2500 W/m^2$, $dle = 2000 W/m^2$, a prescindere dal fatto che rappresenti più o meno bene l'osservato nel singolo giorno, è il set con cui generalmente si riscontrano i risultati migliori in tutti i giorni.

6.3 Assimilazione con diverso passo temporale

In questo paragrafo andremo a prendere in considerazione una delle problematiche che più interessa il tema dell'assimilazione dei dati, la disponibilità delle osservazioni. Fino ad ora, come già riportato, il dato osservato era disponibile ogni 30 minuti, che è anche il passo temporale del modello idrologico. Si ipotizza ora di avere le osservazioni con passo di 1, 12, 24, 48 ore, mantenendo costante il passo temporale del modello idrologico.

Prima di procedere alla valutazione dei risultati è bene introdurre il concetto per cui il valore dei parametri del filtro di Kalman stimati e scelti come quelli che portavano ai risultati migliori per delle osservazioni con passo di 30 minuti potrebbero non essere gli stessi se il passo aumenta. Sarà dunque necessario fare dei test, come fatto in precedenza, al fine definire il set migliore di parametri per i diversi passi temporali.

6.3.1 Calibrazione parametri del filtro di Kalman

Così come al passo precedente, anche in questo caso è stato scelto un set di parametri di riferimento.

Il set scelto è quello che ha dato i migliori risultati con passo di 30 minuti, ovvero:

Tabella 6.3-1 Parametri della simulazione di riferimento

	<i>STs</i> [W/m^2]	<i>Sle</i> [W/m^2]	<i>dle</i> [W/m^2]	<i>drad</i> [W/m^2]	<i>dta</i> [$^{\circ}C$]
<i>Run1</i>	50	2500	2000	100	5

I risultati ottenuti con i diversi step temporali sono riportati di seguito.

Passo 1 ora

Si nota in modo evidente l'istante in cui viene fatta l'assimilazione e viene aggiornato lo stato del sistema rispetto all'istante in cui non c'è assimilazione. Questo è dovuto alla rapidità di evoluzione del calore latente il quale nell'istante di assimilazione subisce una forte variazione che però non si propaga in maniera evidente agli istanti successivi.

Si fa notare che i grafici di calore latente e temperatura del suolo sono riportati troncati dopo appena un giorno non perché la simulazione termina in quel momento ma per rendere più visibile l'andamento che subiscono le variabili. Questo è possibile anche in virtù del fatto che i giorni successivi presentano la medesima situazione del giorno riportato. Lo stesso discorso è stato fatto anche per i grafici dell'umidità del suolo e del fattore di guadagno rappresentando però un giorno in più per poter dare una miglior descrizione dell'andamento del processo di assimilazione.

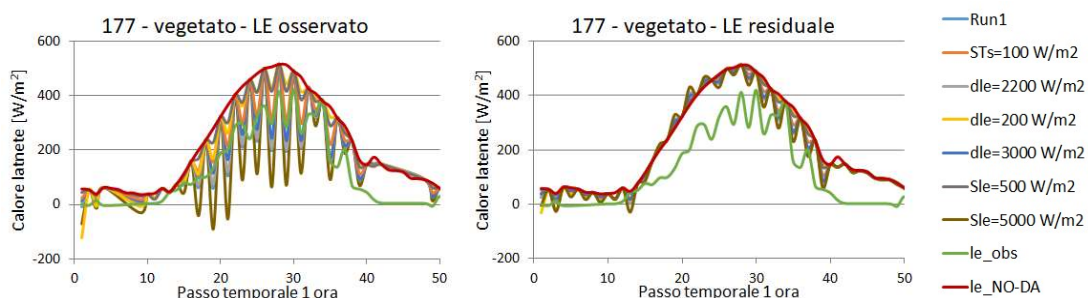


Figura 6.3-1 Confronto tra il calore latente osservato e quello prima e dopo il processo di assimilazione con il filtro di Kalman. Giorno 177.

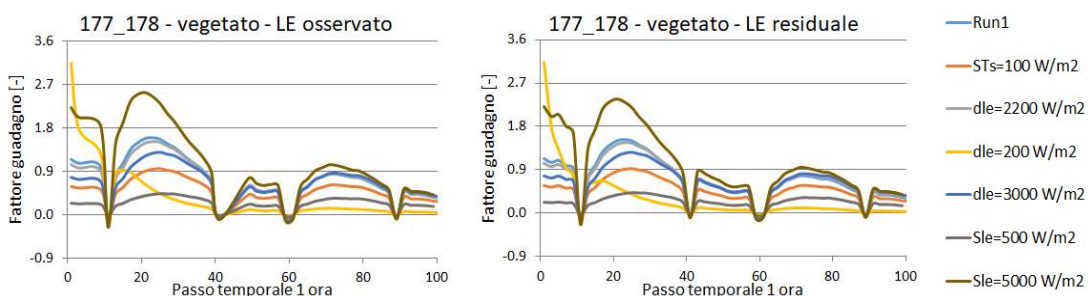


Figura 6.3-2 Andamento del fattore di guadagno del filtro di Kalman. Giorni 177-178.

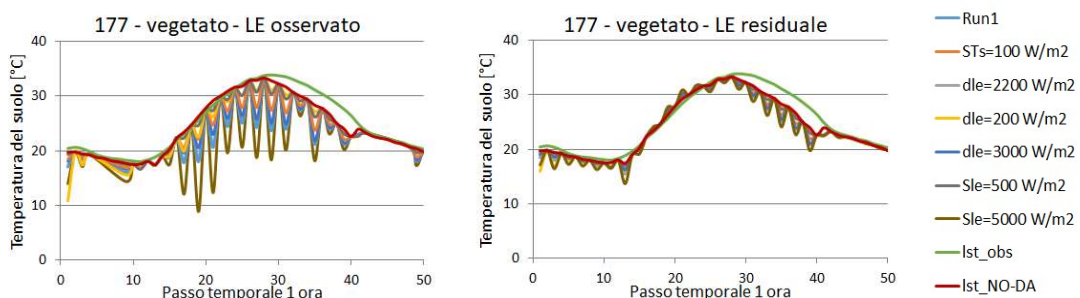


Figura 6.3-3 Confronto tra la temperatura del suolo osservata e quella prima e dopo il processo di assimilazione con il filtro di Kalman. Giorno 177.

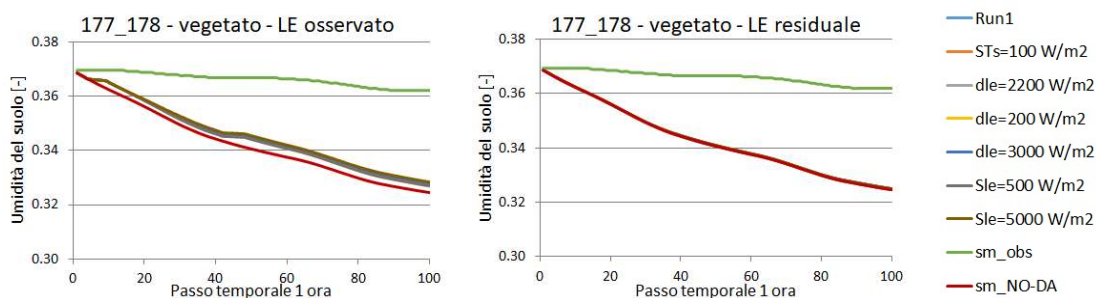


Figura 6.3-4 Confronto tra l'umidità del suolo osservata e quella prima e dopo il processo di assimilazione con il filtro di Kalman. Giorni 177-178.

6.3
Assimilazione con diverso passo temporale

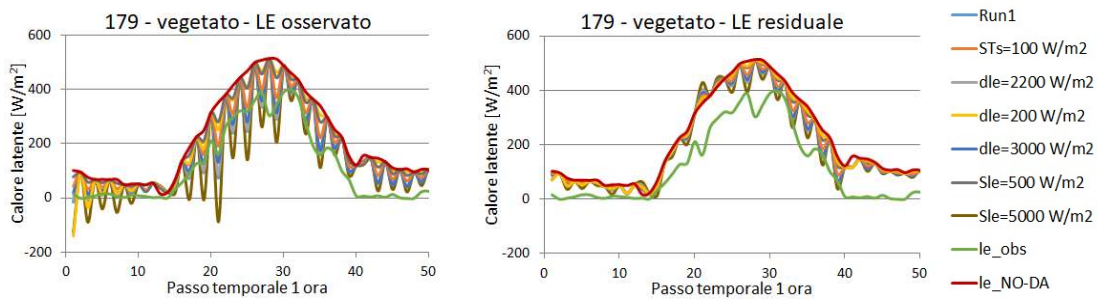


Figura 6.3-5 Confronto tra il calore latente osservato, e quello prima e dopo il processo di assimilazione con il filtro di Kalman. Giorno 179.

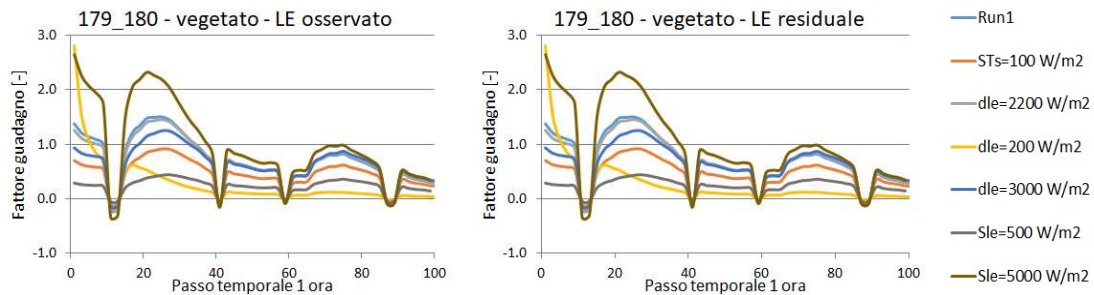


Figura 6.3-6 Andamento del fattore di guadagno del filtro di Kalman. Giorni 179-180.

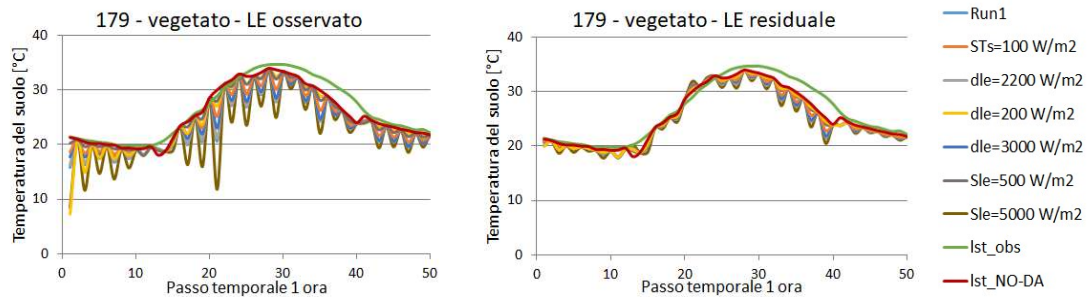


Figura 6.3-7 Confronto tra la temperatura del suolo osservata e quella prima e dopo il processo di assimilazione con il filtro di Kalman. Giorno 179.

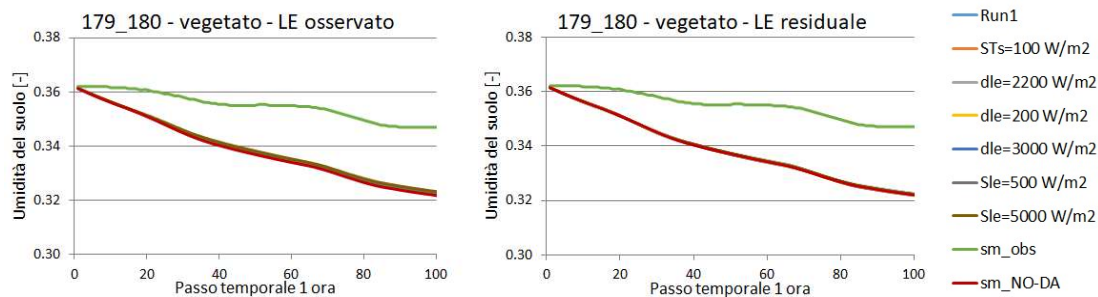


Figura 6.3-8 Confronto tra l'umidità del suolo osservata e quella prima e dopo il processo di assimilazione con il filtro di Kalman. Giorni 179-180.

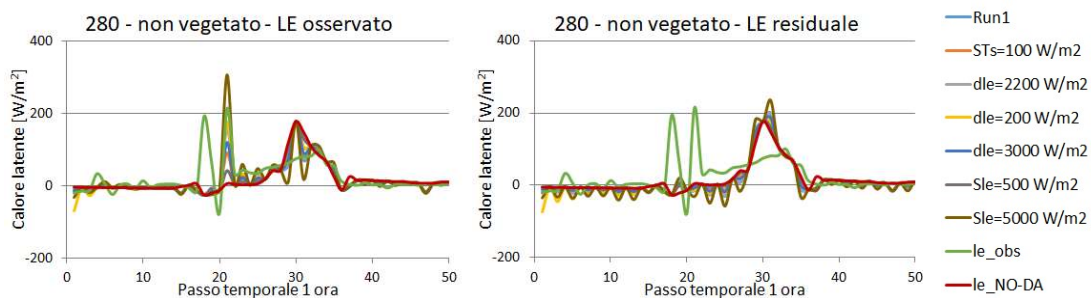


Figura 6.3-9 Confronto tra il calore latente osservato e quello prima e dopo il processo di assimilazione con il filtro di Kalman. Giorno 280.

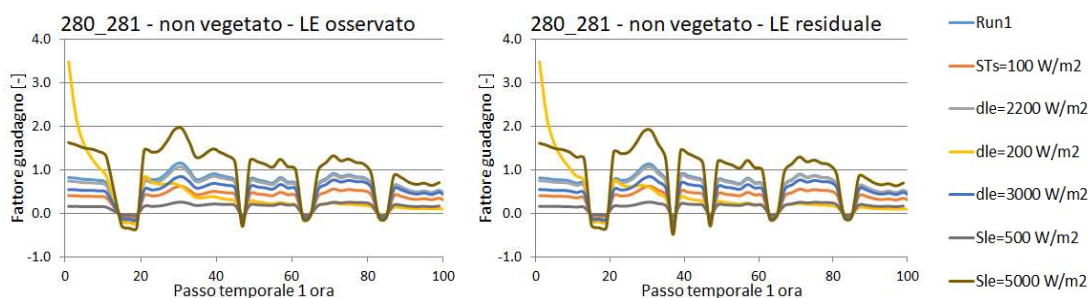


Figura 6.3-10 Andamento del fattore di guadagno del filtro di Kalman. Giorni 280-281.

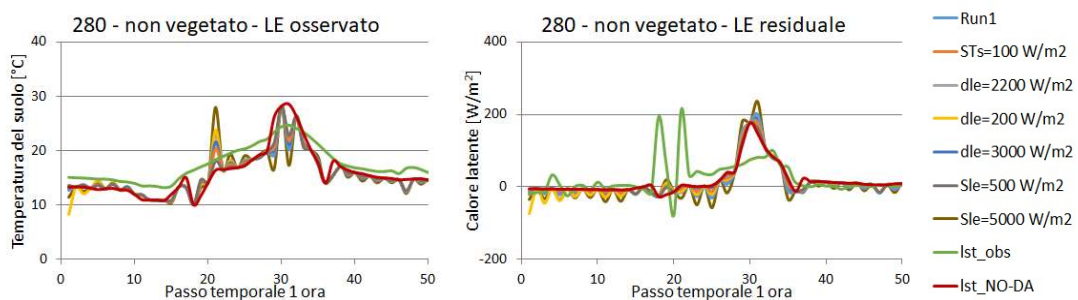


Figura 6.3-11 Confronto tra la temperatura del suolo osservata e quella prima e dopo il processo di assimilazione con il filtro di Kalman. Giorno 280.

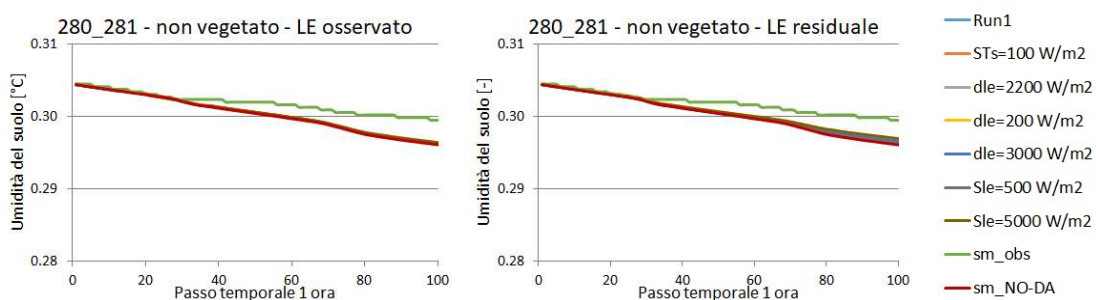


Figura 6.3-12 Confronto tra l'umidità del suolo osservata e quella prima e dopo il processo di assimilazione con il filtro di Kalman. Giorni 280-281.

6.3 Assimilazione con diverso passo temporale

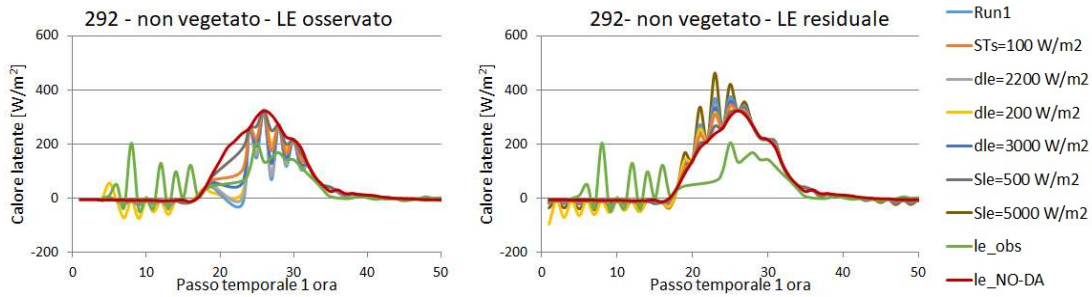


Figura 6.3-13 Confronto tra il calore latente osservato e quello prima e dopo il processo di assimilazione con il filtro di Kalman. Giorno 292.

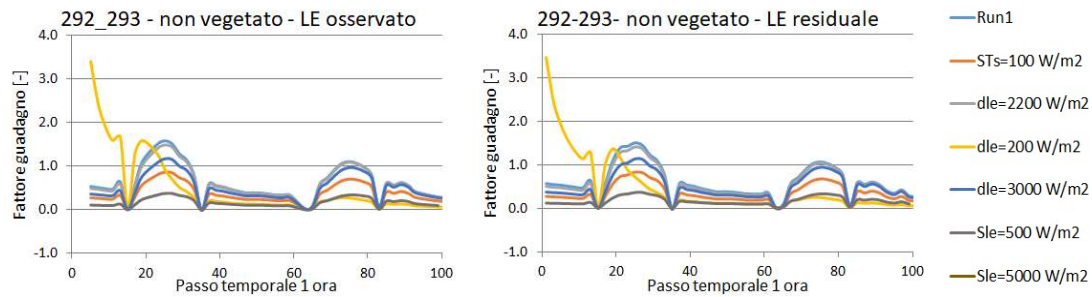


Figura 6.3-14 Andamento del fattore di guadagno del filtro di Kalman. Giorni 292-293.

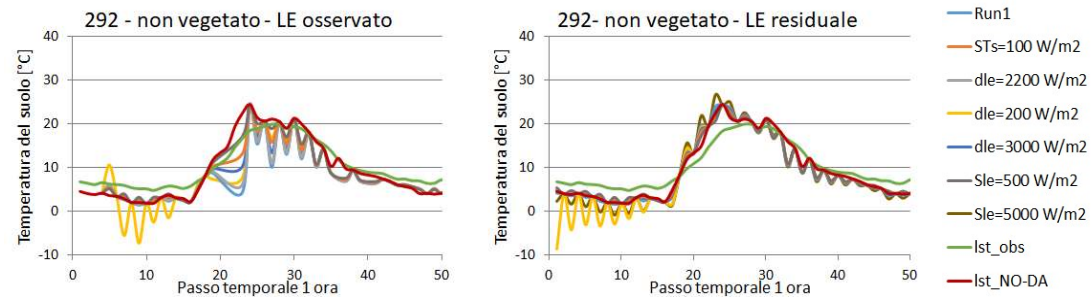


Figura 6.3-15 Confronto tra la temperatura del suolo osservata e quella prima e dopo il processo di assimilazione con il filtro di Kalman. Giorno 292.

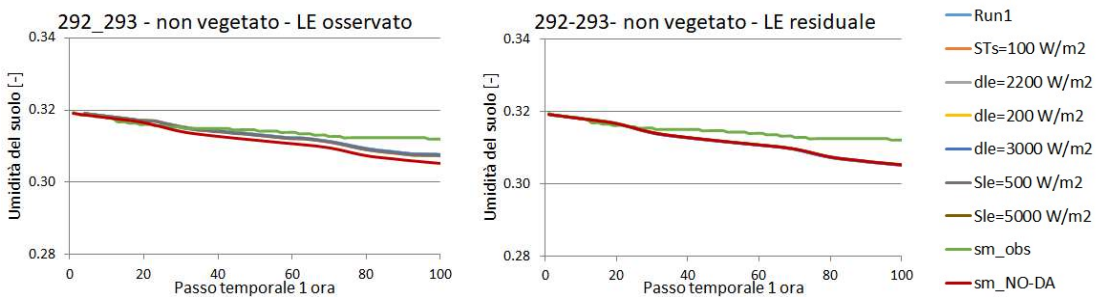


Figura 6.3-16 Confronto tra l'umidità del suolo osservata e quella prima e dopo il processo di assimilazione con il filtro di Kalman. Giorni 292-293.

Di seguito è riportato il calcolo di alcuni indici statistici (scarto quadratico medio, errore medio e deviazione standard) per poter analizzare il problema anche da un punto di vista quantitativo oltre che qualitativo commentando i grafici.

Tabella 6.3-2 A sinistra le tabelle che riassumono i risultati ottenuti con il calore latente osservato a destra quelle dei risultati ottenuti con il calore latente ricavato dal modello residuale.

Tabella Sle=2500 W/m ² dle=2000 W/m ² STs=50 W/m ² drad=100 W/m ² dta=5 °C					Tabella Sle=2500 W/m ² dle=2000 W/m ² STs=50 W/m ² drad=100 W/m ² dta=5 °C							
Giorno	RMSE [W/m ²]	ME [W/m ²]	S [W/m ²]		Giorno	RMSE [W/m ²]	ME [W/m ²]	S [W/m ²]				
177-182	82	-	-66	-	49	-	94	-	-81	-	48	-
179-180	70	-	-45	-	46	-	81	-	-57	-	46	-
280-285	46	-	-13	-	46	-	63	-	-14	-	60	-
292-297	49	-	-9	-	49	-	70	-	-22	-	64	-

Tabella per variazioni di STs del +100% (STs=100 W/m ²)					Tabella per variazioni di STs del +100% (STs=100 W/m ²)								
Giorno	RMSE [W/m ²]	ME [W/m ²]	S [W/m ²]		Giorno	RMSE [W/m ²]	ME [W/m ²]	S [W/m ²]					
177-182	83	1%	-72	9%	43	-12%	177-182	95	1%	-82	2%	48	0%
179-180	71	2%	-50	11%	43	-6%	179-180	81	1%	-58	3%	47	1%
280-285	49	5%	-15	-13%	45	-1%	280-285	61	-3%	-16	16%	61	3%
292-297	50	2%	-13	44%	47	-4%	292-297	66	-6%	-21	-4%	65	2%

Tabella per variazioni di dle del +10% (dle=2200 W/m ²)					Tabella per variazioni di dle del +10% (dle=2200 W/m ²)								
Giorno	RMSE [W/m ²]	ME [W/m ²]	S [W/m ²]		Giorno	RMSE [W/m ²]	ME [W/m ²]	S [W/m ²]					
177-182	82	-1%	-65	0%	50	2%	177-182	94	0%	-81	0%	47	-2%
179-180	69	-1%	-44	0%	48	4%	179-180	81	0%	-57	0%	46	-2%
280-285	46	0%	-13	1%	51	11%	280-285	63	0%	-14	1%	57	-4%
292-297	49	-1%	-9	3%	52	6%	292-297	70	0%	-22	0%	60	-6%

Tabella per variazioni di dle del -90% (dle=200 W/m ²)					Tabella per variazioni di dle del -90% (dle=200 W/m ²)								
Giorno	RMSE [W/m ²]	ME [W/m ²]	S [W/m ²]		Giorno	RMSE [W/m ²]	ME [W/m ²]	S [W/m ²]					
177-182	94	14%	-82	24%	45	-8%	177-182	97	3%	-85	4%	50	3%
179-180	80	15%	-57	27%	45	-2%	179-180	83	3%	-61	7%	47	1%
280-285	55	18%	-19	-42%	45	-2%	280-285	60	-5%	-17	27%	62	3%
292-297	54	11%	-15	67%	48	-2%	292-297	62	-11%	-19	-11%	65	2%

Tabella per variazioni di dle del +50% (dle=3000 W/m ²)					Tabella per variazioni di dle del +50% (dle=3000 W/m ²)								
Giorno	RMSE [W/m ²]	ME [W/m ²]	S [W/m ²]		Giorno	RMSE [W/m ²]	ME [W/m ²]	S [W/m ²]					
177-182	80	-3%	-65	0%	46	-6%	177-182	94	0%	-81	0%	49	1%
179-180	68	-2%	-45	1%	44	-3%	179-180	81	0%	-57	0%	47	1%
280-285	46	0%	-13	1%	45	-2%	280-285	63	-1%	-15	6%	61	2%
292-297	48	-1%	-11	18%	47	-4%	292-297	69	-2%	-21	-1%	65	2%

Tabella per variazioni di Sle del -80% (Sle=500 W/m ²)					Tabella per variazioni di Sle del -80% (Sle=500 W/m ²)								
Giorno	RMSE [W/m ²]	ME [W/m ²]	S [W/m ²]		Giorno	RMSE [W/m ²]	ME [W/m ²]	S [W/m ²]					
177-182	88	7%	-78	19%	41	-15%	177-182	96	2%	-84	4%	47	-3%
179-180	76	9%	-55	23%	41	-10%	179-180	83	2%	-60	5%	45	-3%
280-285	53	14%	-17	-30%	50	9%	280-285	60	-6%	-18	31%	57	-4%
292-297	54	10%	-16	82%	51	5%	292-297	62	-11%	-20	-7%	59	-8%

Tabella per variazioni di Sle del +100% (Sle=5000 W/m ²)					Tabella per variazioni di Sle del +100% (Sle=5000 W/m ²)								
Giorno	RMSE [W/m ²]	ME [W/m ²]	S [W/m ²]		Giorno	RMSE [W/m ²]	ME [W/m ²]	S [W/m ²]					
177-182	88	7%	-59	-10%	65	33%	177-182	94	0%	-80	-2%	51	5%
179-180	74	6%	-39	-13%	58	28%	179-180	81	0%	-55	-3%	49	6%
280-285	46	0%	-12	11%	45	-2%	280-285	67	5%	-11	-19%	66	10%
292-297	-	-	-	-	-	-	292-297	76	9%	-23	4%	73	14%

Passo 12 ore

Con passo 12 ore è stato necessario considerare quei periodi abbastanza lunghi per permettere un numero minimo di assimilazioni al fine di poter analizzare in maniera esaustiva il processo. Come in precedenza, i grafici di calore latente e temperatura superficiale sono stati riportati troncati degli ultimi giorni per poter permettere una visualizzazione migliore in virtù del fatto che la situazione rappresentata nei primi due giorni si ripete con analoghe dinamiche nei giorni successivi.

