

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI NAPOLI “FEDERICO II”

DOTTORATO DI RICERCA IN

**VALORIZZAZIONE E GESTIONE DELLE RISORSE AGRO-
FORESTALI**

XXVIII CICLO

Salvatore Falanga Bolognesi

**Caratterizzazione dei Paesaggi Agricoli Tradizionali italiani mediante
modelli eco-idrologici e telerilevamento**

Tesi per il conseguimento del titolo di
Dottore di Ricerca

Coordinatore e Tutor:
Prof. Ing. Guido D’Urso

PORTICI, APRILE 2016

A Lisa

Abstract

L'ecoidrologia è la scienza fondamentale per la comprensione del legame esistente tra le dinamiche degli ecosistemi e il ciclo dell'acqua. L'obiettivo del presente lavoro di ricerca è la caratterizzazione da un punto di vista quantitativo dei processi eco-idrologici che regolano gli scambi di massa e di energia nel sistema suolo-pianta-atmosfera all'interno dei PAT (Paesaggi Agricoli Tradizionali) delle sottosezioni Ecoregionali d'Italia, mettendo così in luce l'impatto che il loro comportamento eco-idrologico esercita sulla multifunzionalità di tali sistemi (dalla produzione agraria al grado di protezione del territorio) e definendo alcuni "indicatori eco-idrologici" per le tipologie di paesaggio analizzate. Lo studio, condotto nell'ambito del progetto PRIN 2010-2011 sui "Paesaggi Agrari Tradizionali d'Italia", ha riguardato l'estrazione di due tipologie di indicatori; un primo gruppo, ottenuto da dati di Osservazione della Terra (serie multi temporale con frequenza complessiva di 8 giorni dell'indice di vegetazione NDVI composite a 16 giorni, derivato dal sensore MODIS TERRA ed AQUA) per caratterizzare la dinamica vegetazionale (vigore delle coperture vegetali, variazioni temporali (inter-annuali), indici bio-metrici caratteristici, stabilità nel tempo di particolari indici di sviluppo, statistiche vegetazionali). Un secondo gruppo di indicatori è stato derivato dall'applicazione di un modello eco-idrologico, per la stima dei flussi di evaporazione e di traspirazione (stimati mediante l'applicazione del modello P-M FAO56), della produzione primaria lorda (GPP) e netta (NPP), dell'insorgenza di condizioni di stress idrico e del contenuto idrico nel suolo (*soil water content*, SWC). Il modello eco-idrologico prende in conto come input forcing le condizioni di copertura vegetale (derivanti dal primo gruppo di eco-indicatori), il dato meteorologico (derivato da dati di ri-analisi ECMWF ERA-Interim), le caratteristiche idrauliche del suolo, derivate da semplici funzioni di pedo-trasferimento (PTF) applicate ai prodotti *Topsoil physical properties* e *Soil Organic Carbon Content* dell'European Soil Data Centre (ESDAC). Alcuni parametri del modello sono stati derivati dal confronto con misure sperimentali nei siti di Castelvetro (Oliveto in provincia di Trapani, PAT) e Brisighella (Actinidia in provincia di Ravenna, non-PAT), Infine un ultimo

indicatore è stato valutato con riferimento ai processi di erosione del suolo, in base al modello “RUSLE 2015” del JRS. I risultati ottenuti con risoluzione temporale giornaliera per il periodo 2003-2015 sono stati aggregati al fine di sintetizzare in maniera più efficace la risposta dei PAT nell’ambito dei processi eco-idrologici con lo scopo di migliorare la classificazione e la caratterizzazione dei PAT, nonché per individuare strategie di pianificazione e gestione del paesaggio.

Parole chiave: Eco-idrologia, Modelli di Simulazione, Osservazione della Terra.

SOMMARIO

Indice delle figure	3
Indice delle tabelle	10
1 Introduzione.....	1
1.1 Il paesaggio agrario ed il ruolo dei PAT	1
1.2 Scopo della tesi.....	4
1.3 Outline.....	7
2 Metodi.....	9
2.1 Telerilevamento.....	9
2.1.1 Sistema piattaforma e sensore.....	10
2.2 Fenologia delle colture e telerilevamento	12
2.2.1 Concetti e definizioni.....	12
2.2.2 Utilizzo dell'indice NDVI.....	13
2.2.3 Scala spaziale e temporale	14
2.2.3.1 MODIS Vegetation Index Compositing Technique (CV-MVC).....	15
2.3 Smoothing e gap-filling delle serie temporali	17
2.3.1 Concetti e definizioni	17
2.3.2 Whittaker smoother.....	17
2.3.3 Osservazioni in merito alle tecniche di <i>smoothing</i> e <i>gap filling</i> di dati.....	19
2.3.4 Le metriche fenologiche derivate dall'NDVI	20
2.3.5 Approcci alla determinazione degli eventi fenologici connessi alla stima della LSP ..	23
2.4 I modelli climatici e i dati di Ri-analisi.....	26
2.4.1 Introduzione	26
2.4.2 Dati di Ri-analisi ECMWF ERA-Interim	27
2.5 Modello di simulazione sviluppato per la stima di eco-indicatori da processo/simulazione ..	28
3 Materiali.....	35
3.1 Dati acquisiti.....	35
3.1.1 Dati Raster.....	35
3.1.2 Dati vettoriali	36
3.1.3 Dati di validazione	37
3.2 Identificazione geografica di areali riguardanti i PAT	38
3.2.1 Metodologia adottata per la selezione poligoni PAT all'interno delle sottosezioni Ecoregionali d'Italia	38
3.3 Elaborazione dei prodotti indice di vegetazione derivante da piattaforma satellitare MODIS TERRA e AQUA.....	41

3.3.1	Smoothing dell'indice di vegetazione NDVI: analisi e scelta dei parametri lamda e n-iter per l'algoritmo Whittaker-Hederson.....	42
3.4	Trend delle coperture vegetali.....	51
3.5	Variazioni temporali (inter-annuali) delle coperture vegetali.....	51
3.6	Indici bio-metrici caratteristici (Land Surface Phenology, LSP).....	52
3.7	Elaborazione dei dati climatici.....	52
3.8	Derivazione dell'evapotraspirazione di riferimento.....	55
3.9	Caratterizzazione dei parametri biofisici delle colture.....	57
3.9.1	Albedo.....	57
3.9.2	Derivazione del LAI dall'indice NDVI mediante calibrazione della legge di Lambert-Beer.....	62
3.10	Derivazione dell'evapotraspirazione potenziale.....	65
3.11	Caratterizzazione fisica dei suoli all'interno dei PAT.....	65
3.12	Stima della perdita di suolo per erosione idrica.....	71
3.13	Stima del deficit/surplus idrico per colture non irrigue o deficit/surplus potenziale.....	74
3.14	Calibrazione del Modello ed estrazione degli eco-indicatori derivanti da processo.....	74
4	Risultati.....	77
4.1	Ecoindicatori derivanti da dati di osservazione della Terra.....	77
4.1.1	Trend delle coperture vegetali.....	77
4.1.2	Variazioni temporali (intra-annuali ed inter-annuali) delle coperture vegetali.....	83
4.1.3	Indici bio-metrici caratteristici (Land Surface Phenology, LSP).....	89
4.2	Ecoindicatori derivanti da processi/simulazioni.....	93
4.2.1	Deficit potenziale.....	93
4.2.2	Perdita di suolo per erosione idrica stimata dal modello RUSLE2015.....	95
4.2.3	Produzione primaria lorda (GPP), produzione primaria netta (NPP), crop water stress index (CWSI*), soil water content (SWC).....	98
4.3	Conclusioni.....	105
Appendice A: variabilità dei singoli PAT all'interno delle singole sottosezioni di una medesima Regione: confronto tra medie e deviazioni standard derivate dalle serie NDVI dei punti selezionati. .		111
Appendice B: Produzione primaria lorda (GPP), produzione primaria netta (NPP), crop water stress index (CWSI*), soil water content (SWC) per i PAT all'interno di alcune sottosezioni Ecoregionali.		118
5	Bibliografia.....	121
Ringraziamenti.....		130

Indice delle figure

Figura 1 – Schema a blocchi delle connessioni tra i dati utilizzati per ciascuna delle grandezze considerate per derivare gli indicatori appartenenti alle due tipologie (Osservazioni e Processi / Simulazioni).....	7
Figura 2-1 - I componenti principali del sistema di telerilevamento.	9
Figura 2-2 - Illustrazione di una stessa area a diverse risoluzioni spaziali.	11
Figura 2-3 – Illustrazione di una stessa area a diverse risoluzioni radiometriche.	11
Figura 2-4 - Diagramma di flusso e metodologia per l'algoritmo MODIS <i>Vegetation Index Compositing</i>	16
Figura 2-5 – Risaia “Battaglia”, anno 2003- Andamento dell’indice spettrale NDVI originale (tratto-simbolo) e filtrato (linea rossa continua) con indicazione delle metriche fenologiche di base (punti in giallo).	22
Figura 2-6 – Risaia “Battaglia”, anno 2003 –Andamento dell’indice spettrale NDVI filtrato con indicazione (figura a sinistra) dei valori di NDVI (N) e del relativo tempo (T) connessi alle metriche fenologiche minimo (Min), start of season (SOS), massimo (Max), end of season (EOS), amplitudine (AMP) e duration (DUR):Nella figura a sinistra sono indicate le metriche fenologiche short integrated NDVI (SIN) e Large integrated NDVI (LIN).	22
Figura 2-7 – Modello eco-idrologico: rappresentazione dei tre sotto modelli e delle relative variabili e costanti.	28
Figura 2-8 – Schema concettuale dei processi rappresentati dal sotto modello che simula lo stato idrico del suolo a scala giornaliera (flussi verticali nel <i>bucket model</i>).	29
Figura 2-9 – Perdite nel <i>Bucket model</i> per effetto dell'evaporazione, della traspirazione, e del drenaggio in funzione della saturazione media al di sopra della <i>root zone</i>	30
Figura 2-10 – Valori dei coefficienti W_s e T_s per la riduzione della fotosintesi in funzione rispettivamente dell’umidità del suolo e della temperatura.	32
Figura 3-1 –Mappa delle Sottosezioni Ecoregionali d’Italia (Blasi et.al, 2014), con i limiti amministrativi delle Regioni.....	37
Figura 3-2 – Ripartizione delle sottosezioni Ecoregionali nell’ambito della regione Sicilia (Blasi et al.,2014)	43
Figura 3-3 – Smoothing mediante l’approccio Whittaker su serie temporale con frequenza di 8 giorni di dati NDVI composite a 16 giorni da MODIS TERRA e AQUA (MOD13Q1 e MYD13Q1) con dimensione del pixel di 250 m: stima a scala regionale dell’errore quadratico medio (Rcp) al variare del parametro lambda, fissato n-iter=1.	44

Figura 3-4 – Smoothing mediante l’approccio Whittaker su serie temporale con frequenza di 8 giorni di dati NDVI composite a 16 giorni da MODIS TERRA e AQUA (MOD13Q1 e MYD13Q1) con dimensione del pixel di 250 m: stima a scala regionale dell’errore quadratico medio (Rcp) al variare del parametro n-Iter.....	44
Figura 3-5 – Smoothing mediante l’approccio Whittaker al variare di lambda, fissato n-iter=1, su serie temporale con frequenza di 8 giorni su dati NDVI composite a 16 giorni da MODIS TERRA e AQUA (MOD13Q1 e MYD13Q1) con dimensione del pixel di 250: dati originali e filtrati per il test site in prossimità della stazione di Eddy Covariance di Castelvetro (Trapani, Sicilia) per il periodo 2003-2014.....	45
Figura 3-6 – Smoothing mediante l’approccio Whittaker al variare di n-iter, fissato lambda=1000, su serie temporale con frequenza di 8 giorni su dati NDVI composite a 16 giorni da MODIS TERRA e AQUA (MOD13Q1 e MYD13Q1) con dimensione del pixel di 250: dati originali e filtrati per il test site in prossimità della stazione di Eddy Covariance di Castelvetro (Trapani, Sicilia) per il periodo 2003-2014.	45
Figura 3-7 – Andamenti delle statistiche (minimo, massimo, media e deviazione standard) dell’errore quadratico medio (Rcp) al variare del parametro lambda per la sottosezione Ecoregionale “Iblea” (A), “Sicilia Centrale”(B), “Sicilia Occidentale” (C) e “Sicilia Montana” (D).	46
Figura 3-8 – Andamenti delle statistiche (minimo, massimo, media e deviazione standard) dell’errore quadratico medio (Rcp) fissato lambda (1000) al variare del parametro n-Iter per la sottosezione Ecoregionale “Iblea” (A), “Sicilia Centrale”(B), “Sicilia Occidentale” (C) e “Montana Sicilia” (D).	46
Figura 3-9 - Distribuzione dei punti PAT selezionati, differenziati per coltura all’interno delle Sottosezioni Ecoregionali.	49
Figura 3-10 – Serie temporale di indice NDVI originale e filtrato per un punto PAT frutteto in Calabria: esempio di punto ritenuto “valido” tra i punti selezionati in quanto fornisce un’informazione chiara relativamente al trend dell’indice NDVI.	50
Figura 3-11 – Serie temporale di indice NDVI originale e filtrato per un punto PAT frutteto in Calabria: esempio di punto selezionato e poi eliminato per eccesso di “rumore” e come tale non adeguato a fornire un’informazione chiara relativamente al trend dell’indice NDVI.	50
Figura 3-12 – Precipitazione cumulata annua: confronto tra i valori misurati dalla stazione di Eddy Covariance di Castelvetro e derivati dai dati ECWF ERA-Interim.	53
Figura 3-13 – Radiazione solare incidente ad onde corte: confronto tra i valori misurati dalla stazione di Eddy Covariance di Castelvetro e derivati dai dati ECWF ERA-interim.	53
Figura 3-14 – Temperatura a 2 m dal suolo: confronto tra i valori misurati dalla stazione di Eddy Covariance di Castelvetro e derivati dai dati ECWF ERA-interim.	54
Figura 3-15 – Temperatura di rugiada a 2 m dal suolo: confronto tra i valori misurati dalla stazione di Eddy Covariance di Castelvetro e derivati dai dati ECWF ERA-Interim.....	54
Figura 3-16 – Velocità del vento a 10 m dal suolo: confronto tra i valori misurati dalla stazione di Eddy Covariance di Castelvetro e derivati dai dati ECWF ERA-Interim.....	54

Figura 3-17 – Evapotraspirazione di riferimento a scala giornaliera nel periodo 2009-2014: confronto tra i valori derivati dalla stazione di Eddy Covariance di Castelvetrano e derivati dai dati ECWF ERA-Interim per coltura short ($hc=0.12m$).	56
Figura 3-18 – Evapotraspirazione di riferimento a scala giornaliera nel periodo 2009-2014: confronto tra i valori derivati dalla stazione di Eddy Covariance di Castelvetrano e derivati dai dati ECWF ERA-Interim per coltura tall ($hc=0.5m$).	56
Figura 3-19 – Confronto tra albedo originale (derivato secondo le relazioni di Liang (2000) per il sensore MODIS, applicato ai dati di MODIS TERRA (MO09A1)) e filtrato secondo la funzione Whittaker.	59
Figura 3-20 – Confronto tra albedo originale (derivato secondo le relazioni di Liang (2000) per il sensore MODIS, applicato ai dati di MODIS AQUA (MY09A1)) e filtrato secondo la funzione Whittaker.	59
Figura 3-21 – Confronto tra albedo filtrato (derivato secondo le relazioni di Liang applicate ai dati MO09A1 ed MY09A1) con l’algoritmo Whittaker. In nero la media dei due serie di albedo (derivato dai prodotti MO09A1 e MY09A1), essendo entrambi composite ad 8 giorni sincroni (prodotti con stesse date).	59
Figura 3-22 – Confronto tra albedo derivato dalle relazioni di Liang (media dei valori di albedo derivati dai prodotti MO09A1 e MY09A1 mediante relazioni di Liang e filtrati con l’algoritmo Whittaker), Albedo derivato da dati di flusso radiativo ERA-Interim e Albedo (climate) ERA-Interim.	60
Figura 3-23 – Confronto tra le due componenti di interesse dello shortwave del prodotto MODIS albedo: Black sky albedo (BSA short), dove la componente dell’irradianza solare diretta è dominante (cielo sereno) e White sky albedo (WSA short), dove la componente dell’irradianza solare diffusa è dominante (cielo uniformemente nuvoloso).	60
Figura 3-24 – Comparazione tra albedo derivante dal prodotto MODIS MCD43A3 (BSA,WSA), albedo “Liang” (media dei valori di albedo derivati dai prodotti MO09A1 e MY09A1 mediante relazioni di Liang e filtrati con l’algoritmo Whittaker).	61
Figura 3-25 – Comparazione tra albedo derivante dal prodotto MODIS MCD43A3 (BSA,WSA), albedo derivato dalle relazioni di Liang (2000) (media dei valori di albedo derivati dai prodotti MO09A1 e MY09A1 mediante relazioni di Liang e filtrati con l’algoritmo Whittaker), albedo derivato da dati di flusso radiativo ERA-Interim e albedo (climate) ERA-Interim.	61
Figura 3-26 – Andamento nel periodo 2003-2015 della serie NDVI MODIS (TERRA&AQUA) composite a 16 giorni (M.D13Q1) (originale e filtrata) a 250 m: frequenza complessiva 8 giorni. Dati filtrati e salvati con time step 1 giorno.	63
Figura 3-27 – Andamento nel periodo 2003-2015 della serie LAI MODIS (combined TERRA&AQUA) composite a 8 giorni (originale e filtrata) con dimensione del pixel 1000. Dati filtrati e salvati con time step 1 giorno.	64
Figura 3-28 – Comparazione nel periodo 2003-2015 della serie giornaliera filtrata di LAI stimato (MODIS product 15A2) e della serie giornaliera del LAI derivato dall’NDVI secondo la legge	

logaritmica di Lambert Beer (figura a sinistra). Risultato della calibrazione della legge logaritmica LAI-NDVI per l'intero periodo 2003-2015 (figura a destra).....	64
Figura 3-29 – Andamento nel periodo 2003-2015 della serie giornaliera filtrata di LAI stimato (MODIS <i>product</i> 15A2) e della serie giornaliera del LAI derivato dall'NDVI secondo la legge logaritmica di Lambert Beer.	65
Figura 3-30 – Mappa a scala Europea del contenuto di limo (%) secondo il prodotto <i>Topsoil physical properties for Europe (based on LUCAS topsoil data)</i> (Ballabio et. al, 2016) dell' European Soil Data Centre (ESDAC)	66
Figura 3-31 – Mappa a scala Europea del contenuto di sabbia (%) secondo il prodotto <i>Topsoil physical properties for Europe (based on LUCAS topsoil data)</i> (Ballabio et. al, 2016) dell' European Soil Data Centre (ESDAC)	67
Figura 3-32 – Mappa a scala Europea del contenuto di sostanza organica (g C Kg ⁻¹) secondo il prodotto <i>Soil Organic Carbon Content (D. de Brogniez et al, 2014)</i> dell'European Soil Data Centre (ESDAC).....	68
Figura 3-33 – Mappe dell'acqua igroscopica (θ_{HW} , [-]) posta ad un valore costante pari a 0.005 (a sinistra), e mappa della conducibilità idraulica satura (K_s , [mm.giorno ⁻¹]) (a destra).....	70
Figura 3-34 – Mappe della capacità di campo (θ_{FC} , [-]) (a sinistra) e della porosità (porosity [-]) (a destra).....	70
Figura 3-35 – I layer di input per la stima della perdita di suolo per erosione idrica in l'Europa, mediante il modello RUSLE il 2015.....	72
Figura 3-36 – Perdita di suolo nell'Unione Europea per erosione idrica secondo il modello RUSLE2015 (RUSLE2015, sulla base di Renard et al., 1997).....	73
Figura 4-1– Variabilità all'interno della singola sottosezione Ecoregionale: trend dell'indice NDVI per due punti PAT frutteto nella sottosezione 2B3c (Sicilia).....	78
Figura 4-2– Variabilità all'interno della singola sottosezione Ecoregionale: trend dell'indice NDVI per due punti PAT frutteto nella sottosezione 2B2d (Calabria).....	78
Figura 4-3– Variabilità all'interno della singola sottosezione Ecoregionale: trend dell'indice NDVI per due punti PAT oliveto nella sottosezione 2B2d (Calabria).....	79
Figura 4-4– Variabilità all'interno della singola sottosezione Ecoregionale: trend dell'indice NDVI per due punti PAT oliveto nella sottosezione 2B2d (Calabria).....	79
Figura 4-5– Variabilità all'interno della singola sottosezione Ecoregionale: trend dell'indice NDVI per due punti PAT vigneto nella sottosezione 2B3d (Sicilia).	80
Figura 4-6– Variabilità all'interno della singola sottosezione Ecoregionale: trend dell'indice NDVI per due punti PAT vigneto nella sottosezione 2C2a (Puglia).	80
Figura 4-7– Variabilità all'interno della singola sottosezione Ecoregionale: trend dell'indice NDVI per due punti PAT risaia nella sottosezione 1B1a (Veneto).....	81

Figura 4-8– Variabilità all’interno della singola sottosezione Ecoregionale: trend dell’indice NDVI per due punti PAT risaia nella sottosezione 1C1b (Veneto).....	81
Figura 4-9 – Variabilità dei PAT tra sottosezioni Ecoregionali: accordo in termini di ciclicità (valori minimi e massimi annui in fase: ciclo con NDVI minimo in estate e massimo in inverno) e di intensità (similarità in valore per il minimo ed il massimo annuo dell’indice di vegetazione) della serie temporale media dell’indice NDVI per il PAT frutteto nelle due sottosezioni Ecoregionali 2B3c (Sicilia) e 2B2d (Calabria).	82
Figura 4-10 –Variabilità dei PAT tra diverse sottosezioni Ecoregionali: accordo in termini di ciclicità (valori minimi e massimi annui in fase: ciclo con NDVI minimo in estate e massimo in inverno) ma non in termini di intensità (difformità in valore per il minimo ed il massimo annuo dell’indice di vegetazione) della serie temporale media dell’indice NDVI per il PAT frutteto nelle due sottosezioni Ecoregionali 2B3b (Sicilia) e 2B4c (Sardegna).	83
Figura 4-11 – NDVI massimo, NDVI minimo, ampiezza NDVI (NDVI massimo - NDVI minimo) intra-annuale, variazioni inter-annuale NDVI massimo (tra gli anni 2003-2009, 2009-2015 e 2003-2015) per il PAT frutteto nelle sottosezioni Ecoregionali d’Italia, riportate in dettaglio in Tabella 4-1.	85
Figura 4-12 – NDVI massimo, NDVI minimo, ampiezza NDVI (NDVI massimo - NDVI minimo) intra-annuale, variazioni inter-annuale NDVI massimo (tra gli anni 2003-2009, 2009-2015 e 2003-2015) per il PAT Oliveto nelle sottosezioni Ecoregionali d’Italia, riportate in dettaglio in Tabella 4-1.	86
Figura 4-13 – NDVI massimo, NDVI minimo, ampiezza NDVI (NDVI massimo - NDVI minimo) intra-annuale, variazioni inter-annuale NDVI massimo (tra gli anni 2003-2009, 2009-2015 e 2003-2015) per il PAT Vigneto nelle sottosezioni Ecoregionali d’Italia, riportate in dettaglio in Tabella 4-1.	87
Figura 4-14 – NDVI massimo, NDVI minimo, ampiezza NDVI (NDVI massimo - NDVI minimo) intra-annuale, variazioni inter-annuale NDVI massimo (tra gli anni 2003-2009, 2009-2015 e 2003-2015) per il PAT Risaia nelle sottosezioni Ecoregionali d’Italia, riportate in dettaglio in Tabella 4-1.	88
Figura 4-15 – Inizio della stagione di crescita: confronto tra valori intra annuali (valori medi tra anni per sottosezione e PAT nelle sottosezioni Ecoregionali) (sinistra), confronto tra valori inter annuali (valori medi per anno per sottosezioni e PAT nelle sottosezioni Ecoregionali) (destra).....	90
Figura 4-16– Durata della stagione di crescita: confronto tra valori intra annuali (valori medi tra anni per sottosezione e PAT nelle sottosezioni Ecoregionali) (sinistra), confronto tra valori inter annuali (valori medi per anno per sottosezioni e PAT nelle sottosezioni Ecoregionali) (destra).....	91
Figura 4-17 - Somma dei valori di NDVI per la durata della stagione di crescita: confronto tra valori intra annuali (valori medi tra anni per sottosezione e PAT nelle sottosezioni Ecoregionali) (sinistra), confronto tra valori inter annuali (valori medi per anno per sottosezioni e PAT nelle sottosezioni Ecoregionali) (destra).....	92
Figura 4-18 – Deficit/surplus potenziale: delle: confronto tra valori intra annuali (nel periodo giugno-settembre tra gli anni 2003-2015, per ciascun PAT e relativa sottosezione Ecoregionale) (sinistra),	

confronto tra valori intra annuale (valori medi per mese per sottosezioni di medesimo PAT nelle Ecoregioni) (destra).....	94
Figura 4-19 – Perdita di suolo per erosione idrica stimata dal modello RUSLE2015 per il PAT frutteto (valori medi e deviazione standard all’interno delle sottosezioni Ecoregionali di riferimento riportate in dettaglio in Tabella 4-1).....	96
Figura 4-20 – Perdita di suolo per erosione idrica stimata dal modello RUSLE2015 per il PAT oliveto (valori medi e deviazione standard all’interno delle sottosezioni Ecoregionali di riferimento riportate in dettaglio in Tabella 4-1).....	96
Figura 4-21– Perdita di suolo per erosione idrica stimata dal modello RUSLE2015 per il PAT vigneto (valori medi e deviazione standard all’interno delle sottosezioni Ecoregionali di riferimento riportate in dettaglio in Tabella 4 1).	97
Figura 4-22– Perdita di suolo per erosione idrica stimata dal modello RUSLE2015 per il PAT risaia (valori medi e deviazione standard all’interno delle sottosezioni Ecoregionali di riferimento riportate in dettaglio in Tabella 4 1).	97
Figura 4-23– Sito di Brisighella: serie temporale a scala giornaliera di contenuto idrico nel suolo simulati da modello e derivato dai dati ECMWF ERA-Interim (layer 1, profondità 0.07m dal p.c.), con serie temporale del crop water stress index semplificato (CWSI*) derivato dal modello soil water balance FAO56, precipitazioni totali derivate da ECMWF ERA-Interim ed indice di vegetazione NDVI MODIS VI.....	100
Figura 4-24– Sito di Castelvetro: serie temporale a scala giornaliera di contenuto idrico nel suolo simulati da modello e derivato dai dati ECMWF ERA-Interim (layer 1, profondità 0.07m dal p.c.), con serie temporale del crop water stress index semplificato (CWSI*) derivato dal modello soil water balance FAO56, precipitazioni totali derivate da ECMWF ERA-Interim ed indice di vegetazione NDVI MODIS VI.....	100
Figura 4-25– Sito di Brisighella: serie temporale a scala giornaliera di contenuto della produzione primaria lorda (GPP) e netta (NPP) simulata dal modello con serie temporale dell’indice di vegetazione NDVI MODIS VI e della temperatura derivata dai dati ECMWF ERA-Interim.	101
Figura 4-26– Sito di Castelvetro: serie temporale a scala giornaliera di contenuto della produzione primaria lorda (GPP) e netta (NPP) simulata dal modello con serie temporale dell’indice di vegetazione NDVI MODIS VI e della temperatura derivata dai dati ECMWF ERA-Interim.	102
Figura 4-27 – PAT frutteto nelle sottosezioni Ecoregionali 1C2b-Abruzzo (in alto) e 2B2a-Campania (in basso): serie temporale a scala giornaliera di contenuto idrico nel suolo simulati da modello e derivato dai dati ERA-Interim (layer 1, profondità 0.07m dal p.c.), con serie temporale del crop water stress index semplificato (CWSI*) derivato dal modello soil water balance FAO56, precipitazioni totali, derivate da ERA-Interim ed indice di vegetazione NDVI MODIS VI.....	103
Figura 4-28– PAT frutteto nelle sottosezioni Ecoregionali 1C2b-Abruzzo (in alto) e 2B2a-Campania (in basso): serie temporale a scala giornaliera di contenuto della produzione primaria lorda (GPP) e netta (NPP) simulata dal modello con serie temporale dell’indice di vegetazione NDVI MODIS VI e della temperatura derivata dai dati ERA-Interim.	104

Figura 4-29 – Valori cumulati anni e nel periodo (2003-2015) della GPP e della NPP per il PAT frutteto nelle sottosezioni Ecoregionali 1C2b-Abruzzo (a destra) e 2B2a-Campania (a sinistra). .. 104

Figura 0-1– Frutteto-2C1a-Abruzzo-id-181: serie temporale a scala giornaliera di contenuto idrico nel suolo simulati da modello e derivato dai dati ECMWF ERA-Interim (layer 1, profondità 0.07m dal p.c.), con serie temporale del crop water stress index semplificato (CWSI*) derivato dal modello soil water balance FAO56, precipitazioni totali derivate da ECMWF ERA-Interim ed indice di vegetazione NDVI MODIS VI (**in alto**). Serie temporale a scala giornaliera di contenuto della produzione primaria lorda (GPP) e netta (NPP) simulata dal modello con serie temporale dell'indice di vegetazione NDVI MODIS VI e della temperatura derivata dai dati ECMWF ERA-Interim (**in basso**)..... 118

Figura 0-2– Risaia con semina interrata- 1B1a-Emilia_Romagna-id-405: serie temporale a scala giornaliera di contenuto idrico nel suolo simulati da modello e derivato dai dati ECMWF ERA-Interim (layer 1, profondità 0.07m dal p.c.), con serie temporale del crop water stress index semplificato (CWSI*) derivato dal modello soil water balance FAO56, precipitazioni totali derivate da ECMWF ERA-Interim ed indice di vegetazione NDVI MODIS VI (**in alto**). Serie temporale a scala giornaliera di contenuto della produzione primaria lorda (GPP) e netta (NPP) simulata dal modello con serie temporale dell'indice di vegetazione NDVI MODIS VI e della temperatura derivata dai dati ECMWF ERA-Interim (**in basso**)..... 119

Figura 0-2– Vigneto-2B2a-Campania-id-166: serie temporale a scala giornaliera di contenuto idrico nel suolo simulati da modello e derivato dai dati ECMWF ERA-Interim (layer 1, profondità 0.07m dal p.c.), con serie temporale del crop water stress index semplificato (CWSI*) derivato dal modello soil water balance FAO56, precipitazioni totali derivate da ECMWF ERA-Interim ed indice di vegetazione NDVI MODIS VI (**in alto**). Serie temporale a scala giornaliera di contenuto della produzione primaria lorda (GPP) e netta (NPP) simulata dal modello con serie temporale dell'indice di vegetazione NDVI MODIS VI e della temperatura derivata dai dati ECMWF ERA-Interim (**in basso**)..... 120

Indice delle tabelle

Tabella 1-1 – Eco-indicatori derivati	6
Tabella 2-1 - Applicazioni di Land surface phenology (LSP) legati all'agricoltura	13
Tabella 2-2 – Confronto tra diversi set di dati dell'indice NDVI disponibili.	14
Tabella 2-3 - Metriche fenologiche potenzialmente derivabili da serie multi temporale di indice spettrale NDVI filtrato.	21
Tabella 2-4 - I metodi per la determinazione degli eventi fenologici connessi alla stima della LSP da dati di osservazione della terra.....	24
Tabella 2-5 – Tool analizzati, con breve descrizione e riferimenti, finalizzati alla determinazione degli eventi connessi alla stima della LSP da dati satellitari.	25
Tabella 2-6 –Confronto tra diversi set di dati di ri-analisi disponibili.....	27
Tabella 2-7 – Elenco delle corrispondenze tra le variabili e delle costanti utilizzate per il sito di Castelvetrano nella descrizione e nella codifica in MATLAB del modello sviluppato.....	34
Tabella 3-1 – Dati in formato raster utilizzati.....	35
Tabella 3-2 – Legenda dei punti PAT selezionati.....	39
Tabella 3-3 – Numero di sample raccolti, differenziati per coltura all'interno delle sottosezioni Ecoregionali.	40
Tabella 3-4 – “Argomenti” della funzione Whittaker raster ('MODIS', R package), con descrizione ed indicazione delle scelte effettuate per lo studio in esame.	42
Tabella 3-5 – Numero di sample raccolti, differenziati per coltura all'interno delle Sottosezioni Ecoregionali, successivamente all'operazione di rimozione dei punti affetti da “rumore”.....	48
Tabella 3-6 Variabili climatiche ECMWF ERA-Interim considerate per la caratterizzazione climatica dei siti	52
Tabella 3-7 - Confronto a scala di pixel sul sito di Castelvetrano tra i valori dei parametri fisici del suolo stimati in-situ e derivati da pedotrasfer Saxton&Rawls applicate ai prodotti dell'ESDAC.	69
Tabella 3-8 – Elenco delle corrispondenze variabili (con relativa unità di misura) e delle costanti utilizzate per il sito di Castelvetrano nella descrizione e nella codifica in MATLAB del modello sviluppato.	75
Tabella 4-1 – Elenco delle corrispondenze tra Sottosezioni Ecoregionali e Regioni D'Italia.....	84
Tabella 4-2 – Metriche fenologiche inizio, durata e fine della stagione di crescita, derivate per i diversi PAT: valori medi intra-annuali.	93

Tabella 4-3 –Date di inizio e fine della stagione di crescita derivate per i diversi PAT: valori medi intra-annuali. 93

Tabella 4-4 – PAT (Frutteto, Oliveto, Vigneto e Risaia) selezionati all'interno delle diverse sottosezioni Ecoregionali per i quali sono stati derivati gli ecoindicatori forniti dal modello ecoidrologico..... 99

1 Introduzione

1.1 Il paesaggio agrario ed il ruolo dei PAT

Il paesaggio agrario è quella forma che l'uomo, nel corso degli anni ed ai fini delle sue attività produttive agricole, coscientemente e sistematicamente imprime al paesaggio naturale (Sereni, 1961), quindi quel paesaggio considerato una sorta di seconda natura che gli uomini hanno costruito sugli assetti originari del territorio, sugli habitat spontanei, piegandoli e modellandoli secondo i propri bisogni e progetti. Non esistono dei metodi unanimemente riconosciuti per identificare, inventariare e caratterizzare in termini descrittivi multi-disciplinari e multi-scala i paesaggi. Tuttavia, negli ultimi anni alcune iniziative sono state messe in atto come conseguenza del crescere di una consapevolezza, prima culturale e poi politica, sui benefici che derivano dalla tutela e dalla valorizzazione dei sistemi agro-forestali tradizionali e, di riflesso, dei rispettivi paesaggi tradizionali generati. Si tratta di paesaggi, i PAT, composti da sistemi colturali basati su tecnologie agronomiche e risorse genetiche non adeguate alle dominanti necessità del mercato e all'efficienza produttiva dell'agricoltura moderna, il cui interesse risiede non solo o non tanto nella funzione produttiva soddisfacente ma, piuttosto, in quelle ambientali, sociali e culturali. Il PAT, come sistema integrato ecologico e antropico - in virtù di una maggiore resilienza che può essere considerata un *proxy* della sostenibilità dei sistemi naturali, economici e sociali presenti al suo interno - ha la capacità di assorbire le perturbazioni e di adattarsi ai cambiamenti, in modo tale da mantenere le stesse funzioni, la stessa struttura, la stessa identità e gli stessi feedback. I PAT sono spesso fondati sulla policoltura, con particellari complessi, per buona parte autonomi dal punto di vista energetico e con ridotto impatto sui fattori ambientali interessati. Questi sistemi agricoli tradizionali molto diffusi in Italia meridionale ed in Sicilia – anche a causa del ritardo nello sviluppo e di alcuni limiti ambientali che ne hanno consentito la sopravvivenza - sono soprattutto basati sulla presenza delle colture arboree in quanto più idonee - in ragione del carattere di poli-annualità, dell'estensione dell'apparato radicale che li rende maggiormente resistenti agli stress ambientali ed a superare i limiti derivanti della lunga siccità estiva che contraddistingue il clima

mediterraneo garantendo un livello di produzione economicamente sostenibile. Molti paesaggi tradizionali dell'agricoltura italiana (PAT), analogamente a quanto avvenuto a scala europea e mediterranea, sono in via di scomparsa, in seguito all'abbandono o alla conversione colturale, determinati dai processi di polarizzazione verso le aree più urbanizzate. Il concetto di paesaggio e l'organizzazione pianificata delle azioni del suo governo hanno radici e caratteri diversi nei Paesi europei: in molti di essi, soprattutto del nord Europa, si sono risolte quasi esclusivamente in una attività di tutela dei valori naturalistici e in una attenzione per i problemi ambientali ed ecologici; in altri hanno significato grande attenzione per gli aspetti culturali, economici, produttivi, architettonici e ricreativi. Tra i tecnici, gli studiosi e gli operatori di tutta Europa vi è una diffusa consapevolezza che l'apparato concettuale e metodologico finora utilizzato per identificare e valutare i paesaggi sia insufficiente. Si sta costruendo e diffondendo una maggiore chiarezza concettuale trans-disciplinare (Antrop, 1997; Blasi et al., 2005; Vogiatzakis, 2006; Barbera et al., 2010), impensabile anche solo una ventina di anni fa, per cui il paesaggio non è identificato soltanto dall'ambiente, né dal territorio e richiede, come gli altri due concetti, finalità e strumenti specifici che non escludono gli altri approcci, ma che vanno, piuttosto, ad integrarsi reciprocamente.

L'obiettivo del presente lavoro di ricerca è produrre dei macro indicatori che sintetizzino uno o più aspetti ecoidrologici dei PAT e consentano di analizzare l'esistenza e la persistenza di condizioni di particolare criticità sia di stress idrico che di stato della vegetazione, per migliorare la classificazione e la caratterizzazione dei PAT, nonché per individuare strategie di pianificazione e gestione del paesaggio in virtù del clima e dei cambiamenti climatici previsti.

L'ecoidrologia è stata recentemente definita come "la scienza, che cerca di descrivere i meccanismi che sono alla base dei modelli idrologici e dei processi ecologici" (Rodriguez-Iturbe, 2000). Questo tipo di scienza è fondamentale per la comprensione del legame esistente tra le dinamiche degli ecosistemi e il ciclo dell'acqua, in particolare in ambienti aridi e semiaridi, dove l'acqua è una risorsa limitata importante non solo per la sua scarsità, ma anche per la sua intermittenza e la presenza

imprevedibile (Porporato e Rodriguez-Iturbe, 2002; Rodriguez-Iturbe e Porporato, 2005). La pratica ecoidrologica richiede quindi l'integrazione di diverse discipline, dalla meteorologia, alla ecofisiologia vegetale, fino all'idrologia, consentendo così una maggiore comprensione dei paesaggi, in chiave quantitativa. In questo contesto è quindi necessario considerare il clima ed i cambiamenti climatici previsti. Il clima globale sta cambiando per cause naturali e attualmente anche per effetto dell'aumento dei livelli di gas serra indotti dall'uomo in atmosfera e per le relative emissioni umane in corso. Nell'ultimo secolo la temperatura media globale è aumentata di circa 1 ° C e la temperatura globale prevista per il prossimo secolo avrà un aumento compreso tra 2 e 3 ° C (IPCC, 2007). Nelle zone del Mediterraneo i cambiamenti climatici, come conseguenza di questo riscaldamento globale, potrebbero causare la riduzione della disponibilità di acqua, la riduzione dello sviluppo di vegetazione e l'aumento della frequenza degli incendi (UNEP, 2009). Simulazioni climatiche regionali per il bacino del Mediterraneo sulla base delle previsioni climatiche dell'IPCC per il prossimo secolo indicano che caratteri estremi specifici per il clima mediterraneo aumenteranno ulteriormente (Gao e Giorgi, 2008; Hertig e Jacobeit, 2008). Le temperature mostrano una crescita per l'intera area del Mediterraneo per tutti i mesi dell'anno, nel periodo 2071-2100 rispetto al 1990-2019. Per l'Italia vi sarà un aumento delle temperatura in un intervallo di 2-5° C, con la più grande variazione attesa durante l'estate. La precipitazione media annua non dovrebbe cambiare molto, ma la distribuzione delle precipitazioni nel corso dell'anno cambierà verso inverni più umidi e periodi di siccità più lunghi durante l'estate. Durante l'estate la combinazione di precipitazioni ridotte e temperature elevate complessivamente aumenterà la carenza d'acqua su tutta l'area del Mediterraneo con un aumento sostanziale dell'estensione a nord dei regimi aridi.

Un altro aspetto rilevante nell'analisi ecoidrologica dei PAT è quindi legato all'interazione fra l'utilizzo delle risorse idriche e le colture. Gestire le tensioni tra gli "utenti" in competizione, per esempio, tra chi necessita di acqua per l'irrigazione, chi ha bisogno di acqua per uso potabile e la necessità di mantenere la salute ambientale, è sempre più problematico. Inoltre, la maggior parte delle

grandi risorse idriche (falde acquifere, fiumi e laghi) attraversano più Stati, superando il concetto di confine nazionale. Questo porta a contrasti tra esigenze e diritti di proprietà, che aggravano i problemi di gestione. Di conseguenza, le risorse idriche nel 21° secolo sono destinate a diventare l'equivalente delle riserve di petrolio nel 20° secolo: una risorsa limitata a livello globale, tale da causare conflitti regionali e internazionali. Infatti, il conflitto sulla gestione e la distribuzione dell'acqua è già evidente nel mondo arabo, in Africa, in Australia e nel Sud ed il Nord America. La gestione sicura della risorsa vegetazione è altrettanto importante ed include il cibo che mangiamo, le fibre presenti negli indumenti ed il legno che utilizziamo nelle costruzioni e nelle industrie della carta, oltre che per una vasta gamma di attività commerciali. Le colture, in quanto “coperture vegetali”, oltre al valore economico dei prodotti da esse derivati, ricopre un ruolo centrale nella maggior parte dei servizi forniti dagli ecosistemi, come la riduzione dell'erosione del suolo, il fissaggio del carbonio presente in atmosfera e la prevenzione dello sviluppo di salinità delle zone aride (Eamus et al., 2005).

1.2 Scopo della tesi

Il presente lavoro di ricerca è finalizzato alla definizione ed applicazione di una metodologia di caratterizzazione dei processi eco-idrologici nei paesaggi agrari tradizionali. Tali processi possono essere analizzati prendendo in considerazione modelli di simulazione applicabili anche a scala territoriale o di bacino e che considerano tre livelli di informazione: i) il dato meteorologico; ii) l'influenza del suolo (caratteristiche fisiche); iii) le condizioni di copertura vegetale, che intervengono nella stima dei flussi di evaporazione e di traspirazione e nei meccanismi di intercettazione dell'acqua e della radiazione solare. Il reperimento dei dati d'ingresso può essere di notevole onerosità in tutte quelle applicazioni che interessano ampie superfici, come, ad esempio, nel caso di studi condotti a scala regionale o di bacino idrografico. Si rende così necessaria la messa a punto di tecniche specifiche che mirano alla stima della variabilità spaziale e temporale dei parametri che intervengono nel modello, con particolare riferimento alle condizioni al contorno del dominio interessato dalle simulazioni. I parametri di maggior interesse riguardano la caratterizzazione di suolo e vegetazione;

nel primo caso, è possibile valorizzare l'informazione pedologica, ove presente, arricchendola con l'individuazione delle proprietà idrauliche dei suoli. Nel caso della vegetazione, assumono particolare rilievo le variazioni nel tempo di parametri quali la copertura del suolo e l'indice di area fogliare.

Le tecniche di telerilevamento, o più correttamente di **Osservazione della Terra**, mediante sensori operanti in diverse regioni dello spettro elettromagnetico su stazioni orbitanti, sono in grado di contribuire significativamente al monitoraggio della variabilità spaziale e temporale di questi parametri, agevolando l'applicazione e la validazione dei modelli eco-idrologici.

Gli obiettivi specifici di questo lavoro sono pertanto i seguenti:

1. Estrazione di un primo gruppo di indicatori, derivati da dati di Osservazione della Terra riguardanti la caratterizzazione della dinamica della vegetazione nell'arco temporale 2003-2015; questi dati consentono di misurare le variazioni temporali (inter-annuali) del vigore delle coperture vegetali, da cui estrarre indici bio-metrici caratteristici dello sviluppo e della fenologia. L'unica tipologia di dato che consente un'adeguata risoluzione temporale lungo tutto il periodo di osservazione prescelto è riferito al sensore MODIS dei satelliti NASA denominati TERRA e AQUA.
2. Estrazione di un secondo gruppo di indicatori, derivato dall'applicazione di un modello eco-idrologico, parametrizzato mediante confronto dei dati simulati con i dati misurati nei siti di Castelvetro (PAT Oliveto) e Brisighella (non PAT Actinidia). Il modello eco-idrologico prende in conto come input forcing le condizioni di copertura vegetale (derivanti dal primo gruppo di eco-indicatori), il dato meteorologico (derivato da dati di ri-analisi ECMWF ERA-Interim), le caratteristiche idrauliche del suolo (derivate da semplici funzioni di pedo-trasferimento (PTF) applicate ai prodotti *Topsoil physical properties* e *Soil Organic Carbon Content* dell'*European Soil Data Centre* (ESDAC)) e fornisce in output la produzione primaria lorda (GPP) e netta (NPP), flussi di evaporazione e traspirazione potenziale ed effettiva, un indice di stress idrico semplificato (CWSI*), derivato dal modello soil water balance FAO56 ed il contenuto idrico nel suolo (soil water content, SWC). Infine, l'erosione

- intesa come perdita di suolo per erosione idrica - è stata estratta dal prodotto “RUSLE 2015” del JRS, mentre il deficit idrico per colture non irrigue o *deficit potenziale* è derivato dall’evapotraspirazione potenziale e dalla precipitazione netta, quest’ultima ridotta in funzione del LAI a partire dalla precipitazione totale fornita dai dati di ri-analisi ECMWF ERA-Interim. I due gruppi di indicatori sono sintetizzati in Tabella 1-1.

Tabella 1-1 – Eco-indicatori derivati

Tipologia	Eco-Indicatori
Osservazioni della Terra	Trend delle coperture vegetali
	Variazioni temporali (intra ed inter-annuali) delle coperture vegetali
	Indici bio-metrici caratteristici (Land Surface Phenology, LSP)
	Stabilità nel tempo di particolari indici di sviluppo
Processi / Simulazioni	Deficit idrico per colture non irrigue o deficit potenziale
	Perdita di suolo per erosione idrica
	Contenuto idrico del suolo (SWC)
	Crop water stress index semplificato (CWSI*)
	Produttività primaria lorda (GPP)
	Produttività primaria netta (NPP)

Lo schema a blocchi riportato in Figura 1 sintetizza i dati utilizzati per ciascuna delle variabili presa in conto per derivare gli indicatori appartenenti alle due tipologie (Osservazioni e Processi/Simulazioni).

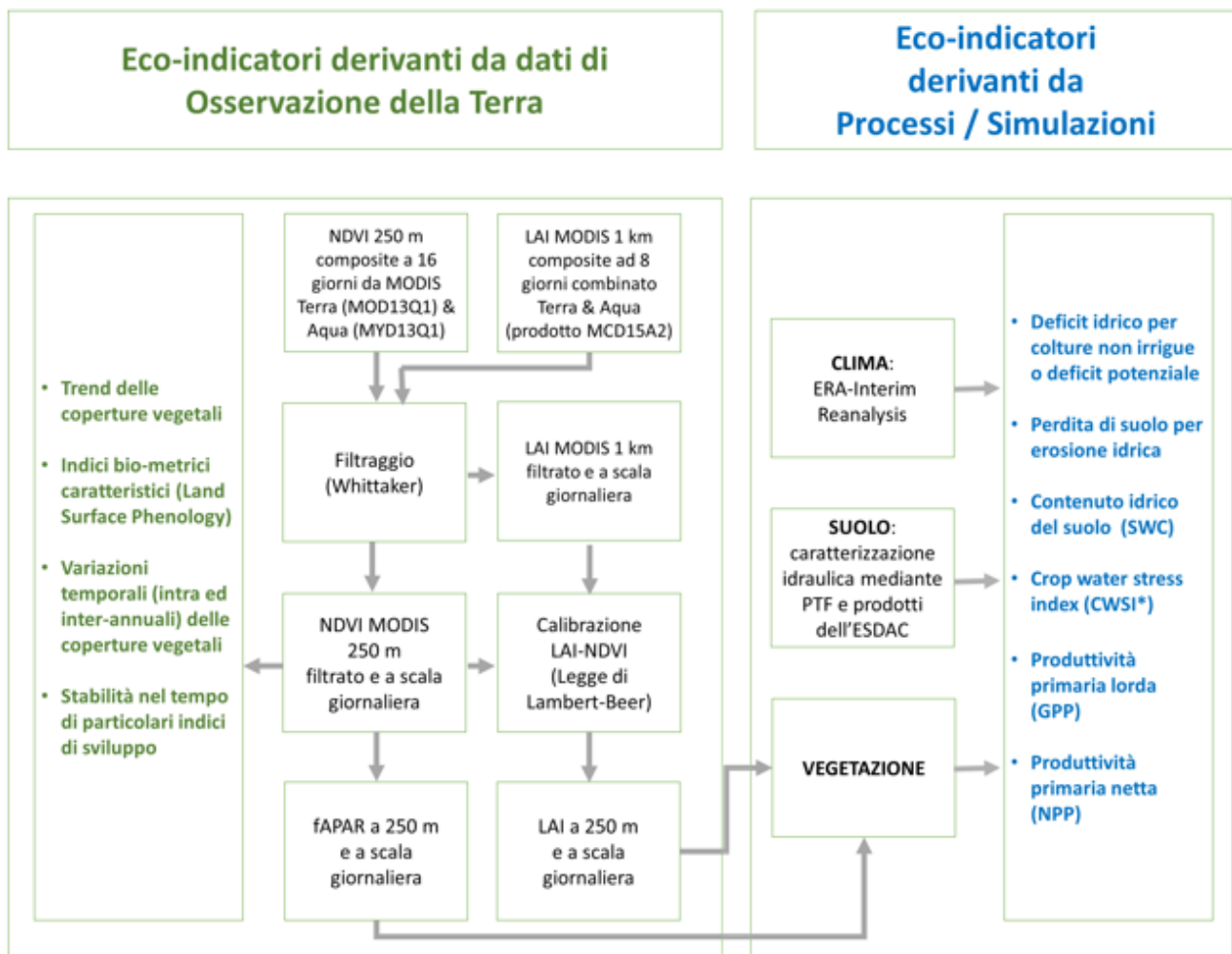


Figura 1 – Schema a blocchi delle connessioni tra i dati utilizzati per ciascuna delle grandezze considerate per derivare gli indicatori appartenenti alle due tipologie (Osservazioni e Processi / Simulazioni).

1.3 Outline

Dallo schema a blocchi della Fig.1 scaturisce l'organizzazione dei capitoli di questa tesi.

Il **Cap.2** descrive i metodi di analisi utilizzati nel lavoro di tesi, riguardanti le tecniche di Osservazione della Terra ed il modello eco-idrologico adottato. Dopo un breve richiamo ai concetti di base del telerilevamento, con particolare riferimento ai sistemi piattaforma-sensore, sono descritti i dati dell'indice di vegetazione MODIS e le tecniche di composizione multi-temporale dei dati necessarie per le analisi di valutazione richieste dal presente studio. Esse includono metodi di *smoothing* e *gap-filling*, ed in particolare l'algoritmo di Whittaker-Handerson adottato, e la loro

implementazione per descrivere le variazioni della fenologia stimata da dato satellitare (*land surface phenology*, LSP).