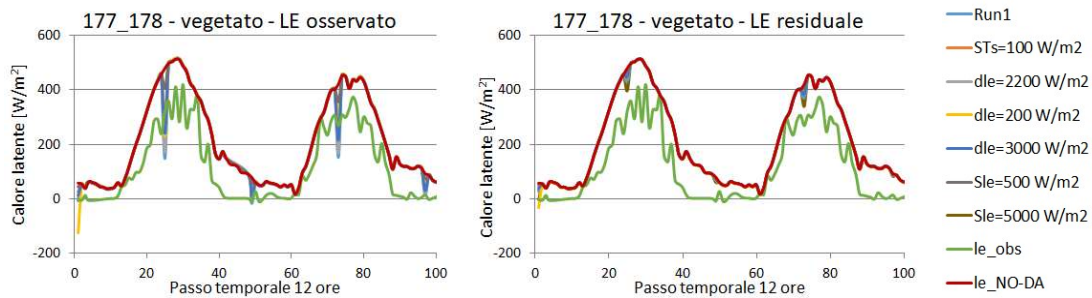


Figura 6.3-17 Confronto tra il calore latente osservato e quello prima e dopo il processo di assimilazione con il filtro di Kalman. Giorni 177-178.

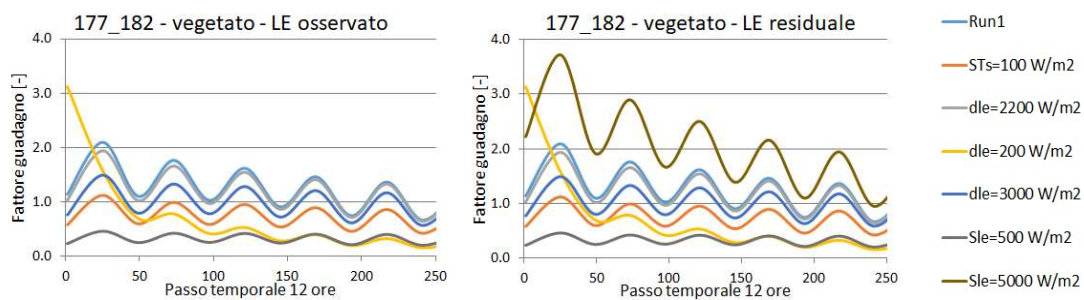


Figura 6.3-18 Andamento del fattore di guadagno del filtro di Kalman. Giorni 177-182.

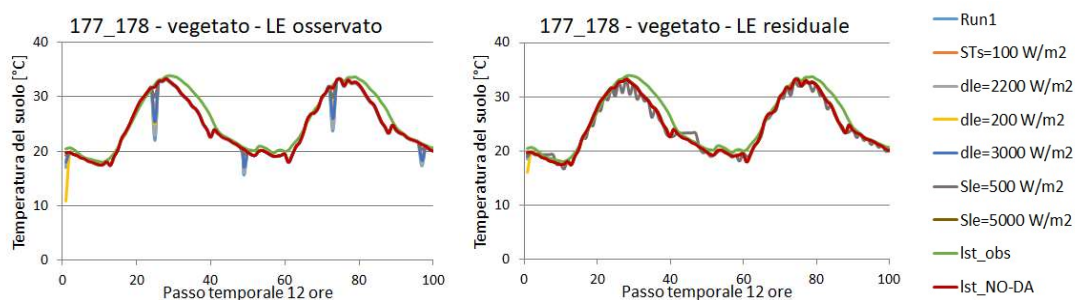


Figura 6.3-19 Confronto tra la temperatura del suolo osservata e quella prima e dopo il processo di assimilazione con il filtro di Kalman. Giorni 177-178.

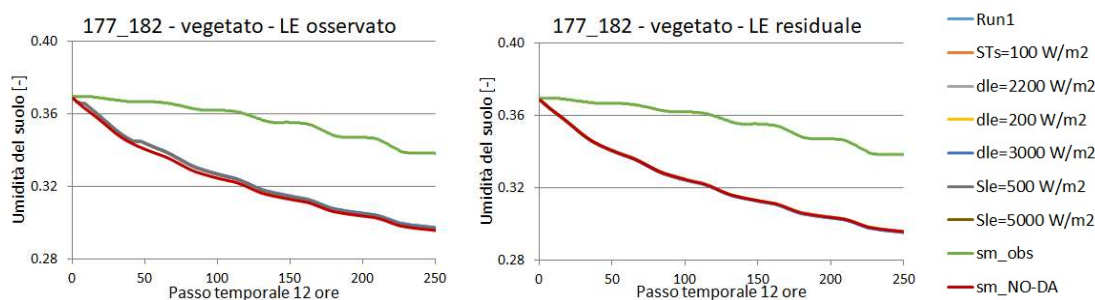


Figura 6.3-20 Confronto tra l'umidità del suolo osservata e quella prima e dopo il processo di assimilazione con il filtro di Kalman. Giorni 177-182.

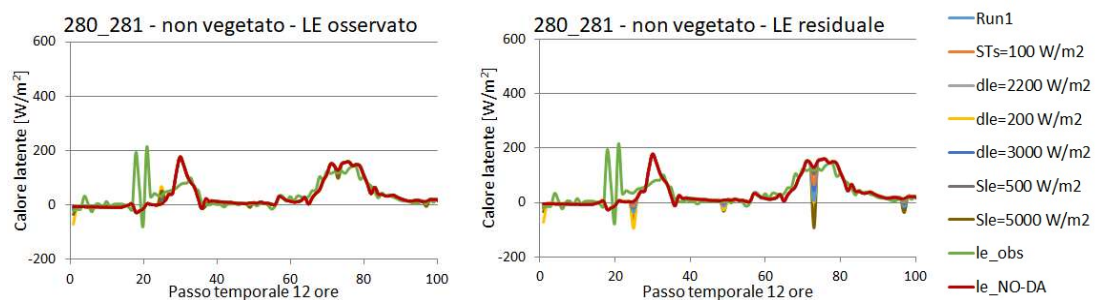


Figura 6.3-21 Confronto tra il calore latente osservato e quello prima e dopo il processo di assimilazione con il filtro di Kalman. Giorni 180-281.

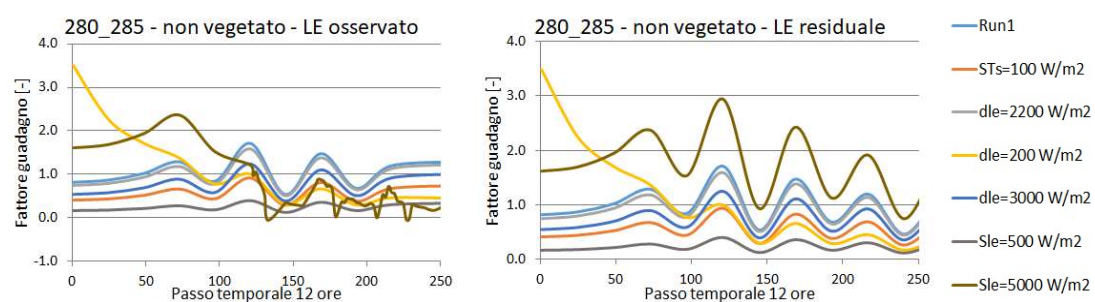


Figura 6.3-22 Andamento del fattore di guadagno del filtro di Kalman. Giorni 280-285.

6.3
Assimilazione con diverso passo temporale

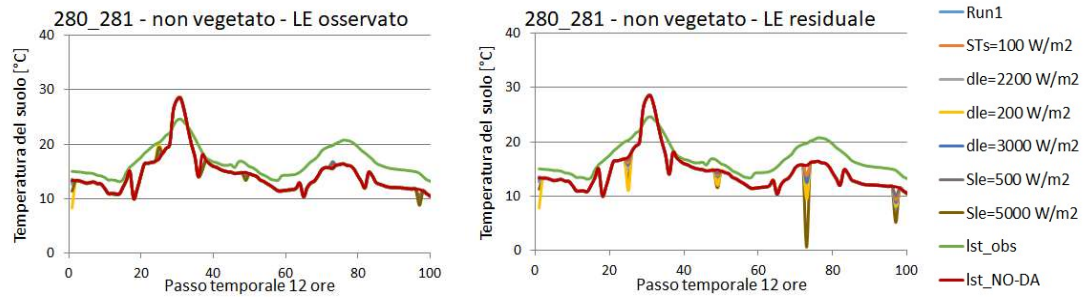


Figura 6.3-23 Confronto tra la temperatura del suolo osservata e quella prima e dopo il processo di assimilazione con il filtro di Kalman. Giorni 280-281.

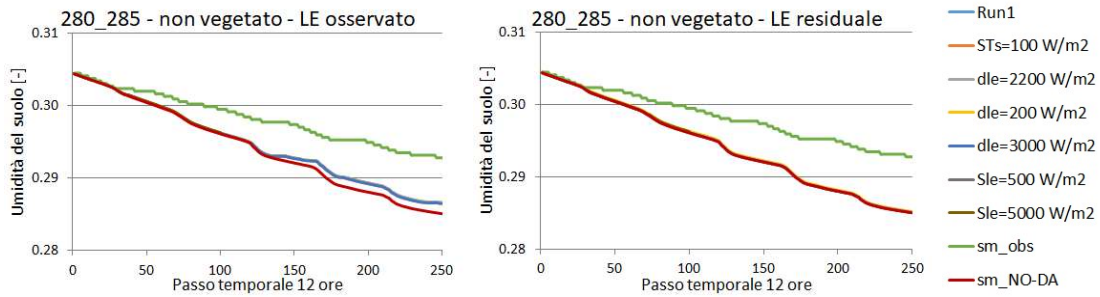


Figura 6.3-24 Confronto tra l'umidità del suolo osservata e quella prima e dopo il processo di assimilazione con il filtro di Kalman. Giorni 280-285.

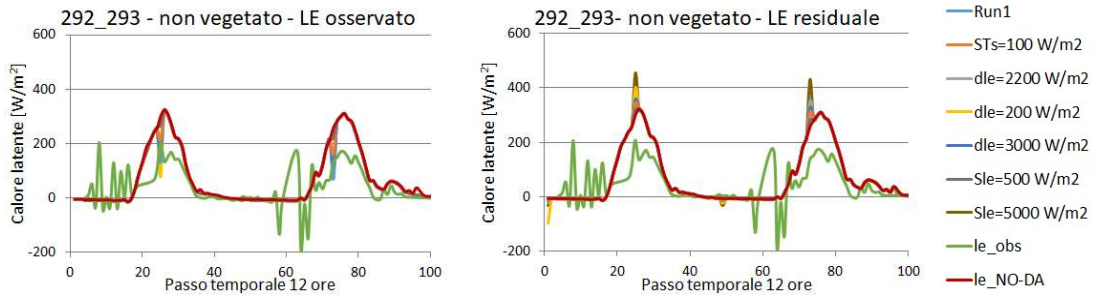


Figura 6.3-25 Confronto tra il calore latente osservato e quello prima e dopo il processo di assimilazione con il filtro di Kalman. Giorni 292-293.

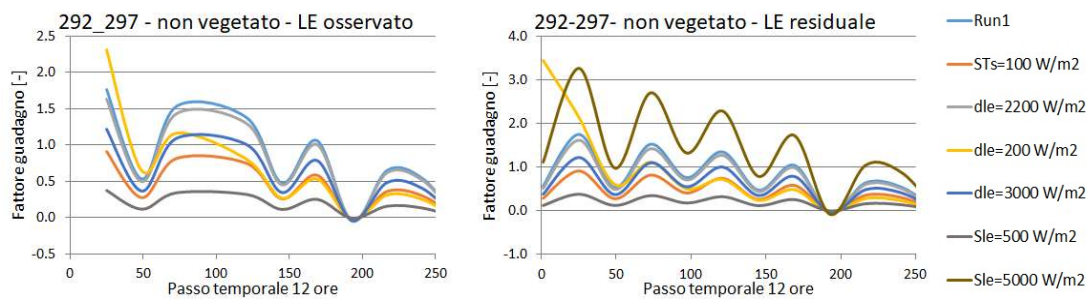


Figura 6.3-26 Andamento del fattore di guadagno del filtro di Kalman. Giorni 292-297.

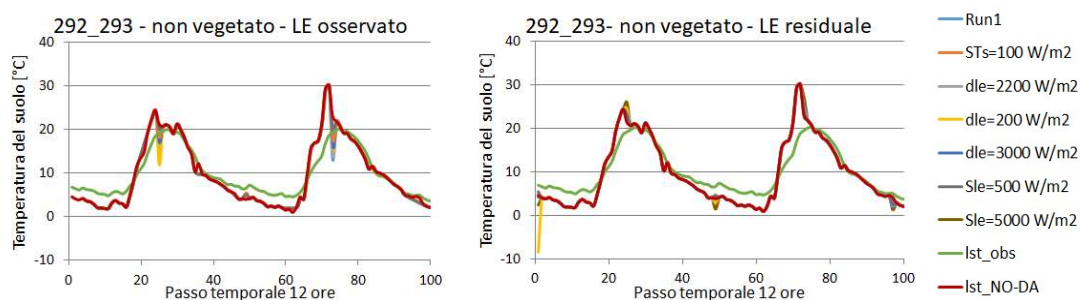


Figura 6.3-27 Confronto tra la temperatura del suolo osservata e quella prima e dopo il processo di assimilazione con il filtro di Kalman. Giorni 292-293.

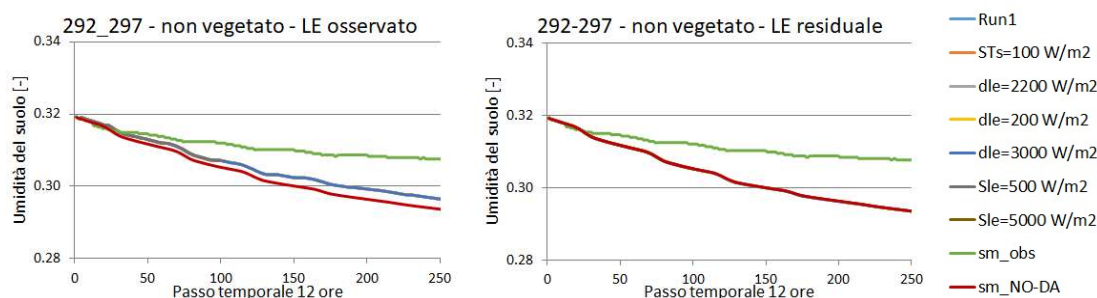


Figura 6.3-28 Confronto tra l'umidità del suolo osservata e quella prima e dopo il processo di assimilazione con il filtro di Kalman. Giorni 292-297.

Così come per il passo orario anche per il passo di 12 ore sono stati calcolati degli indici (scarto quadratico medio, errore medio e deviazione standard).

Tabella 6.3-3 A sinistra le tabelle che riassumono i risultati ottenuti con il calore latente osservato a destra quelle dei risultati ottenuti con il calore latente ricavato dal modello residuale.

Tabella Sle=2500 W/m ² dle=2000 W/m ² STs=50 W/m ² drad=100 W/m ² dta=5 °C					Tabella Sle=2500 W/m ² dle=2000 W/m ² STs=50 W/m ² drad=100 W/m ² dta=5 °C							
Giorno	RMSE [W/m ²]	ME [W/m ²]	S [W/m ²]		Giorno	RMSE [W/m ²]	ME [W/m ²]	S [W/m ²]				
177-182	98	-	-81	-	51	-	99	-	-86	-	48	-
280-285	56	-	-16	-	52	-	61	-	-19	-	56	-
292-297	49	-	-9	-	52	-	65	-	-20	-	59	-

Tabella per variazioni di STs del +100% (STs=100 W/m ²)					Tabella per variazioni di STs del +100% (STs=100 W/m ²)							
Giorno	RMSE [W/m ²]	ME [W/m ²]	S [W/m ²]		Giorno	RMSE [W/m ²]	ME [W/m ²]	S [W/m ²]				
177-182	97	-1%	-84	3%	52	2%	98	0%	-86	0%	48	1%
280-285	55	-2%	-18	10%	53	3%	59	-2%	-20	2%	57	2%
292-297	56	16%	-17	92%	54	3%	62	-5%	-20	-4%	61	3%

Tabella per variazioni di dle del +10% (dle=2200 W/m ²)					Tabella per variazioni di dle del +10% (dle=2200 W/m ²)							
Giorno	RMSE [W/m ²]	ME [W/m ²]	S [W/m ²]		Giorno	RMSE [W/m ²]	ME [W/m ²]	S [W/m ²]				
177-182	97	0%	-81	0%	50	-3%	99	0%	-86	0%	47	-1%
280-285	56	-1%	-16	1%	52	1%	60	0%	-19	0%	57	1%
292-297	57	16%	-16	79%	54	3%	64	-1%	-20	-1%	59	0%

Tabella per variazioni di dle del -90% (dle=200 W/m ²)					
Giorno	RMSE [W/m ²]		ME [W/m ²]		S [W/m ²]
177-182	98	0	-84	4	52 3
280-285	55	-1	-18	11	53 1
292-297	57	17	-16	83	55 4

Tabella per variazioni di dle del -90% (dle=200 W/m ²)					
Giorno	RMSE [W/m ²]		ME [W/m ²]		S [W/m ²]
177-182	98	-1%	-86	0%	48 1%
280-285	60	-1%	-19	-4%	58 2%
292-297	63	-4%	-20	-2%	60 2%

Tabella per variazioni di dle del +50% (dle=3000 W/m ²)					
Giorno	RMSE [W/m ²]		ME [W/m ²]		S [W/m ²]
177-182	97	-1%	-82	2%	51 0%
280-285	55	-2%	-17	6%	52 1%
292-297	56	15%	-17	86%	54 3%

Tabella per variazioni di dle del +50% (dle=3000 W/m ²)					
Giorno	RMSE [W/m ²]		ME [W/m ²]		S [W/m ²]
177-182	99	0%	-86	0%	48 1%
280-285	60	-1%	-19	1%	57 1%
292-297	63	-3%	-20	-2%	60 1%

Tabella per variazioni di Sle del -80% (Sle=500 W/m ²)					
Giorno	RMSE [W/m ²]		ME [W/m ²]		S [W/m ²]
177-182	98	0%	-86	5%	47 -8%
280-285	56	1%	-19	18%	53 2%
292-297	57	18%	-18	103%	55 4%

Tabella per variazioni di Sle del -80% (Sle=500 W/m ²)					
Giorno	RMSE [W/m ²]		ME [W/m ²]		S [W/m ²]
177-182	98	0%	-86	0%	47 0%
280-285	59	-3%	-20	3%	56 -1%
292-297	60	-8%	-19	-6%	57 -4%

Tabella per variazioni di Sle del +100% (Sle=5000 W/m ²)					
Giorno	RMSE [W/m ²]		ME [W/m ²]		S [W/m ²]
177-182	103	6%	-78	-4%	69 34%
280-285	48	-14%	-12	-23%	47 -10%
292-297	-	-	-	-	- -

Tabella per variazioni di Sle del +100% (Sle=5000 W/m ²)					
Giorno	RMSE [W/m ²]		ME [W/m ²]		S [W/m ²]
177-182	99	0%	-86	0%	49 3%
280-285	63	5%	-18	-4%	61 8%
292-297	71	10%	-22	6%	68 15%

6.3.2 Riassunto analisi

L'obiettivo dei test in questo paragrafo è stato quello di valutare se i valori dei parametri del filtro di Kalman ottimi per la simulazione con passo temporale di 30 minuti subiscono variazioni a fronte dell'utilizzo di osservazioni con un differente passo temporale di assimilazione. Si è deciso di fermare i test al passo di 12 ore perché come si può notare dalle tabelle Tabella 6.3-3 in cui sono stati calcolati gli indici statistici, il processo di assimilazione risulta essere inefficace. Questo perché il calore latente è una variabile con uno sviluppo abbastanza rapido, quindi subisce l'aggiornamento nell'istante in cui si ha l'osservazione ma questa non riesce a influire sufficientemente sul calcolo della variabile allo step successivo. A questo si aggiunge il fatto gli aggiornamenti fatti sono talmente pochi rispetto ai valori calcolati delle variabili che si perde l'influenza della singola correzione.

Si può concludere che i parametri del filtro di Kalman ottimi per la simulazione con passo 30 minuti si sono rivelati quelli che danno i migliori risultati anche con passo orario. Non è sempre così con passo di 12 ore come si può vedere nei giorni 292-297 dove utilizzando il modello residuale il set scelto non è quello che dà la rappresentazione migliore. Vanno però fatte due considerazioni, la prima è che effettivamente il valore dell'indice varia al massimo di qualche punto percentuale e, in secondo luogo,

osservando i grafici si vede che in questo caso il processo di assimilazione non riesce a dare buoni risultati probabilmente a causa degli errori del modello residuale.

6.3.3 Confronto risultati dell'assimilazione con diversi passi temporali di assimilazione

Si suddivide come sempre lo studio andando a considerare inizialmente una situazione con suolo vegetato e successivamente una con suolo nudo, sempre utilizzando le due metodologie proposte nel paragrafo introduttivo.

Periodo di suolo vegetato

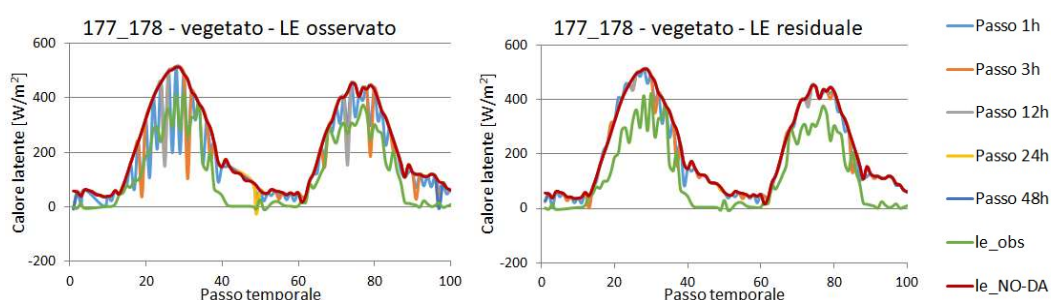


Figura 6.3-29 Confronto tra il calore latente ottenuto dai processi di assimilazione della temperatura correggendo il calore latente a diverso passo temporale, il calore latente osservato e il calore latente prima del processo di assimilazione. Giorni 177-178.

Come già evidenziato in altre situazioni l'utilizzo diretto del calore latente osservato permette delle correzioni migliori evitando di perdere le informazioni sui picchi, i quali risultano spesso smussati utilizzando il calore latente ricavato dal modello residuale. Dal confronto dei diversi passi temporali invece si nota come per i passi piccoli la correzione, essendo fatta più frequentemente, risulta avere una maggior rilevanza, mentre aumentando il passo risulta sempre più irrilevante nel complesso e il calore latente valutato dopo l'assimilazione risulta sempre più simile a quello calcolato con il modello idrologico senza assimilazione dei dati (Figura 6.1-29).

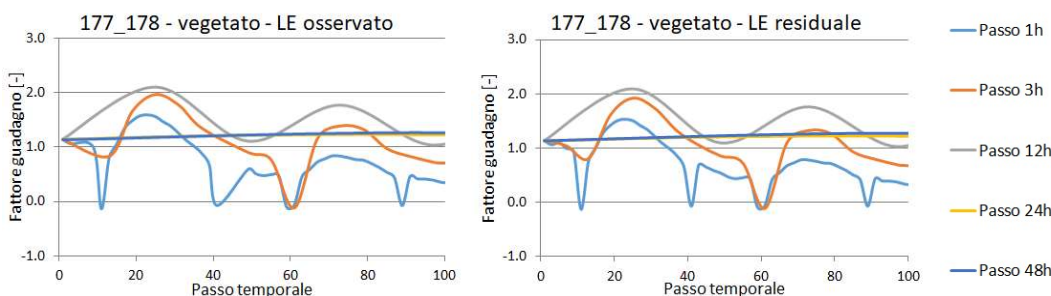


Figura 6.3-30 Confronto del fattore guadagno ottenuto da processi di assimilazione della temperatura correggendo il calore latente a diverso passo temporale. Giorni 177-178.

6.3 Assimilazione con diverso passo temporale

Si mostra in Figura 6.1-30 ancora una volta come utilizzando diversi passi temporali di assimilazioni le correzioni risultano essere differenti.

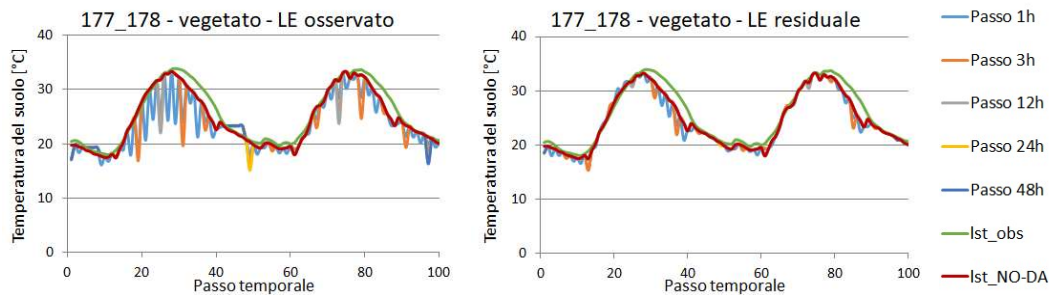


Figura 6.3-31 Confronto tra la temperatura del suolo ottenuta dai processi di assimilazione della temperatura correggendo il calore latente a diverso passo temporale, la temperatura del suolo osservata e quella prima del processo di assimilazione. Giorni 177-178.

Analoghe considerazioni fatte per il calore latente sull'influenza dell'assimilazione al variare della metodologia e del passo temporale, possono essere fatte per la temperatura del suolo (Figura 6.3-31).

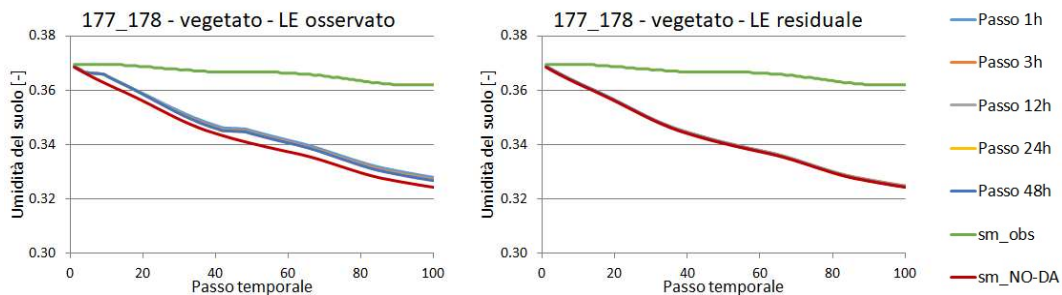


Figura 6.3-32 Confronto dell'umidità del suolo ottenuta da processi di assimilazione della temperatura correggendo il calore latente a diverso passo temporale, l'umidità del suolo osservata e quella prima del processo di assimilazione. Giorni 177-178.

L'umidità del suolo (Figura 6.3-32) risulta come sempre essere debolmente influenzata dall'assimilazione infatti gli spaghetti seguono tutti lo stesso andamento. La differenza fra i due grafici è data dalla diversa metodologia: utilizzando il calore latente come già detto la correzione è meno accentuata e ciò si riflette anche sulla variazione di umidità del suolo.

Periodo di suolo non vegetato

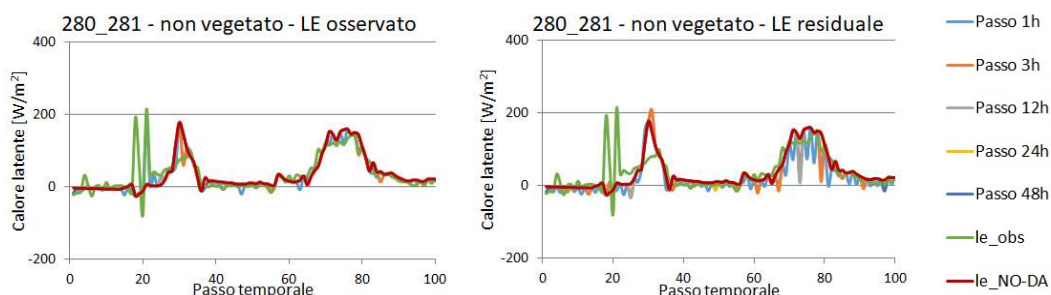


Figura 6.3-33 Confronto tra il calore latente ottenuto dai processi di assimilazione della temperatura correggendo il calore latente a diverso passo temporale, il calore latente osservato e il calore latente prima del processo di assimilazione. Giorni 280-281.