Nel quinto paragrafo, dopo aver introdotto i concetti di modelli climatici e di dati di ri-analisi, sono descritte le caratteristiche dei dati ECWF ERA-Interim, utilizzati in tale lavoro.

Nel sesto paragrafo viene descritto il modello eco-idrologico sviluppato per derivare il gruppo di eco-indicatori “da processo”: vengono descritte le sue tre componenti o sotto modelli relativi alle dinamiche temporali dello stato idrico del suolo, della componente vegetale e dell’attività microbica nel suolo.

Il **Cap.3** descrive i dati utilizzati, partendo dalla elezione delle aree PAT, e la loro elaborazione secondo le metodologie esposte nel Cap.2. Verranno quindi derivate le metriche fenologiche derivate dai dati di O.T., ed i parametri biofisici (albedo e LAI). Ai fini dell’applicazione del modello ecoidrologico, verrà illustrato il processamento dei dati climatici di ri-analisi ERA-Interim ed il confronto con misure di riferimento al suolo, e successivamente, la derivazione dei parametri fisico-idraulici dei suoli.

Nel **Cap.4**, dopo la comparazione, a scala di pixel, fra i risultati del modello eco-idrologico e i dati di osservazione satellitare per il PAT Oliveto (Castelvetrano, TP) e per il non-PAT Actinidia (Brisighella, RA), verranno riportati e discussi i risultati.

2 Metodi

2.1 Telerilevamento

Il telerilevamento è una straordinaria fonte di informazioni utile per i responsabili politici, i gestori di risorse, i meteorologi ed è diventato sempre più vitale per la futura gestione efficace e sostenibile della Terra. Un sistema di telerilevamento è costituito dalla strumentazione, l'elaborazione e l'analisi ed è progettato per misurare, monitorare e prevedere gli aspetti fisici, chimici, e biologici del sistema Terra. Nuove sofisticate tecnologie sono state sviluppate per raccogliere grandi quantità di dati, e la sofisticazione matematica e fisica delle tecniche utilizzate per elaborare e analizzare i dati osservati è considerevolmente aumentata.

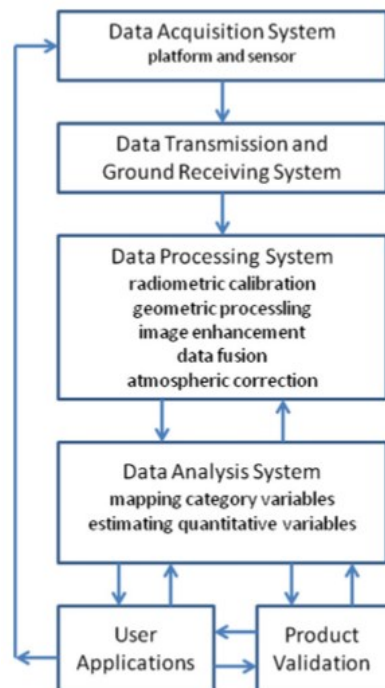


Figura 2-1 - I componenti principali del sistema di telerilevamento.

Nei sotto paragrafi a seguire verrà preso in considerazione il solo modulo “*data acquisition system*” (piattaforma e sensore).

2.1.1 Sistema piattaforma e sensore

Il sistema di acquisizione dati consiste essenzialmente del sensore e la piattaforma su cui risiede il sensore. Le piattaforme spaziali sono costituite principalmente da satelliti, posizionati in orbita geostazionaria (equatoriale) o eliosincrona (polare). I sensori detti “passivi”, utilizzati in questo studio, rilevano la radiazione solare riflessa dalla superficie terrestre (radianza, $W/m^2/\mu m/sr$) o quella emessa per effetto della propria temperatura di brillantezza. Le specifiche della piattaforma e del sensore determinano le risoluzioni dei dati telerilevati: risoluzione spaziale, spettrale, temporale e radiometrica. Al fine di rendere confrontabile il comportamento riflessivo di superfici diverse o riprese in diversi istanti temporali, nelle applicazioni del telerilevamento si utilizza - in luogo della radianza - il coefficiente di riflessività o riflettanza, espresso dal rapporto fra la radianza e l'irradianza (radiazione solare incidente).

La risoluzione spaziale è la misura del più piccolo oggetto che può essere identificato in maniera distinta dal sensore, o l'area a terra immaginata per il campo di vista istantaneo (IFOV) del sensore, oppure la dimensione reale a terra rappresentata da ogni pixel.

La risoluzione spettrale descrive il numero e la larghezza delle bande spettrali in un sistema di sensori. Molti sensori hanno una banda pancromatica, che è una singola banda che copre lo spettro del visibile e le bande multispettrali nello spettro visibile, IR-vicino o IR-termico. I sistemi iperspettrali di solito hanno centinaia di bande spettrali: per esempio il satellite Hyperion EO-1 ha 220 bande alla risoluzione spaziale di 30-m.

La risoluzione temporale è l'intervallo temporale (ore, giorni) fra due rivisitazioni della stessa area della superficie terrestre; essa dipende principalmente dal tipo di orbita della piattaforma e dalle caratteristiche del sistema ottico di acquisizione (*swath*, o larghezza della porzione di superficie terrestre osservata).

La risoluzione *radiometrica* esprime la sensibilità del sensore a rilevare differenze nella quantità di riflessione della radiazione; essa è quindi determinata dal numero di bit in cui la radiazione, divisa per bande, viene registrata. Nei dati a 8 bit, il *digital number* (DN) può variare da 0 a 255 per ogni pixel ($2^8=256$ numeri possibili in totale). Ovviamente più bit si traduce in una maggiore precisione radiometrica del sensore, come mostrato nella Figura 2-3.

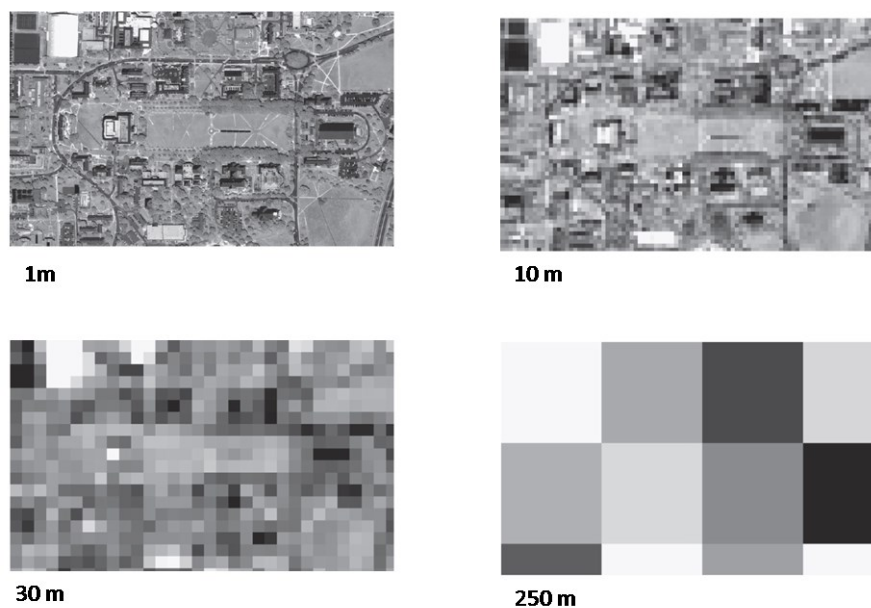


Figura 2-2 - Illustrazione di una stessa area a diverse risoluzioni spaziali.

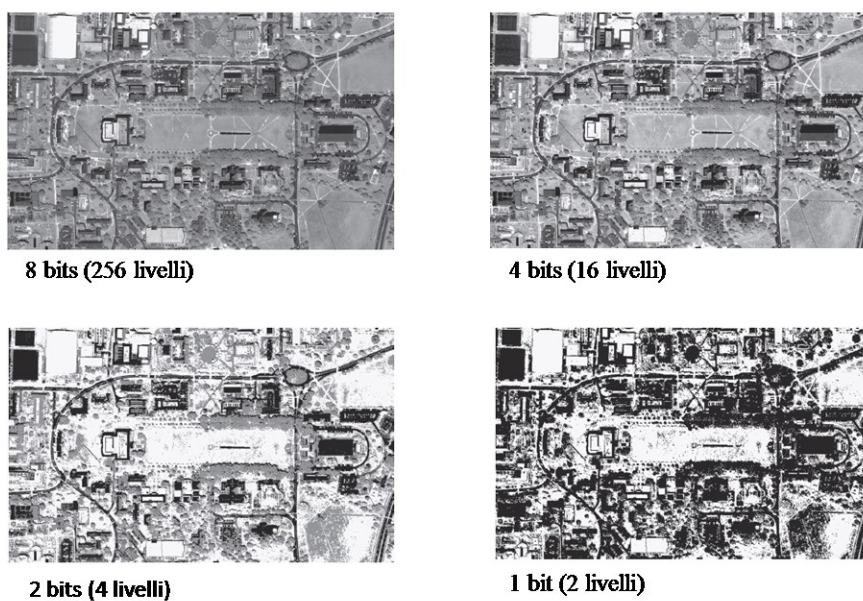


Figura 2-3 – Illustrazione di una stessa area a diverse risoluzioni radiometriche.

2.2 Fenologia delle colture e telerilevamento

2.2.1 Concetti e definizioni

Le dinamiche fenologiche degli ecosistemi terrestri, tra cui la vegetazione naturale e agraria, riflettono la risposta della biosfera terrestre alle dinamiche inter ed intra-annuali del clima e dei regimi idrologici della terra (Zhang et al., 2003). Il comportamento tipico del segnale estratto da serie storiche di indici di vegetazione, all'interno di finestre temporali riconducibili a fasi stagionali, permette di identificare le diverse fasi fenologiche. Per "fasi fenologiche" in telerilevamento - a causa della limitata risoluzione spaziale in concomitanza di una elevata risoluzione temporale dei dati acquisiti - si intendono specifiche fasi di crescita, identificate in modo indiretto e riferite ad una copertura del suolo (*land cover*) eterogenea. Questo segna un concetto distinto dalla tradizionale nozione di fenologia fondata sulle specie (Field et al., 2006). Difatti, mentre in agronomia la fenologia è definita come l'osservazione delle fasi o delle attività dei cicli vitali delle piante e degli animali nel loro succedersi nel corso dell'anno e come lo studio dei tempi e delle cause di eventi biologici che si susseguono, influenzati da fattori biotici ed abiotici ed al legame tra fasi identiche o specie diverse (Lieth, 1974; Schnelle, 1955), nel telerilevamento il termine "*Land surface phenology*" (LSP) è comunemente usato per indicare lo sviluppo spazio-temporale della superficie coperta da vegetazione così come mostrato dai sensori ottici satellitari, limitati ad osservare la fenologia apparente e non la reale specie-specifica. La mappatura dello sviluppo fenologico di una coltura è importante in quanto la fenologia è strettamente legata alla produzione di biomassa e alle rese (Meroni et al., 2014a). Ad esempio, estati fresche possono causare ritardo nella crescita e quindi una diminuzione dei rendimenti. Inoltre, la firma temporale delle superfici vegetate è utile anche per distinguere i tipi di copertura del suolo e per mappare il cambiamento di uso del suolo (Badhwar et al., 1982; Wardlow et al., 2007; Galford et al., 2008; Vuolo et al., 2012). In Tabella 2-1 sono elencate diverse applicazioni di LSP legate all'agricoltura.

Tabella 2-1 - Applicazioni di Land surface phenology (LSP) legati all'agricoltura

Applicazione	Riferimenti
Mappatura dello sviluppo e delle condizioni colturali.	Sakamoto et al., 2011; Kawamura et al., 2005
Utilizzo in approcci di data assimilation all'interno di modelli di crescita colturali.	Moulin et al., 1998; Boschetti et al., 2009
Mappatura della tipologia colturale e della rotazione colturale.	Galford et al., 2008; Peña-Barragán et al., 2011
Mappatura del cambio di uso e del cambio della copertura del suolo.	Galford et al., 2010
Utilizzato come predittore nei modelli di rendimento.	Xin et al., 2002; Bolton and Friedl, 2013; Meroni et al., 2013a

2.2.2 Utilizzo dell'indice NDVI

Nel presente studio la *land surface phenology* viene derivata sulla base dell'indice *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI), calcolato a partire dai dati di osservazione della terra ad elevata frequenza temporale sulla base della relazione a seguire:

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}$$

dove NIR e RED rappresentano, rispettivamente, la banda corrispondente all'infrarosso vicino e al rosso. Le serie storiche basate sull'indice di vegetazione NDVI si sono mostrate utili in una molteplicità di applicazioni e studi quali il monitoraggio ambientale (Reed et al., 1994; Beck et al., 2006; White et al., 2009), per stime delle rese agricole (Tucker et al., 1985; Atzberger et al., 2013; Rembold et al., 2013), per la modellazione degli spostamenti della fauna selvatica e per analisi della biodiversità (Kerr et al., 2003). Tale serie storiche sono anche eccellenti *proxy* per valutare i possibili effetti dei cambiamenti climatici in tutto il mondo (Anyamba et al., 1996; Herrmann et al., 2005) e per il monitoraggio della siccità su larga scala (Ji et al., 2003). Una prima schematizzazione dei dati di comunemente utilizzati relativi all'indice spettrale NDVI è rappresentata in Tabella 2-2.

Tabella 2-2 – Confronto tra diversi set di dati dell'indice NDVI disponibili.

Nome	Sensore	Periodo di copertura	Time step	Risoluzione spaziale
Pathfinder (PAL)	AVHRR	1981-2001	10-giorni	8 km
Global Vegetation Index (GVI)	AVHRR	1981-2009	7-giorni	4 km
Land	AVHRR	1981-2013	Giornaliero	5 km
Fourier-Adjusted, Sensor and Solar zenith angle corrected, Interpolated, Reconstructed (FASIR)	AVHRR	1982-1998	10-giorni	0.125°
GIMMS	AVHRR	1981-2006	15-giorni	8 km
GIMMS3G	AVHRR	1981-2014	15-giorni	8 km
S10	SPOT-Vegetation	1998+	10-giorni	1 Km
EM10	ENVISAT-MERIS	2002-2012	10-giorni	1/1.2
SeaWiFS	SeaWiFS	1997-2010	Mensile	4 Km
MOD (MYD)13 A1/A2			16 giorni	500 m/1 Km
MOD (MYD)A3	TERRA (AQUA)	2000+	Mensile	1 Km
MOD (MYD)C1/C2			16 giorni-Mensile	5.6 Km
MOD (MYD)Q1	MODIS		16 giorni	250 m
MEDOKADS	AVHRR	1989+	Giornaliero	1 km

2.2.3 Scala spaziale e temporale

La scala temporale di questo progetto che ha un focus sulle stagioni è la scala giornaliera nel periodo 2003-2015 e come tale richiede serie di dati multi-temporali e filtrati da eventuali valori anomali (*smoothing* e *gap-filling*). A causa della influenza dovuta alla presenza di nuvole, aerosol e altri fattori, le singole acquisizioni satellitari sono spesso soggette a dati mancanti, limitandone seriamente l'applicazione in ambiti di ricerca come l'analisi di ecosistemi dove è richiesta la continuità spaziale e temporale dei parametri estratti dalla superficie terrestre. Attraverso la composizione multi-temporale dei dati telerilevati, le influenze di questi fattori possono essere ridotti o eliminati (Holben 1986; Cihlar et al., 1994). La composizione multi-temporale dei dati telerilevati utilizza come criterio la selezione dei valori dei pixel di qualità più elevata all'interno di un dataset di acquisizioni (multi scene) per un prefissato intervallo temporale. In base agli obiettivi applicativi, è stata proposta una varietà di criteri di *data compositing*, ciascuno con lo scopo di eliminare per quanto possibile influenze quali nuvolosità,

aerosol ed altri fattori (Cihlar et al., 1994; Qi e Kerr, 1997). Dei diversi tipi di algoritmi di *data compositing* si farà cenno solo al MODIS *Vegetation Index Compositing Technique* (CV-MVC) in quanto applicato ai dati MODIS composite utilizzati in tale lavoro.

2.2.3.1 MODIS Vegetation Index Compositing Technique (CV-MVC)

Nell'approccio MVC, i dati lontani dall'acquisizione nadirale hanno più probabilità di essere selezionati, pertanto è stata proposta la selezione dei dati di telerilevamento con minimo angolo di vista zenitale (Chuvieco et al., 2005). Tuttavia è necessario eliminare, prima del *compositing*, i dati contaminati dalla presenza di nuvole. Per evitare la selezione dei dati lontani dalla condizione nadirale, è stata adottata una correzione mediante un modello *Bidirectional Reflectance Distribution Function* (BRDF) al fine di sintetizzare gli indici di vegetazione MODIS (Van Leeuwen et al., 1999; Schaaf et al., 2002). Sulla base dell'identificazione delle nuvole e di altre informazioni, vengono selezionati all'interno di un intervallo di tempo di 16 giorni i dati di riflettanza direzionale di alta qualità. Quando all'interno della finestra temporale il numero di dati di riflettanza direzionale di alta qualità è maggiore di 5, viene utilizzato il modello Walthall BRDF per un'interpolazione della riflettanza per ciascuna delle bande. Il modello BRDF Walthall può essere espresso dall'equazione 1 (Walthall et al., 1985) come:

$$\rho_{\lambda}(\theta_v, \phi_v, \phi_s) = a_{\lambda}\theta_v^2 + b_{\lambda}\theta_v \cos(\phi_v - \phi_s) + c_{\lambda} \quad (1)$$

ove a, b e c sono i parametri del modello, determinati sulla base di una regressione ai minimi quadrati ed utilizzati per derivare, entro un intervallo di 16 giorni, la riflettanza *on-nadir* per ciascun pixel; mentre $(\theta_v, \phi_v, \phi_s)$ sono rispettivamente l'angolo di vista zenitale, l'angolo di vista azimutale e l'angolo azimutale del sole. Quando il numero di dati senza nuvole nel corso di un periodo di 16 giorni è inferiore a 5, si adotta l'approccio “*constrained view angle, maximum value composite*” (CV-MVC) per selezionare il più alto valore di NDVI, sulla base di due pixel senza nuvole con angoli di vista il più prossimi al nadir. In primo luogo, i dati di riflettanza senza nuvole sono ordinati all'interno della

finestra temporale per l'angolo di vista zenitale, e poi due dati di riflettanza, privi di nuvole e con angoli di vista prossimi all'angolo di vista zenitale, sono selezionati per calcolare l'NDVI. Vengono selezionati come risultati i valori composite all'interno della finestra temporale di 16 giorni corrispondenti alla riflettanza dei dati che determinano valori massimi di NDVI. Se all'interno della finestra temporale esiste solo un'osservazione priva di nuvole, questa sarà selezionata automaticamente per rappresentare il valore ottimale all'interno dell'intervallo del *composite* dei dati. Se i dati di osservazione sono soggetti per tutti i 16 giorni a contaminazione nuvolosa viene calcolato l'indice di vegetazione e tra tutte le osservazioni verrà selezionato il valore del pixel con il massimo valore di NDVI. Per quanto detto i valori NDVI ottenuti con la tecnica MODIS *Vegetation Index Compositing* sono leggermente più bassi rispetto a quelli ottenuti con la tecnica MVC.

La Figura 2-4 mostra il diagramma di flusso e la metodologia per l'algoritmo di *compositing* (CV-MVC) del prodotto indice di vegetazione MODIS (MOD13Q1, MYD13Q1).

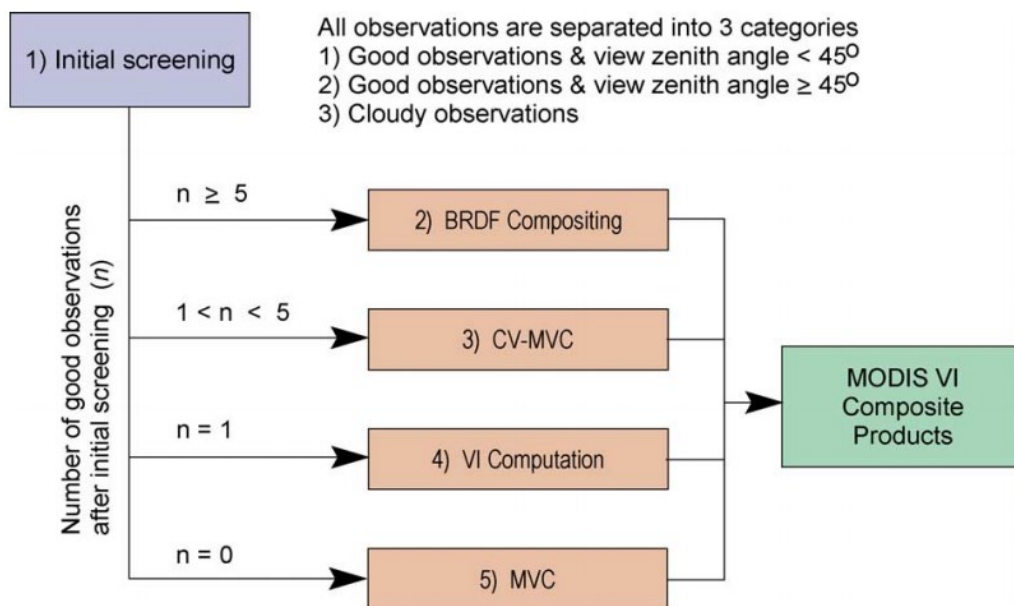


Figura 2-4 - Diagramma di flusso e metodologia per l'algoritmo MODIS *Vegetation Index Compositing*.

2.3 Smoothing e gap-filling delle serie temporali

2.3.1 Concetti e definizioni

Se il periodo di tempo del *composite* è troppo lungo, la tecnica del *time-compositing* non è in grado di riflettere i cambiamenti reali dei parametri della superficie terrestre; se è troppo breve, le influenze delle nuvole non possono essere efficacemente eliminate, soprattutto nelle zone nuvolose. Lo *smoothing* ed il *gap-filling* per i dati di serie temporali si propone di ricostruire i dati di serie temporali di elevata qualità ed eliminare le influenze di nuvole. Fino ad oggi sono stati sviluppati una varietà di tecniche di *smoothing* e *gap-filling* per le serie storiche di dati telerilevati (Viovy et al., 1992, Hermance 2007, Valérie et al., 2006, Roerink et al., 2000, Moody et al., 2005). In generale, questi metodi possono essere suddivisi in due categorie: la prima è lo *smoothing* ed il *gap-filling* nel dominio del tempo, come la tecnica *asymmetric gaussian function fitting* (Jönsson & Eklundh, 2004), *weighted least-squares linear regression* (Sellers et al., 1994), Savitzky-Golay (SG) (Savitzky et al., 1964), Whittaker smoother (Whittaker, 1923; Eilers, 2003; Atzberger et al., 2011; Atkinson et al., 2012); l'altra è lo *smoothing* ed il *gap-filling* nel dominio della frequenza, come *Fourier fitting method* (Roerink et al., 2000). Nel presente lo smoothing è stato operato mediante l'approccio Whittaker, pertanto solo di tale metodologia si parlerà nel sotto paragrafo a seguire.

2.3.2 Whittaker smoother

Questa tecnica che è la più antica tra quelle di *smoothing* (Whittaker, 1923), è stata rielaborata (Eilers, 2003) secondo un approccio denominato Whittaker-Henderson e proposta in un'analisi comparativa con altre tecniche di *smoothing* (Atzberger et al., 2011; Atkinson et al., 2012). Questo metodo, appartenendo alle tecniche di *smoothing* di serie temporali di indici di vegetazione derivati da dati di osservazione della terra, si basa sui seguenti presupposti (Chen et al., 2004):

- la serie temporale di indice di vegetazione segue un ciclo annuale di crescita;
- le nubi e le cattive condizioni atmosferiche, deprimendo i valori di indice di vegetazione e producendo bruschi diminuzione in valore e non essendo compatibili con il graduale processo

di cambiamento della vegetazione, rappresentano il rumore presente nei dati e come tale da rimuovere nell'operazione di filtraggio.

Supponendo che i dati di osservazione della terra siano una serie multi temporale y di lunghezza p ed in cui le osservazioni siano temporalmente equi-spaziate (l'intervallo p è diviso in sotto intervalli uguali tra un'osservazione e l'altra), in cui sia presente del rumore prodotto ad esempio da nuvole o da ombre prodotte da quest'ultime o dalla presenza di aerosol, allora l'applicazione dello *smoother* Whittaker è tale che il risultato del filtraggio z dei dati osservati y produca anche un *over-fitting* di quest'ultimi mediante un indicatore di bilanciamento Q espresso come:

$$Q = S + \lambda R \quad (1)$$

Il primo termine (S) al secondo membro rappresenta la fedeltà dei dati filtrati z ai dati osservati y ed è dato dalla differenza quadratica (*fitting bias*) tra i valori stimati ed i valori osservati. Il secondo termine (R) rappresenta la rugosità ed è espressa come differenza quadratica tra stime successive, ovvero tra le z successive.

Quindi lo *smoother* Whittaker si basa sulla minimizzazione di una funzione di costo che descrive l'equilibrio tra fedeltà e rugosità (*penalized least squares*). Questo equilibrio è controllato dal parametro di *smoothing* λ che può essere fissato dall'operatore: più alto è il suo valore, maggiore sarà l'effetto di *smoothing* sui dati originali, a discapito della fedeltà che si traduce in un minore *over-fitting* tra dati osservati y e dati filtrati z (Kandasamy et al., 2013).

Lo *smoothing* è controllato dall'ordine di differenziazione d , teoricamente variabile ($d=1,2,3\dots$), in pratica fissato ad un valore di 2 per i dati di serie multi temporali campionati a intervalli regolari ma con osservazioni mancanti (Eilers, 2003; Atzberger et al., 2011).

L'espressione matematica di R e S è:

$$S = \sum_i (y_i - z_i)^2 \quad (2)$$

$$R = \sum_i (\Delta^d z_i)^2 \quad (3)$$

Dove

$$\Delta^d z_i = \Delta(\Delta^{d-1} z_i)$$

per $d=1,2,3$ si ha:

$$\begin{aligned}\Delta z_i &= z_i - z_{i-1} \\ \Delta^2 z_i &= \Delta(\Delta z_i) = (z_i - z_{i-1}) - (z_{i-1} - z_{i-2}) = z_i - 2z_{i-1} + z_{i-2} \\ \Delta^3 z_i &= \Delta(\Delta^2 z_i) = (z_i - 2z_{i-1} + z_{i-2}) - (z_{i-1} - 2z_{i-2} + z_{i-3})\end{aligned}$$

L'idea del *penalized least squares* su cui si basa Whittaker smoother è di trovare la serie x che minimizzi Q . La scelta di λ è indipendente da Q , ma un diverso valore di λ porterà ad un diverso valore di Q minimo. Quindi il valore del parametro di *smoothing* λ è cruciale per il metodo Whittaker in quanto dipende dai dati su cui si opera, anche se in letteratura si consiglia un valore di default pari a 1600. Un modo obiettivo di scegliere il valore per λ è una *cross-validation* mediante il *tuning* di λ fino a quando si ottiene un risultato visivamente piacevole oppure considerando dei valori per λ in modo che ciascuno appartenga ad una serie di termini distanziati in modo lineare secondo la funzione $\log(k)$ (ad esempio $K=1,10,100,1000,10000$) e tale che ciascun valore di λ determini un valore minimo di Q ed una serie z filtrata. Calcolando la differenza $y_i - z_i$ (smooth bias) per ciascuna coppia y e z e ripetendo questo per tutti (p) gli elementi y_i e z_i , è possibile determinare il *cross-validation standard error*:

$$S_{cp} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^p (y_i - z_i)^2}{p}} \quad (4)$$

il valore ottimale di λ è tale da minimizzare il valore di S_{cp} (Eilers, 2003).

2.3.3 Osservazioni in merito alle tecniche di *smoothing* e *gap filling* di dati.

In un confronto tra otto tecniche di smoothing di dati NDVI multi temporali, considerando diversi tipi di vegetazione e sensori, si è concluso che il filtraggio con la metodologia Adaptive Savitzky-Golay (SG) fornisce, nella maggior parte delle situazioni, i migliori risultati (Geng et al, 2014). Nonostante la sua popolarità, l'algoritmo Adaptive Savitzky-Golay è poco flessibile e lento, mentre l'approccio

Whittaker-Hederson comporta notevoli miglioramenti in termini di velocità, flessibilità e facilità di cross-validation (Eilers, 2003). In particolare, ad differenza dei metodi Fourier e Wavelets non richiede un'ipotesi di periodicità; la funzione di *smoothing*, come si dimostrerà nei paragrafi seguenti, è governata principalmente dal parametro di *smoothing* λ , l'interpolazione è automatica senza alcun effetto di bordo (introducendo un numero di giorni di dati, ad esempio 40, all'inizio e alla fine della serie multi-temporale).

2.3.4 Le metriche fenologiche derivate dall'NDVI

Le metriche fenologiche coprono un ruolo importante nell'ambito del monitoraggio dei sistemi agricoli. Le coperture agricole rispetto alle coperture naturali, ad esempio, presentano una fenologia più complessa a causa dei picchi derivanti da diverse colture, piantate in modo sequenziale all'interno di una stagione di crescita (Galford et al., 2008; Arvor et al., 2011; Atkinson et al., 2012). Alcuni studi analizzano gli indicatori fenologici in base alla differenza di copertura fogliare che si ha in un campo agricolo in piena stagione, rispetto alla condizione di suolo nudo che si ha successivamente al raccolto (ad esempio, Badhwar et al., 1982; Guérif et al., 1996; Zhang et al., 2003; Bradley et al., 2007; Galford et al., 2008). Altri studi analizzano gli indicatori fenologici rilevati rispetto a variabili climatiche (Udelhoven et al., 2009) e/o mediante un'analisi dei trend (de Jong et al., 2011). Con riferimento a tali metriche in genere si individuano: l'inizio della stagione di crescita (*start of season*, SOS, o *green-up*), il culmine della stagione di crescita (*peak of season*, POS, o max) e la fine della stagione di crescita (*end of season*, EOS, o *senescence*). Queste metriche sono anche definiti come "metriche fenologiche di base" (Curnel et al., 2004) e da queste possono essere derivati altri indicatori fenologici utili al confronto della crescita della vegetazione tra le stagioni (variabilità inter-annuale) o per interpretare la variabilità della resa stagionale delle colture. Un elenco completo delle metriche fenologiche potenzialmente derivabili dalle serie multi temporali di indice spettrale NDVI filtrato (Jönsson & Eklundh, 2004; Chen et al., 2004; Curnel et al., 2004) è mostrato in Tabella 2-3 e riportato in Figura 2-5 e Figura 2-6.

Tabella 2-3 - Metriche fenologiche potenzialmente derivabili da serie multi temporale di indice spettrale NDVI filtrato.

LSP	Acronimo	Interpretazione fenologica	Descrizione
Start of Season Time	SOST	Inizio della fotosintesi nella copertura vegetazionale.	Giorno dell'anno identificato mediante un consistente aumento del valore dell'NDVI nella serie temporale.
Start of Season NDVI	SOSN	Livello di attività fotosintetica all'inizio della fotosintesi.	Valore dell'NDVI individuato nel giorno dell'anno in cui si registra un consistente aumento del valore dello stesso nella serie temporale.
End of Season Time	EOST	Fine della fotosintesi nella copertura vegetazionale.	Giorno dell'anno identificato al termine di una tendenza costante alla diminuzione del valore dell'NDVI nella serie temporale.
End of Season NDVI	EOSN	Livello di attività fotosintetica alla fine della fotosintesi.	Valore NDVI corrispondente al giorno dell'anno identificato mediante la fine di un calo costante del valore dello stesso nella serie temporale.
Time of Minimum	MINT	Tempo di fotosintesi minima nella copertura vegetazionale.	Giorno dell'anno corrispondente al minimo valore dell'NDVI nella serie temporale.
Minimum NDVI	MINN	Livello minimo di attività fotosintetica nella copertura vegetazionale.	Minimo valore dell'NDVI (linea di base) nella serie temporale.
Time of Maximum	MAXT	Tempo di fotosintesi massima nella copertura vegetazionale.	Giorno dell'anno corrispondente al massimo valore dell'NDVI nella serie temporale.
Maximum NDVI	MAXN	Livello massimo di attività fotosintetica nella copertura vegetazionale.	Massimo valore dell'NDVI nella serie temporale.
Duration	DUR	Lunghezza di attività fotosintetica (durata della stagione di crescita).	Numero di giorni compresi tra SOST e EOST.
Amplitude	AMP	Aumento massimo dell'attività fotosintetica nella copertura vegetazionale sopra la linea di base.	Differenza tra i valori di NDVI massimo (MAXN) e minimo (MINN) nella serie temporale.
Small integrated NDVI o value	SIN o SIV	Attività fotosintetica nella copertura vegetazionale durante tutta la stagione di crescita.	Integrazione dei valori giornalieri (interpolati) dell'NDVI, al di sopra della linea di base (MINN), per l'intera durata della stagione di crescita (da SOST a EOST).

Cont Tabella 2-3

LSP	Acronimo	Interpretazione fenologica	Descrizione
Large integrated NDVI o value	LIN o LIV	Attività fotosintetica nella copertura vegetazionale tutta la stagione di crescita	Integrazione dei valori giornalieri (interpolati) dell'NDVI per l'intera durata della stagione di crescita (da SOST a EOST).
Rate of increase	RI	Velocità con cui si raggiunge il massimo dell'attività fotosintetica a partire dal minimo della stessa.	$AMP/(MAXT-MINT)$

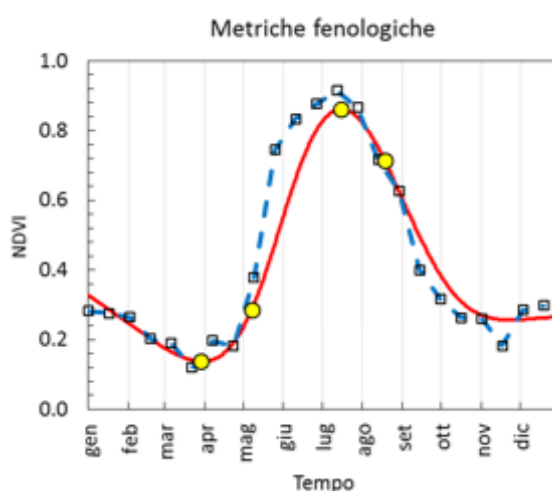


Figura 2-5 – Risaia “Battaglia”, anno 2003- Andamento dell’indice spettrale NDVI originale (tratto-simbolo) e filtrato (linea rossa continua) con indicazione delle metriche fenologiche di base (punti in giallo).

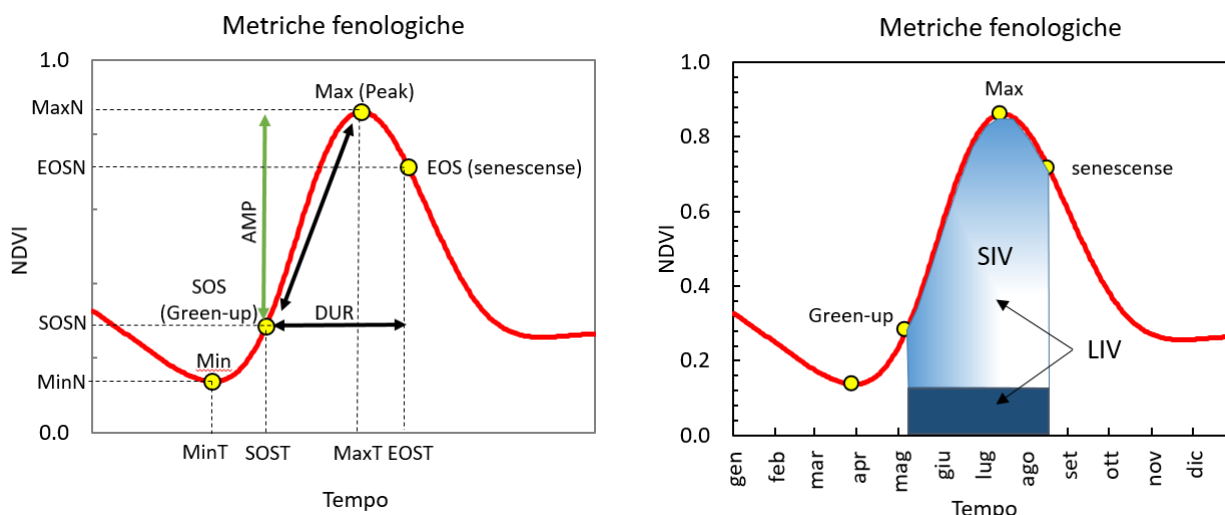


Figura 2-6 – Risaia “Battaglia”, anno 2003 –Andamento dell’indice spettrale NDVI filtrato con indicazione (figura a sinistra) dei valori di NDVI (N) e del relativo tempo (T) connessi alle metriche fenologiche minimo (Min), start of season (SOS), massimo (Max), end of season (EOS), amplitudine (AMP) e duration (DUR):Nella figura a sinistra sono indicate le metriche fenologiche short integrated NDVI (SIN) e Large integrated NDVI (LIN).

2.3.5 Approcci alla determinazione degli eventi fenologici connessi alla stima della LSP

Per determinare i parametri fenologici da serie storiche di indici di vegetazione derivanti da dati satellitari sono state sviluppati diversi metodi che possono essere raggruppati in due categorie (Beck et al., 2006):

1. Metodi che stimano i tempi dei singoli eventi fenologici (Reed et al., 1994; White et al., 2009; Badeck et al., 2004);
2. Metodi che modellano l'intera serie temporale utilizzando una funzione matematica (Jönsson e Eklundh, 2002; Stöckli e Vidale, 2004; Beck et al., 2006).

Gli approcci appartenenti ai due gruppi sono riassunti in Tabella 2-4 con i relativi riferimenti. I metodi che modellano l'intera serie temporale di indice di vegetazione hanno il vantaggio di conservarne un quantitativo massimo di informazioni, riducendone la dimensionalità (Jönsson e Eklundh, 2004). Pertanto, in aggiunta alle date fenologiche, dai modelli possono essere stimati anche altri parametri (Beck et al., 2006). Tuttavia, tali metodi sono difficili da applicare per grandi regioni e in genere non si adattano bene allo studio di ecosistemi caratterizzati da molteplici cicli di crescita (ad esempio, i sistemi a doppia o tripla-coltura e i sistemi semi aridi con più piogge stagionali) (Atkinson et al., 2012). La tradizionale trasformata di Fourier, ad esempio, prevede la periodicità dei dati che non sempre si presenta nella realtà (ad esempio, nel caso di cambiamento di uso del suolo) e spesso rivela oscillazioni spurie (Hermance, 2007) dovute alla combinazione di molte armoniche necessarie alla costruzione di modelli temporali non banali (ad esempio, in relazione a cicli culturali doppi e tripli). Mentre i dati non stazionari con forme temporali irregolari sono ben gestite dalla trasformata di wavelet (Galford et al., 2008), utilizzata ad esempio con successo per identificare l'inizio della stagione di crescita e il tempo di raccolta con errori relativamente bassi (± 2 settimane) (Sakamoto et al., 2005). L'analisi Wavelet è in grado di gestire il *range* di *pattern* agricoli che si succedono nel tempo, così come l'eterogeneità spaziale dei campi derivanti da precipitazioni e dalla gestione. Il metodo *Curve Fitting* utilizza funzioni

predefinite (ad esempio, *double logistic*) per modellare l'intera serie storica (Badhwar et al, 1982; Guérif et al, 1996; Beck et al, 2006; Meroni et al, 2014b.) e oltre a gestire il *gap-filling* dei dati, semplifica la parametrizzazione necessaria per l'identificazione di metriche, come il *green-up*. Un inconveniente dell'approccio *Curve Fitting* è che necessita dell'informazioni a priori sul numero di stagioni di coltivazione entro un periodo di 12 mesi e richiede la probabile localizzazione dei picchi di vegetazione (Jönsson e Eklundh, 2004).

Tabella 2-4 - I metodi per la determinazione degli eventi fenologici connessi alla stima della LSP da dati di osservazione della terra.

Metodo di stima della LSP	Riferimenti
Utilizzo specifiche soglie di NDVI	White et al., 2009; Atzberger et al., 2011
Individuazione del maggior incremento di NDVI	Kaduk and Heinmann, 1996
Utilizzo di medie mobili	Reed et al., 1994
Utilizzo dell'analisi delle componenti principali	Hirosawa et al., 1996
Utilizzo dell'analisi mediante serie armoniche e di Fourier	Atkinson et al., 2012; Azzali and Menenti, 2000; Jakubauskas et al., 2001
Utilizzo della wavelet decomposition	Anyamba and Eastman, 1996; Sakamoto et al., 2005
Curve fitting globale	Zhang et al., 2003; Beck et al., 2006; Jönsson e Eklundh, 2002; Meroni et al., 2014b
Curve fitting locale	Zhang et al., 2003

In questa lavoro di ricerca sono stati analizzati diversi tool, ciascuno afferente ad alcune delle metodologie illustrate ed esposte in Tabella 2-5.

Tabella 2-5 – Tool analizzati, con breve descrizione e riferimenti, finalizzati alla determinazione degli eventi connessi alla stima della LSP da dati satellitari.

Tool/metodologia	Descrizione	Riferimenti
Classical Seasonal Decomposition by Moving Averages	Scomponere una serie storica in componenti stagionali utilizzando medie mobili.	http://stat.ethz.ch/R-manual/R-devel/library/stats/html/decompose.html
Breaks For Additive Season and Trend (BFAST)	Integra la decomposizione delle serie temporali in tendenze stagionali e componenti con metodi che individuano e caratterizzare il cambiamento all'interno delle serie storiche.	http://bfast.r-forge.r-project.org/ Verbesselt et al., 2010.
GreenBrown	È una raccolta di funzioni per analizzare le tendenze ed i cambiamenti di tendenza nelle serie storiche di dati di osservazioni satellitari o simulazioni di modelli climatici.	http://greenbrown.r-forge.r-project.org/ Forkel et al.,2013.
TIMESAT	È in grado di indagare la stagionalità dei dati satellitari di serie temporali e il loro rapporto con le proprietà dinamiche della vegetazione, come la fenologia e lo sviluppo temporale.	http://www.nateko.lu.se/timesat/timesat.asp Jönsson et al.,2002;Jönsson et al.,2004.
Phenex	Fornisce funzioni per l'analisi spaziale di dataset fenologici e di dati di osservazioni satellitari della vegetazione.	https://cran.r-project.org/web/packages/phenex/

2.4 I modelli climatici e i dati di Ri-analisi

2.4.1 Introduzione

La Ri-analisi è un metodo scientifico per lo sviluppo di un rapporto completo e coerente di come il meteo ed il clima cambiano nel corso del tempo. I dati di ri-analisi si basano sulla assimilazione dei dati da sensore mediante più fonti e su modelli numerici di previsione meteorologica per la produzione di un insieme di dati spazializzati secondo una griglia e continuamente aggiornati tale da descrivere lo stato dell'atmosfera terrestre in differenti punti nel tempo e nello spazio. I dati di ri-analisi sono disponibili mediante diverse fonti. Le diverse fonti di dati variano rispetto alla risoluzione spaziale, la risoluzione temporale, il numero di variabili modellate, il relativo grado in cui diverse reti di sensori sono usati per produrre i dati di ri-analisi, e la lunghezza del record di dati storici. Per dati di ri-analisi si intende in genere dati con orizzonte temporale maggiore di dieci anni e tale da coprire l'intero globo dalla superficie terrestre ben al di sopra della stratosfera. I dati di ri-analisi sono spesso usati come "osservazioni" o il "vero stato" dell'atmosfera quando si studia la variabilità a breve termine ed i cambiamenti a lungo termine. Tuttavia, è importante sottolineare che i dati di ri-analisi possono soffrire di incongruenze nel sistema di raccolta dei dati e di distorsioni nell'assimilazione o nei modelli numerici. Di conseguenza, in alcune località, come per i complessi rocciosi, i dati di ri-analisi possono avere tendenze spurie. Questi problemi possono essere affrontati in una certa misura confrontando l'output di diverse ri-analisi oppure confrontando l'output di ri-analisi con dati di sensori indipendenti. Una schematizzazione dei dati di ri-analisi disponibili è riportata in Tabella 2-6, nel prossimo paragrafo si accennerà ai soli dati di ri-analisi ECMWF ERA-Interim, che sono i dati utilizzati in tale studio.

Tabella 2-6 –Confronto tra diversi set di dati di ri-analisi disponibili

Dati	Fonte	Periodo di riferimento	Modello di assimilazione	Data modello	Risoluzione spaziale	Risoluzione temporale	Formato dei dati
NCEP/NCAR Reanalysis 1	NCEP/NCAR	1948 ad oggi	3D-VAR	1995	2.5 x 2.5 e 2.0 x 2.0	6 ore; giornaliera; mensile	netCDF, GRIB
NCEP/NCAR Reanalysis 2	NCEP/DOE	1979 ad oggi	3D-VAR	2009	2.5 x 2.5 e 2.0x 2.0	6 ore; giornaliera; mensile	netCDF, GRIB
ECMWF ERA-Interim	ECMWF	1979 ad oggi	4D-VAR	2006	83 km all'equatore	3 ore per i campi superficiali; 6 ore per i restanti campi	GRIB
NCEP (CFSRR)	NCEP	1979 ad oggi	3D-VAR	2009	0.5 x 0.5 e 2.5x 2.5	oraria; 6 ore	GRIB
NASA MERRA	NASA	1979 ad oggi	GOES IAU	2009	0.75 lon x 0.5 lat	2D: oraria, giornaliera 3D: 3 ore; giornaliera.	netCDF, GRIB
NASA MERRA2	NASA	1980 ad oggi	TBD	2014	TBD (3.75 ° x 4.5°)	TBD	TDB
NOAA-CIRES	NOAA / ESRL / PSD	1871-2012	Esemble Kalman Filter	2009	2.0° x 2.0°	4 ore; 6 ore; giornaliera	netCDF, GRIB

2.4.2 Dati di Ri-analisi ECMWF ERA-Interim

I dati ERA-Interim sono forniti dal Centro europeo per le previsioni a medio termine (ECMWF) e sono stati originariamente progettati come una ri-analisi 'ad interim' in preparazione per i dati di ri-analisi estesi di nuova generazione in sostituzione dei dati ERA-40 (Dee et. al 2011). Attualmente è utilizzata una versione di dicembre 2006 del ECMWF integrato al modello di previsione (IFS Cy31r2). Inizialmente i dati coprivano il periodo dal 1° Gennaio 1989, in seguito all'aggiunta di una decade, i dati partono dal 1° Gennaio 1979 e continuano in tempo reale. La risoluzione spettrale è T255 (circa 80 km) e prevede 60 livelli verticali, con il modello al top dell'atmosfera pari a 0,1 hPa (circa 64 km s.l.m.m).

2.5 Modello di simulazione sviluppato per la stima di eco-indicatori da processo/simulazione

Il modello di simulazione sviluppato nell'ambito di questo lavoro ha un approccio modulare ed è composto da tre sotto modelli che stimano rispettivamente le dinamiche temporali dello stato idrico del suolo, della componente vegetale e dell'attività microbica nel suolo. Lo schema generale del modello è riportato in Figura 2-7.

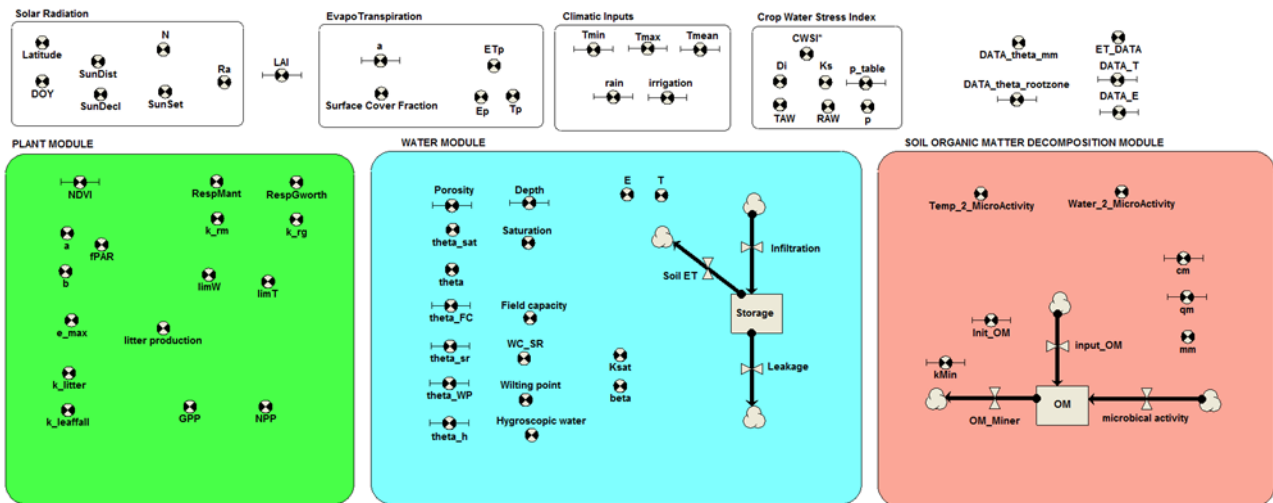


Figura 2-7 – Modello eco-idrologico: rappresentazione dei tre sotto modelli e delle relative variabili e costanti.

Il primo sotto modello simula lo stato idrico del suolo a scala giornaliera ed è stato formulato a partire dal *bucket model* (Guswa et. al, 2002). Il modello è rappresentato da una equazione differenziale ordinaria la cui variabile di stato è il contenuto idrico S (mm). In Figura 2-8 è rappresentato uno schema concettuale dei processi rappresentati dal sotto modello. Il flusso di infiltrazione I [$\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$] assume che tutte le precipitazioni siano efficaci, ovvero si infiltrino nel suolo fino al valore di saturazione ed è formulato come segue:

$$I'(S(t_i^-), t_i) = \min[P(t_i), nZ_r(1 - S(t_i^-))]$$

dove $P(t)$ sono le precipitazioni giornaliere [$\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$].

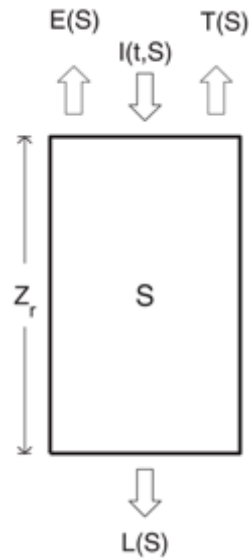


Figura 2-8 – Schema concettuale dei processi rappresentati dal sotto modello che simula lo stato idrico del suolo a scala giornaliera (flussi verticali nel *bucket model*).