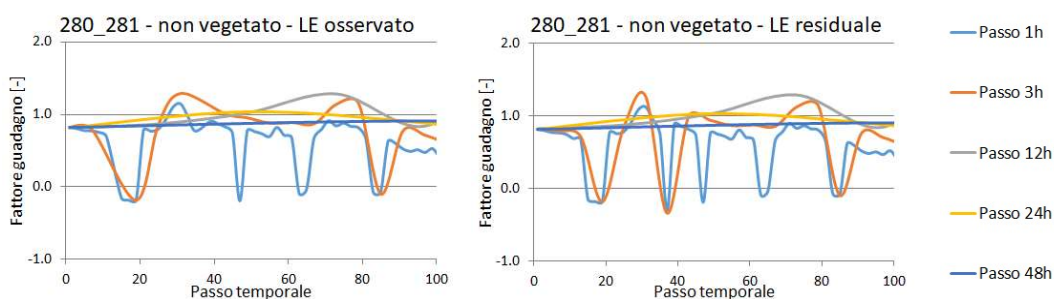


Figura 6.3-34 Confronto del fattore guadagno ottenuto da processi di assimilazione della temperatura correggendo il calore latente a diverso passo temporale. Giorni 280-281.

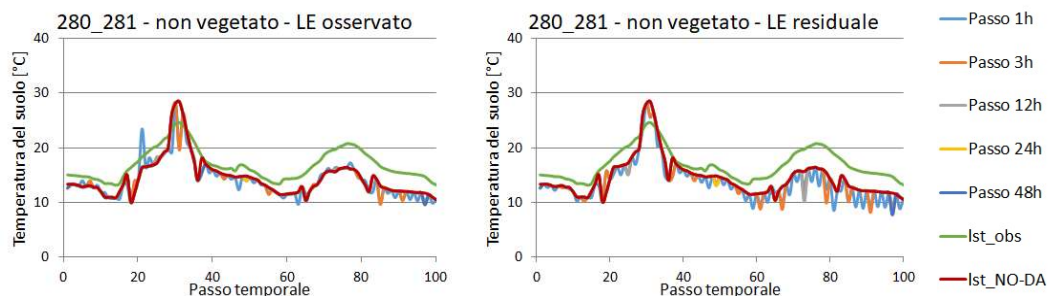


Figura 6.3-35 Confronto tra la temperatura del suolo ottenuta dai processi di assimilazione della temperatura correggendo il calore latente a diverso passo temporale, la temperatura del suolo osservata e quella prima del processo di assimilazione. Giorni 280-281.

6.3 Assimilazione con diverso passo temporale

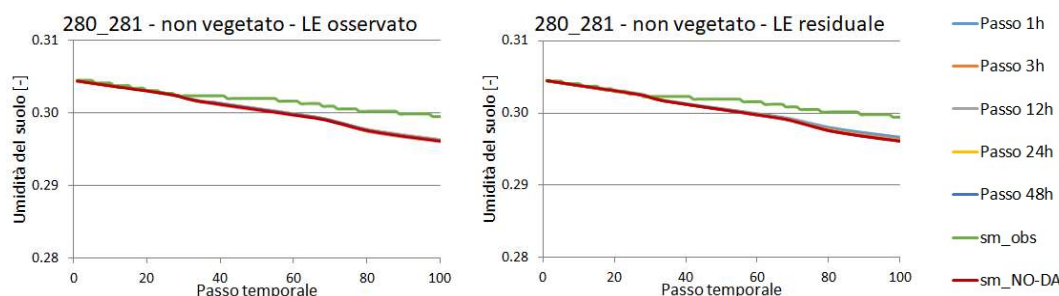


Figura 6.3-36 Confronto dell'umidità del suolo ottenuta da processi di assimilazione della temperatura correggendo il calore latente a diverso passo temporale, l'umidità del suolo osservata e quella prima del processo di assimilazione. Giorni 280-281.

Analoghe considerazioni al caso vegetato si possono trarre per il caso non vegetato.

Indici statistici

Anche per questi test sono stati calcolati gli indici statistici scarto quadratico medio, errore medio e deviazione standard.

Dal calcolo degli indici emerge come aumentando il passo temporale generalmente peggiori la rappresentazione del calore latente, così come peggiora passando dall'utilizzo diretto dell'osservazione del calore latente ad un valore di calcolato con un modello residuale confermando quanto intuito dai grafici.

Tabella 6.3-4 A sinistra le tabelle che riassumono i risultati ottenuti con il calore latente osservato a destra quelle dei risultati ottenuti con il calore latente ricavato dal modello residuale.

Tabella passo 30 minuti					Tabella passo 30 minuti					
Giorno	RMSE [W/m ²]	ME [W/m ²]	S [W/m ²]		Giorno	RMSE [W/m ²]	ME [W/m ²]	S [W/m ²]		
177-182	73	-	-60	-	42	-	94	-	-80	-
280-285	37	-	-11	-	36	-	64	-	-13	-
Tabella passo 1 ora					Tabella passo 1 ora					
Giorno	RMSE [W/m ²]	ME [W/m ²]	S [W/m ²]		Giorno	RMSE [W/m ²]	ME [W/m ²]	S [W/m ²]		
177-182	82	12%	-66	9%	54	30%	94	0%	-81	1%
280-285	42	13%	-13	21%	50	39%	63	-1%	-14	7%
Tabella passo 3 ore					Tabella passo 3 ore					
Giorno	RMSE [W/m ²]	ME [W/m ²]	S [W/m ²]		Giorno	RMSE [W/m ²]	ME [W/m ²]	S [W/m ²]		
177-182	93	27%	-75	25%	57	36%	97	3%	-84	4%
280-285	54	45%	-15	40%	54	49%	61	-4%	-17	36%
Tabella passo 12 ore					Tabella passo 12 ore					
Giorno	RMSE [W/m ²]	ME [W/m ²]	S [W/m ²]		Giorno	RMSE [W/m ²]	ME [W/m ²]	S [W/m ²]		
177-182	98	33%	-81	35%	52	24%	99	4%	-86	7%
280-285	56	50%	-16	48%	55	53%	61	-5%	-19	50%

Tabella passo 24 ore						
Giorno	RMSE [W/m ²]		ME [W/m ²]		S [W/m ²]	
177-182	99	34%	-85	42%	49	16%
280-285	59	56%	-20	81%	55	54%

Tabella passo 24 ore						
Giorno	RMSE [W/m ²]		ME [W/m ²]		S [W/m ²]	
177-182	98	4%	-86	7%	48	-5%
280-285	59	-8%	-20	52%	55	-12%

Tabella passo 48 ore						
Giorno	RMSE [W/m ²]		ME [W/m ²]		S [W/m ²]	
177-182	99	35%	-86	43%	49	16%
280-285	59	56%	-20	81%	55	54%

Tabella passo 48 ore						
Giorno	RMSE [W/m ²]		ME [W/m ²]		S [W/m ²]	
177-182	98	4%	-86	7%	48	-5%
280-285	59	-8%	-20	53%	55	-12%

6.3.4 Riassunto analisi

Dai test fatti emerge che aumentando il passo di assimilazione la stima del calore latente peggiora, in linea con le aspettative.

Inoltre si ha conferma di quanto già accennato nel paragrafo precedente cioè che, aumentando eccessivamente il passo temporale, l'assimilazione risulta essere un procedimento non efficace. Questo perché come già detto il calore latente è una variabile con processo evolutivo rapido e quindi l'informazione del passo precedente non influisce molto quella al passo successivo. Analizzando attraverso la Tabella 6.3-4 le elaborazioni con passo di 12 ore e superiore, si può confermare quanto detto in precedenza. Si dovrà dunque cercare di avere osservazioni almeno con passo orario se si vuole garantire una certa efficacia del sistema di aggiornamento.

CAPITOLO 7.

ASSIMILAZIONE DELLA LST ATTRAVERSO IL FILTRO DI KALMAN CORREGGENDO IL CALORE DAL SUOLO

Analogamente a quanto detto nel precedente capitolo, anche qui l'idea è quella di assimilare la temperatura del suolo con la differenza che ora la variabile di stato del sistema che si andrà a variare non sarà più il calore latente ma il flusso di calore dal suolo. Ciò è possibile in quanto la temperatura del suolo e il flusso di calore dal suolo risultano essere collegate tra loro nel bilancio di energia.

7.1 Calibrazione dei parametri del filtro di Kalman

Obiettivo di questo paragrafo è quello di andare a calibrare i parametri del modello del filtro di Kalman sempre attraverso l'assimilazione il calore latente. I parametri selezionati sono l'errore sulla misura del calore dal terreno ST_s , l'errore sul calcolo del calore dal terreno Sg e il parametro di perturbazione dg . La calibrazione verrà fatta anche in questo caso per tentativi, si è dunque scelto un set di parametri che è stato imposto alla simulazione di riferimento e a turno se ne andrà a variare uno di questi per sceglierne il valore che porta il miglior risultato.

I parametri scelti per la simulazione di riferimento *Run1* sono:

Tabella 7.1-1 Parametri della simulazione di riferimento

	$STs [W/m^2]$	$Sg [W/m^2]$	$dg [W/m^2]$	$drad [W/m^2]$	$dta [^{\circ}C]$
<i>Run1</i>	<i>50</i>	<i>2500</i>	<i>2000</i>	<i>100</i>	<i>5</i>

Di seguito sono riportati dei grafici rappresentativi di alcuni test fatti nel processo di calibrazione sempre facendo riferimento alle due metodologie, calore dal terreno osservato oppure ottenuto con modello residuale.

In Figura 7.1-1, Figura 7.1-2, Figura 7.1-3, Figura 7.1-4, Figura 7.1-5 si mostrano i risultati ottenuti utilizzando il calore dal suolo osservato.

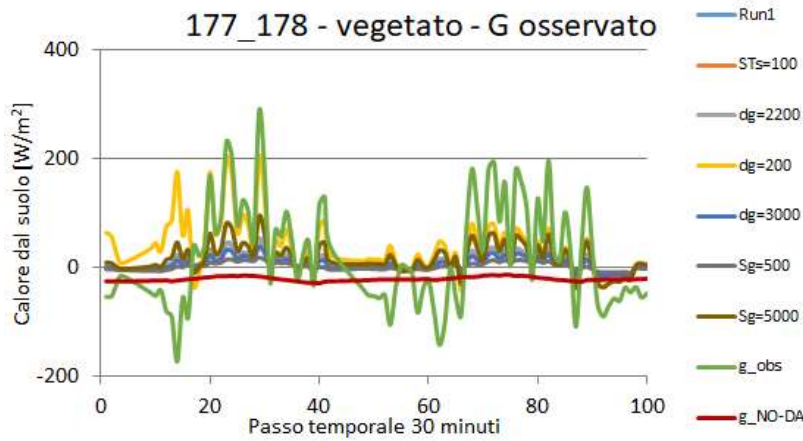


Figura 7.1-1 Confronto tra il calore dal suolo osservato e quello prima e dopo il processo di assimilazione con il filtro di Kalman. Giorni 177-178.

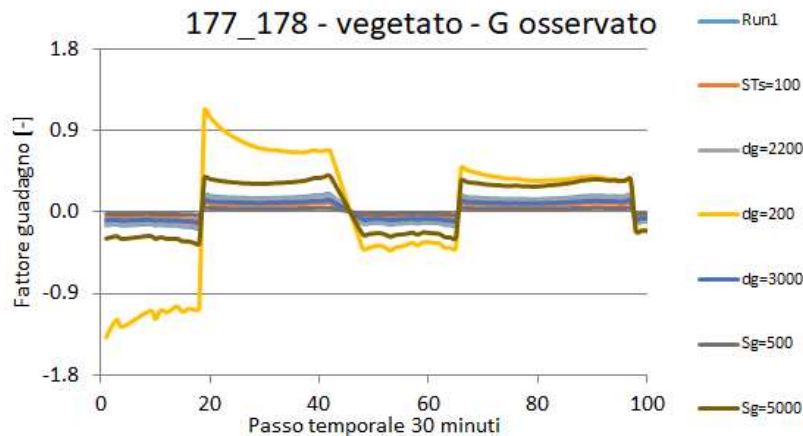


Figura 7.1-2 Andamento del fattore di guadagno del filtro di Kalman. Giorni 177-178.

Come mostrato in Figura 6.2-1 e Figura 6.2-2, a seconda del valore assegnato ai parametri considerati si ottengono risultati diversi dal processo di assimilazione. Le considerazioni più evidenti sono legate all'utilità del filtro di Kalman e all'importanza dell'assimilazione dei dati in termini di durata, infatti

anche qui il fattore di guadagno assume valori più bassi con l'aumentare dello step temporale di assimilazione.

In Figura 6.2-3 si mostrano i risultati per la temperatura del suolo, la quale viene calcolata a valle del processo di assimilazione quindi cercando quella temperatura che determina la chiusura del bilancio imponendo il flusso G al valore ricavato dall'aggiornamento nel passo temporale.

Si nota che con questo metodo di ricerca del valore ottimo della temperatura questa risulta essere poco influenzata dal processo di aggiornamento del flusso di calore dal suolo.

Comportamento analogo si ha anche per il calore latente (Figura 7.1-4) il quale viene calcolato all'interno del bilancio energetico con la temperatura che ne determina la chiusura.

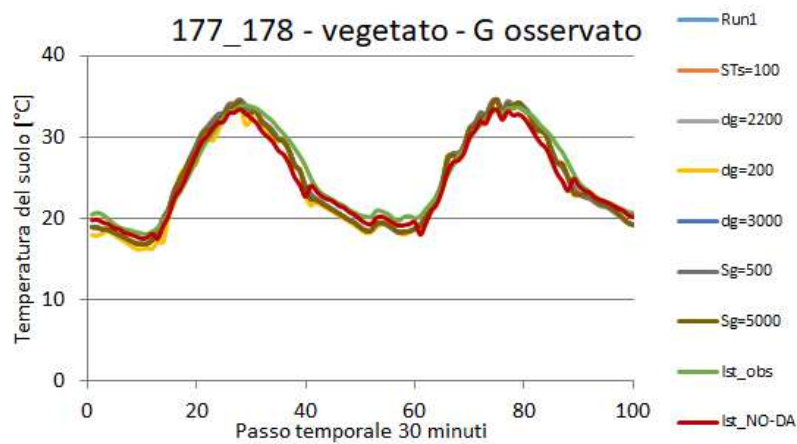


Figura 7.1-3 Confronto tra la temperatura del suolo osservata e quella prima e dopo il processo di assimilazione con il filtro di Kalman. Giorni 177-178.

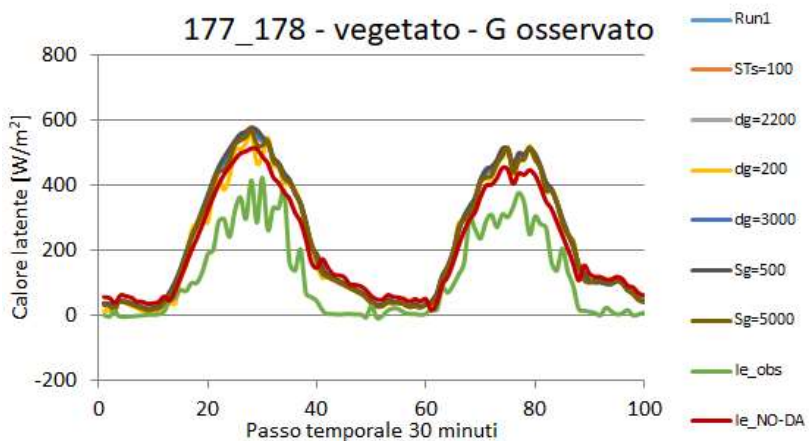


Figura 7.1-4 Confronto tra il calore latente osservato e quello prima e dopo il processo di assimilazione con il filtro di Kalman. Giorni 177-178.

Infine viene calcolata l'umidità del suolo (Figura 6.2-4) la quale non mostra variazioni significative per effetto dell'assimilazione dei dati, stabilizzandosi su valori simili a quello calcolato senza il processo di assimilazione.

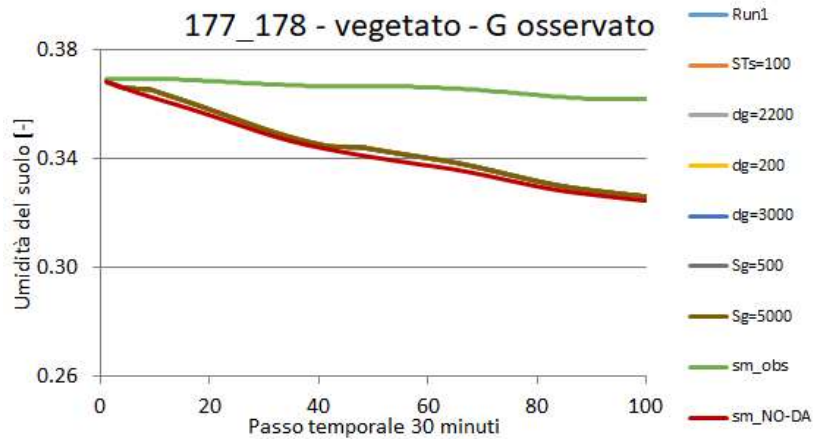


Figura 7.1-5 Confronto tra l'umidità del suolo osservata e quella prima e dopo il processo di assimilazione con il filtro di Kalman. Giorni 177-178.

In Figura 7.1-6, Figura 7.1-7, Figura 7.1-8, Figura 7.1-9 e Figura 7.1-10 si mostrano invece i risultati ottenuti utilizzando il calore dal suolo ottenuto dal modello residuale.

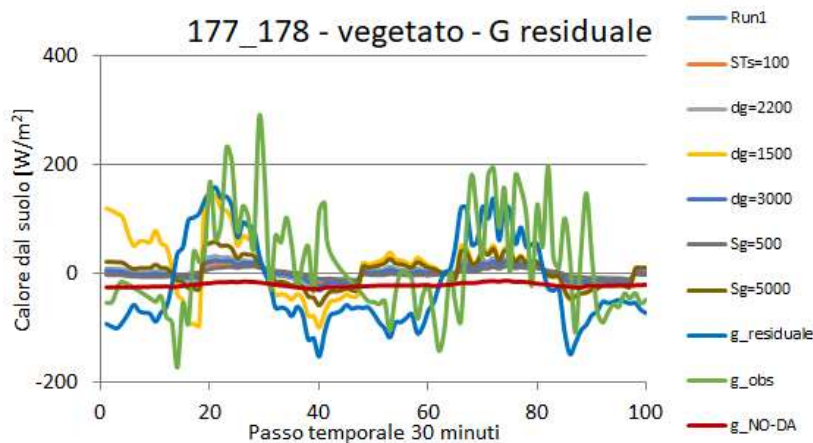


Figura 7.1-6 Confronto tra il calore dal suolo osservato, quello ottenuto con il modello residuale e quello prima e quello dopo il processo di assimilazione con il filtro di Kalman. Giorni 177-178.

Anche in questo caso si nota che l'utilizzo del modello residuale comporta alcuni errori in più rispetto all'utilizzo dell'osservato, i risultati infatti seguano l'andamento del modello residuale piuttosto che quello delle osservazioni.

Per i commenti relativi alle figure Figura 7.1-7, Figura 7.1-8, Figura 7.1-9 e Figura 7.1-10 si rimanda a quanto detto in precedenza per l'assimilazione utilizzando il calore latente osservato.

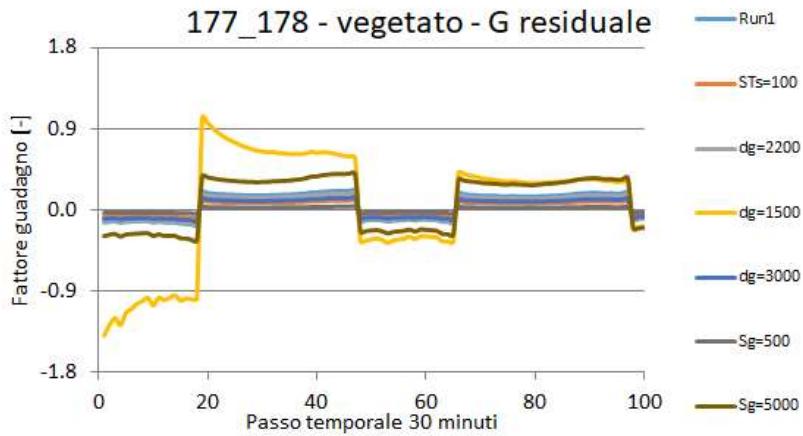


Figura 7.1-7 Andamento del fattore di guadagno del filtro di Kalman. Giorni 177-178.

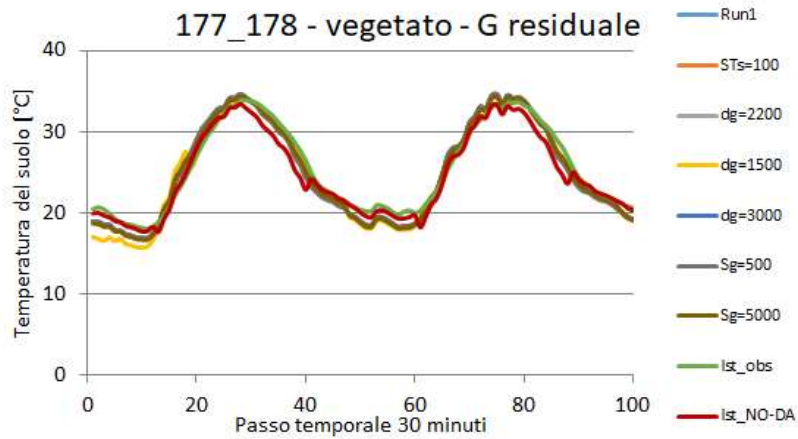


Figura 7.1-8 Confronto tra la temperatura del suolo osservata e quella prima e dopo il processo di assimilazione con il filtro di Kalman. Giorni 177-178.

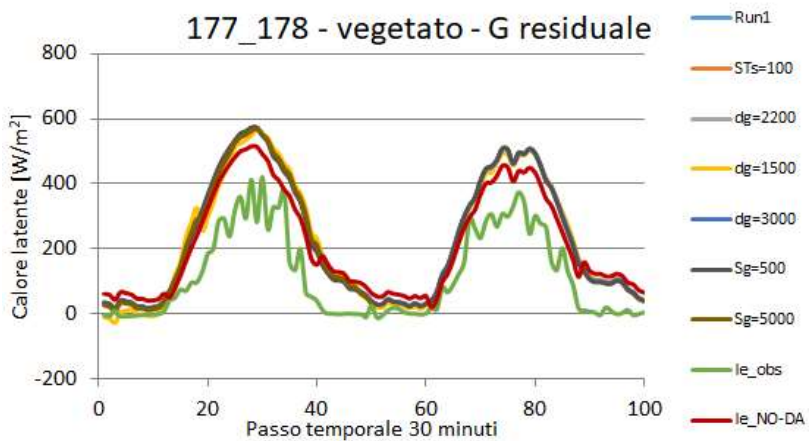


Figura 7.1-9 Confronto tra il calore latente osservato e quello prima e quello dopo il processo di assimilazione con il filtro di Kalman. Giorni 177-178.

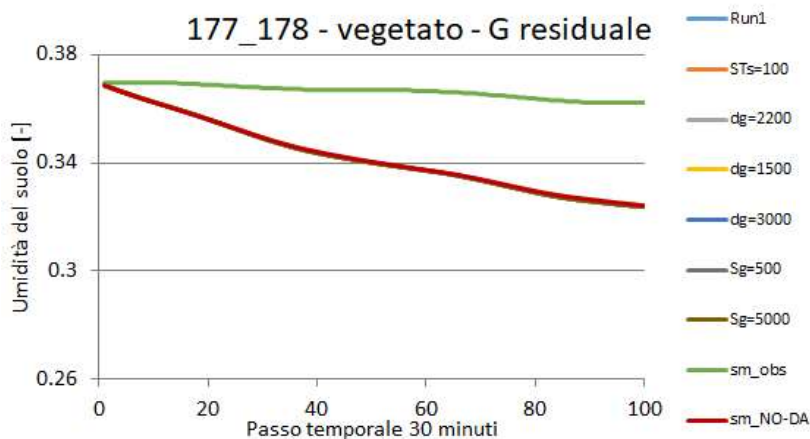


Figura 7.1-10 Confronto fra umidità del suolo osservata e quella prima e dopo il processo di assimilazione con il filtro di Kalman. Giorni 177-178.

7.1.1 Periodo di suolo vegetato

Il confronto delle due metodologie e la scelta del set di parametri migliore vengono ampliati facendo i medesimi test su altre date considerandone alcune in un periodo vegetato ed altre in un periodo non vegetato.

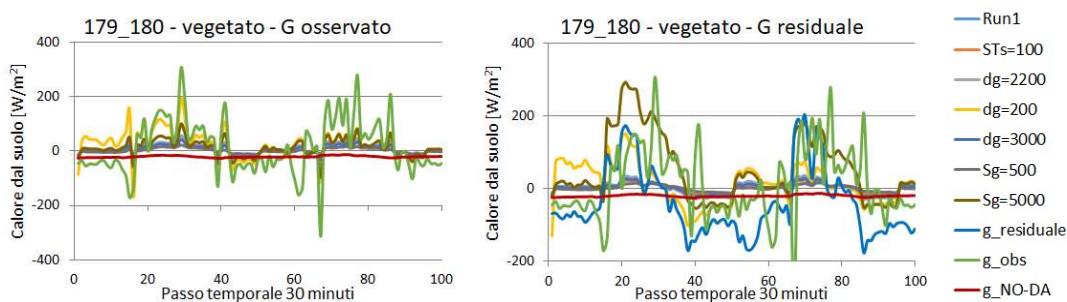


Figura 7.1-11 Confronto tra il calore dal suolo osservato, quello ottenuto con il modello residuale e quello prima e dopo il processo di assimilazione con il filtro di Kalman. Giorni 179-180.

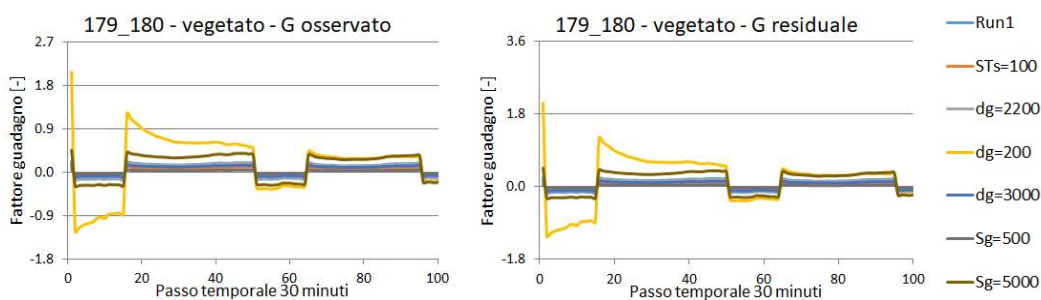


Figura 7.1-12 Andamento del fattore di guadagno del filtro di Kalman. Giorni 179-180.

7.1
Calibrazione dei parametri del filtro di Kalman

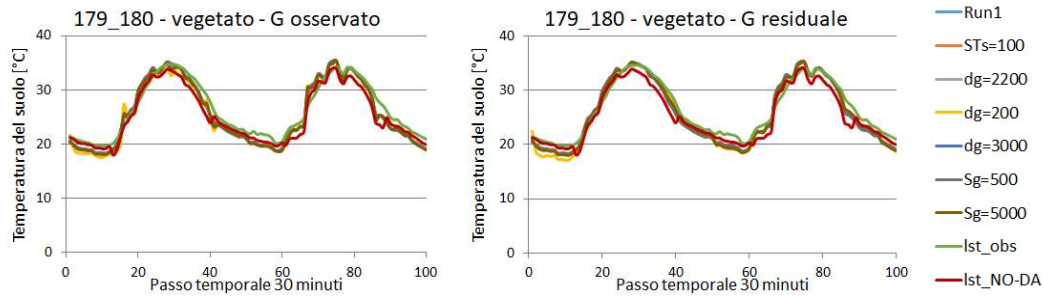


Figura 7.1-13 Confronto tra la temperatura del suolo osservata e quella prima e dopo il processo di assimilazione con il filtro di Kalman. Giorni 179-180.