Il flusso di percolazione L [mm d^{-1}] dal profilo di suolo simulato, è assunto come uguale alla conducibilità idraulica insatura descritta con la seguente relazione esponenziale:

$$L(S) = K_{sat} \frac{e^{\beta(S-S_{fc})} - 1}{e^{\beta(1-S_{fc})} - 1}$$

dove K_{sat} è la conducibilità idrica a saturazione, β è un parametro specifico del suolo e S_{fc} è il contenuto idrico a capacità di campo [mm], assumendo il drenaggio per gravità trascurabile rispetto ai flussi di evapotraspirazione. I flussi di evaporazione e traspirazione sono stimati a partire dall'evapotraspirazione potenziale derivata con la formulazione di Penman-Monteith FAO56. I valori giornalieri di ETp vengono separati in valori di evaporazione potenziale (Ep) e traspirazione potenziale (Tp) utilizzando la metodologia proposta da Ritchie (1972), secondo le seguenti relazioni:

$$Tp = ETp * 1 - \exp(-r_{est} * LAI)$$

$$Ep = ETp * (1 - (1 - \exp(-r_{est} * LAI)))$$

dove r_{est} è il coefficiente di estinzione della radiazione solare [-] e LAI è l'indice di area fogliare [$\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$]. L'evaporazione e la traspirazione effettive sono calcolate partendo dall'assunzione che tali flussi dipendano dallo stato idrico del suolo. Quando il contenuto idrico S è maggiore di un valore soglia S^* , E_a e T_a sono pari a E_p e T_p . Tali flussi si riducono linearmente tra S^* e S_w (contenuto idrico al punto di appassimento), dove i flussi si annullano completamente. La figura X rappresenta graficamente il contributo di tutti i flussi in uscita dell'equazione.

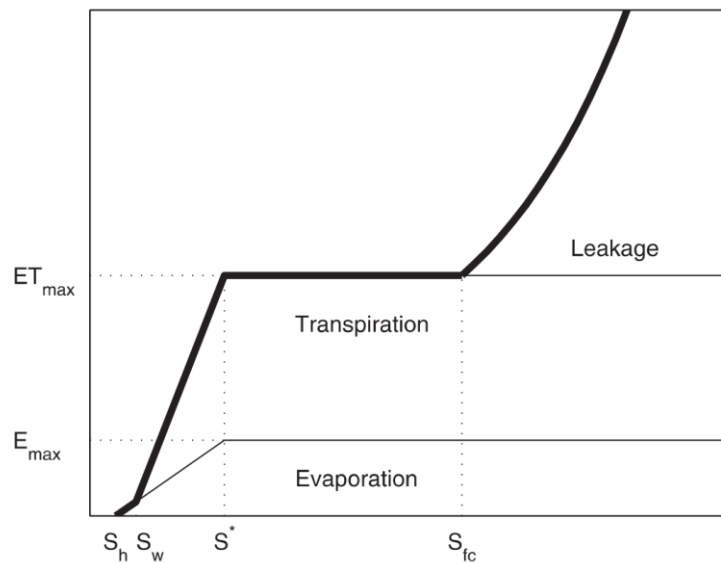


Figura 2-9 – Perdite nel *Bucket model* per effetto dell'evaporazione, della traspirazione, e del drenaggio in funzione della saturazione media al di sopra della *root zone*.

E_a e T_a sono espressi mediante le seguenti relazioni:

$$E(S) = \begin{cases} 0 & S \leq S_h \\ \frac{S-S_h}{S^*-S_h} \cdot E_{\max} & S_h < S < S^* \\ E_{\max} & S \geq S^* \end{cases} \quad T(S) = \begin{cases} 0 & S \leq S_w \\ \frac{S-S_w}{S^*-S_w} \cdot T_{\max} & S_w < S < S^* \\ T_{\max} & S \geq S^* \end{cases}$$

A partire dal contenuto idrico calcolato a scala giornaliera con le equazioni sopra riportate, è stato derivato un indice di stress idrico semplificato (CWSI*), definito in Cammalleri et al. (2002) come il complemento ad 1 del coefficiente di stress K_s del metodo FAO 56 (Allen et al., 1998).

Il secondo sotto modello simula il bilancio del carbonio della componente vegetale tramite l'approccio della *Light Use Efficiency* (LUE), come riportato in Yuan et al., 2007. Questo approccio si basa su due assunzioni fondamentali: 1) la produzione primaria lorda (GPP) di un ecosistema è direttamente correlata con la radiazione fotosinteticamente attiva (PAR) attraverso l'efficienza di utilizzo della luce (LUE), definita come la quantità di carbonio prodotta per unità di PAR; 2) la LUE effettiva può essere ridotta al di sotto del suo valore potenziale a causa di stress ambientali quali basse temperature o carenza idrica (Landsberg, 1986). La GPP [$\text{g C m}^{-2} \text{d}^{-1}$] viene quindi stimata attraverso la seguente relazione:

$$\text{GPP} = \text{PAR} \times f\text{APAR} \times \varepsilon$$

dove la APAR è la radiazione fotosinteticamente attiva incidente [$\text{MJ.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$], fAPAR è la frazione della PAR effettivamente assorbita dalla vegetazione ed ε (g C MJ^{-1}) è la LUE effettiva.

La frazione di radiazione assorbita fotosinteticamente attiva viene calcolata con il metodo proposto da Myneni e Williams (1994), secondo la seguente relazione:

$$f\text{APAR} = a \cdot \text{NDVI} + b$$

a e b sono parametri empirici che sono impostati rispettivamente a 1.24 e -0.168. Questa relazione con questi parametri è stata globalmente verificata in vari ecosistemi, ed è stata dimostrata la loro vasta e ampia rappresentatività (Sims et al., 2005).

Il valore di ε effettivo viene stimato come segue:

$$\varepsilon = \varepsilon_{\text{max}} \times \min(T_S, W_S)$$

dove ε_{max} è la LUE potenziale in assenza di stress ambientali e T_S e W_S sono scalari che variano tra 0 ed 1 e rappresentano gli effetti negativi della temperatura e dell'umidità del suolo sulla fotosintesi e sono calcolati con la seguente funzione:

$$X_S = ((2 \cdot (X - X_{\min})^\alpha) \times ((X_{\text{opt}} - X_{\min})^\alpha - (X - X_{\min})^{2\alpha})) / (X_{\text{opt}} - X_{\min})^{2\alpha}$$

dove

$$\alpha = \ln(2) / \ln((X_{\max} - X_{\min}) / (X_{\text{opt}} - X_{\min}));$$

dove X è uguale a T (temperatura) o W (contenuto idrico del suolo) e X_{\max} , X_{opt} e X_{\min} sono i parametri che definiscono i punti per cui la risposta X_S è uguale a 0 (X_{\max} e X_{\min}) e 1 (X_{opt}). In figura X sono riportati due esempi di curve di risposta W_S e T_S .

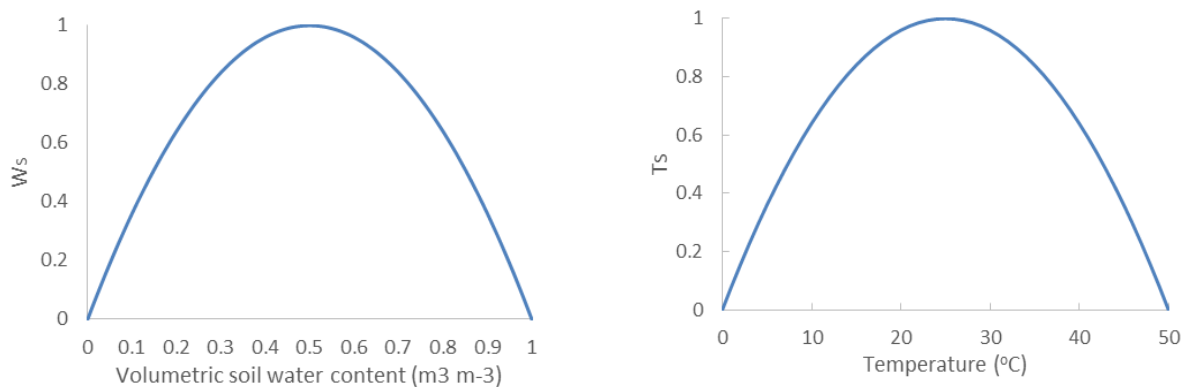


Figura 2-10 – Valori dei coefficienti W_S e T_S per la riduzione della fotosintesi in funzione rispettivamente dell'umidità del suolo e della temperatura.

Il modello inoltre stima la produzione primaria netta (NPP) come segue:

$$NPP = GPP - \text{Resp}_{\text{MANT}} - \text{Resp}_{\text{CRESCITA}}$$

dove $\text{Resp}_{\text{MANT}}$ [g.C.m⁻².d⁻¹] rappresenta la respirazione di mantenimento e $\text{Resp}_{\text{CRESCITA}}$ la respirazione di crescita della biomassa vegetale. Queste due grandezze vengono stimate a partire dai valori di NDVI come segue:

$$\text{Resp}_{\text{MANT}} = r_{\text{MANT}} \times \text{NDVI}_t$$

$$\text{Resp}_{\text{CRESCITA}} = r_{\text{CRESCITA}} \times \min(0, (\text{NDVI}_t - \text{NDVI}_{t-1}))$$

dove r_{MANT} [$\text{g C m}^{-2} \text{d}^{-1}$] rappresenta la quantità di carbonio respirata per unità di NDVI al tempo t , e $r_{CRESCITA}$ [$\text{g C m}^{-2} \text{d}^{-1}$] rappresenta la quantità di carbonio respirata per unità di incremento di NDVI al tempo t rispetto al tempo precedente $t-1$.

Il sottomodulo di respirazione microbica simula le dinamiche della sostanza organica (SO) nel suolo e stima, a partire dai flussi di mineralizzazione della stessa, i flussi di carbonio nel suolo. Il sottomodulo è una versione semplificata del modello proposto da Mazzoleni et al., 2012 ed è rappresentato da una equazione differenziale ordinaria che rappresenta la variazione nel tempo della sostanza organica nel suolo, formulata come:

$$d(\text{SO})/dt = \text{Lettiera}_{\text{TURNOVER}} + \text{Lettiera}_{\text{CADUTA}} + \text{Attività Microbica} - \text{Mineralizzazione};$$

dove $\text{Lettiera}_{\text{TURNOVER}}$ e $\text{Lettiera}_{\text{CADUTA}}$ [$\text{g C m}^{-2} \text{d}^{-1}$] rappresentano gli apporti di SO derivanti dalla produzione di lettiera dovuti ai processi di *turnover* radicale e fogliare e alla caduta delle foglie rispettivamente. Questi due flussi sono calcolati come segue:

$$\text{Lettiera}_{\text{TURNOVER}} = k_{\text{TURNOVER}} \times \text{NDVI}_t$$

$$\text{Lettiera}_{\text{CADUTA}} = k_{\text{CADUTA}} \times \min(0, \text{NDVI}_{t-1} - \text{NDVI}_t)$$

dove k_{TURNOVER} [$\text{g C m}^{-2} \text{d}^{-1}$] rappresenta la quantità di SO prodotta per unità di NDVI al tempo t , e k_{CADUTA} [$\text{g C m}^{-2} \text{d}^{-1}$] rappresenta la quantità di SO prodotta per unità di decremento di NDVI al tempo t rispetto al tempo precedente $t-1$.

Il flusso positivo “Attività Microbica” [$\text{g C m}^{-2} \text{d}^{-1}$] rappresenta l’apporto di SO dovuto al *turnover* microbico ed è calcolato come:

$$\text{Attività Microbica} = k_M \times \text{Mineralizzazione}$$

dove k_M ($\text{g C microbico} / \text{g C mineralizzato}$) è un parametro che rappresenta la quantità media di SO apportata al suolo dalla componente microbica per unità di SO vegetale mineralizzata. Il flusso

Mineralizzazione [$\text{g C m}^{-2} \text{d}^{-1}$] rappresenta il processo di mineralizzazione della SO ad opera della componente microbica del suolo ed è formulato come segue:

$$\text{Mineralizzazione} = \text{SO} \times k_{\text{MIN}} \times \min(T_s, W_s)$$

dove k_{MIN} [d^{-1}] è il tasso di mineralizzazione potenziale che viene ridotto in funzione dei fattori ambientali limitanti (temperatura e umidità del suolo) come riportato in precedenza.

Tabella 2-7 – Elenco delle corrispondenze tra le variabili e delle costanti utilizzate per il sito di Castelvetro nella descrizione e nella codifica in MATLAB del modello sviluppato.

Nome questo documento	Nome MATLAB	Unità di misura	Valore	Descrizione
n x Zr x Sfc	Theta FC	$\text{m}^3 \text{m}^{-3}$	0.32	Theta field capacity
n x Zr x Sw	Theta WP	$\text{m}^3 \text{m}^{-3}$	0.09	Theta wilting point
n x Zr x Sh	Theta HW	$\text{m}^3 \text{m}^{-3}$	0.04	Theta hygroscopic water
Ks	Ks	mm d^{-1}	110.4	Saturated hydraulic conductivity
Zr	Depth	mm	1000	Root zone depth (simulated soil layer depth)
n	Porosity (-)	-	0.5	Soil porosity
ϵ_{max}	e_max	g C MJ^{-1}	0.2	Potential LUE
r_{est}	r_ext	-	0.7	Radiation extinction by canopy
r_{MANT}	k_rm	$\text{g C m}^{-2} \text{d}^{-1}$	1.00	mant resp rate
r_{CRESCITA}	k_rg	$\text{g C m}^{-2} \text{d}^{-1}$	1.00	growth resp rate
k_{TURNOVER}	k_litter	$\text{g C m}^{-2} \text{d}^{-1}$	0.10	rate of litter prod by leaf fall
k_{CADUTA}	k_litter2	$\text{g C m}^{-2} \text{d}^{-1}$	0.10	rate of litter prod by turnover
n x Zr x S*	theta_WCs	$\text{m}^3 \text{m}^{-3}$	0.20	water cont max ET
β	beta	-	1.00	Water leakage parameter
k_{MIN}	k_min	d^{-1}	0.10	mineralization rate
k_{M}	Comp_Micro	-	0.50	SOMDY
k_{M}	Quoziente_metabolico	-	0.20	SOMDY
	Tmin	$^{\circ}\text{C}$	0.00	Climatic limiting factors
	Tmax	$^{\circ}\text{C}$	50.00	Climatic limiting factors
	Topt	$^{\circ}\text{C}$	30.00	Climatic limiting factors
	Wmin	$\text{m}^3 \text{m}^{-3}$	0.00	Climatic limiting factors
	Wmax	$\text{m}^3 \text{m}^{-3}$	1.00	Climatic limiting factors
	Wopt	$\text{m}^3 \text{m}^{-3}$	0.40	Climatic limiting factors

3 Materiali

3.1 Dati acquisiti

3.1.1 Dati Raster

I dati di input, in formato raster, riguardanti il clima, la vegetazione ed il suolo sono sintetizzati in Tabella 3-1 con la descrizione delle caratteristiche e della finalità.

Tabella 3-1 – Dati in formato raster utilizzati.

Tipologia di dato	dataset	Tipologia	risoluzione spaziale	Acronimo	Fonte
Clima	ECWF ERA-Interim		0.125°x0.125°	-	ECWF
Riflettanza	MODIS REFL	Prodotto TERRA	500 m	MOD09A1	
		Prodotto AQUA	500 m	MYD09A2	
Indici e parametri biofisici della Vegetazione	MODIS NDVI	Prodotto TERRA	250 m	MYD13Q1	
		Prodotto AQUA	250 m	MOD13Q1	
	MODIS LAI/FPAR	Prodotto Combinato TERRA & AQUA	1000 m	MCD 15A2	LP DAAC
		Prodotto Combinato TERRA & AQUA	500 m	MCD43A3	
	MODIS GPP/PSN	Prodotto TERRA	1000 m	MOD17A2	
		Prodotto AQUA	1000 m	MOD17A3	
Perdita di suolo per erosione idrica	Soil erosion by water (RUSLE2015)	-	500 m	RUSLE 2015	
Proprietà fisiche dello strato superficiale del suolo	LUCAS TOPSOIL 2015	-	500 m	LUCAS TOPSOIL 2015	JRS
Carbonio organico contenuto nel suolo	LUCASSOC	-	100 m	LUCASSO C	

I prodotti MODIS considerati in tale lavoro appartengono alla versione 5 (V005) che differiscono dalla versione 6 (V006) per i quali vi è stata una revisione dell'algoritmo di mascheramento delle

nuvole, determinando un aumentato di precisione del rilevamento delle stesse che si traduce in una maggiore accuratezza nel composite finale.

3.1.2 Dati vettoriali

I dati di input in formato vettoriale raccolti in questo studio sono i seguenti:

- A. **Sud e centro Italia** (Abruzzo, Basilicata, Calabria, Campania, Molise, Puglia, Sardegna, Sicilia): cartografia dell'uso del suolo con approfondimento delle aree agricole irrigate delle regioni Obiettivo I, elaborata attraverso l'analisi multi temporale di immagini Landsat negli anni 2004-2005. Scala 1:100.000 e 1:50.000 (aree irrigate), codificata mediante una legenda riportata in e conforme al Corine Land Cover III Liv. (Fonte INEA: <http://web.inea.it:8080/geodati>);
- B. **Nord Italia** (Liguria; Toscana settentrionale, una porzione dell'Emilia): uso del suolo derivato dalla carta CNR Touring club degli anni '60 (carta TCI 1960);
- C. Poligoni censiti a oliveto - fonte uso del suolo AGEA 2007 - ricadenti nel comune di Trevi (con annessa Carta dell'utilizzazione del suolo d'Italia in scala 1:200.000 - Foglio 13 TCI 1960), forniti dall'Università degli studi di Perugia;
- D. Poligoni relativi ad 8 aree test localizzate all'interno di zone PAT del territorio Siciliano, fornito dall'Università degli studi di Catania e Palermo;
- E. Unità di suolo del Cilento localizzate all'interno di zone PAT del territorio Campano, fornito dall'Università degli studi di Napoli;
- F. Aree a riso – fonte Ente Nazionale Riso (ENR) - e relative a dieci province (Pavia, Mantova, Verona, Ferrara, Rovigo, Grosseto, Siena, Oristano, Cosenza, Bologna), fornite dall'Università degli studi di Milano;
- G. Ecoregioni d'Italia (Blasi et.al, 2014), fornito dall'Università degli Studi di Roma La Sapienza e riportato in Figura 3-1.

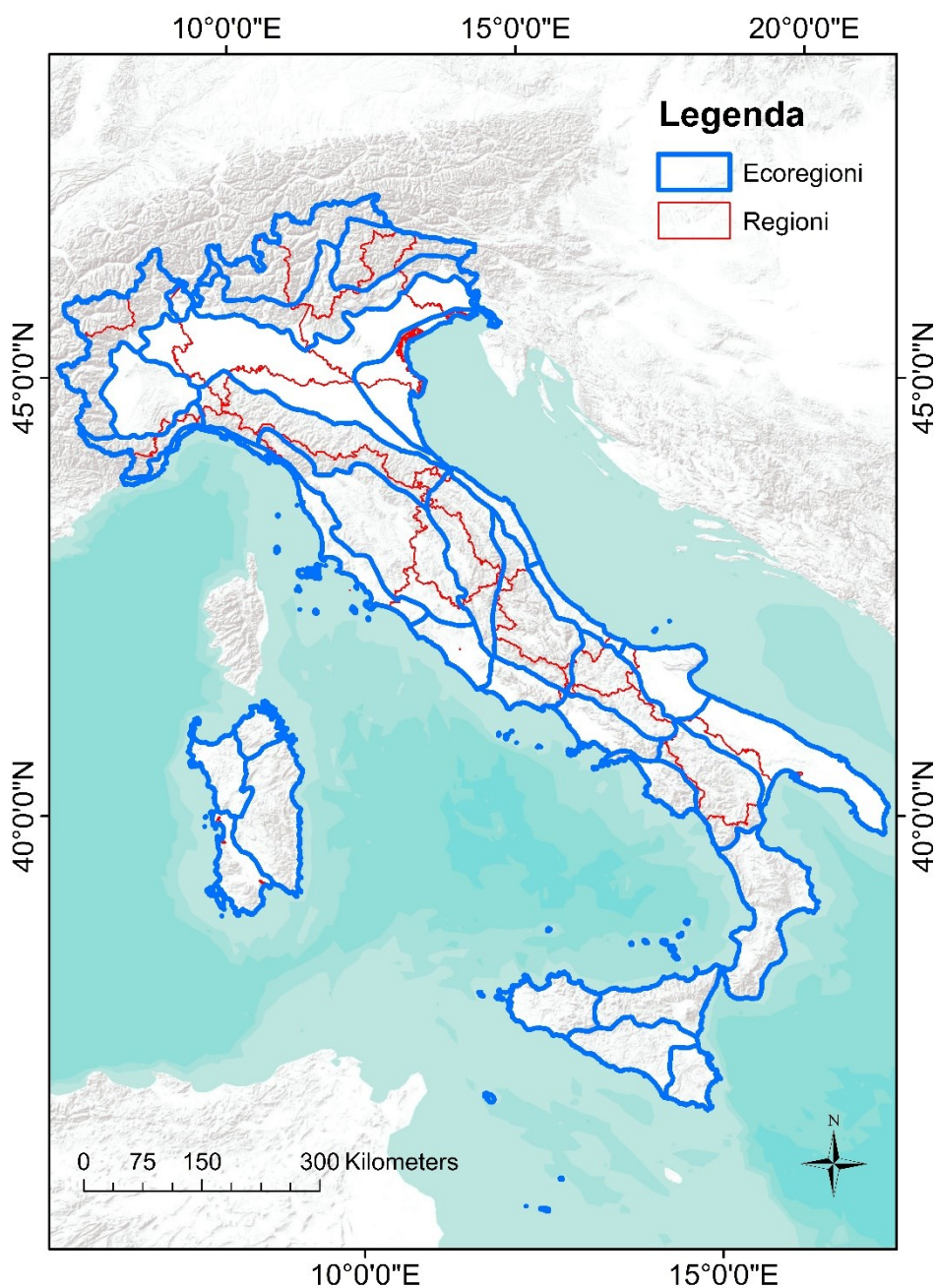


Figura 3-1 –Mappa delle Sottosezioni Ecoregionali d’Italia (Blasi et.al, 2014), con i limiti amministrativi delle Regioni.

3.1.3 Dati di validazione

Sono dati relativi a due stazioni di Eddy covariance: la stazione di Castelvetro (Trapani) e la stazione di Brisighella (Ravenna). La prima ha fornito una serie storica di dati agrometeorologici e flussi di H₂O nel periodo 2009-2014, mentre dalla seconda sono stati estratti dati agrometeorologici e flussi di CO₂ e di H₂O nel periodo maggio-settembre 2009.

3.2 Identificazione geografica di areali riguardanti i PAT

A scala nazionale all'interno delle Sottosezioni Ecoregionali d'Italia (Blasi et al.,2014) - che rappresentano una sintesi analitica di informazioni bioclimatiche , biogeografiche, lito-strutturali, morfologiche e vegetazionali - è stato realizzato un database dei dati disponibili per il calcolo di indicatori eco-idrologici. Individuata la tipologia di PAT (sistemi colturali, ambiente pedo-climatico, etc.) è stato realizzato uno strato informativo vettoriale (shapefile) di PAT noti per la maggior parte delle Sottosezioni Ecoregionali d'Italia, a partire da documenti specifici disponibili a scala regionale come la “Carta dei paesaggi agrari tradizionali” redatta per la Sicilia (Barbera et al.,2014) e dalla consultazione delle carte dell'uso del suolo attuali (Corine, Geodati INEA, AGEA, ENR) e storiche (Touring Club).

3.2.1 Metodologia adottata per la selezione poligoni PAT all'interno delle sottosezioni Ecoregionali d'Italia

A livello Nazionale i differenti sistemi colturali sono stati suddivisi secondo la legenda dei GEODATI INEA e della carta TCI 1960 carta TCI 1960. Sovrapponendo queste cartografie alle orto-foto satellitari del motore di ricerca Bing (<http://www.bing.com/maps/>) è stata verificata, mediante fotointerpretazione, la rispondenza delle cartografie all'uso attuale del suolo (validazione dei poligoni). Successivamente, sovrapponendo ai poligoni così individuati le immagini del prodotto MODIS NDVI (dimensione del pixel 250), sono stati selezionati i pixel omogenei rispetto a ciascun PAT all'interno del livello ecoregionale di “sottosezione”. Si è provveduto poi alla recodifica della legenda dei punti derivati dai dati vettoriali di uso del suolo, secondo quanto riportato in Tabella 3-2.

Tabella 3-2 – Legenda dei punti PAT selezionati

Uso suolo cartografia sorgente	Utilizzata
Risaie con semina in acqua	Risaia
Risaie con semina interrata	
Frutteti e frutti minori irrigui	Frutteto
Frutteti e frutti minori non irrigui	
Oliveti irrigui	Oliveto
Oliveti non irrigui	
Vigneti irrigui	Vigneto
Vigneti non irrigui	

Tabella 3-3 – Numero di sample raccolti, differenziati per coltura all'interno delle sottosezioni Ecoregionali.