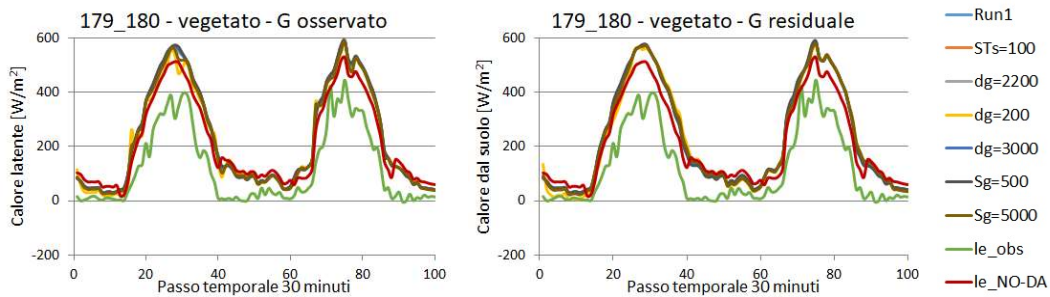


Figura 7.1-14 Confronto tra il calore latente osservato, quello prima e quello dopo il processo di assimilazione con il filtro di Kalman. Giorni 179-180.

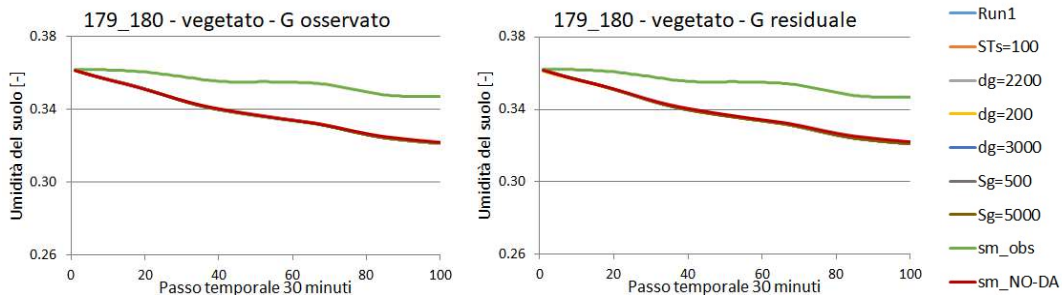


Figura 7.1-15 Confronto tra l'umidità del suolo osservata e quella prima e dopo il processo di assimilazione con il filtro di Kalman. Giorni 179-180.

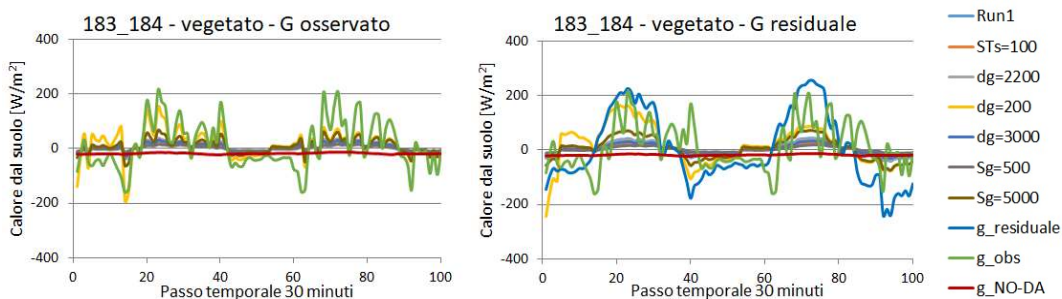


Figura 7.1-16 Confronto tra il calore dal suolo osservato, quello ottenuto con il modello residuale e quello prima e dopo il processo di assimilazione con il filtro di Kalman. Giorni 183-184.

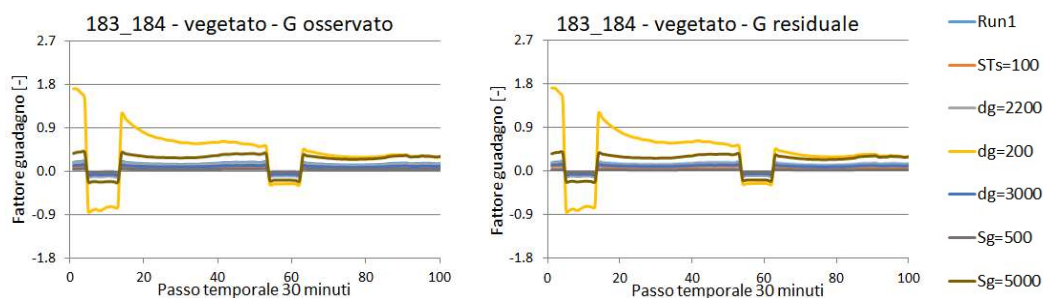


Figura 7.1-17 Andamento del fattore di guadagno del filtro di Kalman. Giorni 183-184.

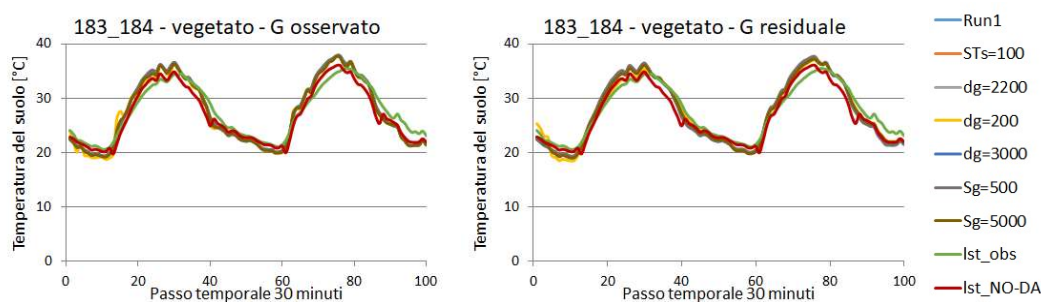


Figura 7.1-18 Confronto tra la temperatura del suolo osservata, quella prima e quella dopo il processo di assimilazione con il filtro di Kalman. Giorni 183-184.

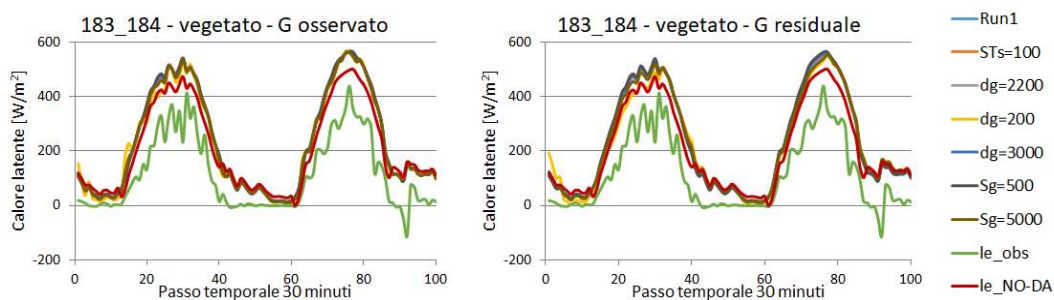


Figura 7.1-19 Confronto fra calore latente osservato, quello prima e quello dopo il processo di assimilazione con il filtro di Kalman. Giorni 183-184.

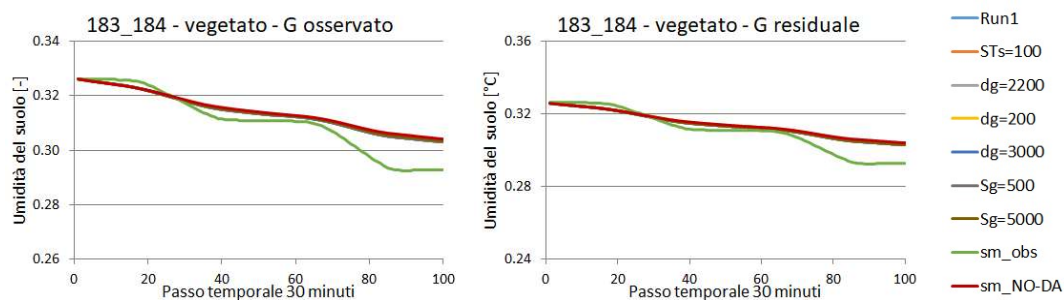


Figura 7.1-20 Confronto fra umidità del suolo osservata e quella prima e dopo il processo di assimilazione con il filtro di Kalman. Giorni 183-184.

7.1
Calibrazione dei parametri del filtro di Kalman

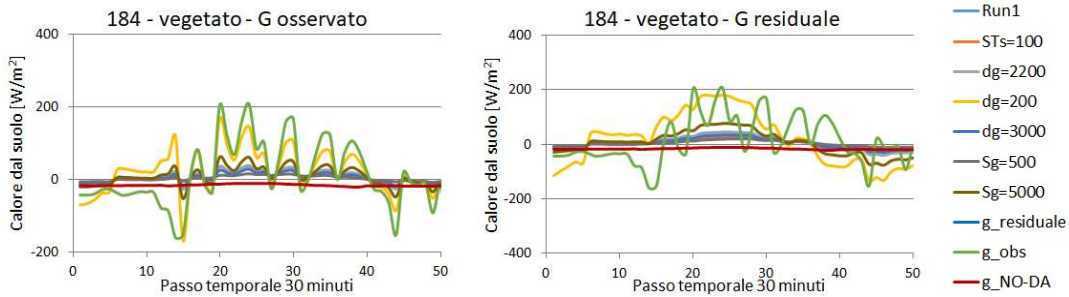


Figura 7.1-21 Confronto tra il calore dal suolo osservato, quello ottenuto con il modello residuale e quello prima e dopo il processo di assimilazione con il filtro di Kalman. Giorno 184.

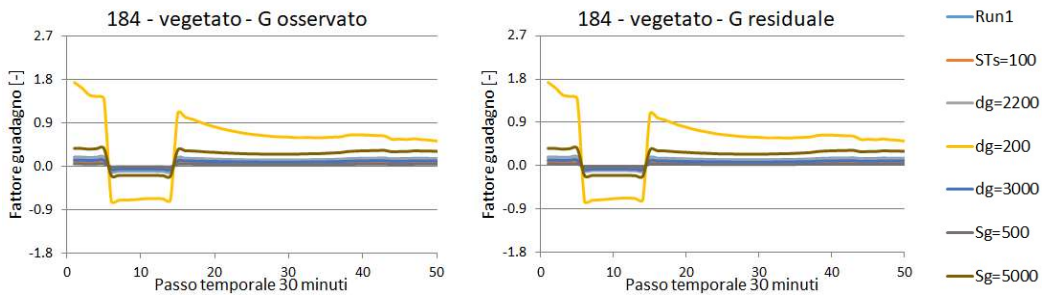


Figura 7.1-22 Andamento del fattore di guadagno del filtro di Kalman. Giorno 184.

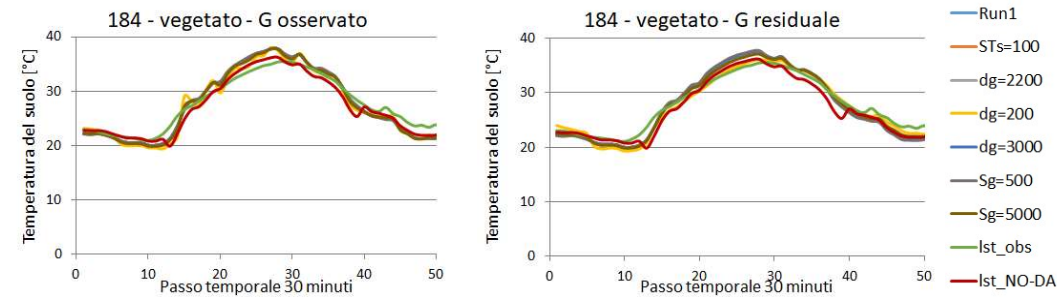


Figura 7.1-23 Confronto tra la temperatura del suolo osservata e quella prima e dopo il processo di assimilazione con il filtro di Kalman. Giorno 184.

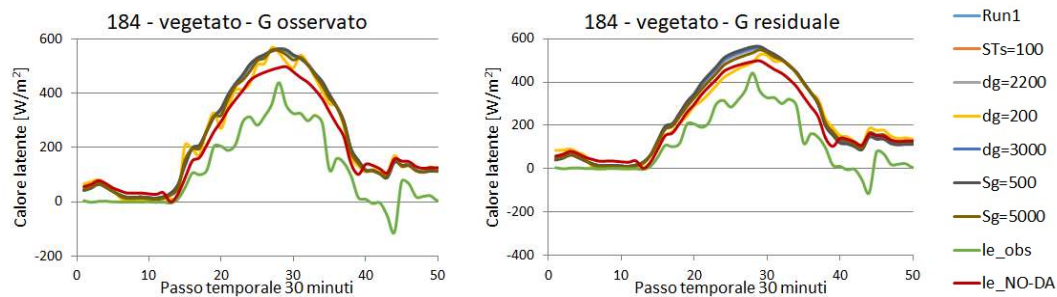


Figura 7.1-24 Confronto tra il calore latente osservato, quello prima e quello dopo il processo di assimilazione con il filtro di Kalman. Giorno 184.

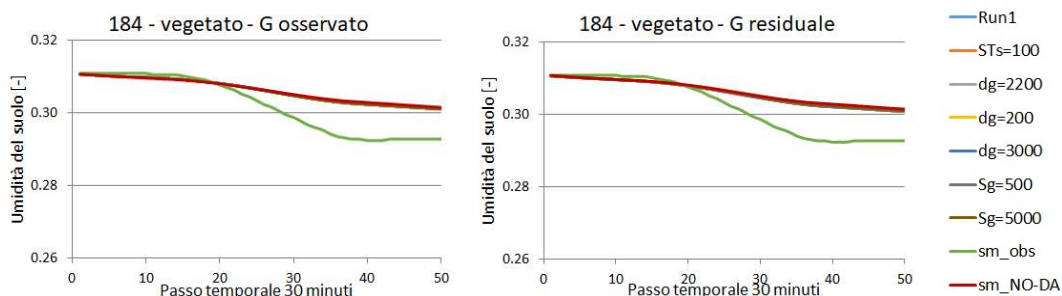


Figura 7.1-25 Confronto tra l'umidità del suolo osservata e quella prima e dopo il processo di assimilazione con il filtro di Kalman. Giorno 184.

Indici statistici

Si sono calcolati degli indici statistici (scarto quadratico medio, errore medio e deviazione standard) sul calore latente che sono rappresentativi delle varie simulazioni, al fine di valutare anche quantitativamente quale sia il set di parametri del filtro di Kalman che fornisce i risultati migliori.

Tabella 7.1-2 A sinistra le tabelle che riassumono i risultati ottenuti con il calore latente osservato a destra quelle dei risultati ottenuti con il calore latente ricavato dal modello residuale. L'indice calcolato è riferito al giorno sottolineato quando ce ne sono due

Tabella Sg=2500 W/m ² dg=2000 W/m ² STs=50 W/m ² drad=100 W/m ² dta=5 °C				
Giorno	RMSE [W/m ²]	ME [W/m ²]	S [W/m ²]	
177	89	-	23	87
179	83	-	9	83
<u>183-184</u>	72	-	8	73
<u>183-184</u>	77	-	10	10
<u>183-184</u>	75	-	9	77
184	77	-	10	77

Tabella Sg=2500 W/m ² dg=2000 W/m ² STs=50 W/m ² drad=100 W/m ² dta=5 °C				
Giorno	RMSE [W/m ²]	ME [W/m ²]	S [W/m ²]	
177	98	-	33	93
179	93	-	17	93
<u>183-184</u>	78	-	7	79
<u>183-184</u>	81	-	12	12
<u>183-184</u>	79	-	10	80
184	80	-	12	80

Tabella per variazioni di STs del +100% (STs=100 W/m ²)				
Giorno	RMSE [W/m ²]	ME [W/m ²]	S [W/m ²]	
177	94	6%	28	90
179	88	6%	13	88
<u>183-184</u>	77	7%	10	78
<u>183-184</u>	81	6%	12	12
<u>183-184</u>	79	6%	11	77
184	81	6%	12	81

Tabella per variazioni di STs del +100% (STs=100 W/m ²)				
Giorno	RMSE [W/m ²]	ME [W/m ²]	S [W/m ²]	
177	98	0%	34	94
179	93	0%	17	93
<u>183-184</u>	80	2%	9	80
<u>183-184</u>	83	2%	13	13
<u>183-184</u>	81	2%	11	80
184	83	3%	13	82

Tabella per variazioni di dg del +10% (dg=2200 W/m ²)				
Giorno	RMSE [W/m ²]	ME [W/m ²]	S [W/m ²]	
177	90	1%	24	87
179	84	1%	10	83
<u>183-184</u>	73	1%	8	73
<u>183-184</u>	78	1%	10	10
<u>183-184</u>	75	1%	9	70
184	78	1%	10	78

Tabella per variazioni di dg del +10% (dg=2200 W/m ²)				
Giorno	RMSE [W/m ²]	ME [W/m ²]	S [W/m ²]	
177	98	0%	33	93
179	93	0%	17	92
<u>183-184</u>	78	0%	8	78
<u>183-184</u>	81	0%	12	12
<u>183-184</u>	80	0%	10	79
184	81	0%	12	83

Tabella per variazioni di dg del -90% (dg=200 W/m ²)				Tabella per variazioni di dg del -90% (dg=200 W/m ²)					
Giorno	RMSE [W/m ²]	ME [W/m ²]	S [W/m ²]	Giorno	RMSE [W/m ²]	ME [W/m ²]	S [W/m ²]		
177	89	0%	-27 17%	86	-1%	177	116 18%	17 -49%	116 25%
179	74	-10%	-21 133%	73	-12%	179	114 23%	1 -96%	116 25%
<u>183-184</u>	52	-27%	-6 -25%	53	-27%	<u>183-184</u>	99 28%	-12 -30%	100 27%
<u>183-184</u>	67	-13%	4 -57%	4	-57%	<u>183-184</u>	80 -1%	8 -37%	8 -37%
<u>183-184</u>	60	-20%	-1 -89%	67	-12%	<u>183-184</u>	90 14%	-2 -124%	91 14%
184	59	-23%	-7 -30%	60	-22%	184	99 23%	-5 -69%	98 22%

Tabella per variazioni di dg del +50% (dg=3000 W/m ²)				Tabella per variazioni di dg del +50% (dg=3000 W/m ²)					
Giorno	RMSE [W/m ²]	ME [W/m ²]	S [W/m ²]	Giorno	RMSE [W/m ²]	ME [W/m ²]	S [W/m ²]		
177	92	4%	26 17%	89	3%	177	98 0%	33 1%	93 0%
179	86	4%	12 25%	86	4%	179	93 0%	17 0%	93 0%
<u>183-184</u>	76	5%	9 16%	76	4%	<u>183-184</u>	79 2%	9 18%	79 1%
<u>183-184</u>	80	4%	11 13%	11	13%	<u>183-184</u>	82 1%	13 5%	13 5%
<u>183-184</u>	78	4%	10 15%	77	1%	<u>183-184</u>	80 1%	11 10%	80 0%
184	80	4%	11 14%	80	4%	184	82 2%	12 6%	82 2%

Tabella per variazioni di Sg del -80% (Sg=500 W/m ²)				Tabella per variazioni di Sg del -80% (Sg=500 W/m ²)					
Giorno	RMSE [W/m ²]	ME [W/m ²]	S [W/m ²]	Giorno	RMSE [W/m ²]	ME [W/m ²]	S [W/m ²]		
177	97	9%	32 41%	93	7%	177	99 1%	34 2%	94 1%
179	91	11%	15 61%	91	9%	179	93 0%	17 0%	93 0%
<u>183-184</u>	81	12%	11 39%	81	11%	<u>183-184</u>	82 5%	11 44%	82 4%
<u>183-184</u>	84	9%	13 33%	13	33%	<u>183-184</u>	84 5%	13 12%	14 12%
<u>183-184</u>	82	10%	12 36%	82	7%	<u>183-184</u>	83 5%	12 24%	82 3%
184	84	9%	13 33%	84	9%	184	84 5%	13 15%	84 5%

Tabella per variazioni di Sg del +100% (Sg=5000 W/m ²)				Tabella per variazioni di Sg del +100% (Sg=5000 W/m ²)					
Giorno	RMSE [W/m ²]	ME [W/m ²]	S [W/m ²]	Giorno	RMSE [W/m ²]	ME [W/m ²]	S [W/m ²]		
177	81	-9%	11 -50%	81	-7%	177	99 1%	32 -3%	95 2%
179	73	-11%	2 -75%	74	-11%	179	109 17%	-56 329%	94 2%
<u>183-184</u>	63	-13%	4 -48%	63	-13%	<u>183-184</u>	77 -1%	3 -55%	78 -1%
<u>183-184</u>	69	-10%	6 -39%	6	-39%	<u>183-184</u>	80 -1%	10 -14%	10 -14%
<u>183-184</u>	66	-11%	5 -43%	66	-14%	<u>183-184</u>	78 -1%	7 -30%	78 -2%
184	69	-10%	6 -41%	69	-10%	184	80 -1%	10 -18%	80 -1%

Ciò che questi indici mostrano è il fatto che piccole variazioni, dell'ordine del 10% non portano a variazioni consistenti dell'indice, occorrono variazioni più importanti per apprezzare il cambiamento. Oltre a questo si nota che i risultati ottenuti attraverso il modello residuale sono peggiori a causa degli errori intrinseci ad esso, difatti i valori degli indici nelle tabelle di destra sono peggiori di quelli nelle tabelle a sinistra. Anche qui le considerazioni fatte sull'influenza dell'aggiornamento in termini di durata sono valide, basti guardare ancora il giorno 184, quando esso si trova ad essere il primo giorno di assimilazione presenta valori molto migliori degli indici rispetto a quando è il secondo giorno di assimilazione.

7.1.2 Periodo di suolo non vegetato

Analogamente al caso di suolo vegetato si è scelto di fare dei test anche per delle date in un periodo di suolo nudo al fine di rendere più completa e corretta l'analisi.

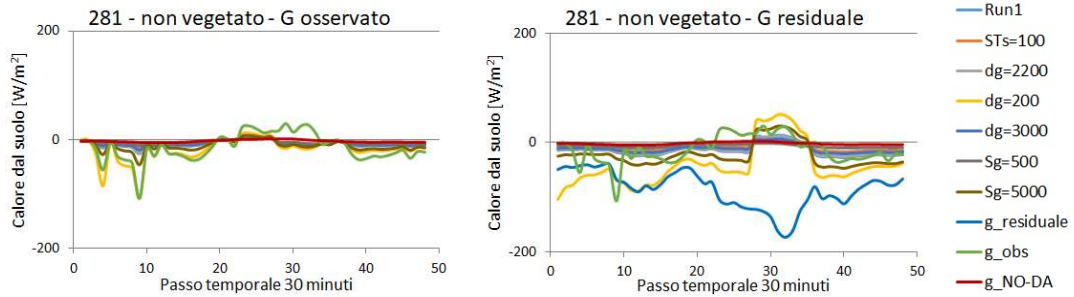


Figura 7.1-26 Confronto tra il calore dal suolo osservato, quello ottenuto con il modello residuale e quello prima e dopo il processo di assimilazione con il filtro di Kalman. Giorno 281.

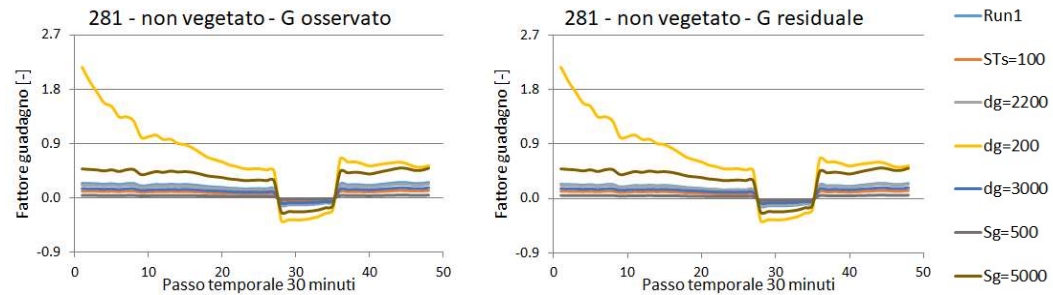


Figura 7.1-27 Andamento del fattore di guadagno del filtro di Kalman. Giorno 281.

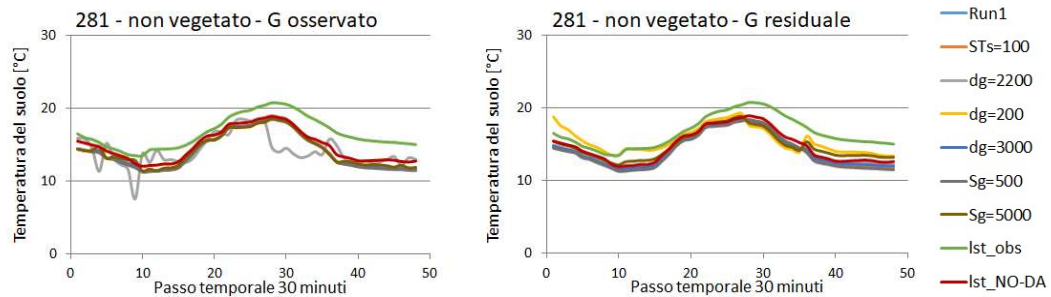


Figura 7.1-28 Confronto tra la temperatura del suolo osservata e quella prima e dopo il processo di assimilazione con il filtro di Kalman. Giorno 281.

7.1
Calibrazione dei parametri del filtro di Kalman

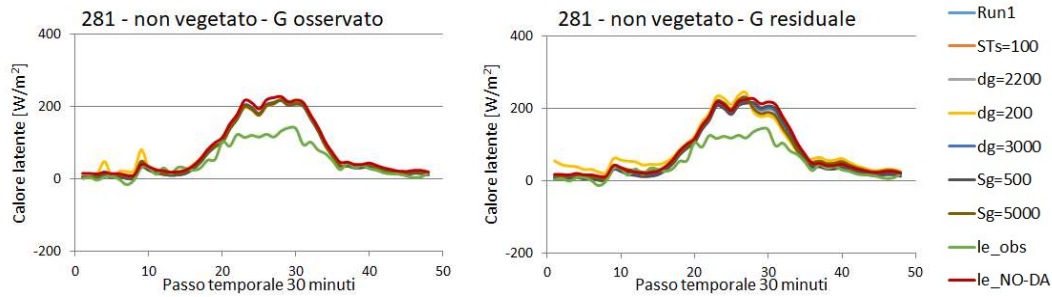


Figura 7.1-29 Confronto tra il calore latente osservato, quello prima e quello dopo il processo di assimilazione con il filtro di Kalman. Giorno 281.

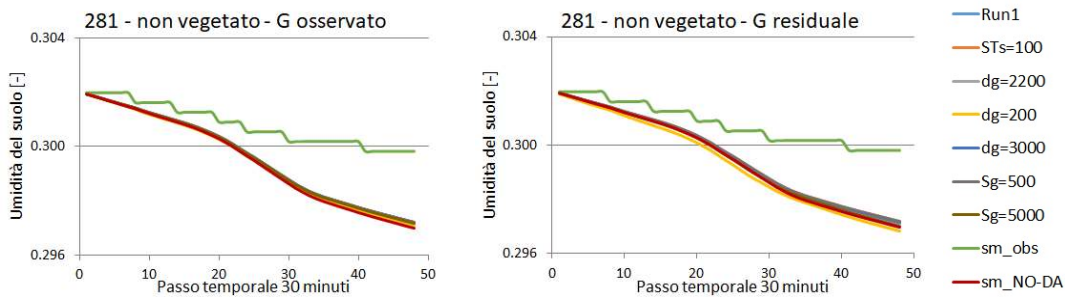


Figura 7.1-30 Confronto tra l'umidità del suolo osservata e quella prima e dopo il processo di assimilazione con il filtro di Kalman. Giorno 281.

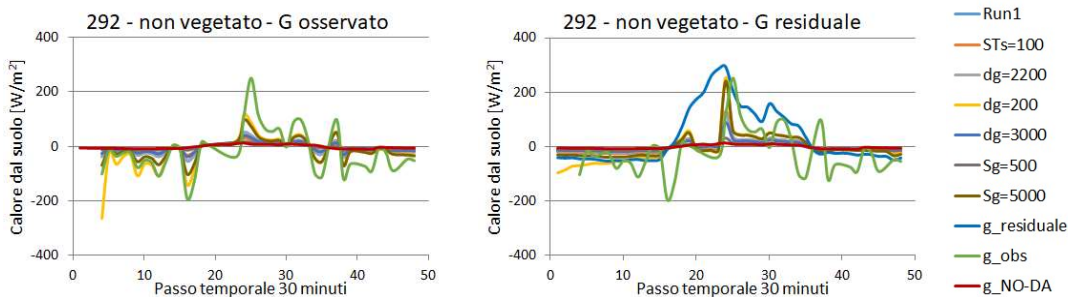


Figura 7.1-31 Confronto tra il calore dal suolo osservato, quello ottenuto con il modello residuale e quello prima e dopo il processo di assimilazione con il filtro di Kalman. Giorno 292.

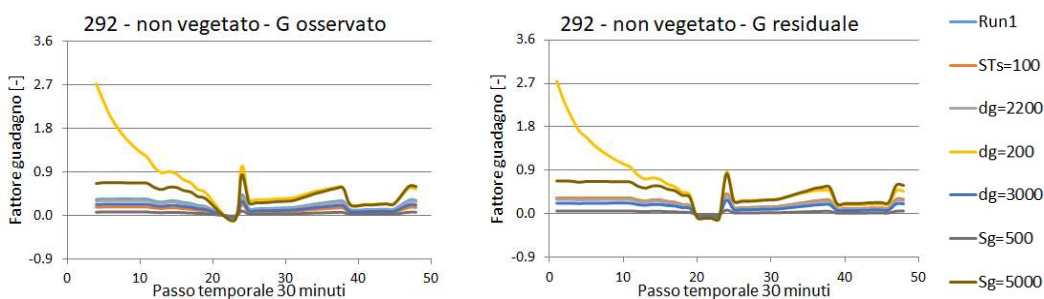


Figura 7.1-32 Andamento del fattore di guadagno del filtro di Kalman. Giorno 292

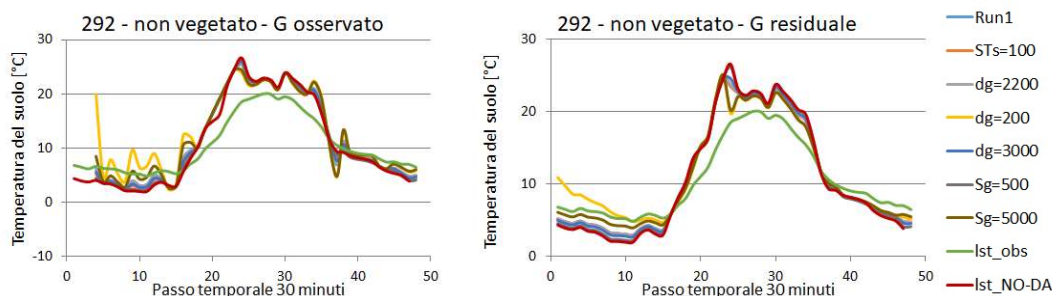


Figura 7.1-33 Confronto tra la temperatura del suolo osservata e quella prima e dopo il processo di assimilazione con il filtro di Kalman. Giorno 292.

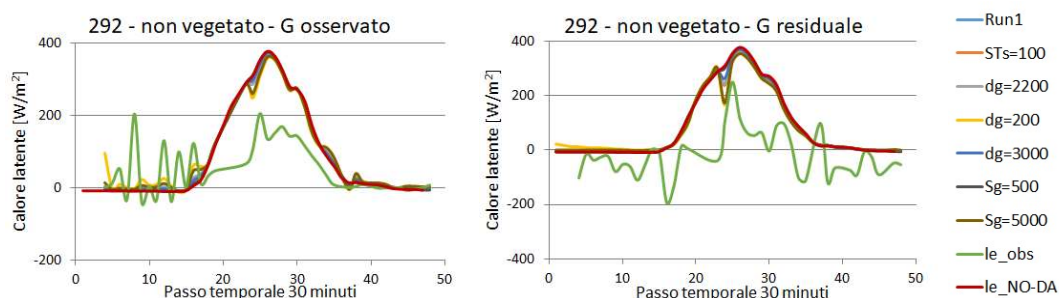


Figura 7.1-34 Confronto tra il calore latente osservato, quello prima e quello dopo il processo di assimilazione con il filtro di Kalman. Giorno 292.

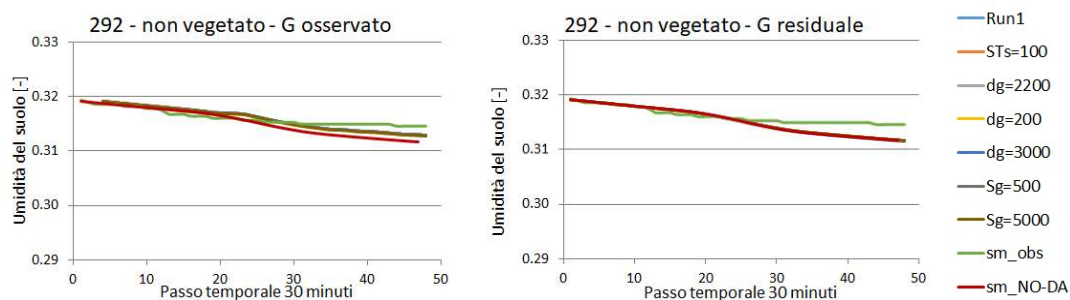


Figura 7.1-35 Confronto tra l'umidità del suolo osservata e quella prima e dopo il processo di assimilazione con il filtro di Kalman. Giorno 292.

Indici statistici

Si sono calcolati degli indici statistici (scarto quadratico medio, errore medio e deviazione standard) sul calore latente che sono rappresentativi delle varie simulazioni, al fine di valutare anche quantitativamente quale sia il set di parametri del filtro di Kalman che fornisce i risultati migliori.

Tabella 7.1-3 A sinistra le tabelle che riassumono i risultati ottenuti con il calore latente osservato a destra quelle dei risultati ottenuti con il calore latente ricavato dal modello residuale.

Tabella Sg=2500 W/m ² dg=2000 W/m ² STs=50 W/m ² drad=100 W/m ² dta=5 °C					Tabella Sg=2500 W/m ² dg=2000 W/m ² STs=50 W/m ² drad=100 W/m ² dta=5 °C								
Giorno	RMSE [W/m ²]		ME [W/m ²]		S [W/m ²]		Giorno	RMSE [W/m ²]		ME [W/m ²]		S [W/m ²]	
281	22	-	-6	-	22	-	281	22	-	0	-	22	-
292	38	-	-4	-	38	-	292	76	-	-20	-	74	-

Tabella per variazioni di STs del +100% (STs=100 W/m ²)					Tabella per variazioni di STs del +100% (STs=100 W/m ²)								
Giorno	RMSE [W/m ²]		ME [W/m ²]		S [W/m ²]		Giorno	RMSE [W/m ²]		ME [W/m ²]		S [W/m ²]	
281	24	9%	-8	27%	23	8%	281	23	6%	-4	730%	23	4%
292	52	36%	-7	78%	52	35%	292	76	0%	-20	0%	74	0%

Tabella per variazioni di dg del +10% (dg=2200 W/m ²)					Tabella per variazioni di dg del +10% (dg=2200 W/m ²)								
Giorno	RMSE [W/m ²]		ME [W/m ²]		S [W/m ²]		Giorno	RMSE [W/m ²]		ME [W/m ²]		S [W/m ²]	
281	23	2%	-6	5%	22	2%	281	22	0%	0	-10%	22	1%
292	39	3%	-5	12%	40	4%	292	76	0%	-20	-2%	74	1%

Tabella per variazioni di dg del -90% (dg=200 W/m ²)					Tabella per variazioni di dg del -90% (dg=200 W/m ²)								
Giorno	RMSE [W/m ²]		ME [W/m ²]		S [W/m ²]		Giorno	RMSE [W/m ²]		ME [W/m ²]		S [W/m ²]	
281	15	-32%	4	-33%	15	-32%	281	45	106%	29	6182%	34	58%
292	65	73%	-2	54%	66	73%	292	76	0%	-19	-6%	74	1%

Tabella per variazioni di dg del +50% (dg=3000 W/m ²)					Tabella per variazioni di dg del +50% (dg=3000 W/m ²)								
Giorno	RMSE [W/m ²]		ME [W/m ²]		S [W/m ²]		Giorno	RMSE [W/m ²]		ME [W/m ²]		S [W/m ²]	
281	23	6%	-7	18%	23	5%	281	22	3%	-3	406%	22	2%
292	44	17%	-6	47%	44	16%	292	77	2%	-19	-6%	76	3%

Tabella per variazioni di Sg del -80% (Sg=500 W/m ²)					Tabella per variazioni di Sg del -80% (Sg=500 W/m ²)								
Giorno	RMSE [W/m ²]		ME [W/m ²]		S [W/m ²]		Giorno	RMSE [W/m ²]		ME [W/m ²]		S [W/m ²]	
281	25	15%	-9	43%	24	12%	281	25	14%	-7	1727%	24	9%
292	64	70%	-9	130%	64	69%	292	81	7%	-17	-16%	80	8%

Tabella per variazioni di Sg del +100% (Sg=5000 W/m ²)					Tabella per variazioni di Sg del +100% (Sg=5000 W/m ²)								
Giorno	RMSE [W/m ²]		ME [W/m ²]		S [W/m ²]		Giorno	RMSE [W/m ²]		ME [W/m ²]		S [W/m ²]	
281	19	-16%	-3	52%	19	-14%	281	26	20%	10	2081%	24	11%
292	34	-9%	1	-75%	35	-9%	292	76	0%	-24	18%	73	-2%

Analoghe considerazioni al caso vegetato si possono trarre per il caso non vegetato.

7.1.3 Riassunto analisi

Per quanto riguarda la scelta del set migliore parametri bisogna innanzitutto fare alcune piccole premesse. Sicuramente il periodo, vegetato o non vegetato, ma anche il giorno scelto risulta essere influente sulla bontà del modello di rappresentare l'osservato. Difatti confrontando gli indici calcolati nei diversi giorni all'interno di una singola tabella vediamo che questi assumono valori differenti l'uno con l'altro.

Ciò che però è di maggior interesse per quanto riguarda l'analisi che si sta svolgendo è che, trascurando qualche situazione particolare, possiamo affermare che il set di parametri $STs = 50 W/m^2$, $Sle = 5000 W/m^2$, $dle = 2000 W/m^2$, a prescindere dal fatto che rappresenti più o meno bene l'osservato nel singolo giorno, è il set con cui generalmente si riscontrano i risultati migliori in tutti i giorni.

CAPITOLO 8.

ASSIMILAZIONE DELL'UMIDITÀ DEL SUOLO ATTRAVERSO IL FILTRO DI KALMAN

In questa parte l'obiettivo è quello di assimilare direttamente l'umidità del suolo utilizzando il processo del filtro di Kalman.

8.1 Calibrazione dei parametri del filtro di Kalman

L'obiettivo di questo paragrafo è quello di andare a calibrare i parametri del modello del filtro di Kalman sempre attraverso l'assimilazione dell'umidità del suolo. I parametri selezionati sono l'errore sulla misura dell'umidità del suolo STs , l'errore sul calcolo dell'umidità del suolo Ssm e il parametro di perturbazione dsm . La calibrazione verrà fatta anche in questo caso per tentativi, si è dunque scelto un set di parametri che è stato imposto alla simulazione di riferimento, a turno si andrà a variare un parametro alla volta per scegliere il valore che porta il miglior risultato.

I parametri scelti per la simulazione di riferimento *Run1* sono:

Tabella 8.1-1 Parametri della simulazione di riferimento

	STs [-]	Ssm [-]	dsm [-]	$drad$ [W/m^2]	dta [$^{\circ}C$]
<i>Run1</i>	0.005	0.1	0.005	100	5

Di seguito sono riportati dei grafici rappresentativi di alcuni test fatti nel processo di calibrazione. Come di consueto i test sono stati svolti in diverse date cercando di avere date sia nel periodo in cui sul suolo è presente vegetazione che nel periodo di suolo nudo.

8.1.1 Periodo di suolo vegetato

Si presentano in questo sottoparagrafo i risultati relativi ad un periodo in cui sul suolo è presente della vegetazione. Il nome delle diverse simulazioni è assegnato in base al parametro che si va a cambiare nella specifica simulazione. Si è scelto un orizzonte temporale di assimilazione di un paio di giorni per poter avere una visualizzazione migliore del processo di aggiornamento del filtro di Kalman.

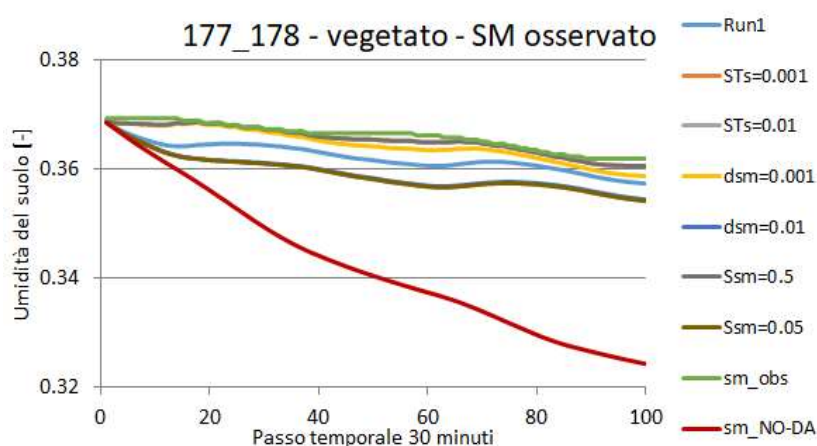


Figura 8.1-1 Confronto fra umidità del suolo osservata e quella prima e dopo il processo di assimilazione con il filtro di Kalman. Giorni 177-178.

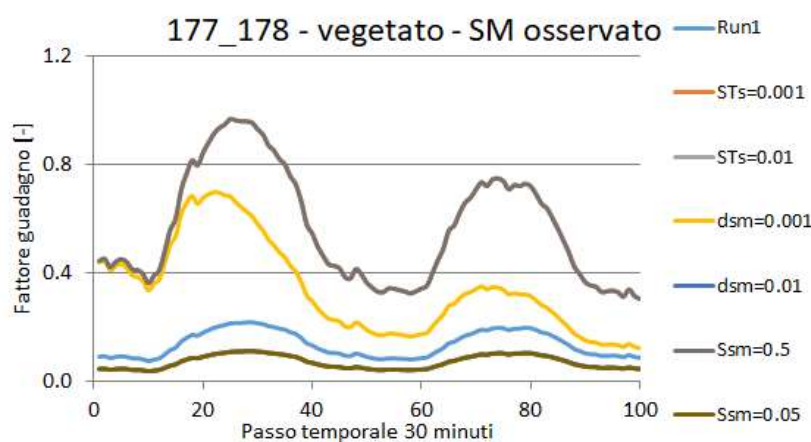


Figura 8.1-2 Andamento del fattore di guadagno del filtro di Kalman. Giorni 177-178.

Come si evince dalle figure Figura 8.1-1 e Figura 8.1-2, il processo di assimilazione funziona in maniera corretta aggiornando il valore di umidità all'aumentare del passo temporale di assimilazione e facendolo tendere al valore di umidità del suolo osservato. In Figura 8.1-2 si vede proprio l'andamento del fattore guadagno del filtro che risulta essere differente a seconda dei parametri utilizzati per la simulazione mantenendo però un *trend* decrescente indice del fatto che l'aggiornamento si fa meno marcato con l'aumentare dello step temporale.

In seguito si riportano due grafici, uno della temperatura superficiale del suolo (Figura 8.1-3) e uno del calore latente (Figura 8.1-4), anche loro variabili del modello idrologico. Come primo commento va

senz'altro detto che entrambe le variabili non subiscono una rilevante variazione per effetto dell'aggiornamento dell'umidità del suolo, così come nei paragrafi precedenti si era visto che al variare di queste l'umidità rimaneva pressoché invariata. Ciò è un'ulteriore conferma del fatto che pur essendo legati dallo stesso processo dei bilanci di massa ed energia, sono processi con passi temporali di aggiornamento molto differenti e quindi sembrano dipendere da fattori differenti.

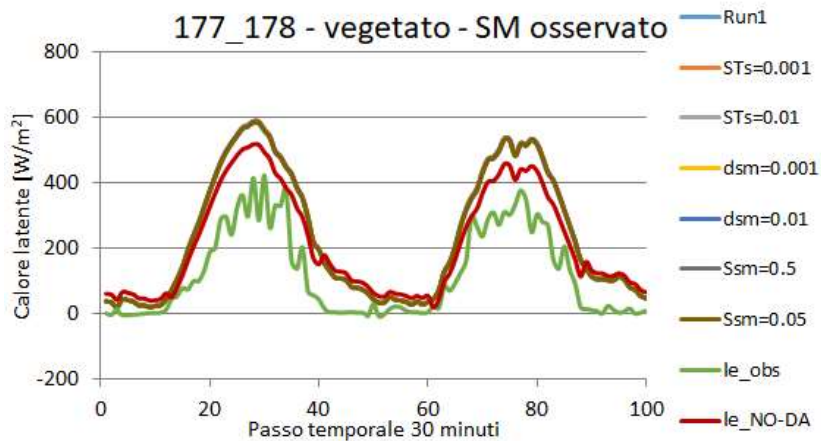


Figura 8.1-3 Confronto fra calore latente osservato e quello prima e dopo il processo di assimilazione con il filtro di Kalman. Giorni 177-178.

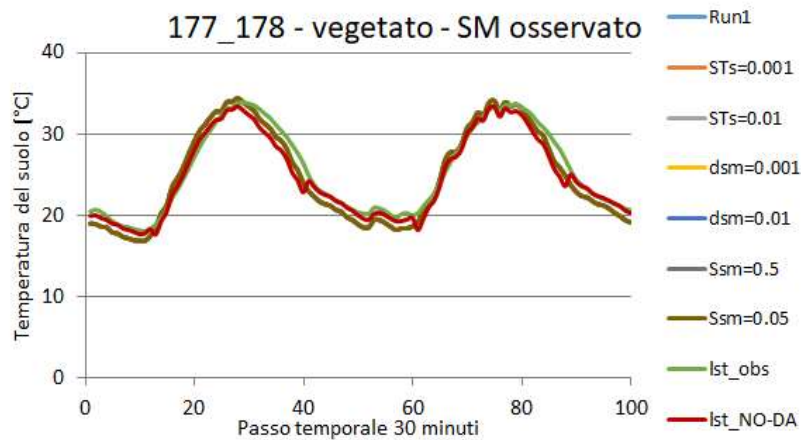


Figura 8.1-4 Confronto fra temperatura del suolo osservata e quella prima e dopo il processo di assimilazione con il filtro di Kalman. Giorni 177-178.

Di seguito si propone la medesima analisi fatta su altre date sempre prese nel periodo di suolo vegetato, i commenti sono analoghi a quelli fatti in precedenza.

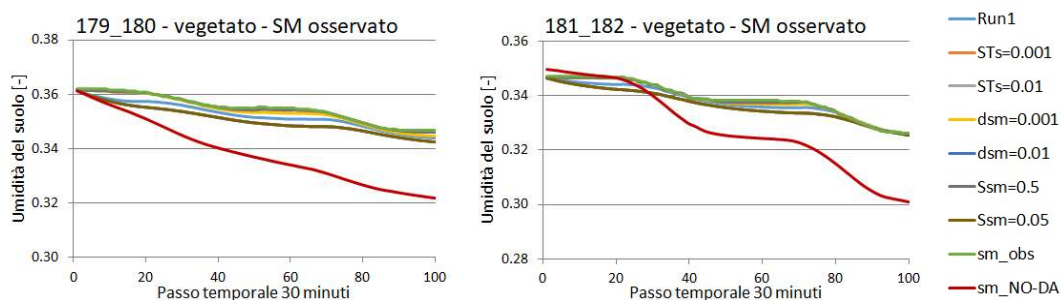


Figura 8.1-5 Confronto tra l'umidità del suolo osservata e quella prima e dopo il processo di assimilazione con il filtro di Kalman. Giorni 179-180 e 181-182.

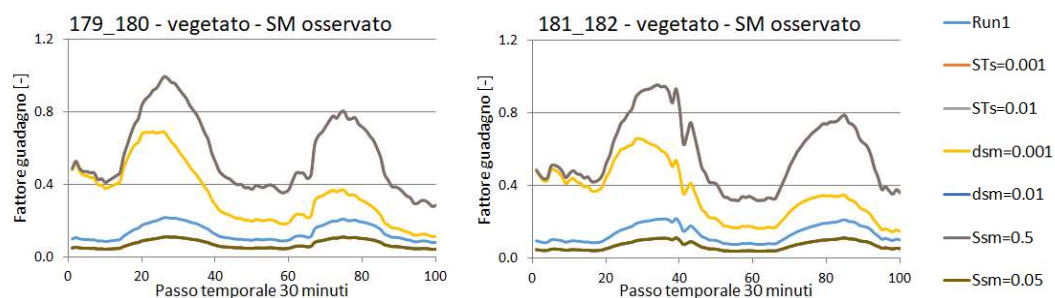


Figura 8.1-6 Andamento del fattore di guadagno del filtro di Kalman. Giorni 179-180 e 181-182.

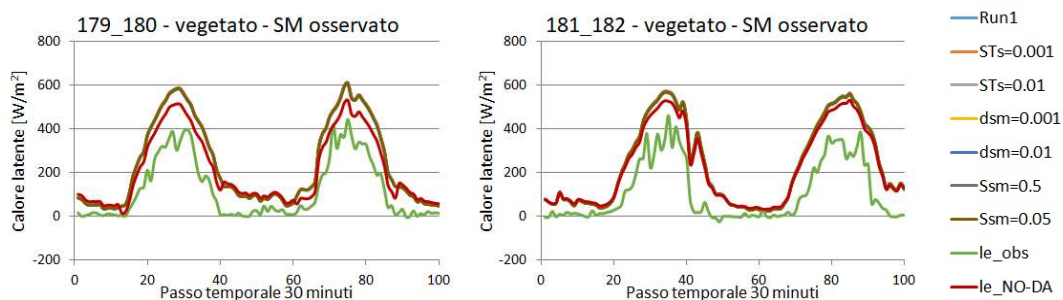


Figura 8.1-7 Confronto tra il calore latente osservato e quello prima e dopo il processo di assimilazione con il filtro di Kalman. Giorni 179-180 e 181-182.

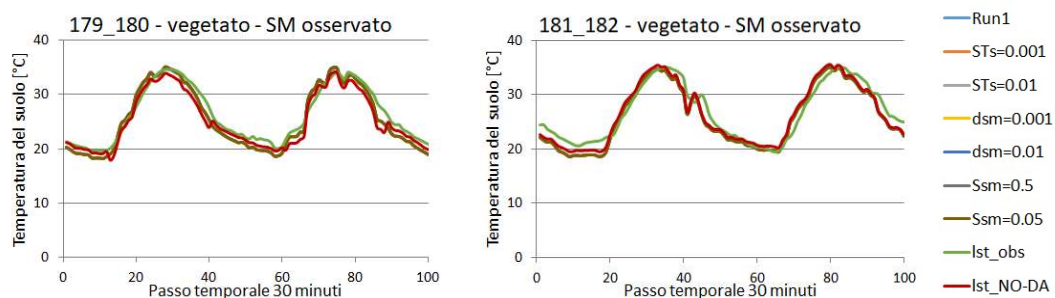


Figura 8.1-8 Confronto tra la temperatura del suolo osservata e quella prima e dopo il processo di assimilazione con il filtro di Kalman. Giorni 179-180 e 181-182.

Indici statistici

Anche per questa serie di test sono calcolati degli indici statistici (scarto quadratico medio, errore medio e deviazione standard) sull'umidità del suolo che sono rappresentativi delle varie simulazioni, al fine di valutare anche quantitativamente quale sia il set di parametri del filtro di Kalman che fornisce i risultati migliori.

Tabella 8.1-2 Indici riassuntivi del periodo vegetato

Tabella Ssm=0.1 dsm=0.005 STs=0.005 drad=100 W/m ² dta=5°C			
Giorno	RMSE [-]	ME [-]	S [-]
177-178	4E-03 -	4E-03 -	7E-04 -
179-180	3E-03 -	3E-03 -	6E-04 -
181-182	2E-03 -	1E-03 -	7E-04 -

Tabella per variazioni di STs del -80% (STs=0.001)			
Giorno	RMSE [-]	ME [-]	S [-]
177-178	8E-04 -81%	7E-04 -83%	1E-03 50%
179-180	5E-04 -81%	4E-04 -83%	1E-03 84%
181-182	4E-04 -76%	2E-04 -83%	1E-03 69%

Tabella per variazioni di dsm del +100% (dsm=0.01)			
Giorno	RMSE [-]	ME [-]	S [-]
177-178	7E-03 72%	7E-03 73%	2E-03 122%
179-180	5E-03 72%	4E-03 75%	1E-03 126%
181-182	3E-03 62%	2E-03 76%	1E-03 103%

Tabella per variazioni di STs del +100% (STs=0.01)			
Giorno	RMSE [-]	ME [-]	S [-]
177-178	7E-03 74%	7E-03 75%	1E-03 93%
179-180	5E-03 73%	5E-03 77%	9E-04 60%
181-182	3E-03 63%	2E-03 77%	9E-04 38%

Tabella per variazioni di Ssm del +500% (Ssm=0.5)			
Giorno	RMSE [-]	ME [-]	S [-]
177-178	8E-04 -81%	7E-04 -83%	4E-04 -41%
179-180	5E-04 -81%	4E-04 -83%	3E-04 -47%
181-182	4E-04 -76%	2E-04 -83%	3E-04 -49%

Tabella per variazioni di dsm del -80% (dsm=0.001)			
Giorno	RMSE [-]	ME [-]	S [-]
177-178	2E-03 -55%	2E-03 -59%	1E-03 65%
179-180	1E-03 -58%	1E-03 -62%	1E-03 91%
181-182	7E-04 -60%	4E-04 -68%	1E-03 69%

Tabella per variazioni di Ssm del -50% (Ssm=0.05)			
Giorno	RMSE [-]	ME [-]	S [-]
177-178	7E-03 74%	7E-03 75%	2E-03 124%
179-180	5E-03 73%	5E-03 77%	1E-03 126%
181-182	3E-03 63%	2E-03 77%	1E-03 103%

Gli indici, in questa situazione, confermano quello che i grafici dell'umidità del suolo in Figura 8.1-1 e Figura 8.1-5 hanno mostrato, ovvero che le simulazioni $STs = 0.001$ e $Ssm = 0.5$ presentano i risultati migliori. È inoltre interessante notare che le due simulazioni presentano risultati molto simili questo è quindi un esempio del problema dell'*equifinality*. Questa problematica descrive come diverse combinazioni dei valori dei parametri in esame conducano al risultato ottimo. Viene dunque introdotta la consapevolezza che i set di parametri trovati possano non essere i migliori in senso assoluto, ma una delle varie combinazioni che portano al risultato ottimo.

8.1.2 Periodo di suolo non vegetato

Si presentano in questo sotto paragrafo i risultati relativi ad un periodo di suolo su cui non è presente della vegetazione.

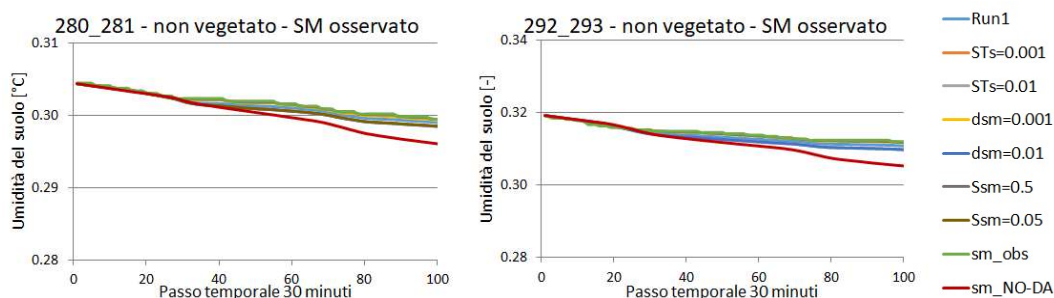


Figura 8.1-9 Confronto tra l'umidità del suolo osservata e quella prima e dopo il processo di assimilazione con il filtro di Kalman. Giorni 280-281 e 292-293.