Coltura	Sottosezione Ecoregionale	n° punti
Frutteto	1B1b-Sottosezione Alta e Bassa Pianura	5
	1C2b-Sottosezione Laziale-Abruzzese	22
	2B2a-Sottosezione Campana	12
	2B2b-Sottosezione Lucana	5
	2B2c-Sottosezione Cilentana	4
	2B2d-Sottosezione Calabrese	19
	2B3a-Sottosezione Iblea	1
	2B3b-Sottosezione Montana Siciliana	5
	2B3c-Sottosezione Siciliana centrale	6
	2B4a-Sottosezione Sarda sud-occidentale	20
	2B4c-Sottosezione Sarda sud-orientale	11
	2C1a-Sottosezione Centrale	158
	2C2a-Sottosezione Apulo-Salentina	16
	2C2b-Sottosezione Garganica	21
	Totale	
Oliveto	1C1b-Sottosezione Bacino Toscano	2
	1C2a-Sottosezione Umbro-Marchigiana	7
	1C2b-Sottosezione Laziale-Abruzzese	32
	1C2c-Sottosezione Appennino Campano	10
	2B2a-Sottosezione Campana	15
	2B2b-Sottosezione Lucana	33
	2B2c-Sottosezione Cilentana	74
	2B2d-Sottosezione Calabrese	195
	2B3d-Sottosezione Siciliana occidentale	9
	2B4b-Sottosezione Sarda Nord occidentale	32
	2B4c-Sottosezione Sarda sud-orientale	1
	2C1a-Sottosezione Centrale	2
	2C2a-Sottosezione Apulo-Salentina	19
2C2b-Sottosezione Garganica	13	
Totale		444
Risaia	1B1a-Sottosezione Lagunare	37
	1B1b-Sottosezione Alta e Bassa Pianura	9
	1C1b-Sottosezione Bacino Toscano	32
	2B1b-Sottosezione Maremmana	2
	2B4a-Sottosezione Sarda sud-occidentale	2
Totale		82
Totale		831

3.3 Elaborazione dei prodotti indice di vegetazione derivante da piattaforma satellitare MODIS TERRA e AQUA.

I dati di indice di vegetazione utilizzati in questo studio sono dati in formato raster, derivati da un composite a 16 giorni dell'indice spettrale NDVI dal sensore MODIS con una dimensione dei pixel 250m. Il composite MODIS NDVI è un prodotto di livello 3, calcolato dal prodotto di livello 2 giornaliero e relativo alla riflettanza superficiale (serie MOD09 e MYD09) (Vermote et al.,1999; Vermote et al.,2002). I dati sono aggregati utilizzando il metodo di *compositing* CV-MVC in un intervallo temporale di 16 giorni (Huete et al.,2002). L'indice spettrale NDVI dal sensore MODIS è attualmente disponibile dalle piattaforme TERRA e AQUA (MOD13Q1 e MYD13Q1) e l'uso combinato dei due satelliti fornisce serie storiche con frequenza di 8 giorni nel periodo 2003-2015 e con dimensione del pixel di 250 m. Se il periodo di tempo del composite è troppo lungo, la tecnica del *time-compositing* non è in grado di riflettere i cambiamenti reali dei parametri della superficie terrestre; se è troppo breve, le influenze delle nuvole non possono essere efficacemente eliminate, soprattutto nelle zone nuvolose. Lo *smoothing* ed il *gap-filling* per i dati di serie temporali si propone di ricostruire i dati di serie temporali di elevata qualità ed eliminare le influenze di nuvole. Per tale studio è stata adottata la tecnica di Whittaker-Hederson.

L'approccio Whittaker-Hederson o Whittaker modificato è stato utilizzato per questo lavoro all'interno l'ambiente di *scripting* R (R Development Core Team, 2011), operando la raccolta dei dati MODIS ed il pre-processing mediante le funzionalità di GDAL (Warmerdam, 2008), ed infine lo *smoothing* ed il *gap-filling* con l'ausilio di un pacchetto "MODIS" (Mattiuzzi et al, 2012). Nella versione corrente (Version: 0.10-34 | Last change: 2016-01-25 19:32:13+01 | Rev.: 510) del pacchetto "MODIS" è inoltre possibile prendere in conto, come dato ancillare per il filtraggio dei dati grezzi, il dato raster ancillare "quality" (*VI Quality detailed*) ed il dato raster "data effettiva del pixel" (*Day of Year*).

Tabella 3-4 – “Argomenti” della funzione Whittaker.raster (‘MODIS’, R package), con descrizione ed indicazione delle scelte effettuate per lo studio in esame.

Argomenti	Descrizione	Valori utilizzati
vi	Vegetation index raster	NDVI/EVI da M.OD13Q1; altri indici spettrali derivati da M.OD13Q1 e M.09A1
w	In case of MODIS composite the 'VI_Quality' raster	VI_Quality M.OD13Q1 (weighting threshold=6) e weighting manuale mediante la funzione makeWeights
t	In case of MODIS composite the 'composite_day_of_the_year' raster	NDVI/EVI dal prodotto M.OD13Q1; altri indici spettrali derivati dal prodotto M.D13Q1 e M.D09A1
lambda	High values = stiff/rigid spline	1000
n-Iter	Number of iteration for the upper envelope fitting.	1 (corrispondente a due iterazioni)
removeOutlier	If 'removeOutliers=TRUE', a whittaker spline (with the user specified 'lambda') is applied before the iterative filtering process. If the difference between spline and raw value is bigger than threshold the raw value is removed.	-
outlierThreshold	Numerical in the same unit as vi, used for outliers removal.	-
mergeDoyFun	Multiple measurements for one day can be present, here you can choose how those values are merged to one single value: "max" use the highest value, "mean" or "weighted.mean" use the mean if no weighting "w" is available and weighted.mean if it is.	max per il prodotto M.D13Q1 mean per il prodotto M.D09A1

3.3.1 Smoothing dell’indice di vegetazione NDVI: analisi e scelta dei parametri lamda e n-Iter per l’algoritmo Whittaker-Hederson.

L’analisi dei parametri “argomenti” della funzione Whittaker raster presi in esame e riportati in Tabella 3-4 sono lamda ed n-Iter (numero di iterazioni). L’area considerata è la regione Sicilia mediante dati di NDVI composite a 16 giorni da MODIS TERRA e AQUA (MOD13Q1 e MYD13Q1) con frequenza del dataset complessivo di 8 giorni nel periodo 2003-2015 e con dimensione del pixel di 250 m. Al variare, separatamente, di n-Iter e lambda si è operata una comparazione quantitativa a scala di sottosezione Ecoregionale, riportate in Figura 3-2, mediante la

stima dell'errore quadratico medio (Rcp), e visivamente - a scala di punto-pixel in alcune aree test – sulla base della fedeltà dello *smoothing* ai dati originari (*over-fitting*).



Figura 3-2 – Ripartizione delle sottosezioni Ecoregionali nell'ambito della regione Sicilia (Blasi et al.,2014)

Fissato n-iter pari ad 1 si è proceduto allo *smoothing* con valori di lambda pari a 1, 10, 100, 1000, 1600 (quest'ultimo è il valore consigliato in letteratura) e 10000 con la determinazione del corrispondente errore quadratico medio, come riportato in Figura 3-2. Fissato lambda pari a 1000, si è proceduto allo *smoothing* con valori di n-Iter pari a 0, 1, 2, 3, 4 con la determinazione del corrispondente errore quadratico medio, come riportato in Figura 3-9. Un confronto visivo tra dati non filtrati e dati filtrati a scala di pixel per le due elaborazioni – filtraggio, fissato n-iter pari ad 1, al variare di lambda (1, 10, 100, 1000, 1600 e 10000) e filtraggio, fissato lambda=1000, al variare di n-iter (0, 1, 2, 3 e 4) è riportato rispettivamente in Figura 3-4 e Figura 3-10. Infine a scala regionale, per le 4 sottosezioni Ecoregionali di Iblei, Sicilia Centrale, Sicilia Occidentale e Sicilia Montana sono stati valutate le statistiche media, minimo, massimo e deviazione standard dell'errore Rcp al variare di lambda (1, 10, 1000, 1600, 10000) fissato n-Iter=1 e successivamente al variare di n-Iter (0, 1, 2, 3, 4) fissato lambda=1000, come riportato rispettivamente in Figura 3-6 e Figura 3-7.

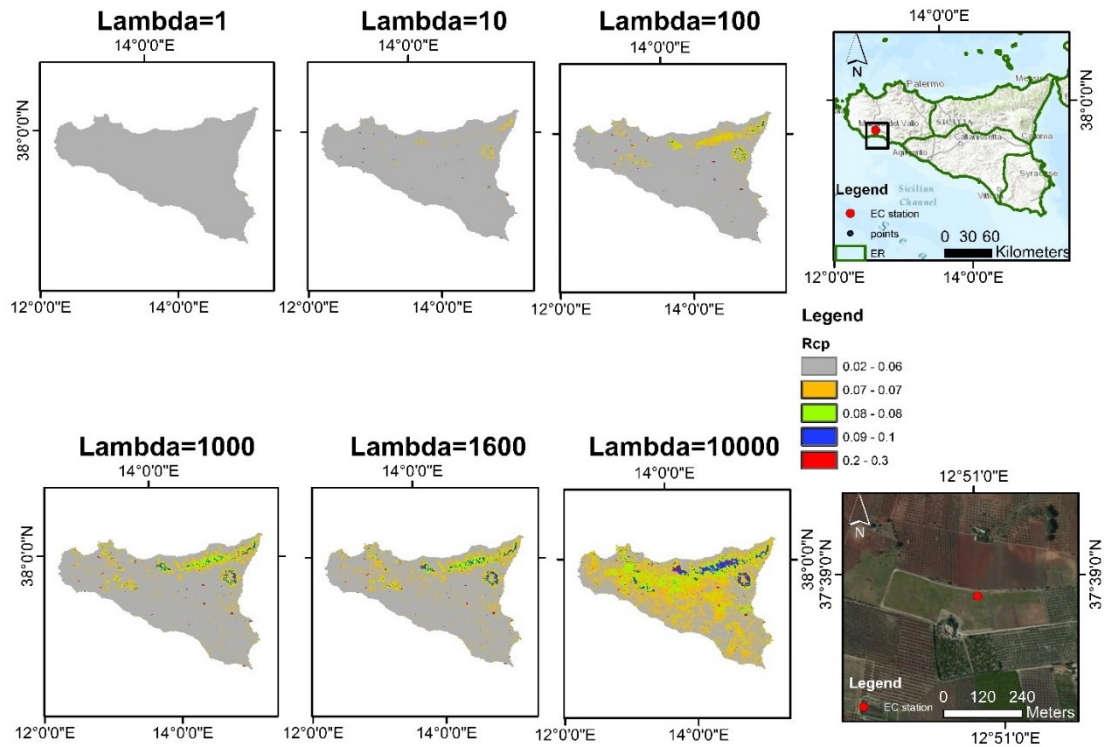


Figura 3-3 – Smoothing mediante l’approccio Whittaker su serie temporale con frequenza di 8 giorni di dati NDVI composite a 16 giorni da MODIS TERRA e AQUA (MOD13Q1 e MYD13Q1) con dimensione del pixel di 250 m: stima a scala regionale dell’errore quadratico medio (Rcp) al variare del parametro lambda, fissato n-iter=1.

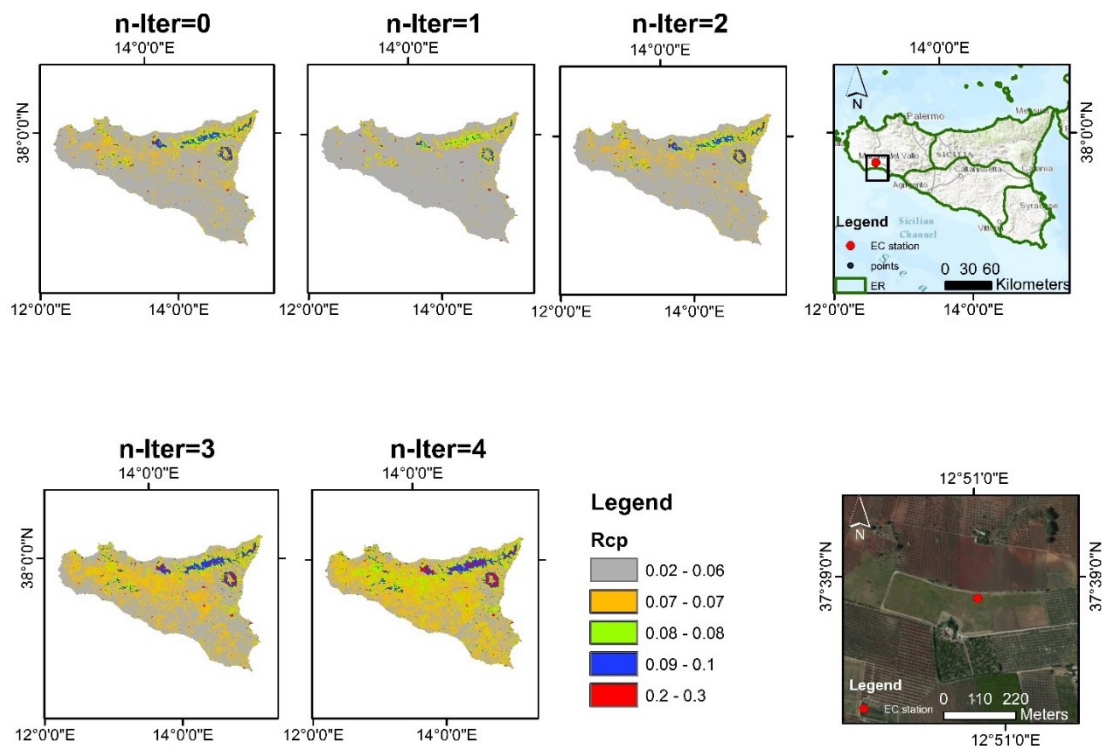


Figura 3-4 – Smoothing mediante l’approccio Whittaker su serie temporale con frequenza di 8 giorni di dati NDVI composite a 16 giorni da MODIS TERRA e AQUA (MOD13Q1 e MYD13Q1) con dimensione del pixel di 250 m: stima a scala regionale dell’errore quadratico medio (Rcp) al variare del parametro n-Iter.

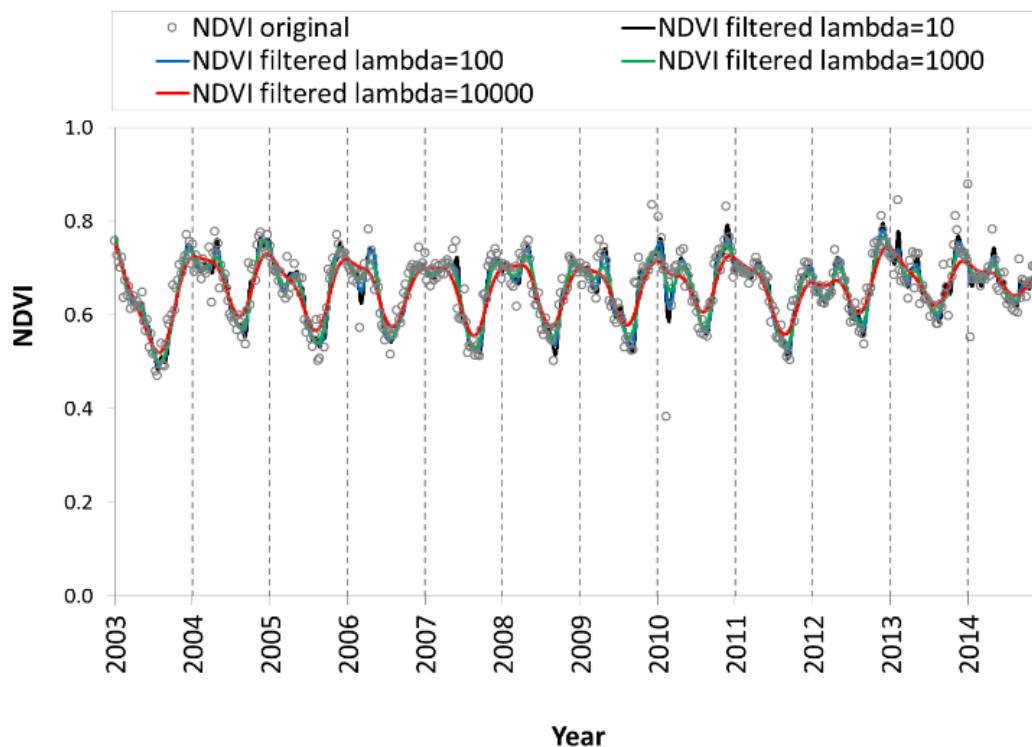


Figura 3-5 – Smoothing mediante l’approccio Whittaker al variare di lambda, fissato n-iter=1, su serie temporale con frequenza di 8 giorni su dati NDVI composite a 16 giorni da MODIS TERRA e AQUA (MOD13Q1 e MYD13Q1) con dimensione del pixel di 250: dati originali e filtrati per il test site in prossimità della stazione di Eddy Covariance di Castelvetrano (Trapani, Sicilia) per il periodo 2003-2014.

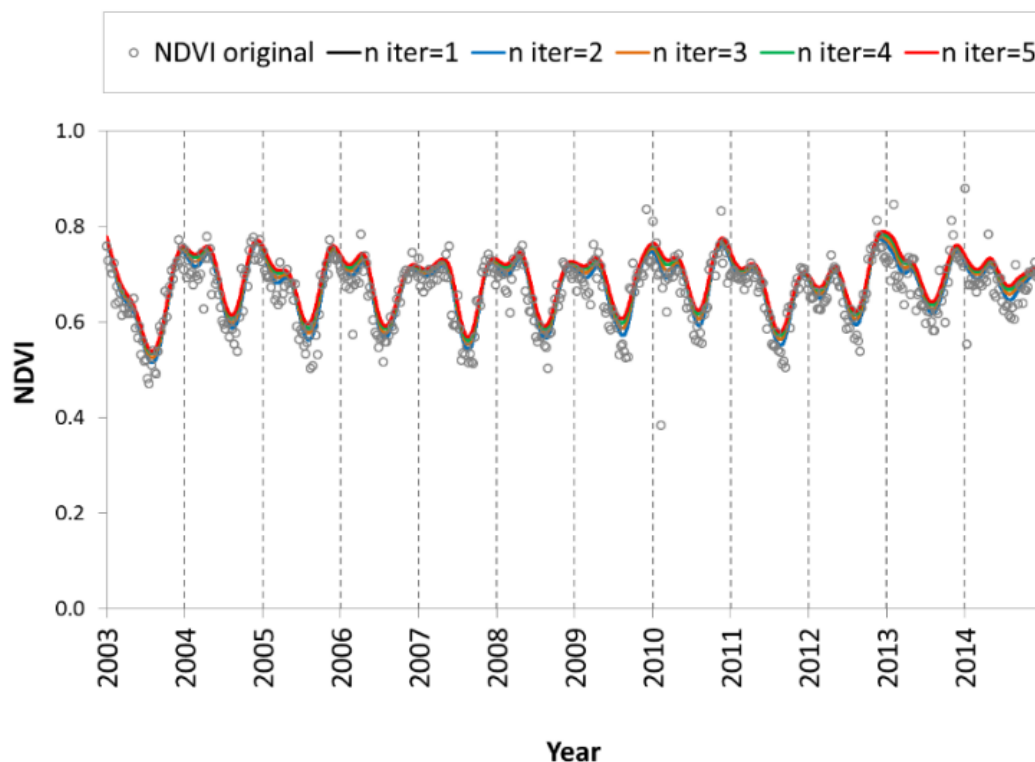


Figura 3-6 – Smoothing mediante l’approccio Whittaker al variare di n-iter, fissato lambda=1000, su serie temporale con frequenza di 8 giorni su dati NDVI composite a 16 giorni da MODIS TERRA e AQUA (MOD13Q1 e MYD13Q1) con dimensione del pixel di 250: dati originali e filtrati per il test site in prossimità della stazione di Eddy Covariance di Castelvetrano (Trapani, Sicilia) per il periodo 2003-2014.

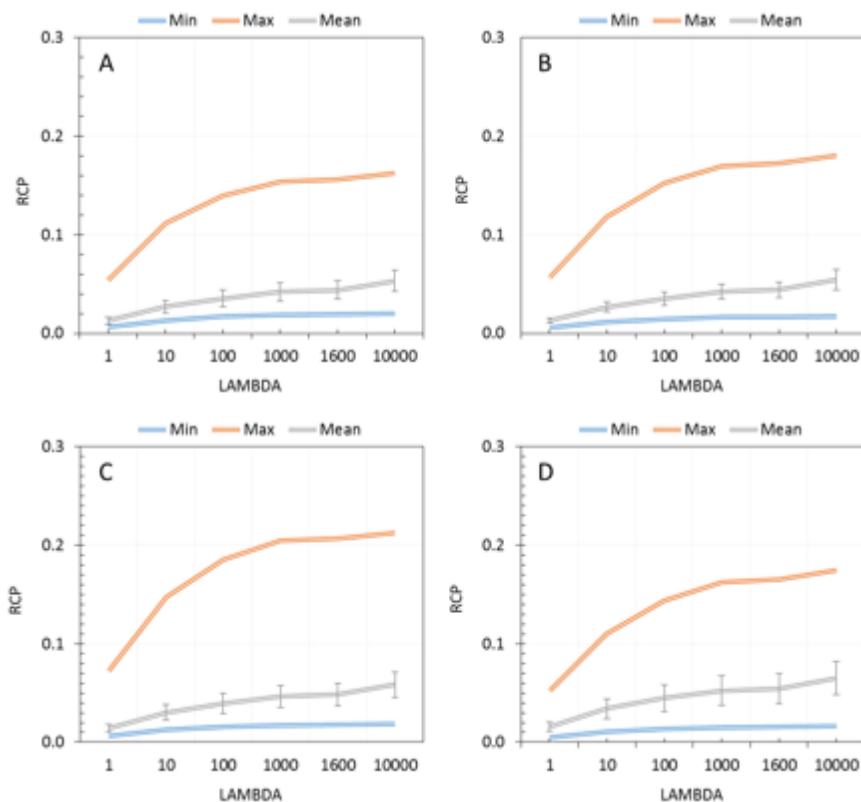


Figura 3-7 – Andamenti delle statistiche (minimo, massimo, media e deviazione standard) dell’errore quadratico medio (Rcp) al variare del parametro lambda per la sottosezione Ecoregionale “Iblea” (A), “Sicilia Centrale”(B), “Sicilia Occidentale” (C) e “Sicilia Montana” (D).

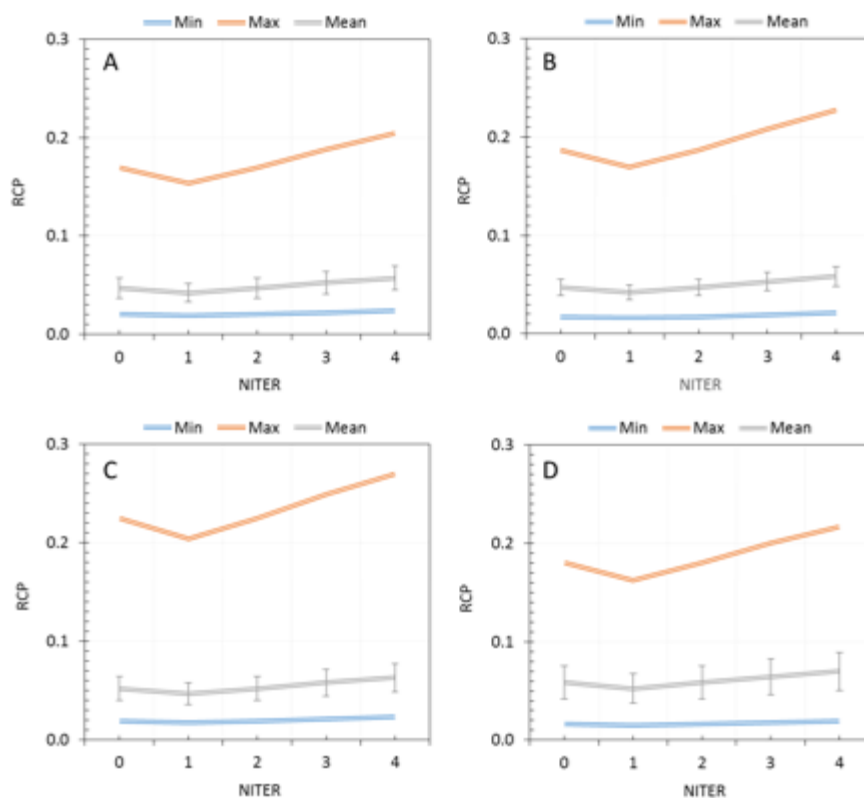


Figura 3-8 – Andamenti delle statistiche (minimo, massimo, media e deviazione standard) dell’errore quadratico medio (Rcp) fissato lambda (1000) al variare del parametro n-Iter per la sottosezione Ecoregionale “Iblea” (A), “Sicilia Centrale”(B), “Sicilia Occidentale” (C) e “Montana Sicilia” (D).

Da questa analisi è possibile concludere che:

- Il filtraggio con il metodo Whittaker- Hederson è sensibile alle variazioni del parametro λ ed n-Iter. In particolare, negli intervalli indagati di λ , la curva di *smoothing* assume andamenti più regolari e quindi visivamente più “gradevoli” al crescere di λ (dal valore 10 al valore 10000), ma si registra globalmente una perdita di fedeltà (*over-fitting*) rispetto ai dati di partenza, quantificato dall’aumento dell’errore Rcp. In corrispondenza dei valori indagati per il parametro n-Iter si registra uno spostamento della curva di *smoothing* verso l’alto (*upper envelop*) nei tratti in prossimità dei minimi e dei massimi, con una perdita di fedeltà (*over-fitting*) rispetto ai dati di partenza, quantificato dall’aumento dell’errore Rcp.
- Il valore consigliato per il parametro n-Iter pari a 1 (corrispondente ad due iterazioni) produce, a scala regionale e a scala di pixel, il minore errore Rcp: in generale Rcp diminuisce passando da n-Iter =0 a n-Iter=1 ed aumenta nel passare da n-Iter=1 ad n-Iter=4.
- Valori maggiori dell’errore quadratico medio (Rcp) si registrano in corrispondenza di aree montuose (Figura 3-4 Figura 3-4): ciò è dovuto molto probabilmente ad una persistenza di rumore (nuvole e delle ombre prodotte dalle nuvole) che l’algoritmo di composite non è in grado di rimuovere e che sono rilevati dall’algoritmo di smoothing durante il filtraggio.

I valori scelti sulla base di tale considerazioni sono $\lambda=1000$ e n-Iter=1 (corrispondente a due iterazioni). Successivamente al filtraggio dell’indice NDVI sono stati generati delle serie temporali di indice NDVI originale e filtrato per tutti i punti PAT riportati in Tabella 3-3: di questi punti sono stati selezionati quelli per cui la serie temporale dell’indice NDVI filtrato e originale mostravano andamenti non affetti da “rumore” e come tali da cui si potesse estrarre informazioni chiare relativamente al trend dell’indice NDVI, pervenendo quindi ai punti riportati in Tabella 3-5 e distribuiti geograficamente secondo quanto riportato in Figura 3-9. Un esempio di serie temporale di indice NDVI filtrato ed originale per un punto ritenuto “valido” è riportato in Figura 3-10, mentre in Figura 3-11 è riportata la serie temporale di indice NDVI filtrato ed originale per

un punto eliminato in quanto affetto da eccessivo “rumore” e come tale non adeguata a fornire chiare informazioni relative al trend dell’indice NDVI.