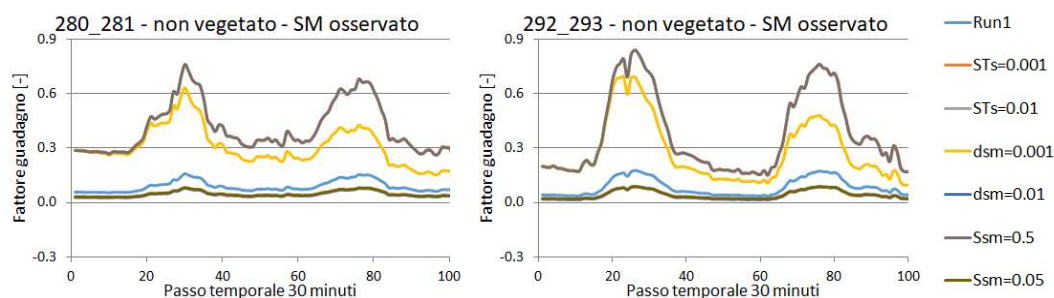


Figura 8.1-10 Andamento del fattore di guadagno del filtro di Kalman. Giorni 280-281 e 292-293.

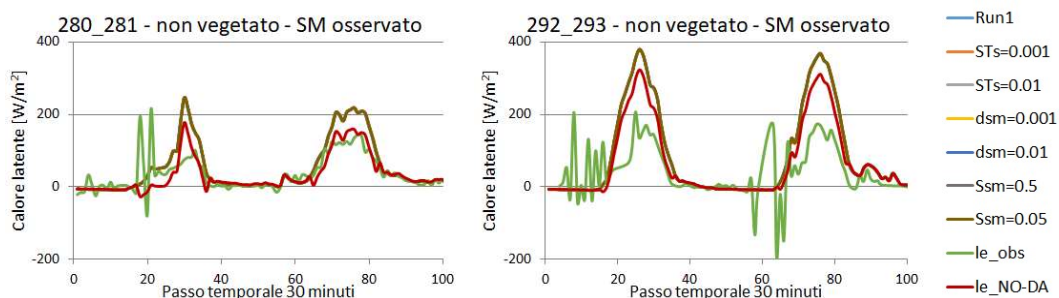


Figura 8.1-11 Confronto tra il calore latente osservato e quello prima e dopo il processo di assimilazione con il filtro di Kalman. Giorni 280-281 e 292-293

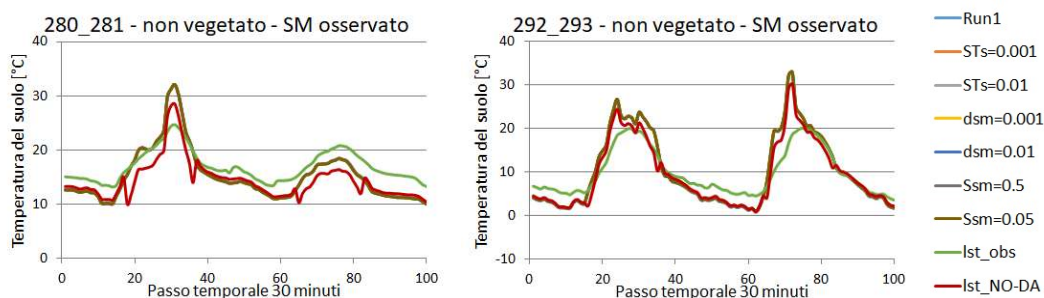


Figura 8.1-12 Confronto tra la temperatura del suolo osservata e quella prima e dopo il processo di assimilazione con il filtro di Kalman. Giorni 280-281 e 292-293.

Nel caso di suolo nudo il modello idrologico riproduce abbastanza fedelmente la situazione reale senza bisogno di grandi aggiornamenti, ciò lo si può notare dalla Figura 8.1-10 il fattore che determina l'aggiornamento dei parametri ha infatti dei valori più bassi rispetto al caso vegetato (Figura 8.1-6).

L'assimilazione produce un miglioramento nella stima dell'umidità del suolo (Figura 8.1-9) ma non influenza, come nel caso di suolo vegetato, temperatura del suolo (Figura 8.1-12) e calore latente (Figura 8.1-11).

Indici statistici

Anche per questa serie di test sono calcolati degli indici statistici (scarto quadratico medio, errore medio e deviazione standard) sull'umidità del suolo che sono rappresentativi delle varie simulazioni, al fine di valutare anche quantitativamente quale sia il set di parametri del filtro di Kalman che fornisce i risultati migliori.

Tabella 8.1-3 Indici riassuntivi del periodo non vegetato

Tabella Ssm=0.1 dsm=0.005 STs=0.005 drad=100 W/m ² dta=5°C			
Giorno	RMSE [-]	ME [-]	S [-]
280-281	5E-04 -	4E-04 -	2E-04 -
292-293	1E-03 -	8E-04 -	5E-04 -

Tabella per variazioni di STs del -80% (STs=0.001)			
Giorno	RMSE [-]	ME [-]	S [-]
280-281	9E-05 -80%	6E-05 -86%	2E-04 25%
292-293	2E-04 -79%	1E-04 -85%	5E-04 8%

Tabella per variazioni di dsm del +100% (dsm=0.01)			
Giorno	RMSE [-]	ME [-]	S [-]
280-281	8E-04 76%	7E-04 76%	4E-04 106%
292-293	2E-03 67%	1E-03 70%	9E-04 86%

Tabella per variazioni di STs del +100% (STs=0.01)			
Giorno	RMSE [-]	ME [-]	S [-]
280-281	8E-04 77%	7E-04 77%	3E-04 72%
292-293	2E-03 68%	1E-03 70%	8E-04 57%

Tabella per variazioni di Ssm del +500% (Ssm=0.5)			
Giorno	RMSE [-]	ME [-]	S [-]
280-281	9E-05 -80%	6E-05 -86%	8E-05 -61%
292-293	2E-04 -79%	1E-04 -85%	2E-04 -68%

Tabella per variazioni di dsm del -80% (dsm=0.001)			
Giorno	RMSE [-]	ME [-]	S [-]
280-281	1E-04 -69%	1E-04 -74%	2E-04 26%
292-293	3E-04 -67%	2E-04 -71%	6E-04 9%

Tabella per variazioni di Ssm del -50% (Ssm=0.05)			
Giorno	RMSE [-]	ME [-]	S [-]
280-281	8E-04 77%	7E-04 77%	4E-04 108%
292-293	2E-03 68%	1E-03 70%	9E-04 87%

Gli indici confermano anche qui quello che i grafici ci hanno fatto intuire i grafici, riprendendo il grafico in Figura 8.1-9 possiamo avere conferma che, anche per il periodo di suolo nudo, le simulazioni rinominate $STs = 0.001$ e $Ssm = 0.5$ presentano i risultati migliori.

8.2 Assimilazione con diverso passo temporale

In questo paragrafo andremo a prendere in considerazione una delle problematiche che più interessa il tema dell'assimilazione dei dati, la disponibilità delle osservazioni. Fino ad ora, come già riportato, il dato osservato era disponibile ogni 30 minuti, che è anche il passo temporale del modello idrologico. Si ipotizza ora di avere le osservazioni con passo di 1, 12, 24, 48 ore, mantenendo costante il passo temporale del modello idrologico.

Come già visto nei precedenti capitoli, cambiando il passo temporale il valore dei parametri del filtro di Kalman stimati e scelti come quelli che portavano ai risultati migliori per delle osservazioni con passo di 30 minuti potrebbero non essere gli stessi se il passo aumenta. Sarà dunque necessario fare dei test al fine definire il set migliore di parametri per i diversi passi temporali.

8.2.1 Calibrazione dei parametri del filtro di Kalman

Così come al passo precedente, anche ora è stato scelto un set di parametri di riferimento, il set scelto è quello che ha dato i migliori risultati con passo di 30 minuti cioè:

Tabella 8.2-1 Parametri della simulazione di riferimento

	$STs [-]$	$Ssm [-]$	$dsm [-]$	$drad [W/m^2]$	$dta [^{\circ}C]$
<i>Run1</i>	<i>50</i>	<i>2500</i>	<i>2000</i>	<i>100</i>	<i>5</i>

I test sono stati condotti sia per un gruppo di date nel periodo vegetato sia per uno nel periodo di suolo nudo. L'orizzonte temporale è stato ampliato per garantire, soprattutto nei test con i passi maggiori, un numero accettabile di osservazioni e di conseguenza di aggiornamenti attraverso l'assimilazione dei dati. Di seguito vengono riportati grafici e indici calcolati per i diversi passi temporali, i commenti sono riportati invece al termine della presentazione dei risultati.

Passo 1 ora

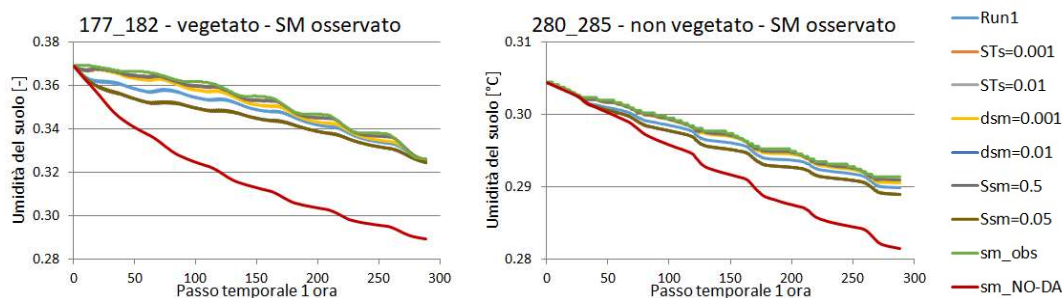


Figura 8.2-1 Confronto tra l'umidità del suolo osservata e quella prima e dopo il processo di assimilazione con il filtro di Kalman. Giorni 177-182 e 280-285.

8.2

Assimilazione con diverso passo temporale

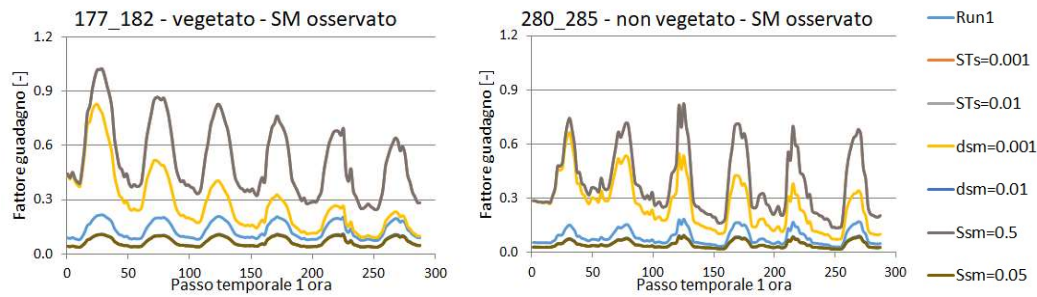


Figura 8.2-2 Andamento del fattore di guadagno del filtro di Kalman. Giorni 179-182 e 280-285.

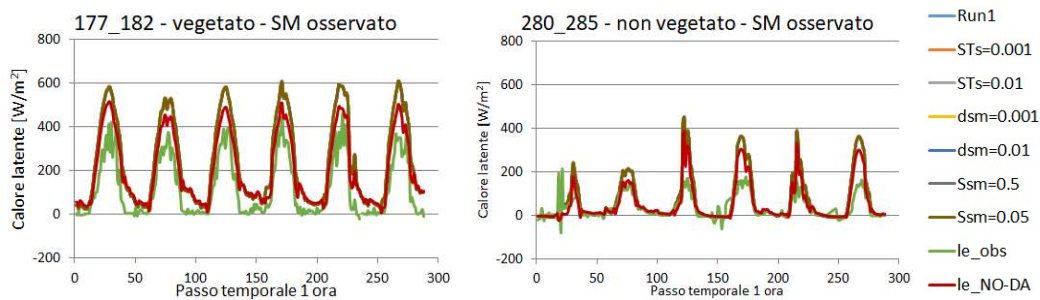


Figura 8.2-3 Confronto tra il calore latente osservato e quello prima e dopo il processo di assimilazione con il filtro di Kalman. Giorni 177-182 e 280-285.

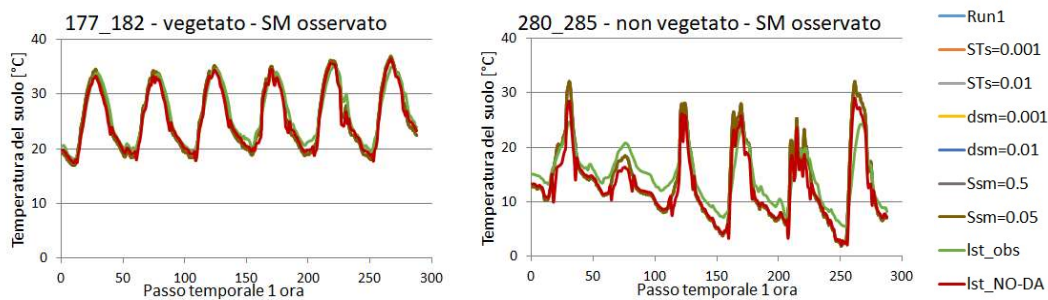


Figura 8.2-4 Confronto tra la temperatura del suolo osservata e quella prima e dopo il processo di assimilazione con il filtro di Kalman. Giorni 179-182 e 280-285.

Di seguito è riportato il calcolo di alcuni indici statistici (scarto quadratico medio, errore medio e deviazione standard) per poter analizzare il problema anche da un punto di vista quantitativo oltre che qualitativo commentando i grafici.

Tabella 8.2-2 Indici riassuntivi per assimilazione con un passo di 1 ora.

Tabella Ssm=0.1 dsm=0.005 STs=0.005 drad=100 W/m ² dta=5°C			
Giorno	RMSE [-]	ME [-]	S [-]
177-182	5E-03 -	5E-03 -	1E-03 -
280-285	1E-03 -	9E-04 -	3E-04 -

Tabella per variazioni di STs del -80% (STs=0.001)				Tabella per variazioni di dsm del +100% (dsm=0.01)			
Giorno	RMSE [-]	ME [-]	S [-]	Giorno	RMSE [-]	ME [-]	S [-]
177-182	1E-03 -76%	1E-03 -78%	3E-03 176%	177-182	9E-03 67%	8E-03 69%	3E-03 202%
280-285	2E-04 -79%	2E-04 -83%	4E-04 34%	280-285	2E-03 78%	2E-03 79%	6E-04 118%

Tabella per variazioni di STs del +100% (STs=0.01)				Tabella per variazioni di Ssm del +500% (Ssm=0.5)			
Giorno	RMSE [-]	ME [-]	S [-]	Giorno	RMSE [-]	ME [-]	S [-]
177-182	9E-03 69%	8E-03 71%	2E-03 59%	177-182	1E-03 -76%	1E-03 -78%	7E-04 -30%
280-285	2E-03 80%	2E-03 80%	6E-04 88%	280-285	2E-04 -79%	2E-04 -83%	1E-04 -52%

Tabella per variazioni di dsm del -80% (dsm=0.001)				Tabella per variazioni di Ssm del -50% (Ssm=0.05)			
Giorno	RMSE [-]	ME [-]	S [-]	Giorno	RMSE [-]	ME [-]	S [-]
177-182	3E-03 -52%	2E-03 -53%	3E-03 178%	177-182	9E-03 69%	8E-03 71%	3E-03 201%
280-285	4E-04 -62%	3E-04 -66%	4E-04 35%	280-285	2E-03 80%	2E-03 80%	6E-04 120%

Passo 12 ore

Si nota come incrementando il passo temporale delle osservazioni disponibili nei grafici si mostrino in maniera evidente gli istanti di assimilazione.

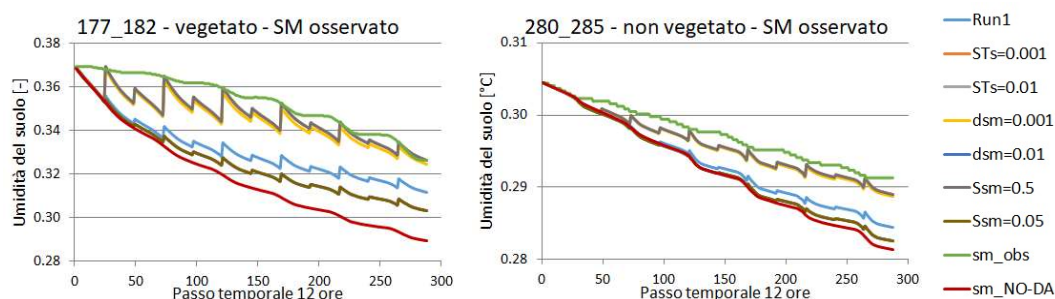


Figura 8.2-5 Confronto tra l'umidità del suolo osservata e quella prima e dopo il processo di assimilazione con il filtro di Kalman. Giorni 177-182 e 280-285.

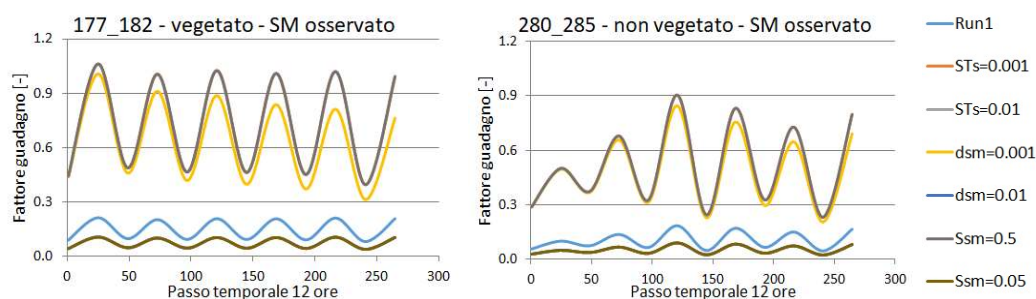


Figura 8.2-6 Andamento del fattore di guadagno del filtro di Kalman. Giorni 179-182 e 280-285.

8.2
Assimilazione con diverso passo temporale

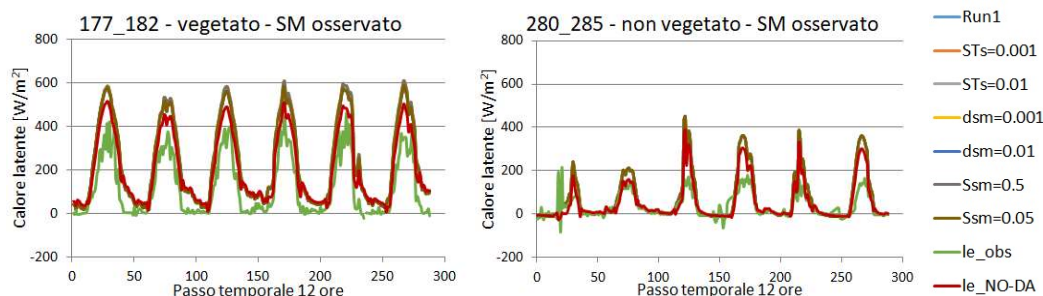


Figura 8.2-7 Confronto tra il calore latente osservato e quello prima e dopo il processo di assimilazione con il filtro di Kalman. Giorni 177-182 e 280-285.

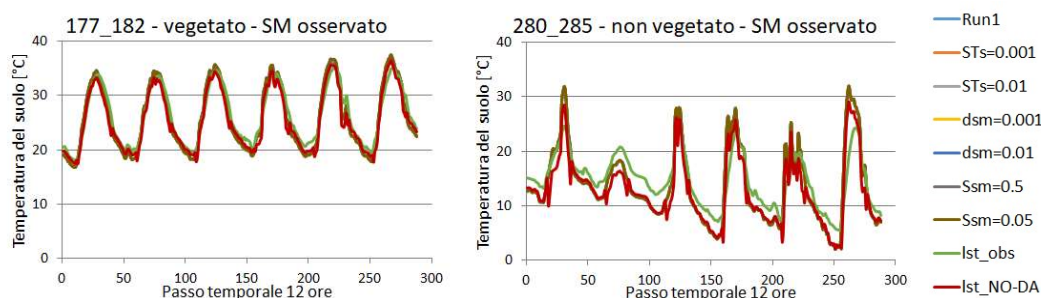


Figura 8.2-8 Confronto tra la temperatura del suolo osservata e quella prima e dopo il processo di assimilazione con il filtro di Kalman. Giorni 179-182 e 280-285.

Di seguito è riportato il calcolo di alcuni indici statistici (scarto quadratico medio, errore medio e deviazione standard) per poter analizzare il problema anche da un punto di vista quantitativo oltre che qualitativo commentando i grafici.

Tabella 8.2-3 Indici riassuntivi per assimilazione con un passo di 12 ore.

Tabella Ssm=0.1 dsm=0.005 STs=0.005 drad=100 dta=5			
Giorno	RMSE [-]	ME [-]	S [-]
177-182	2E-02	2E-02	5E-03
280-285	4E-03	4E-03	1E-03

Tabella per variazioni di STs del -80% (STs=0.001)			
Giorno	RMSE [-]	ME [-]	S [-]
177-182	8E-03 -65%	6E-03 -69%	7E-03 23%
280-285	2E-03 -66%	1E-03 -65%	2E-03 34%

Tabella per variazioni di dsm del +100% (dsm=0.01)			
Giorno	RMSE [-]	ME [-]	S [-]
177-182	3E-02 23%	2E-02 22%	8E-03 52%
280-285	5E-03 21%	5E-03 19%	3E-03 75%

Tabella per variazioni di STs del +100% (STs=0.01)			
Giorno	RMSE [-]	ME [-]	S [-]
177-182	3E-02 23%	2E-02 22%	6E-03 16%
280-285	5E-03 21%	5E-03 19%	2E-03 20%

Tabella per variazioni di Ssm del +500% (Ssm=0.5)			
Giorno	RMSE [-]	ME [-]	S [-]
177-182	8E-03 -65%	6E-03 -69%	4E-03 -22%
280-285	2E-03 -66%	1E-03 -65%	6E-04 -59%

Tabella per variazioni di dsm del -80% (dsm=0.001)			
Giorno	RMSE [-]	ME [-]	S [-]
177-182	9E-03 -61%	7E-03 -64%	7E-03 23%
280-285	2E-03 -63%	2E-03 -61%	2E-03 35%

Tabella per variazioni di Ssm del -50% (Ssm=0.05)			
Giorno	RMSE [-]	ME [-]	S [-]
177-182	3E-02 23%	2E-02 22%	8E-03 52%
280-285	5E-03 21%	5E-03 19%	3E-03 75%

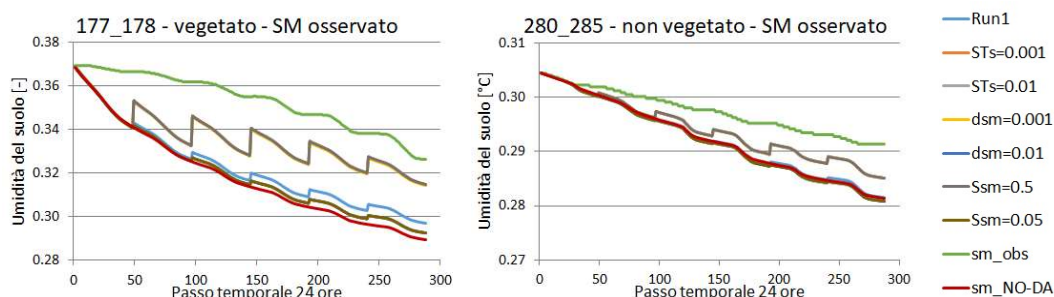
Passo 24 ore

Figura 8.2-9 Confronto tra l'umidità del suolo osservata e quella prima e dopo il processo di assimilazione con il filtro di Kalman. Giorni 177-182 e 280-285.

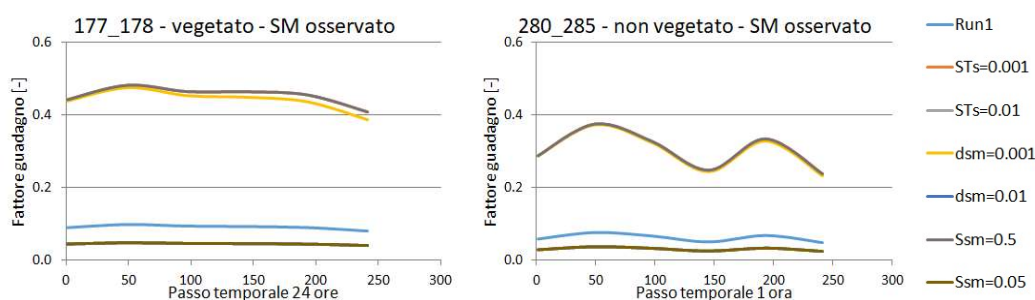


Figura 8.2-10 Andamento del fattore di guadagno del filtro di Kalman. Giorni 179-182 e 280-285.

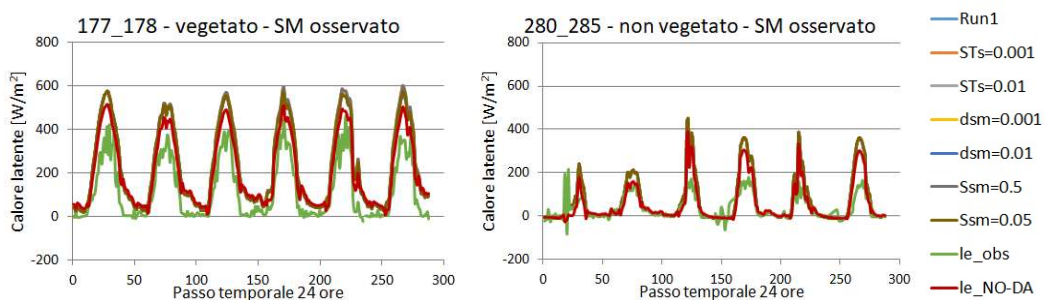


Figura 8.2-11 Confronto tra il calore latente osservato e quello prima e dopo il processo di assimilazione con il filtro di Kalman. Giorni 177-182 e 280-285.

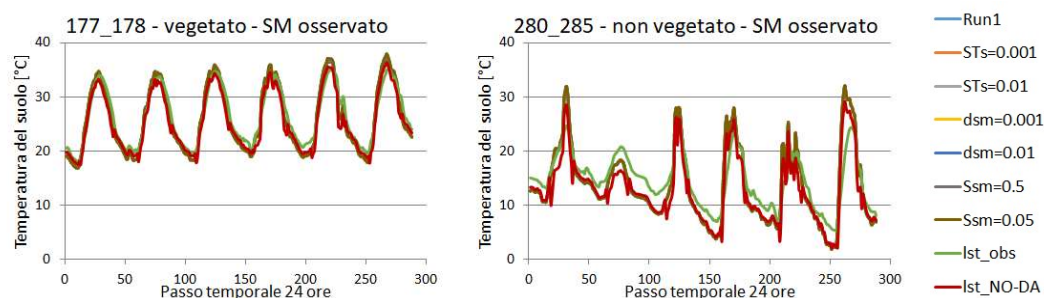


Figura 8.2-12 Confronto tra la temperatura del suolo osservata e quella prima e dopo il processo di assimilazione con il filtro di Kalman. Giorni 179-182 e 280-285.

Di seguito è riportato il calcolo di alcuni indici statistici (scarto quadratico medio, errore medio e deviazione standard) per poter analizzare il problema anche da un punto di vista quantitativo oltre che qualitativo commentando i grafici.

Tabella 8.2-4 Indici riassuntivi per assimilazione con un passo di 24 ore.

Tabella Ssm=0.1 dsm=0.005 STs=0.005 drad=100 W/m ² dta=5°C			
Giorno	RMSE [-]	ME [-]	S [-]
177-182	3E-02 -	3E-02 -	7E-03 -
280-285	6E-03 -	5E-03 -	2E-03 -

Tabella per variazioni di STs del -80% (STs=0.001)			
Giorno	RMSE [-]	ME [-]	S [-]
177-182	2E-02 -40%	2E-02 -40%	9E-03 16%
280-285	4E-03 -38%	3E-03 -36%	3E-03 21%

Tabella per variazioni di dsm del +100% (dsm=0.01)			
Giorno	RMSE [-]	ME [-]	S [-]
177-182	3E-02 8%	3E-02 7%	1E-02 39%
280-285	6E-03 6%	5E-03 6%	3E-03 41%

Tabella per variazioni di STs del +100% (STs=0.01)			
Giorno	RMSE [-]	ME [-]	S [-]
177-182	3E-02 8%	3E-02 7%	8E-03 7%
280-285	6E-03 6%	5E-03 6%	2E-03 5%

Tabella per variazioni di Ssm del +500% (Ssm=0.5)			
Giorno	RMSE [-]	ME [-]	S [-]
177-182	2E-02 -40%	2E-02 -40%	6E-03 -25%
280-285	4E-03 -38%	3E-03 -36%	2E-03 -25%

Tabella per variazioni di dsm del -80% (dsm=0.001)			
Giorno	RMSE [-]	ME [-]	S [-]
177-182	2E-02 -39%	2E-02 -39%	9E-03 16%
280-285	4E-03 -37%	3E-03 -36%	3E-03 21%

Tabella per variazioni di Ssm del -50% (Ssm=0.05)			
Giorno	RMSE [-]	ME [-]	S [-]
177-182	3E-02 8%	3E-02 7%	1E-02 39%
280-285	6E-03 6%	5E-03 6%	3E-03 41%

Passo 48 ore

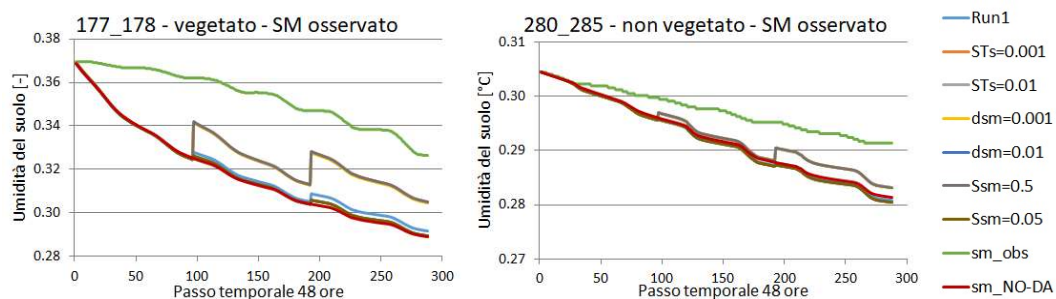


Figura 8.2-13 Confronto tra l'umidità del suolo osservata e quella prima e dopo il processo di assimilazione con il filtro di Kalman. Giorni 177-182 e 280-285.

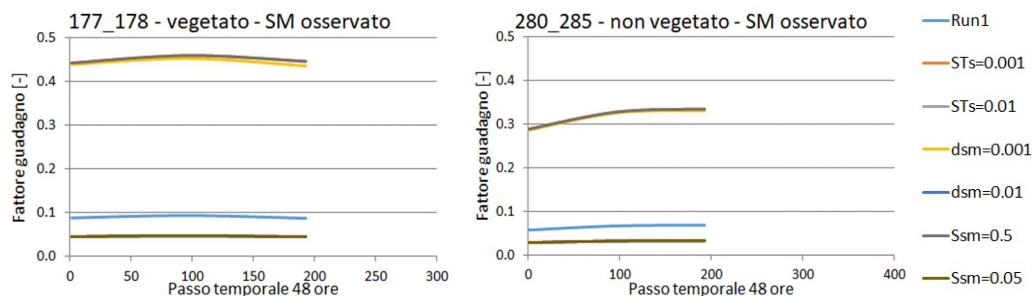


Figura 8.2-14 Andamento del fattore di guadagno del filtro di Kalman. Giorni 179-182 e 280-285.

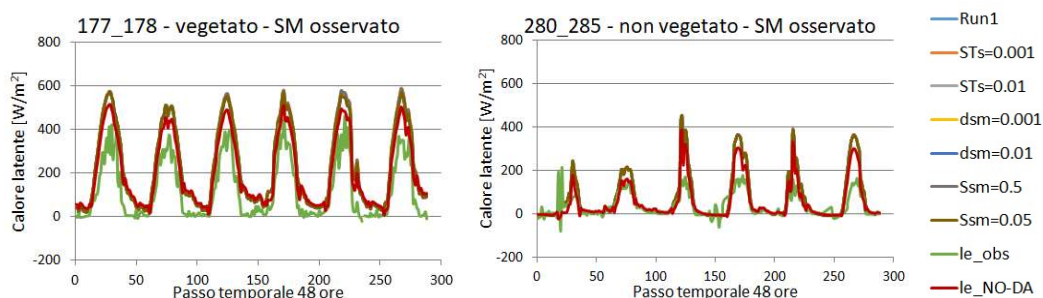


Figura 8.2-15 Confronto tra il calore latente osservato e quello prima e dopo il processo di assimilazione con il filtro di Kalman. Giorni 177-182 e 280-285.

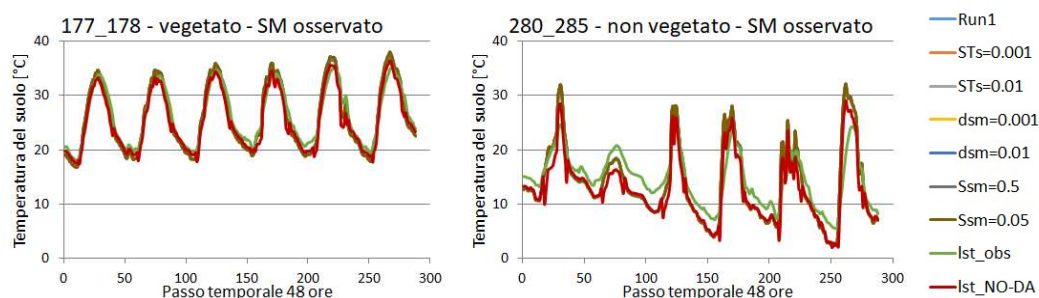


Figura 8.2-16 Confronto tra la temperatura del suolo osservata e quella prima e dopo il processo di assimilazione con il filtro di Kalman. Giorni 179-182 e 280-285.

Di seguito è riportato il calcolo di alcuni indici statistici (scarto quadratico medio, errore medio e deviazione standard) per poter analizzare il problema anche da un punto di vista quantitativo oltre che qualitativo commentando i grafici.

Tabella 8.2-5 Indici riassuntivi per assimilazione con un passo di 48 ore.

Tabella Ssm=0.1 dsm=0.005 STs=0.005 drad=100 W/m ² dta=5°C			
Giorno	RMSE [-]	ME [-]	S [-]
177-182	3E-02 -	3E-02 -	9E-03 -
280-285	6E-03 -	5E-03 -	3E-03 -

Tabella per variazioni di STs del -80% (STs=0.001)			
Giorno	RMSE [-]	ME [-]	S [-]
177-182	2E-02 -24%	2E-02 -24%	1E-02 3%
280-285	5E-03 -24%	4E-03 -22%	3E-03 14%

Tabella per variazioni di dsm del +100% (dsm=0.01)			
Giorno	RMSE [-]	ME [-]	S [-]
177-182	3E-02 4%	3E-02 3%	1E-02 19%
280-285	6E-03 3%	6E-03 3%	3E-03 27%

Tabella per variazioni di STs del +100% (STs=0.01)			
Giorno	RMSE [-]	ME [-]	S [-]
177-182	3E-02 4%	3E-02 3%	9E-03 3%
280-285	6E-03 3%	6E-03 3%	3E-03 2%

Tabella per variazioni di Ssm del +500% (Ssm=0.5)			
Giorno	RMSE [-]	ME [-]	S [-]
177-182	2E-02 -24%	2E-02 -24%	8E-03 -15%
280-285	5E-03 -24%	4E-03 -22%	2E-03 -14%

Tabella per variazioni di dsm del -80% (dsm=0.001)			
Giorno	RMSE [-]	ME [-]	S [-]
177-182	2E-02 -24%	2E-02 -24%	1E-02 4%
280-285	5E-03 -24%	4E-03 -22%	3E-03 15%

Tabella per variazioni di Ssm del -50% (Ssm=0.05)			
Giorno	RMSE [-]	ME [-]	S [-]
177-182	3E-02 4%	3E-02 3%	1E-02 19%
280-285	6E-03 3%	6E-03 3%	3E-03 27%

8.2.2 Riassunto analisi

Come possiamo dedurre dai grafici e dalle tabelle mostrati, aumentando il passo temporale peggiora la rappresentazione dell'umidità da parte del modello, questo perché l'aggiornamento del valore di umidità con il valore osservato avviene più di rado disponendo di meno osservazioni. Lo scopo di questi test era di calibrare i parametri del filtro di Kalman, a tal merito si possono individuare due configurazioni di parametri che determinano ad ogni passo temporale i risultati migliori. I set migliori come per il passo temporale di 30 minuti sono quelli con $STs = 0.001$ e con $Ssm = 0.5$, si può quindi concludere che, anche variando il passo temporale di assimilazione, il valore dei parametri del filtro di Kalman che determinano i risultati migliori rimane invariato questo è di molto aiuto al fine di uniformare la procedura avendo magari osservazioni non a passi temporali sempre uguali e costanti.

8.2.3 Confronto diretto dell'assimilazione a diversi passi temporali

Sono qui raccolti i risultati delle calibrazioni a diverso passo temporale sia per le date nel periodo vegetato che in quelle nel periodo di suolo nudo in modo da porre maggior visibilità al confronto fra simulazioni con un diverso passo temporale di assimilazione. Si è anche qui scelta come combinazione di parametri fra le due che portavano i risultati migliori quella con $STs = 0.001$, $dsm = 0.005$ e $Ssm = 0.1$.

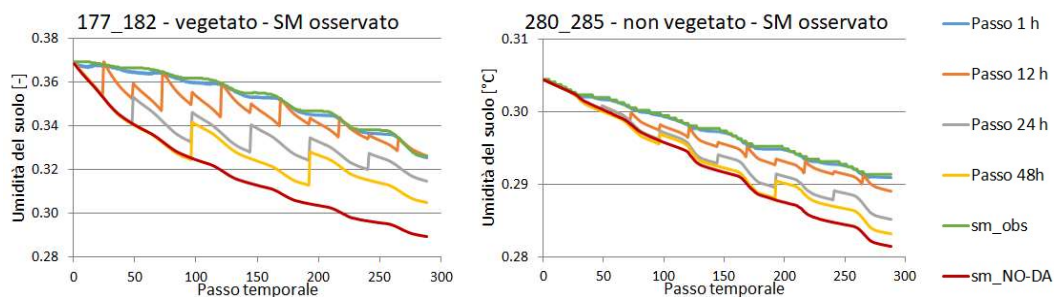


Figura 8.2-17 Confronto tra l'umidità del suolo osservata e quella prima e dopo il processo di assimilazione con il filtro di Kalman a diversi temporali. Giorni 177-182 e 280-285.

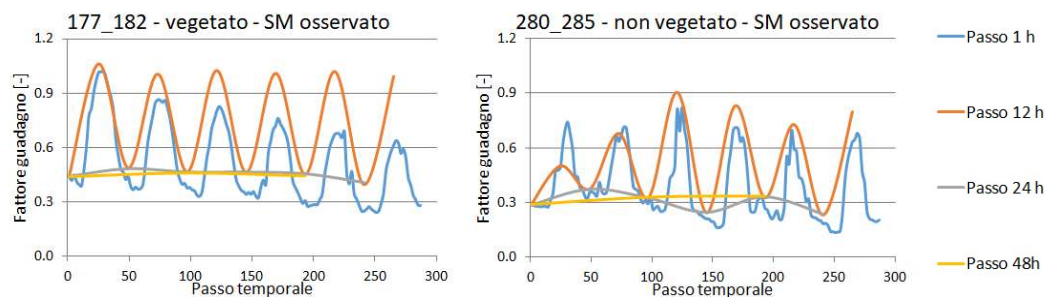


Figura 8.2-18 Andamento del fattore di guadagno del filtro di Kalman a diversi passi temporali. Giorni 179-182 e 280-285.

Dall'analisi dei grafici in Figura 8.2-17 e Figura 8.2-18 si comprende ancor di più quello che già si accennava in precedenza cioè che, all'aumentare del passo di assimilazione, i risultati vanno via via allontanandosi da quello che è il valore osservato (sm_obs) in quanto diminuisce il numero di osservazioni e di conseguenza il numero di aggiornamenti che subisce l'umidità del suolo.

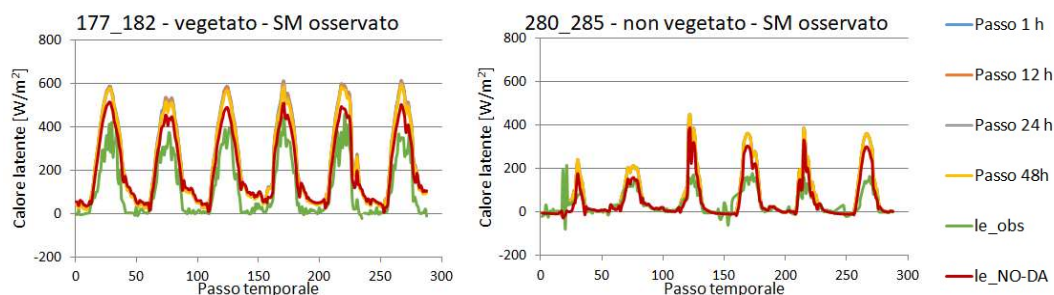


Figura 8.2-19 Confronto tra il calore latente osservato e quello prima e dopo il processo di assimilazione con il filtro di Kalman a diversi passi temporali. Giorni 177-182 e 280-285.

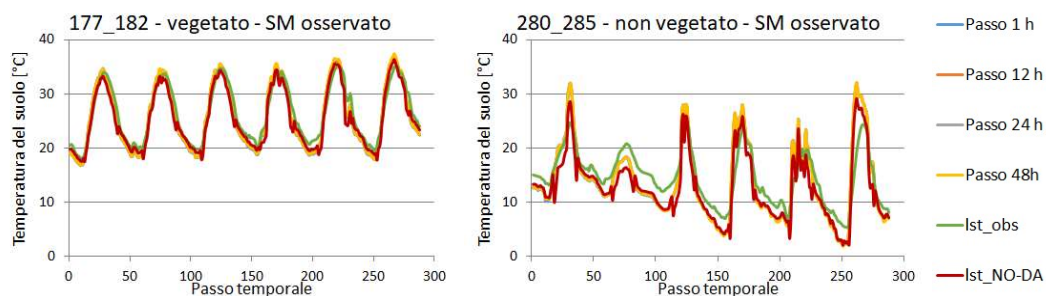


Figura 8.2-20 Confronto tra la temperatura del suolo osservata e quella prima e dopo il processo di assimilazione con il filtro di Kalman a diversi passi temporali. Giorni 179-182 e 280-285.

Come già si è fatto notare in precedenza, la variazione dell'umidità del suolo non provoca delle variazioni apprezzabili di temperatura del suolo (Figura 8.2-20) e calore latente (Figura 8.2-19) che conferma una volta ancor di più il fatto che queste variabili pur essendo legati dallo stesso processo dei bilanci di massa ed energia, sono processi con passi temporali di aggiornamento molto differenti e quindi sembrano dipendere da fattori differenti.

Di seguito è riportato il calcolo di alcuni indici statistici (scarto quadratico medio, errore medio e deviazione standard) per poter analizzare il problema anche da un punto di vista quantitativo oltre che qualitativo commentando i grafici.

Tabella 8.2-6 Indici riassuntivi per assimilazione a diverso passo temporale.

Tabella passo 30 minuti						
Giorno	RMSE [-]		ME [-]		S [-]	
177-182	8E-04	-	6E-04	-	4E-04	-
280-285	1E-04	-	8E-05	-	1E-04	-

Tabella passo 1 ora						
Giorno	RMSE [-]		ME [-]		S [-]	
177-182	1E-03	65%	2E-04	-75%	4E-03	811%
280-285	2E-04	63%	9E-04	1010%	4E-04	331%

Tabella passo 12 ore						
Giorno	RMSE [-]		ME [-]		S [-]	
177-182	8E-03	881%	1E-03	123%	5E-03	1088%
280-285	2E-03	1062%	2E-04	89%	1E-03	1180%

Tabella passo 24 ore						
Giorno	RMSE [-]		ME [-]		S [-]	
177-182	2E-02	2169%	3E-03	413%	7E-03	1616%
280-285	4E-03	2661%	2E-03	1898%	2E-03	1845%

Tabella passo 48 ore						
Giorno	RMSE [-]		ME [-]		S [-]	
177-182	2E-02	2995%	4E-03	558%	4E-02	9031%
280-285	5E-03	3474%	3E-04	273%	3E-03	3361%

Le tabelle degli indici confermano con i numeri quanto già detto dall'osservazione qualitativa dei grafici sopra riportati.

8.2.4 Riassunto analisi

In questo sottoparagrafo si sono proposti i confronti delle variabili per i diversi passi temporali utilizzando per ognuno lo stesso set di parametri del filtro di Kalman. Si nota come l'umidità del suolo, essendo una variabile con uno sviluppo più lento rispetto al calore latente, mantenga l'informazione del passo precedente e la riesca a trasferire al passo successivo. Questo lo si nota perché, aumentando anche di molto il passo temporale dell'assimilazione la stima dell'umidità del suolo peggiora rimanendo però influenzata dal processo di assimilazione dei dati. Al contrario, con il calore latente (paragrafo 6.3.3) se viene aumentato di molto il passo temporale si va a perdere qualsiasi informazione legata all'assimilazione risultando così un processo inutile. In particolare si è notato che aumentando il passo temporale la stima peggiora (Figura 8.2-17).

CAPITOLO 9.

ASSIMILAZIONE DELLA LST UTILIZZANDO UN METODO SEMPLIFICATO

Fino ad ora lo schema utilizzato per l'assimilazione dei dati è stato quello del filtro di Kalman. Si propone in questo capitolo di utilizzare una metodologia semplificata al fine di valutarne la bontà e la possibilità di utilizzo. L'idea di base di questa metodologia è descritta nel paragrafo 9, qui si riporta con maggior dettaglio lo step per l'inizializzazione della procedura.

Il primo passo è stato quello di andare a calibrare la perturbazione della radiazione rad [W/m^2], in quanto dalle analisi precedenti si è visto essere la forzante meteo che ha maggior influenza, all'interno del bilancio idrologico. La perturbazione di una forzante porta ad avere risultati differenti, in questo caso i risultati sono espressi sotto forma di temperatura di chiusura del bilancio.

$$rad = rad + drad$$

$$RET(rad + drad)$$

La calibrazione è stata fatta per tentativi andando a variare manualmente il valore della perturbazione $drad$ [W/m^2].

Si riportano ora i risultati ottenuti dall'assimilazione con questa metodologia. Come nei casi precedenti il metodo inizialmente testato su suolo vegetato per poi estendere l'analisi anche al suolo nudo.

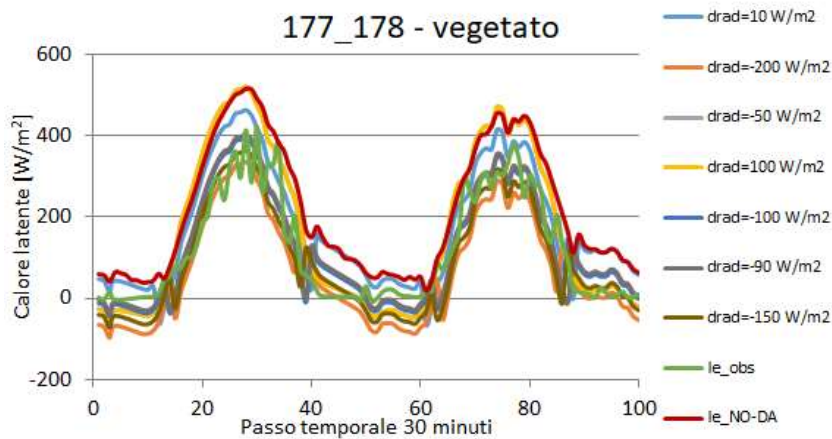


Figura 8.2-1 Confronto tra il calore latente osservato e quello prima e dopo il processo di assimilazione. Giorni 177-178.

Ciò che si può intuire dal grafico in Figura 8.2-1 è che la variazione della radiazione in ingresso al bilancio idrologico determina una variazione del calore latente. È interessante però notare che la variazione di quest'ultimo sia fissa, cioè non presenti più, come per il filtro di Kalman, un aggiornamento più marcato inizialmente che tende a diminuire con l'aumento degli step di assimilazione. Lo scostamento dal valore osservato si mantiene pressoché costante.

Analoga considerazione si può fare per la temperatura (Figura 8.2-2) dove addirittura questo fenomeno risulta essere più marcato.

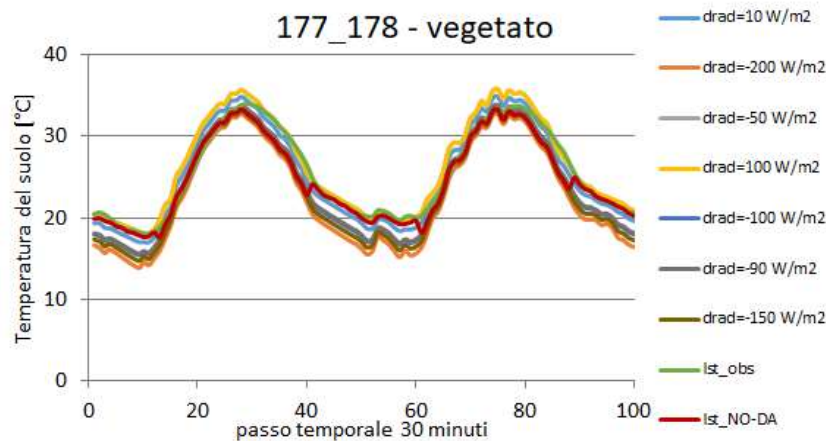


Figura 8.2-2 Confronto tra la temperatura del suolo osservata e quella prima e dopo il processo di assimilazione. Giorni 177-178.

Per quanto riguarda l'umidità del suolo (Figura 8.2-3) invece si conferma il fatto che la variazione impulsiva delle forzanti meteo non influisca sul suo andamento, in quanto risulta più influenzata da i parametri del suolo. Va comunque detto che l'umidità ha un tempo di variazione ben più lungo delle 48 ore simulate, quindi anche il limitare l'analisi a questi tempi influisce sulla piccola variazione di questa variabile.

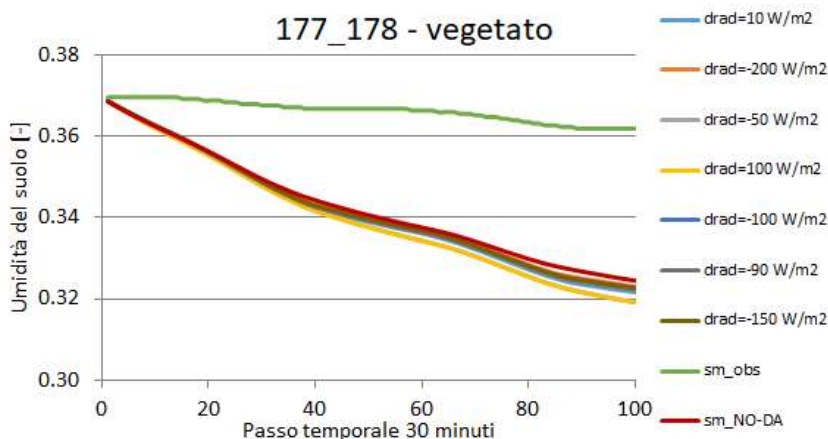


Figura 8.2-3 Confronto tra l'umidità del suolo osservata e quella prima e dopo il processo di assimilazione. Giorni 177-178.

Di seguito si riportano i risultati per altre date, sia per suolo vegetato che per suolo nudo. I commenti e le considerazioni sono analoghi a quelli fatti per i giorni 177-178 precedentemente riportati.

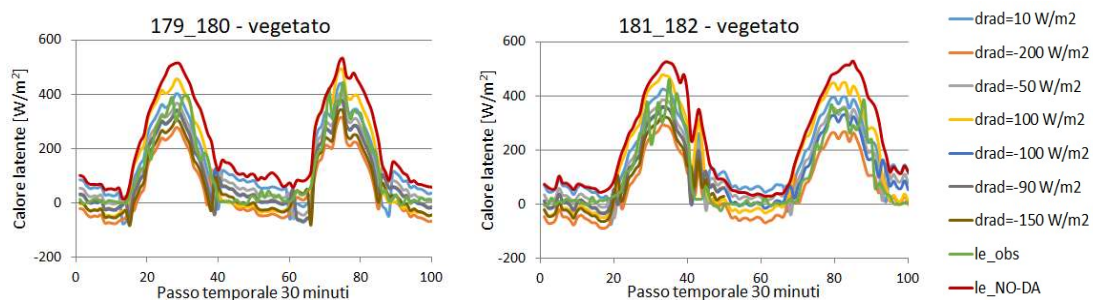


Figura 8.2-4 Confronto tra il calore latente osservato e quello prima e dopo il processo di assimilazione. Giorni 179-180 (sinistra) 181-182 (destra).

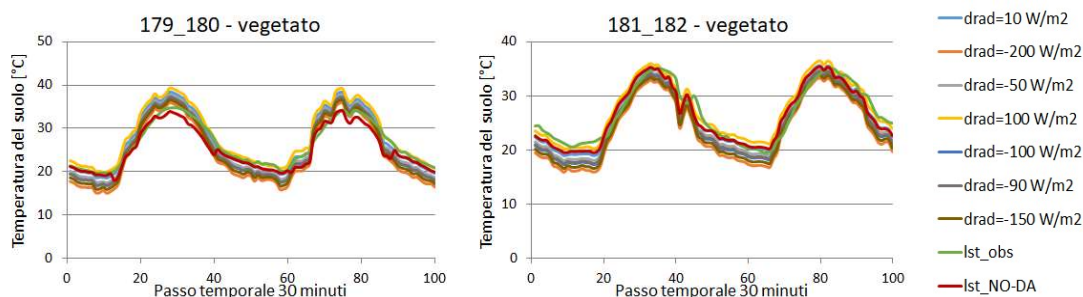


Figura 8.2-5 Confronto tra la temperatura del suolo osservata e quella prima e dopo il processo di assimilazione. Giorni 179-180 (a sinistra) 181-182 (a destra).

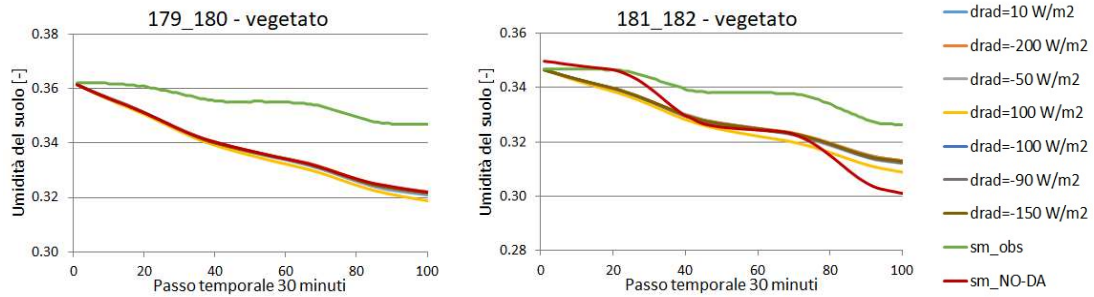


Figura 8.2-6 Confronto tra l'umidità del suolo osservata e quella prima e dopo il processo di assimilazione. Giorni 179-180 (a sinistra) 181-182 (a destra).

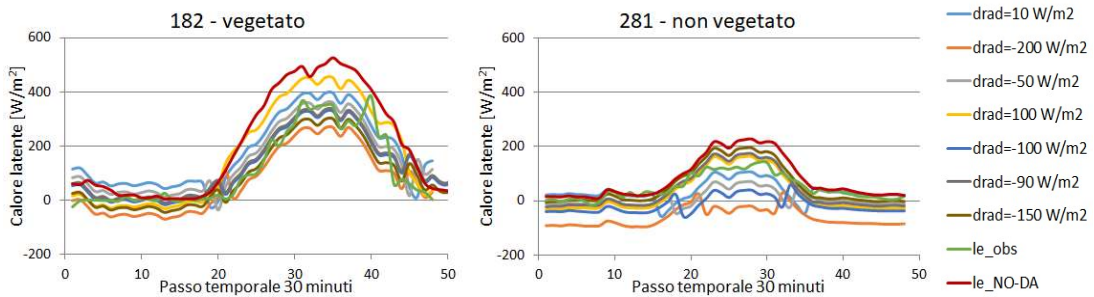


Figura 8.2-7 Confronto tra il calore latente osservato e quello prima e dopo il processo di assimilazione. Giorno 182 (sinistra) 281 (destra).