Tabella 3-5 – Numero di sample raccolti, differenziati per coltura all’interno delle Sottosezioni Ecoregionali, successivamente all’operazione di rimozione dei punti affetti da “rumore”.

Coltura	Ecoregione	n° punti
Frutteto	1B1b-Sottosezione Alta e Bassa Pianura	2
	1C2b-Sottosezione Laziale-Abruzzese	3
	2B2a-Sottosezione Campana	3
	2B2b-Sottosezione Lucana	2
	2B2c-Sottosezione Cilentana	1
	2B2d-Sottosezione Calabrese	6
	2B3a-Sottosezione Iblea	1
	2B3b-Sottosezione Montana Siciliana	4
	2B3c-Sottosezione Siciliana centrale	6
	2C1a-Sottosezione Centrale	19
	2C2a-Sottosezione Apulo-Salentina	14
	2C2b-Sottosezione Garganica	16
	Totale	77
Oliveto	1C1b-Sottosezione Bacino Toscano	2
	1C2b-Sottosezione Laziale-Abruzzese	2
	2B2b-Sottosezione Lucana	2
	2B2c-Sottosezione Cilentana	12
	2B2d-Sottosezione Calabrese	108
	2B3d-Sottosezione Siciliana occidentale	8
	2C2a-Sottosezione Apulo-Salentina	13
2C2b-Sottosezione Garganica	9	
Totale	156	
Risaia	1B1a-Sottosezione Lagunare	36
	1B1b-Sottosezione Alta e Bassa Pianura	9
	1C1b-Sottosezione Bacino Toscano	33
	2B1b-Sottosezione Maremmana	2
	2B2d-Sottosezione Calabrese	5
Totale	85	
Vigneto	2B2a-Sottosezione Campana	2
	2B2d-Sottosezione Calabrese	2
	2B3d-Sottosezione Siciliana occidentale	4
	2C1a-Sottosezione Centrale	1
	2C2a-Sottosezione Apulo-Salentina	6
Totale	15	
Totale	333	

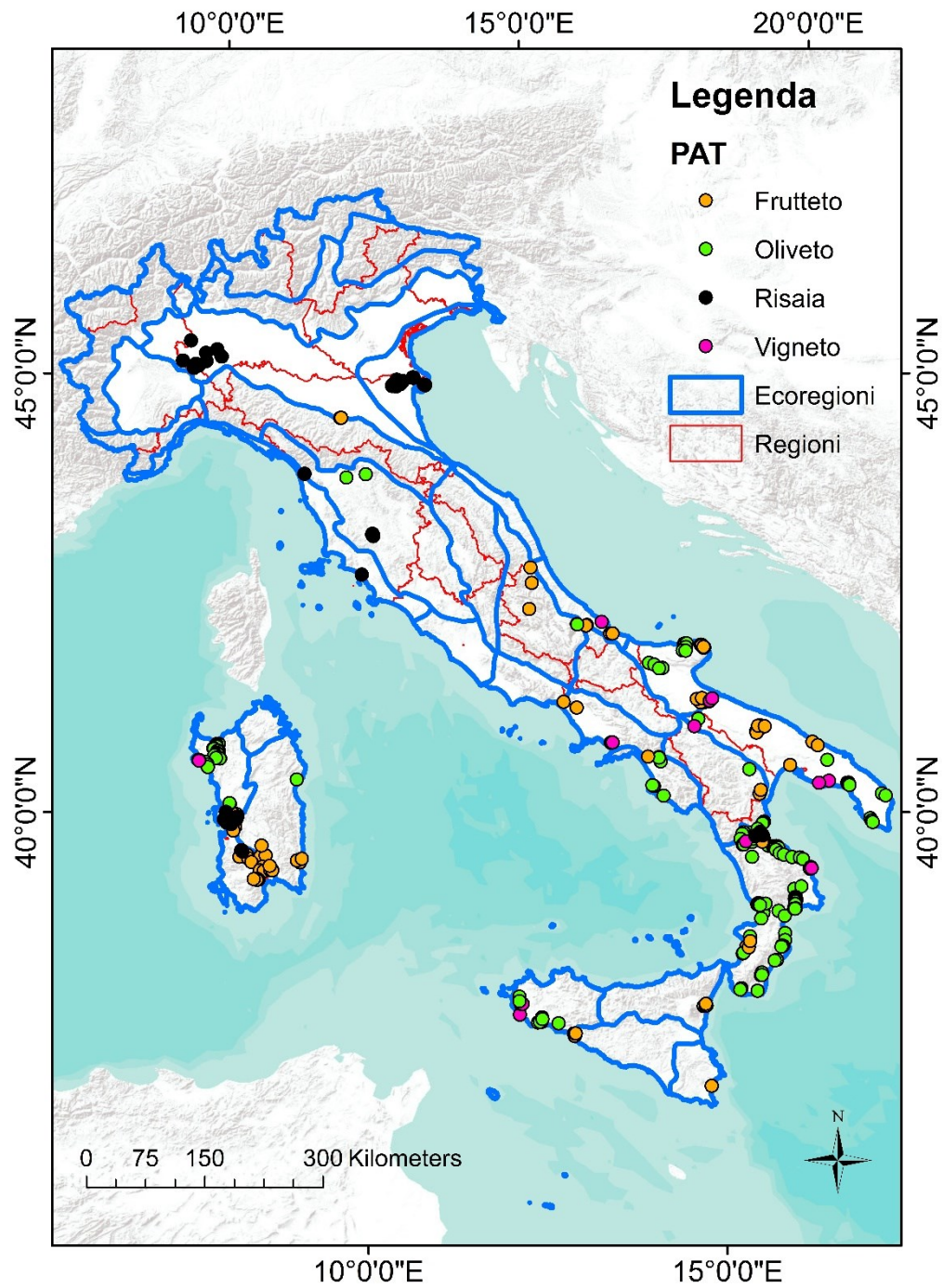


Figura 3-9 - Distribuzione dei punti PAT selezionati, differenziati per coltura all'interno delle Sottosezioni Ecoregionali.

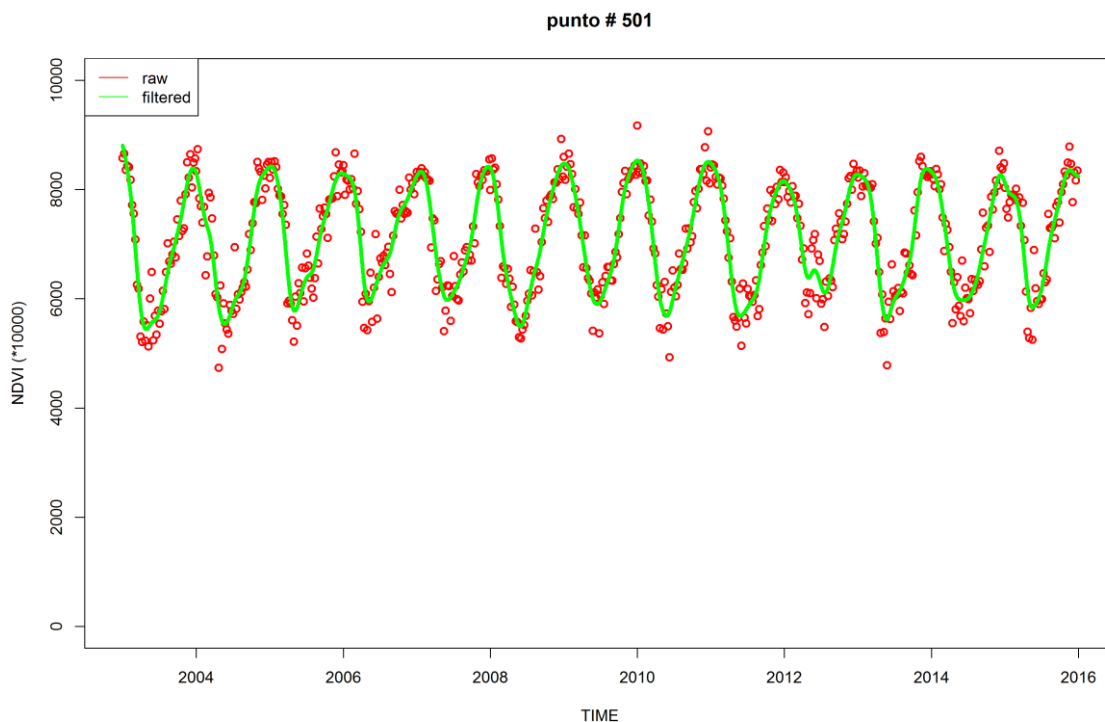


Figura 3-10 – Serie temporale di indice NDVI originale e filtrato per un punto PAT frutteto in Calabria: esempio di punto ritenuto “valido” tra i punti selezionati in quanto fornisce un’informazione chiara relativamente al trend dell’indice NDVI.

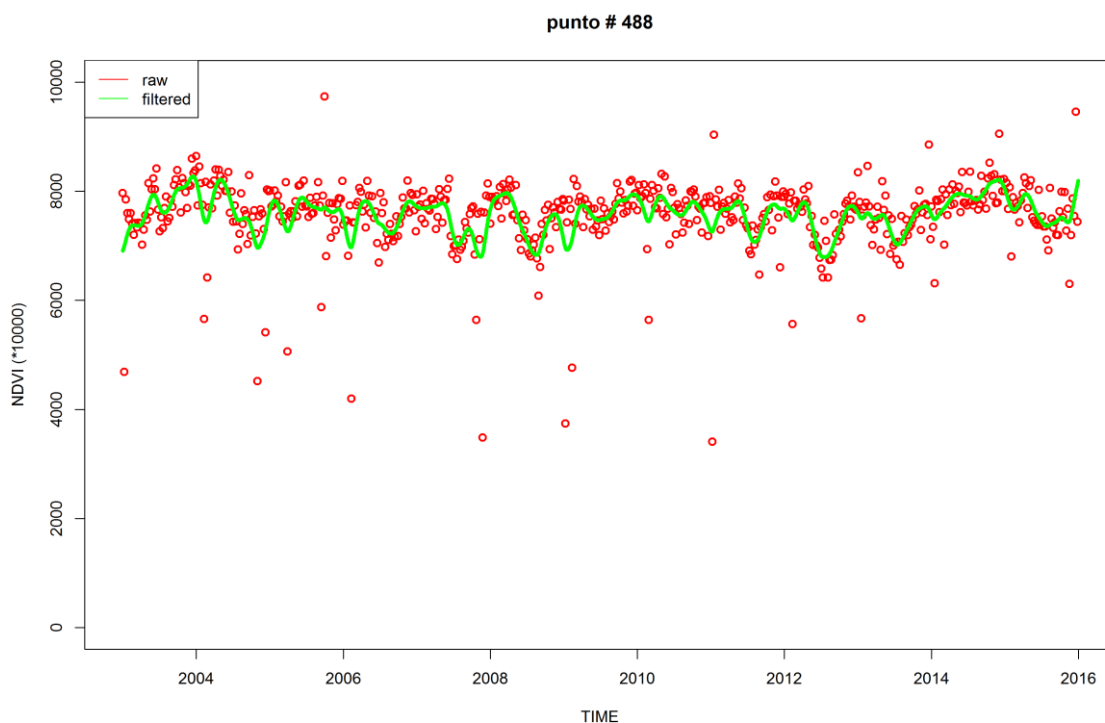


Figura 3-11 – Serie temporale di indice NDVI originale e filtrato per un punto PAT frutteto in Calabria: esempio di punto selezionato e poi eliminato per eccesso di “rumore” e come tale non adeguato a fornire un’informazione chiara relativamente al trend dell’indice NDVI.

3.4 Trend delle coperture vegetali

Il trend delle coperture vegetali e le statistiche vegetazionali da esse derivabili consentono di stimare la produttività, la biomassa e la loro variabilità annua, consentono una classificazione dei PAT (per uno stesso PAT, l'appartenenza a specie diverse), di evidenziare andamenti stagionali condizionati dalla temperatura e dalla precipitazione cumulata, di evidenziare di verse gestioni e densità d'impianto caratterizzanti il sito del PAT in esame. In tale studio è stato condotto un confronto tra serie temporali dell'indice NDVI, in particolare confronti in termini di ciclicità (valori estremi (max/min) dell'indice NDVI in diverse stagioni (estate/inverno)) e di intensità (ampiezza dei valori minimi e dei valori massimi) delle serie temporali dell'indice NDVI. Le elaborazioni esplicitate negli scopi e nelle modalità possono essere così schematizzate:

- a) Stima della variabilità di uno stesso PAT all'interno di ciascuna Ecoregione: confronto mediante **serie temporali** di NDVI tra punti PAT **nelle sottosezioni** Ecoregionali.
- b) Stima della variabilità di uno stesso PAT tra Sottosezioni Ecoregionali: confronto mediante **serie temporali** di NDVI tra punti PAT **tra sottosezioni di diverse Regioni**.

Per la prima elaborazione sono state considerate la serie temporale dell'indice NDVI dei singoli punti PAT, punti riportati in Tabella 3-5, per la seconda le serie temporali media dell'indice NDVI da essi derivate.

3.5 Variazioni temporali (inter-annuali) delle coperture vegetali

L'NDVI massimo annuo è una misura della produttività complessiva e della biomassa della vegetazione. La variazione intra-annuale ($NDVI_{massimo} - NDVI_{minimo}$) fornisce invece informazioni della variabilità della produttività. Per il presente studio, il valore massimo, minimo e l'ampiezza (amplitude) dell'indice NDVI sono stati derivati considerando la media delle serie di punti per PAT nelle diverse Sottosezioni Ecoregionali e derivando per questa la media nei 13 anni disponibili per le analisi.

3.6 Indici bio-metrici caratteristici (Land Surface Phenology, LSP)

Per operare la stima degli eventi connessi alla LSP, riportati in Tabella 2-3, si è utilizzato l'approccio mediante soglie specifiche sulla base dell'indice spettrale NDVI, derivante dal filtraggio dei dati da serie multi temporali dei satelliti AQUA (MYD13Q1) e TERRA (MYD13Q1), con una risoluzione del pixel di 250 metri. La soglia per tali analisi è stata fissata al 20% dell'amplitude (AMP). Le elaborazioni sono state condotte utilizzando il *tool* Phenex, nell'ambiente di *scripting* R. Le metriche fenologiche derivate su base raster sono elencate in Tabella 2-3, ma di queste solo alcune sono state considerate nel confronto tra PAT nelle Sottosezioni Ecoregionali: SOST (start of season o green-up), DUR (duration) e LIV (large integrated value), derivati considerando la media delle serie di punti per PAT nelle diverse Sottosezioni Ecoregionali nei 13 anni disponibili per le analisi.

3.7 Elaborazione dei dati climatici

Per la caratterizzazione climatica dei PAT sono state considerate le variabili climatiche del Centro europeo per le previsioni a medio termine (ECMWF) ERA-Interim, riportate in Tabella 3-6, nel periodo 2003-2015.

Tabella 3-6 Variabili climatiche ECMWF ERA-Interim considerate per la caratterizzazione climatica dei siti

Simbolo	Nome	Unità di misura
T	Temperatura a 2m dal suolo	K
Tdew	Temperatura di rugiada a 2m dal suolo	K
Uvel Vvel	Componente orizzontale e verticale della velocità del vento a 10m dal suolo	m.s-1
al	Albedo alla superficie del suolo	-
SSRD	Radiazione solare incidente ad onde corte (circa pari alla somma della radiazione diretta e diffusa)	J.m-2
SSR	Radiazione solare netta ad onde corte	J.m-2
STRD	Radiazione solare incidente ad onde lunghe	J.m-2
STR	Radiazione solare netta ad onde lunghe	J.m-3
TP	Precipitazione totale	m
SWVL1	Volume di acqua nello strato (0.00 m e -0.07m)	m3.m-3
SWVL2	Volume di acqua nello strato (-0.07m e -0.28 m)	m3.m-3
SWVL3	Volume di acqua nello strato (-0.28m e -1.00 m)	m3.m-3
SWVL4	Volume di acqua nello strato (-1.00 m e -2.89 m)	m3.m-3
Par	Photosynthetically active radiation alla superficie	J.m-2

Per le dette grandezze climatiche sono stati considerati, nel periodo 2003-2015, i campi di analisi 0000, 0600, 1200 e il 1800 UTC e come step di previsione i valori 0 h, 3h e 12h: tale configurazione riduce i problemi di *spin-down spin-up* dei dati aggregati a scala giornaliera a partire dai dati a scala oraria (Källberg, 2011). La risoluzione spaziale dei dati prodotti è $0.125^\circ \times 0.125^\circ$, ottenuta per interpolazione lineare dei dati originari alla risoluzione spaziale di $0.75^\circ \times 0.75^\circ$. Confronti per alcune grandezze meteorologiche a scala di pixel tra dati ECWF ERA-Interim e dati misurata da stazione di Eddy covariance, posizionata in prossimità di Castelvetro (TP) sono riportate nelle figure a seguire.

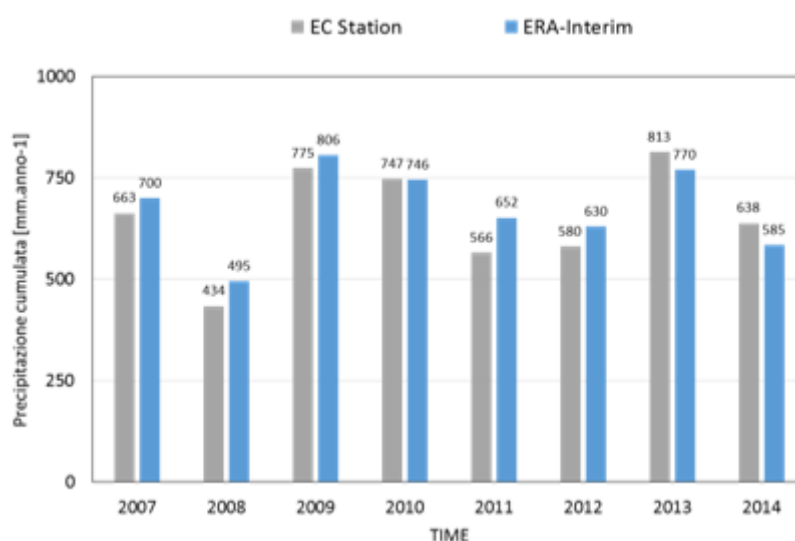


Figura 3-12 – Precipitazione cumulata annua: confronto tra i valori misurati dalla stazione di Eddy Covariance di Castelvetro e derivati dai dati ECWF ERA-Interim.

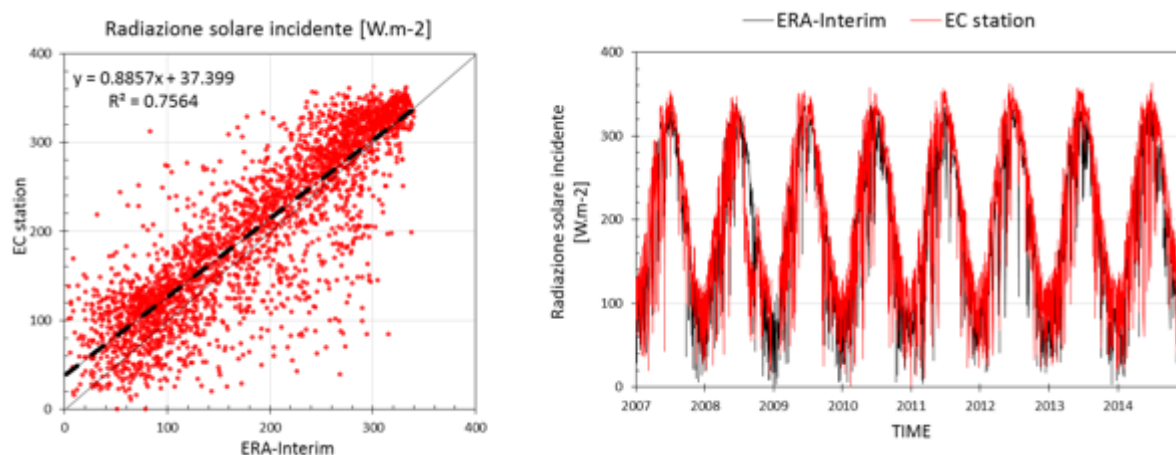


Figura 3-13 – Radiazione solare incidente ad onde corte: confronto tra i valori misurati dalla stazione di Eddy Covariance di Castelvetro e derivati dai dati ECWF ERA-interim.

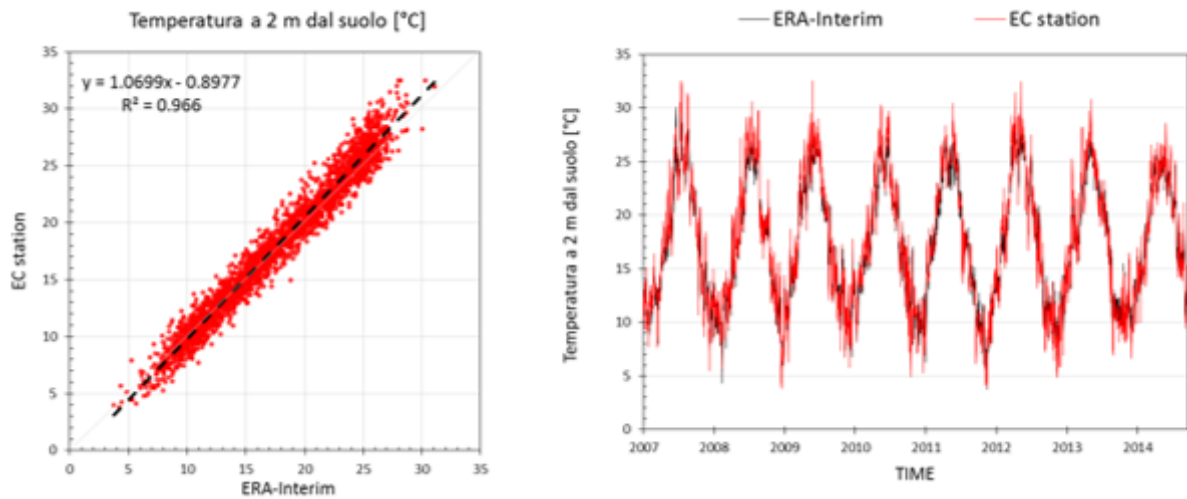


Figura 3-14 – Temperatura a 2 m dal suolo: confronto tra i valori misurati dalla stazione di Eddy Covariance di Castelvetrano e derivati dai dati ECWF ERA-interim.

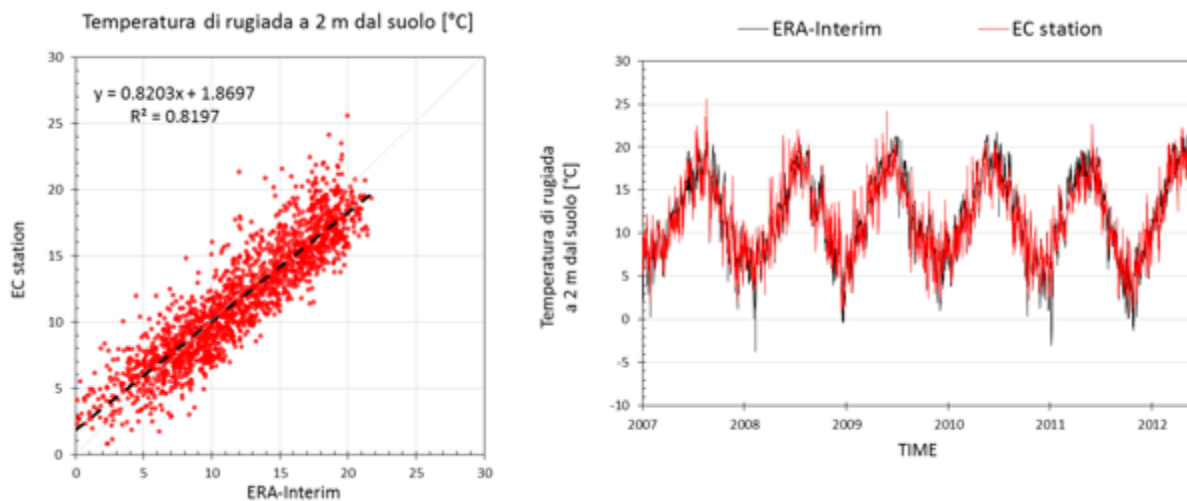


Figura 3-15 – Temperatura di rugiada a 2 m dal suolo: confronto tra i valori misurati dalla stazione di Eddy Covariance di Castelvetrano e derivati dai dati ECWF ERA-Interim.

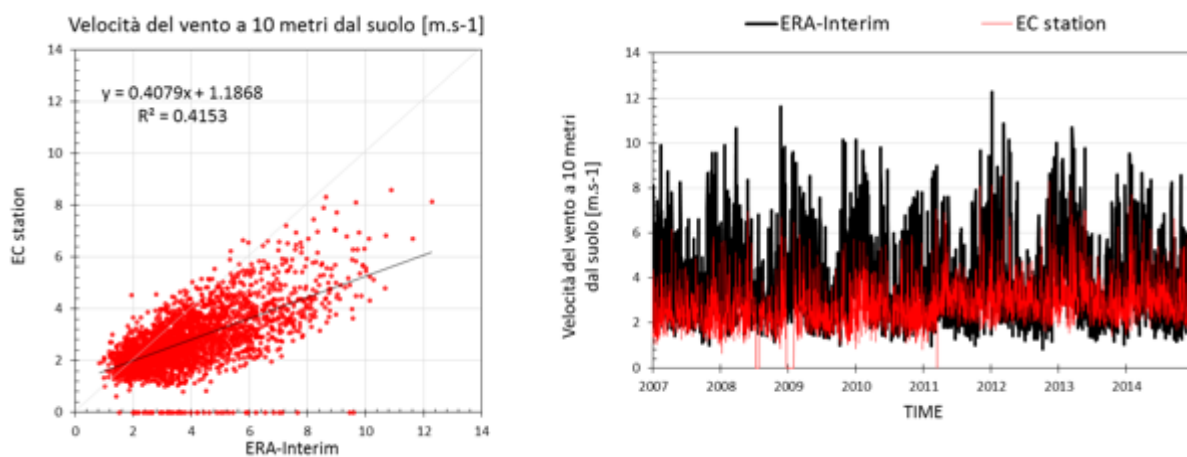


Figura 3-16 – Velocità del vento a 10 m dal suolo: confronto tra i valori misurati dalla stazione di Eddy Covariance di Castelvetrano e derivati dai dati ECWF ERA-Interim.