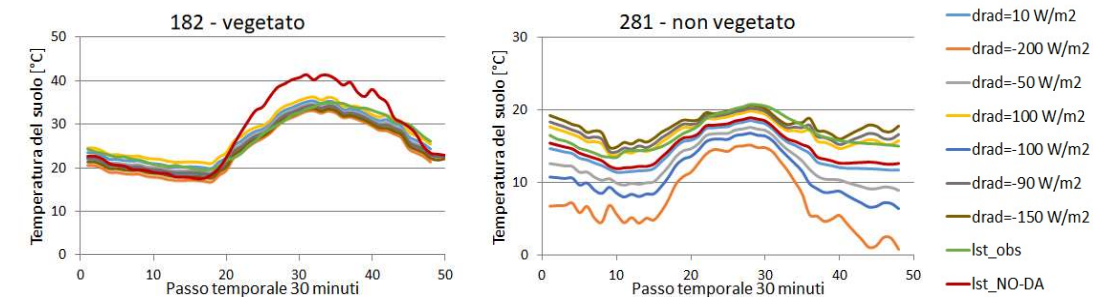


Figura 8.2-8 Confronto tra la temperatura del suolo osservata e quella prima e dopo il processo di assimilazione. Giorno 182 (sinistra) 281 (destra).

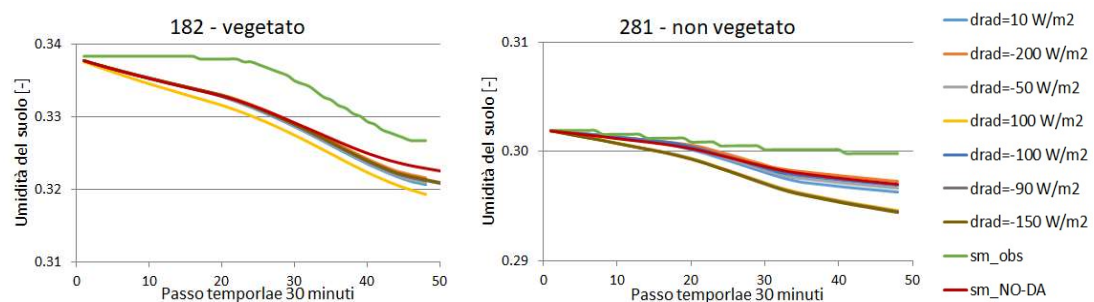


Figura 8.2-9 Confronto tra l'umidità del suolo osservata e quella prima e dopo il processo di assimilazione. Giorno 182 (sinistra) 281 (destra).

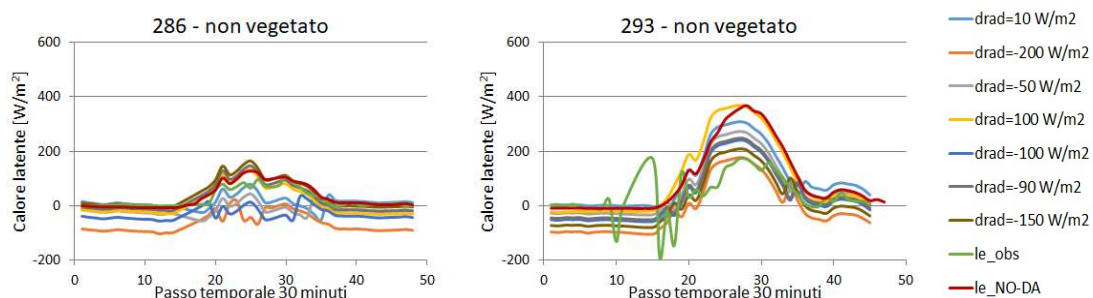


Figura 8.2-10 Confronto tra il calore latente osservato e quello prima e dopo il processo di assimilazione. Giorno 286 (sinistra) 293 (destra).

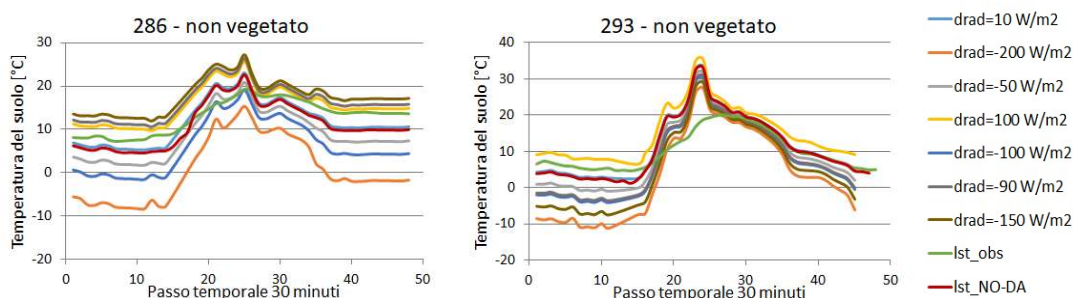


Figura 8.2-11 Confronto tra la temperatura del suolo osservata e quella prima e dopo il processo di assimilazione. Giorno 286 (sinistra) 293 (destra).

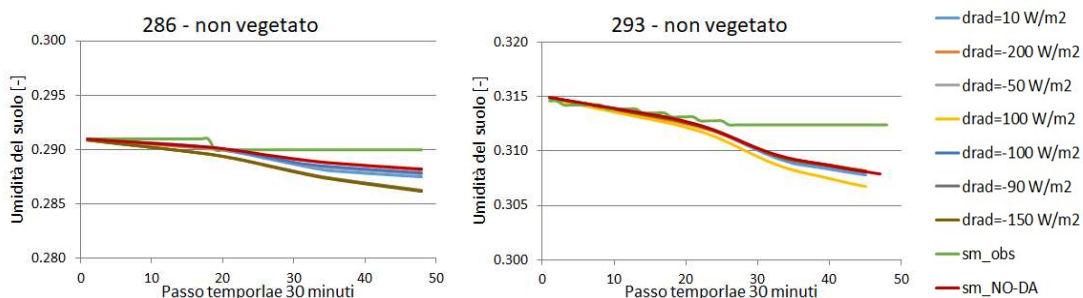


Figura 8.2-12 Confronto tra l'umidità del suolo osservata e quella prima e dopo il processo di assimilazione. Giorno 286 (sinistra) 293 (destra).

Si sono calcolati degli indici statistici (scarto quadratico medio, errore medio e deviazione standard) sul calore latente che sono rappresentativi delle varie simulazioni, al fine di valutare anche quantitativamente quale sia il set di parametri del filtro di Kalman che fornisce i risultati migliori.

Tabella 8.2-1 Indici calcolati sul calore latente al variare della perturbazione della radiazione. Quando ci sono più giorni, l'indice è riferito al periodo sottolineato. Suolo vegetato.

Tabella per drad=-100 W/m ²				
Giorno	RMSE [W/m ²]	ME [W/m ²]	S [W/m ²]	
177	61	-	-3	-
179	62	-	20	-
<u>181-182</u>	58	-	11	-
<u>181-182</u>	48	-	-9	-
<u>181-182</u>	53	-	1	-
182	57	-	-8	-

Tabella per variazioni di drad del +110% (drad=10 W/m ²)						Tabella per variazioni di drad del -100% (drad=-200 W/m ²)							
Giorno	RMSE [W/m ²]		ME [W/m ²]		S [W/m ²]		Giorno	RMSE [W/m ²]		ME [W/m ²]		S [W/m ²]	
177	89	46%	-56	1866%	69	13%	177	77	26%	43	-1333%	65	6%
179	71	14%	-28	40%	66	11%	179	90	44%	67	238%	61	2%
<u>181-182</u>	76	31%	-43	290%	63	9%	<u>181-182</u>	85	48%	61	439%	61	7%
<u>181-182</u>	77	60%	-58	572%	59	572%	<u>181-182</u>	69	43%	44	388%	45	412%
<u>181-182</u>	76	44%	-50	3892%	58	9%	<u>181-182</u>	78	46%	53	3868%	56	4%
182	82	45%	-58	663%	59	3%	182	75	31%	46	475%	60	5%

Tabella per variazioni di drad del +50% (drad=-50 W/m ²)						Tabella per variazioni di drad del +200% (drad=100 W/m ²)							
Giorno	RMSE [W/m ²]		ME [W/m ²]		S [W/m ²]		Giorno	RMSE [W/m ²]		ME [W/m ²]		S [W/m ²]	
177	117	91%	-77	2563%	89	44%	177	117	91%	-77	2563%	88	43%
179	58	-6%	-4	-80%	58	-2%	179	69	10%	-21	5%	66	11%
<u>181-182</u>	60	4%	-11	0%	58	1%	<u>181-182</u>	92	59%	-36	227%	86	51%
<u>181-182</u>	57	19%	-31	251%	31	251%	<u>181-182</u>	91	90%	-53	510%	54	510%
<u>181-182</u>	59	10%	-21	1653%	67	26%	<u>181-182</u>	92	72%	-44	3440%	70	31%
182	65	14%	-30	291%	56	-2%	182	98	72%	-53	599%	85	49%

Tabella per variazioni di drad del +10% (drad=-90 W/m ²)						Tabella per variazioni di drad del +50% (drad=-150 W/m ²)							
Giorno	RMSE [W/m ²]		ME [W/m ²]		S [W/m ²]		Giorno	RMSE [W/m ²]		ME [W/m ²]		S [W/m ²]	
177	62	1%	-9	200%	62	0%	177	62	2%	19	533%	60	-2%
179	61	-1%	18	-9%	59	-1%	179	75	21%	46	135%	60	1%
<u>181-182</u>	57	-1%	6	-50%	57	0%	<u>181-182</u>	68	18%	33	191%	60	5%
<u>181-182</u>	49	3%	-14	65%	14	65%	<u>181-182</u>	51	7%	19	111%	20	124%
<u>181-182</u>	53	0%	-4	425%	53	0%	<u>181-182</u>	60	14%	26	1874%	55	2%
182	58	2%	-13	75%	57	0%	182	60	6%	21	163%	57	0%

Tabella 8.2-2 Indici calcolati sul calore latente al variare della perturbazione della radiazione. Suolo nudo.

Tabella per drad=-100 W/m ²						
Giorno	RMSE [W/m ²]		ME [W/m ²]		S [W/m ²]	
281	72	-	16	-	35	-
286	68	-	59	-	31	-
293	73	-	-6	-	73	-

Tabella per variazioni di drad del +110% (drad=10 W/m ²)						Tabella per variazioni di drad del -100% (drad=-200 W/m ²)							
Giorno	RMSE [W/m ²]		ME [W/m ²]		S [W/m ²]		Giorno	RMSE [W/m ²]		ME [W/m ²]		S [W/m ²]	
281	38	-47%	112	601%	28	-20%	281	115	61%	42	161%	30	-13%
286	34	-49%	14	-76%	23	-28%	286	93	38%	91	54%	31	-1%
293	97	33%	-61	880%	76	3%	293	84	16%	43	681%	73	0%

Tabella per variazioni di drad del +50% (drad=-50 W/m ²)						Tabella per variazioni di drad del +200% (drad=100 W/m ²)							
Giorno	RMSE [W/m ²]		ME [W/m ²]		S [W/m ²]		Giorno	RMSE [W/m ²]		ME [W/m ²]		S [W/m ²]	
281	51	-29%	22	37%	30	-14%	281	37	-49%	66	310%	30	-15%
286	52	-24%	41	-30%	25	-19%	286	28	-59%	12	-80%	34	8%
293	81	12%	-34	437%	75	2%	293	125	72%	-71	1044%	104	42%

Tabella per variazioni di $drad$ del +10% ($drad = -90 \text{ W/m}^2$)						Tabella per variazioni di $drad$ del +50% ($drad = -150 \text{ W/m}^2$)							
Giorno	RMSE [W/m^2]	ME [W/m^2]	S [W/m^2]	RMSE [W/m^2]	ME [W/m^2]	S [W/m^2]	RMSE [W/m^2]	ME [W/m^2]	S [W/m^2]	RMSE [W/m^2]	ME [W/m^2]	S [W/m^2]	
281	32	-56%	10	-37%	30	-13%	281	31	-56%	-8	-50%	31	-12%
286	26	-62%	1	-99%	26	-17%	286	31	-54%	-17	-71%	26	-16%
293	74	1%	-12	87%	74	0%	293	76	4%	16	166%	75	2%

Riassunto analisi

Per quanto riguarda l'analisi di suolo vegetato, come mostrano i grafici e le tabelle, la perturbazione che fornisce i valori migliori per il calore latente è $drad = -100 \text{ [W/m}^2\text{]}$.

Invece per l'analisi di suolo non vegetato come mostrano i grafici e le tabelle la perturbazione che fornisce i valori migliori per il calore latente pare essere $drad = 100 \text{ [W/m}^2\text{]}$. Analizzando il giorno 293 si nota come i risultati migliori tornano ad essere quelli con $drad = -100 \text{ [W/m}^2\text{]}$. Ciò è spiegabile analizzando il profilo della radiazione. Nei giorni 281 e 286 la radiazione nell'arco giornata risulta essere minore (con picco di 320 W/m^2) rispetto al giorno 293 (picco di circa 700 W/m^2) che ha valori più simili a quelli del periodo di suolo vegetato (picchi di 900 W/m^2) questo spiega i risultati ottenuti.

In conclusione questo metodo, anche se sicuramente meno macchinoso e più rapido, non sortisce effetti così buoni come il filtro di Kalman. Come prima cosa perché la correzione risulta essere costante per tutto il periodo analizzato e in aggiunta si ha una forte dipendenza dalla radiazione del giorno.

CONCLUSIONI

Questo studio è nato con lo scopo di sviluppare uno strumento operativo per la previsione in tempo reale delle esigenze di irrigazione delle colture al fine di supportare la gestione parsimoniosa dell'acqua e ottimizzare la pianificazione dell'irrigazione fornendo, sia in modo statico che dinamico in tempo reale, il comportamento dell'umidità del suolo ad alte risoluzioni spaziali e temporali. A tal proposito è stato implementato un filtro di Kalman.

Nel corso dell'elaborato è stato mostrato come attraverso il processo di assimilazione della temperatura del suolo è stato possibile condurre una calibrazione dei parametri del suolo, la modifica di questi ovviamente influisce sulle variabili del modello idrologico, va da sé che l'utilizzo di parametri corretti per la modellazione idrologica permetta una più accurata stima delle variabili del modello. A questa considerazione si aggiungono quelle emerse dai casi di aggiornamento dello stato del sistema (calore latente, calore dal suolo) con l'assimilazione della temperatura superficiale del suolo, si è infatti notato come, con la giusta combinazioni di parametri del filtro di Kalman, è possibile stimare in maniera corretta i flussi del bilancio di energia. La conoscenza ad esempio del flusso di calore latente risulta fondamentale per valutare l'evapotraspirazione e quindi ottimizzare la pianificazione dell'irrigazione. Di estrema rilevanza anche ciò che è emerso dall'aggiornamento del sistema umidità del suolo attraverso l'assimilazione della stessa umidità il quale ha mostrato anche qui ottimi segnali dal punto di vista della stima del contenuto di acqua nel suolo, altra informazione fondamentale per la gestione della risorsa idrica.

È possibile dunque concludere che la procedura di assimilazione attraverso il filtro di Kalman può aiutare a correggere le stime dei modelli idrologici permettendo un'analisi migliore e di conseguenza delle scelte più appropriate nel campo della gestione della risorsa idrica come mostrano i risultati ottenuti assimilando l'umidità del suolo.

Analogamente al filtro di Kalman è stata testata una metodologia di assimilazione semplificata, assimilando la temperatura con il calore latente che non ha sortito i risultati sperati, permettendo di

concludere che anche il metodo di assimilazione deve essere scelto in maniera attenta assicurandosene il funzionamento.

L'instabilità in un sistema di assimilazione come il filtro di Kalman è data senz'altro dal numero di osservazioni disponibili nel tempo. Nel corso della tesi si è dunque analizzata questa problematica. Si è visto che per processi con uno sviluppo breve, come può essere quello del calore latente, è necessario assimilare molto di frequente, mentre per variabili con uno sviluppo più lento come l'umidità del suolo si è notato che bastano un paio di osservazioni durante la giornata per rappresentare con buona approssimazione l'andamento reale della variabile. Il diverso passo temporale fra i processi di aggiornamento può far sembrare che dipendano da fattori differenti quando invece sono legati dallo stesso processo dei bilanci di massa ed energia.

In questa tesi non è stato affrontato il problema della distribuzione delle osservazioni nello spazio, si riservano perciò ulteriori studi che vedono per esempio l'utilizzo di immagini da satellite in modo da avere le osservazioni di parametri o variabili distribuite su una certa area e da lì attraverso l'assimilazione dei dati aggiornare i diversi valori.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- [1] Anderson, M. C., J. M. Norman, J. R. Mecikalski, R. D. Torn, W. P. Kustas, e J. B. Basara. «A Multiscale Remote Sensing Model for Disaggregating Regional Fluxes to Micrometeorological Scales.» *Journal of Hydrometeorology* 5 (2004): 343-363.
- [2] Bastiaanssen, W. G. M., M. Menenti, R. A. Feddes, e A. A. M. Holtslag. «A Remote Sensing Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL) 1. Formulation.» *Journal of Hydrology* 212-213 (1998): 198-212.
- [3] Blöschl, G., e M. Sivapalan. «Scale Issues in Hydrological Modelling: A Review.» *Hydrological Processes* 9 (1995): 251-290.
- [4] Brockwell, P., e R. Davis. «Time Series: Theory and.» *Springer-Verlag*, 1987.
- [5] Cammalleri, C., e G. Ciruolo. «State and parameter update in a coupled energy/hydrologic balance model using ensemble Kalman filtering.» *Journal of Hydrology* 416-417 (January 2012): 171-181.
- [6] Corbari, C. «Energy water balance and land surface temperature from satellite data for evapotranspiration control.» PhD thesis, Politecnico di Milano, Milan, Italy, 2010.
- [7] Corbari, C., G. Ravazzani, J. Martinelli, e M. Mancini. «Elevation based correction of snow coverage retrieved from satellite images to improve model calibration.» *Hydrology and Earth System Sciences* 13 (2009): 639-649.
- [8] Corbari, C., H. Hoeschi, G. Ravazzani, e M. Mancini. «Land Surface Temperature from Remote Sensing and from an Energy Water Balance Model for Irrigation Management.» *Options Méditerranéennes, Series A (Mediterranean Seminars)*. Bari, 2008. 223-234.
- [9] Corbari, Chiara. «Smart Irrigation monitoring and forecasting using satellite and hydro-meteorological modelling.» *Ciclo di Seminari della Commissione Scientifica DICA - IV serie*. Milano, 2017.
- [10] Corbari, Chiara, Giovanni Ravazzani, e Marco Mancini. «A Distributed Thermodynamic Model for Energy and Mass Balance Computation: FEST-EWB.» *Hydrological Process* 25 (2011): 1443-1452.

- [11] Corbari, Chiara, J. A. Sobrino, M. Mancini, e V. Hidalgo. «Land surface temperature representativeness in a heterogeneous area through a distributed energy-water balance model and remote sensing data.» 2010.
- [12] Corbari, Chiara, José A. Sobrino, Marco Mancini, e Victoria Hidalgo. «Mass and energy flux estimates at different spatial resolution in a heterogeneous area through a distributed energy-water balance model and remote-sensing data.» *International Journal of Remote Sensing*, 2012.
- [13] Courtier, F. Bouttier and P. «Data assimilation concepts and methods March 1999.» 2001.
- [14] Crow, W. T., and D. Ryu. "A new data assimilation approach for improving runoff prediction using remotely-sensed soil moisture retrievals." 2009.
- [15] Dooge, J. C. I. «Looking for hydrologic laws.» *Water Resources Research* 22, n. 9 (1986): 46-58.
- [16] Famiglietti, J. S., e F. Wood. «Multiscale Modelling of Spatially Variable Water and Energy Balance Processes.» *Water Resources Research* 30 (1994): 3061-78.
- [17] Galanis, George, e Manolis Anadranistakis. «A one-dimensional Kalman filter for the correction of near surface temperature forecasts.» *Meteorol. Appl.* 9 (2002): 437-441.
- [18] Gorenburg, I.P., D. McLaughlin, e D. Entekhabi. «Scale-recursive estimation of precipitation data.» *Adv. Water Res.* 24, n. 9-10 (2000): 941-953.
- [19] Gurtz, J., K. Jasper, e H. Lang. «Advanced flood forecasting in Alpine watershed by coupling meteorological and forecasts with a distributed hydrological model.» *Journal of Hydrology* 267 (2002): 40-52.
- [20] Jacobs, A.F.G., B.G. Heusinkveld, e A.A.M. Holtslag. «Towards closing the energy surface budget of a mid-latitude grassland.» *Boundary Layer Meteorology* 126 (2008): 125-136.
- [21] Jarvis, P.G. «The interpretation of the variations in leaf water potential and stomatal conductance found in canopies in the field.» *Philosophical Transactions of the Royal Society of London* 273 (1976): 593-610.
- [22] Kalma, J. D., T. R. McVicar, e M. F. McCabe. «Estimating Land Surface Evaporation: A Review of Methods Using Remotely Sensed Surface Temperature Data.» *Surveys in Geophysics* 29 (2008): 421-469.
- [23] Kalman, R.E. «A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems.» *Trans. ASME* 82 (1960): 35-45.
- [24] Kalman, R.E., e R.S., Bucy. «New results in linear filtering and prediction problems.» *Trans. ASME* 83 (1961): 95-108.
- [25] Kustas, W. P., F. Li, T. J. Jackson, J. H. Prueger, J. I. Macpherson, e M. Wolde. «Effects of Remote Sensing Pixel Resolution on Modelled Energy Flux Variability of Croplands in Iowa.» *Remote Sensing of Environment* 92 (2004): 535-547.

-
- [26] Lahoz, William, Boris Khatkov, e Menard Richard. *Data assimilation - Making sense of observation*. William Lahoz, 2010.
- [27] Lakshmi, Venkataraman. «A simple surface temperature assimilation scheme for use in land surface models.» *Water Resources Research* 36, n. 12 (December 2000): 3687-3700.
- [28] Liang, X., Lettenmaier, D. P., E. F. Wood, e S. J. Burges. «A Simple Hydrologically Based Model of Land Surface Water and Energy Fluxes for General Circulation Models.» *Journal of Geophysical Research* 99 (1994): 415-428.
- [29] Luo, L., et al. «Validation of the North American Land Data Assimilation System (NLDAS) retrospective forcing over the southern Great Plains.» 108, n. D22 (2003): 8843.
- [30] Male, D.H., e R.J. Granger. «Snow surface energy exchange.» *Water Resources Research* 17, n. 3 (1981): 609-627.
- [31] Mancini, M. «La modellazione distribuita della risposta idrologica: effetti della variabilità spaziale e della scala di rappresentazione del fenomeno dell'assorbimento.» PhD dissertation, Politecnico di Milano, Milan, 1990.
- [32] Mancini, M., J. Martinelli, e G. Ravazzani. «A distributed model based on energy balance equation for the simulation of hydrologic cycle at the basin scale.» In *Rendiconti Cremonesi - Il contributo del Politecnico di Milano alla Conoscenza delle Dinamiche Evolutive nel Territorio di Cremona*, 201-213. Milan: Paolillo PL, 2005.
- [33] Masseroni, Daniele, Giovanni Ravazzani, Chiara Corbari, e Marco Mancini. «Correlazione tra la dimensione del footprint e le variabili esogene misurate da stazioni eddy covariance in Pianura Padana, Italia.» *Italian Journal of Agrometeorology*, 2011.
- [34] McCumber, M.C., e R.A. Pielke. «Simulation of the effects of surface fluxes of heat and moisture in a mesoscale numerical model.» *Journal of Geophysical Research* 86, n. C10 (1981).
- [35] McLaughlin, D.B. «Recent developments in hydrologic data assimilation.» 1985: 977-984.
- [36] Meyers, T.P., e S.E. Hollinger. «An assessment of storage terms in the surface energy balance of maize and soybean.» *Agricultural and Forest Meteorology* 125 (2004): 105-115.
- [37] Montaldo, N., e J.D. Albertson. «On The Use of the Force-Restore SVAT model formulation for stratified soils.» *Journal of Hydrometeorology* 2, n. 6 (2001): 571-578.
- [38] Noihlan, J., e S. Planton. «A Simple Parameterization of Land Surface Processes for Meteorological Models.» *Monthly Weather Review* 117 (1989): 536-549.
- [39] Norman, J. M., W. P. Kustas, e K. S. Humes. «Source Approach for Estimating Soil and Vegetation Energy Fluxes in Observations of Directional Radiometric Surface Temperature.» *Agricultural and Forest Meteorology* 77 (1995): 263-293.
- [40] Parlange, M.B., J.D. Albertson, W.E. Eichinger, A.T. Cahill, e T.J. Jackson. «Evaporation: use of fast-response turbulence sensors, Raman Lidar, and passive microwave remote sensing.» In *Vadose Zone Hydrology: Cutting Across Disciplines*, di Jan W. Hopmans e Marc B. Parlange, 260-316. Oxford UK: Parlange MB, Hopmans JW (eds.), 1999.

- [41] Peters-Lidard, C.D.P., E. Blackburn, Liang, X., e E.F. Wood. «The effect of soil thermal conductivity parameterization on surface energy fluxes and temperatures.» *Journal of the Atmospheric Sciences* 55 (1998): 1209-1224.
- [42] Qin, C., Y. Jia, Z. Su, Z. Zhou, Y. Qiu, e S. Suhui. «Integrating remote sensing information into a distributed hydrological model for improving water budget predictions in large-scale basins through data assimilation.» 8, n. 7 (2008): 4441-4465.
- [43] Rabuffetti, D., G. Ravazzani, C. Corbari, e M. Mancini. «Verification of operational Quantitative Discharge Forecast (QDF) for a regional warning system - the AMPHORE case studies in the upper Po River.» *Natural Hazards and Earth System Sciences* 8 (2008): 8: 161-173.
- [44] Ravazzani, G., D. Rabuffetti, C. Corbari, e M. Mancini. «Validation of FEST-WB, a continuous water balance distributed model for flood simulation.» *Proceedings of XXXI Italian Hydraulic and Hydraulic*. Perugia, 2008.
- [45] Reichel, Rolf H., Dara Entekhabi, e Dennis B. McLaughlin. «Downscaling of radio brightness measurements for soil moisture estimation: A four-dimensional variational data assimilation approach.» 2001.
- [46] Roerink, G., Su, Z., e M. Menenti. «S-SEBI: A Simple Remote Sensing Algorithm to Estimate the Surface Energy Balance.» *Physics and Chemistry of the Earth (B)* 25 (2000): 147-157.
- [47] Sedlar, J., e R. Hock. «Testing longwave radiation parameterizations under clear and overcast skies at Storglaciaren.» *The Cryosphere* 3 (2009): 75-84.
- [48] Sivapalan, M., e E. F. Wood. «Effect of Scale on the Infiltration Response in Spatially Variable Soils.» *In Scale Problems in Hydrology* (V. K. Gupta, I. Rodriguez-Iturbe, E. F. Wood, and D. Reidel), 1986: 81-106.
- [49] Su, Z. «The Surface Energy Balance System (SEBS) for Estimation of Turbulent Heat Fluxes.» *Hydrology and Earth System Sciences* 6 (2002): 85-100.
- [50] Su, Z., H. Pelgrum, e M. Menenti. «Aggregation Effects of Surface Heterogeneity in Land Surface Processes.» *Hydrology and Earth System Sciences* 3 (199): 549-563.
- [51] Sun, S.F. «Moisture and heat transport in a soil layer forced by atmospheric conditions.» M.Sc. Thesis, University of Connecticut, Storrs, CT., 1982.
- [52] Thom, A.S. «Momentum, mass and heat exchange of plant communities.» In *Vegetation and Atmosphere*, 57-110. London: Monteith JL (ed), 1975.
- [53] Wood, E. F. «Scale Analyses for Land Surface Hydrology.» *In Scale Dependence and Scale Invariance in Hydrology* (G. Sposito), 1998: 1-29.
- [54] Wood, E. F. «Scaling Behaviour of Hydrologic Fluxes and Variables: Empirical Studies Using a Hydrological Model and Remote Sensing Data.» *Hydrological Processes* 9 (1995): 331-346.