3.8 Derivazione dell'evapotraspirazione di riferimento

Dai dati climatici ERA-Interim è stata derivata la serie temporale, a scala giornaliera e con una risoluzione spaziale di $0.125^\circ \times 0.125^\circ$, della grandezza evapotraspirazione di riferimento ET_o [mm.giorno^{-1}] nel periodo 2003-2015 secondo l'equazione PM-FAO 56 a seguire:

$$ET_o = \frac{1}{\lambda} \frac{\Delta [(1-\alpha)R_s + R_{nl}] (1 - 0.4e^{-0.5LAI}) + c_p \rho_a (e_s - e_a) U / (a - b \ln(cLAI))}{\Delta + \gamma \left\{ 1 + Ud / [(a - b \ln(cLAI)) LAI] \right\}} \quad [\text{mm.giorno}^{-1}]$$

dove:

λ è il calore latente di vaporizzazione [MJ kg^{-1}]; □

Δ è la pendenza della curva di pressione del vapore saturo alla temperatura dell'aria T [$\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$],

R_s è la radiazione solare incidente [$\text{MJ m}^{-2} \text{giorni}^{-1}$],

R_{nl} è la radiazione netta ad onde lunghe uscente [$\text{MJ m}^{-2} \text{giorno}^{-1}$],

c_p è il calore specifico a pressione costante [$\text{MJ kg}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$],

ρ_a la densità media dell'aria a pressione costante [kg m^{-3}],

$(e_s - e_a)$ è il deficit pressione di vapore [kPa],

U è la velocità del vento a 2 m [m s^{-1}], □

γ è la costante psicrometrica [$\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$].

LAI è il leaf area index della coltura di riferimento (alfa-alfa), pari a 2.88 [m^2m^{-2}]

α è l'albedo della coltura di riferimento (alfa-alfa), pari a 0.23 [-].

Successivamente alla strutturazione della serie temporale a scala giornaliera nel periodo 2003-2015 del dato di evapotraspirazione di riferimento secondo la legge P-MFAO56, è stata effettuata una comparazione a scala di pixel tra l'evapotraspirazione di riferimento derivata con i dati ERA-Interim e derivati dalla stazione agrometeorologica di Castelvetro nel periodo 2009-2014, come riportato in Figura 3-17 e Figura 3-18.

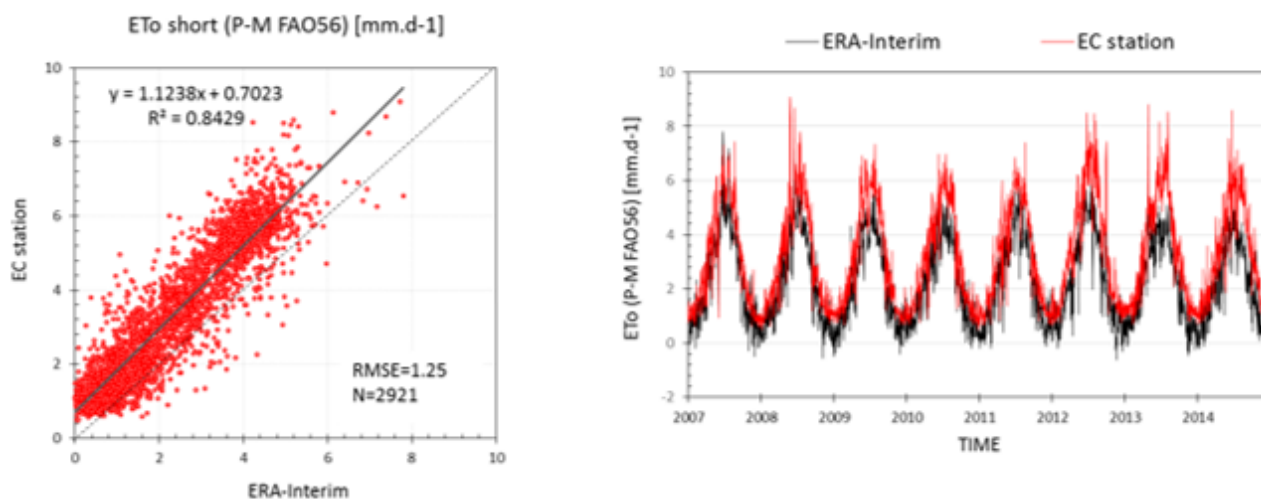


Figura 3-17 – Evapotraspirazione di riferimento a scala giornaliera nel periodo 2009-2014: confronto tra i valori derivati dalla stazione di Eddy Covariance di Castelvetrano e derivati dai dati ECWF ERA-Interim per coltura short ($hc=0.12m$).

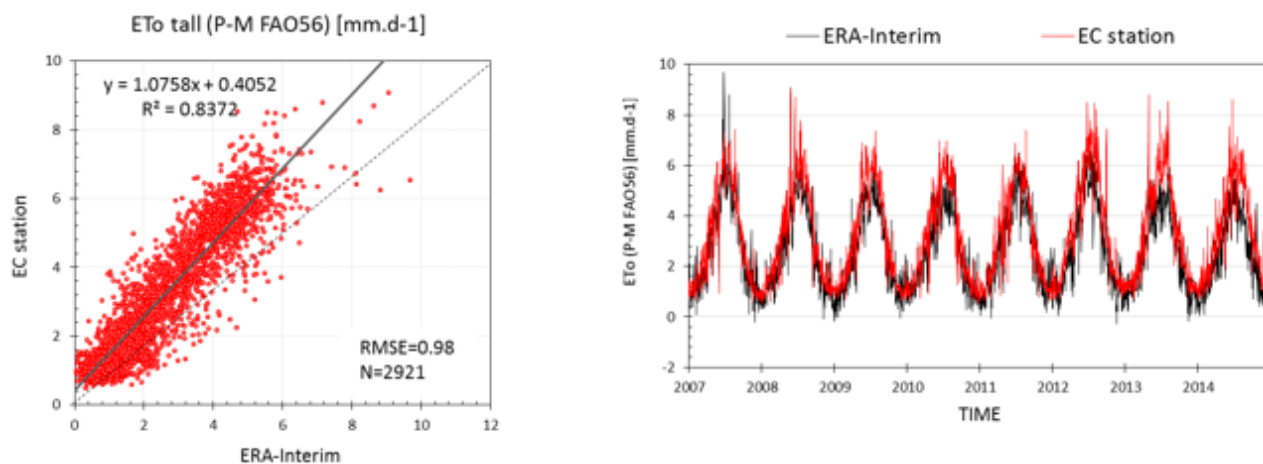


Figura 3-18 – Evapotraspirazione di riferimento a scala giornaliera nel periodo 2009-2014: confronto tra i valori derivati dalla stazione di Eddy Covariance di Castelvetrano e derivati dai dati ECWF ERA-Interim per coltura tall ($hc=0.5m$).

3.9 Caratterizzazione dei parametri biofisici delle colture

3.9.1 Albedo

L'albedo, assieme al leaf area index (LAI), è uno degli input biofisici della coltura, per il calcolo dell'evapotraspirazione derivata secondo la formulazione Penman-Monteith-FAO56. Albedo è un parametro chiave ampiamente utilizzato in studi di bilancio energetico *land-surface*, nell'ambito della previsione meteorologica a lungo termine e nell'indagine sui cambiamenti climatici globali. È definita come il rapporto tra l'irraggiamento riflesso dalla superficie e l'irraggiamento incidente la superficie. Poiché l'albedo quantifica la capacità di una superficie di riflettere la radiazione solare, è uno dei principali fattori trainanti del bilancio energetico e d'interazione tra la superficie terrestre e l'atmosfera. Un aumento dell'albedo comporta una diminuzione della radiazione netta, con diminuzione del calore latente e del calore sensibile il che comporta la formazione di nubi e la diminuzione di precipitazioni. L'umidità del terreno può anche diminuire, aumentando ulteriormente l'albedo superficiale e la formazione di un meccanismo di feedback positivo. La riduzione della nuvolosità provoca un aumento della radiazione solare e aumenta ulteriormente la radiazione netta, che introduce un feedback negativo. L'albedo svolge un ruolo chiave nel mantenimento di uno stato stabile tra i meccanismi di feedback positivo e negativo. Pertanto, è un componente fondamentale nella determinazione della *Surface Radiation Budget* (SRB) e nel movimento atmosferico durante il cambio climatico globale e regionale. Le variazioni spaziali e temporali dell'albedo superficiale sono influenzate da processi naturali, come ad esempio l'umidità del terreno, la dinamica della vegetazione, e la copertura di neve, oltre all'utilizzo del territorio e di altre attività umane.

3.9.1.1 Comparazione tra diversi dataset di dati di albedo

Al fine di valutare opportunamente la scelta dell'albedo è stata effettuata la comparazione a scala di pixel in corrispondenza del sito agrometeorologico di Castelvetro tra i valori di albedo, nel periodo 2003-2015, estratti dai seguenti dataset:

1. Albedo derivato dal prodotto *Surface Reflectance* 8-Day L3 Global 500m (dalla piattaforma TERRA MO09A1 ed AQUA MY09A1) mediante le relazioni di Liang (2000) per il sensore MODIS.
2. Albedo (*climate*) ERA-Interim (o *land albedo standard*), alla risoluzione spaziale di $0.125^\circ \times 0.125^\circ$, calcolato da una climatologia mensile derivata MODIS sulla base delle seguenti quattro componenti:
 1. *Shortwave* albedo: albedo nel range [0.4; 0.7] micron;
 2. *Longwave* albedo: albedo nel range > 0.7 micron;
 3. *Black sky* albedo: la componente dell'irradianza solare diretta è dominante (cielo sereno);
 4. *White sky* albedo: la componente dell'irradianza solare diffusa è dominante (cielo uniformemente nuvoloso).
3. L'albedo stimato da flussi di superficie derivati da ERA-Interim secondo la relazione $\alpha = 1 - SSR/SSRD$, alla risoluzione spaziale di $0.125^\circ \times 0.125^\circ$, dove SSR=radiazione netta e SSRD radiazione solare incidente (diretta + diffusa).
4. L'albedo derivato dal prodotto MODIS MCD43A3 16-Day L3 Global 500m (combinato tra TERRA ed AQUA).

Il risultato di tali comparazioni sono riportate nelle figure a seguire.

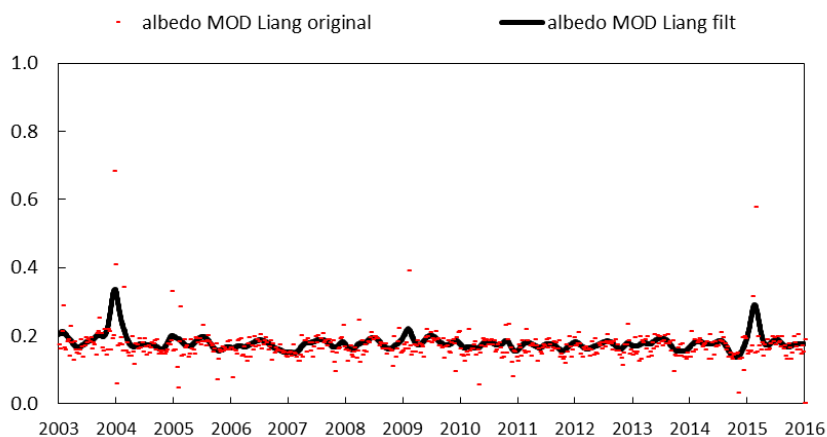


Figura 3-19 – Confronto tra albedo originale (derivato secondo le relazioni di Liang (2000) per il sensore MODIS, applicato ai dati di MODIS TERRA (MO09A1)) e filtrato secondo la funzione Whittaker.

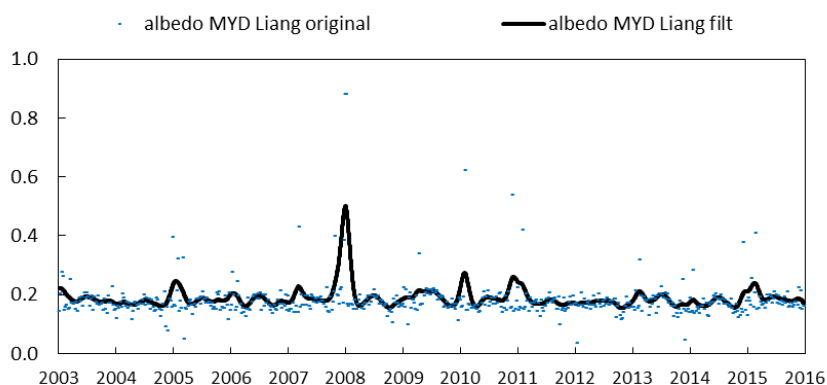


Figura 3-20 – Confronto tra albedo originale (derivato secondo le relazioni di Liang (2000) per il sensore MODIS, applicato ai dati di MODIS AQUA (MY09A1)) e filtrato secondo la funzione Whittaker.

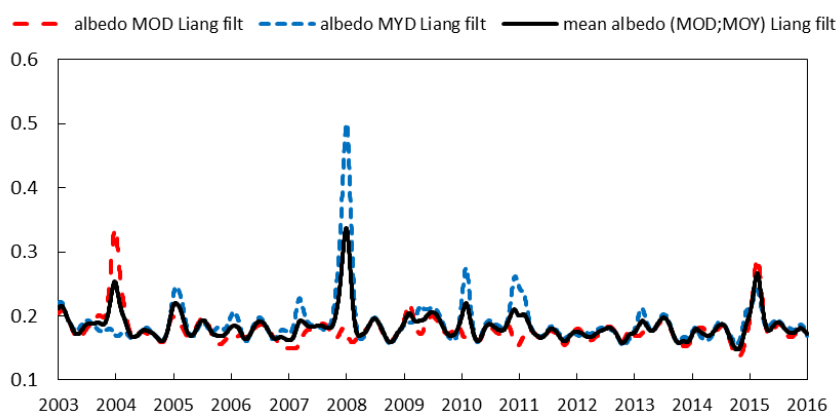


Figura 3-21 – Confronto tra albedo filtrato (derivato secondo le relazioni di Liang applicate ai dati MO09A1 ed MY09A1) con l’algoritmo Whittaker. In nero la media dei due serie di albedo (derivato dai prodotti MO09A1 e MY09A1), essendo entrambi composite ad 8 giorni sincroni (prodotti con stesse date).

Dalla Figura 3-19, Figura 3-20 e Figura 3-21 si osserva che l'albedo derivato dal prodotto MY09A1 e MO09A1 presenta nella serie temporale composite ad 8 giorni dei valori anomali (punti con elevato valore dell'albedo) che lo *smoothing* non riesce a rimuovere. Inoltre anche nella serie temporale media delle due serie di prodotti MODIS filtrate persistono tali anomalie.

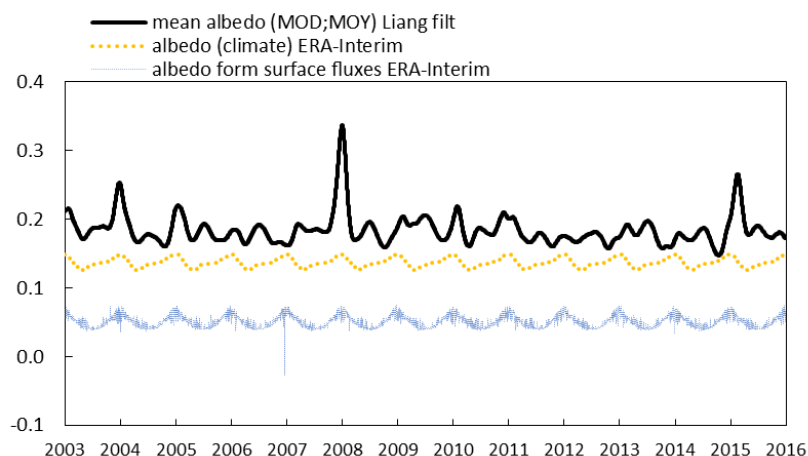


Figura 3-22 – Confronto tra albedo derivato dalle relazioni di Liang (media dei valori di albedo derivati dai prodotti MO09A1 e MY09A1 mediante relazioni di Liang e filtrati con l'algoritmo Whittaker), Albedo derivato da dati di flusso radiativo ERA-Interim e Albedo (climate) ERA-Interim.

Dalla figura Figura 3-22 è possibile notare che nella serie temporale i valori di albedo derivato dai flussi radiativi ERA-Interim sono circa la metà in intensità rispetto all'albedo (climate) ERA-Interim e quest'ultimo è di poco inferiore rispetto ai valori di albedo derivati con le relazioni di Liang applicate ai prodotti MO09A1 e MY09A1 e con il filtraggio mediante algoritmo Whittaker.

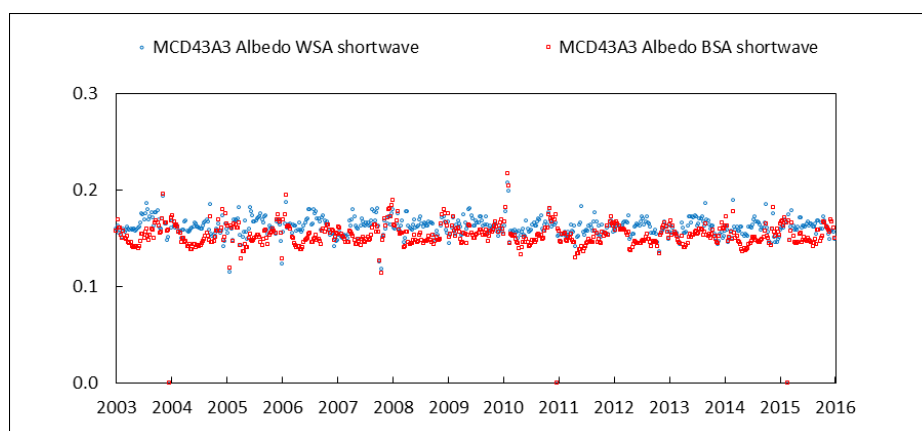


Figura 3-23 – Confronto tra le due componenti di interesse dello shortwave del prodotto MODIS albedo: Black sky albedo (BSA short), dove la componente dell'irradianza solare diretta è dominante (cielo sereno) e White sky albedo (WSA short), dove la componente dell'irradianza solare diffusa è dominante (cielo uniformemente nuvoloso).

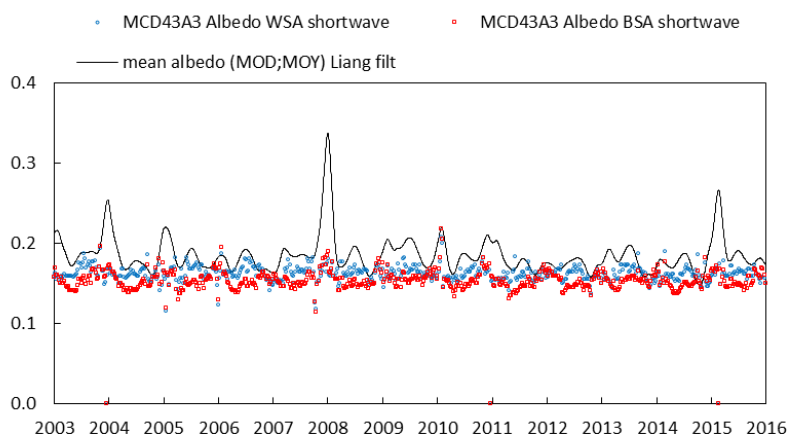


Figura 3-24 – Comparazione tra albedo derivante dal prodotto MODIS MCD43A3 (BSA,WSA), albedo “Liang” (media dei valori di albedo derivati dai prodotti MO09A1 e MY09A1 mediante relazioni di Liang e filtrati con l’algoritmo Whittaker).

Dalla Figura 3-24 si osserva che i valori di albedo derivati dal prodotto MODIS albedo MCD43A3 (BSA,WSA) sono molto vicini in intensità al prodotto albedo derivato dalle relazioni di Liang (2000) e presentano come quest’ultimo dei valori anomali molto bassi.

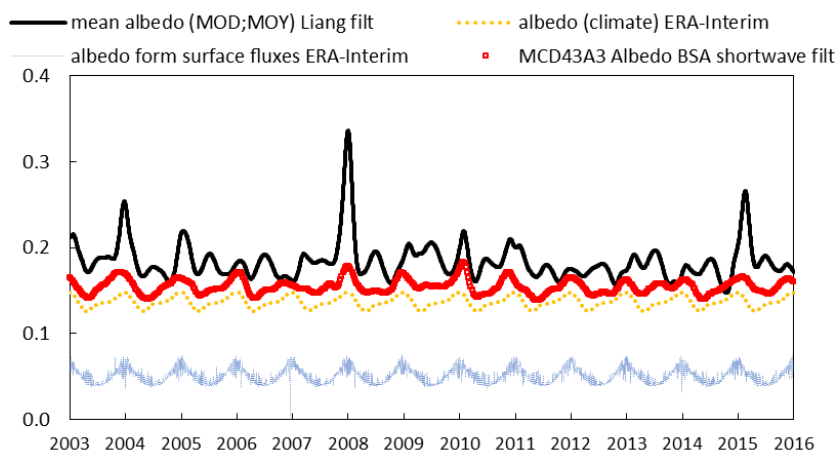


Figura 3-25 – Comparazione tra albedo derivante dal prodotto MODIS MCD43A3 (BSA,WSA), albedo derivato dalle relazioni di Liang (2000) (media dei valori di albedo derivati dai prodotti MO09A1 e MY09A1 mediante relazioni di Liang e filtrati con l’algoritmo Whittaker), albedo derivato da dati di flusso radiativo ERA-Interim e albedo (*climate*) ERA-Interim.

Sulla base dalle osservazioni derivate dalle comparazioni fin qui prodotte e che si concludono con la Figura 3-25 l’albedo utilizzato nel calcolo dell’evapotraspirazione potenziale è l’albedo (*climate*)

ERA-Interim in quanto ha valori prossimi all'albedo derivante dal prodotto MODIS MCD43A3 (BSA,WSA), ma non presenta alcuna anomalia (picchi bassi o lati) nella serie temporale.

3.9.2 Derivazione del LAI dall'indice NDVI mediante calibrazione della legge di Lambert-Beer

Il LAI è definito come l'area fogliare per unità di superficie di suolo (Chen e Cihlar, 1996). Poiché le superfici fogliari sono i siti primari di energia e di scambio di massa, importanti processi - come l'intercettazione da parte della chioma, l'evapotraspirazione, e la fotosintesi lorda - sono direttamente proporzionali al LAI. Il LAI può anche essere derivato sulla base dei dati di telerilevamento sia con metodi statistici che fisici. I metodi statistici utilizzano relazioni empiriche tra il LAI e la riflettanza superficiale o indici di vegetazione. I metodi fisici determinano il LAI sulla base di processi di trasferimento radiativi della luce all'interno della chioma. In questo lavoro è stata utilizzata una relazione logaritmica che permette di ricavare il LAI dall'NDVI e che è espressa dalla legge di estinzione della radiazione in un mezzo omogeneo o legge di Lambert-Beer. La legge che lega il LAI all'NDVI è la seguente:

$$LAI = -\frac{1}{k} \cdot \ln \frac{NDVI_{max} - NDVI}{NDVI_{max} + NDVI_{min}}$$

dove:

$NDVI_{max}$ è il valore in presenza di copertura vegetale "infinitamente" densa.

$NDVI_{min}$ è il valore di fondo, funzione delle proprietà ottiche sottostante.

k è il parametro equivalente al coefficiente di estinzione.

Questa legge è stata applicata per il sito relativo alla stazione di EC di Castelvetro dove vi è il PAT "Oliveto" e per il sito di relativo alla stazione di EC di Brisighella dove vi è il non PAT "Actinidia".

Le due calibrazioni della relazione LAI-NDVI sono state eseguite secondo lo schema a seguire:

1. Sono stati considerati i prodotti MODIS LAI *combined* MCD15A2 *composite* 8 days 1000m e MODIS VI (NDVI) *combined* (MOD13Q1 & MYD13Q1) *composite* 8 days 250m.
2. Tali prodotti sono stati filtrati nel periodo 2003-2015 producendo un *dataset* con passo temporale 1 giorno.
3. All'interno del poligono PAT è stato individuato un punto e creato un *buffer* di 500 m di raggio dal quale estrarre i valori di LAI e di NDVI.
4. Dalla serie di valori di NDVI è stato estratto il valore minimo, il valore massimo e derivato il valore di k in corrispondenza di RMSE minimo tra LAI calcolato (con la legge logaritmica Lambert Beer) e LAI stimato dal prodotto MODIS LAI *combined* MCD15A2.

Per il sito di Castelvetro i valori derivati sono $NDVI_{min}=0.78$ $NDVI_{max}=0.39$ e $K=1.27$ con $RMSE=0.61$. Per il sito di Brisighella i valori derivati sono $NDVI_{min}=0.84$ $NDVI_{max}=0.32$ e $K=3.92$ con $RMSE=0.27$. Nelle elaborazioni successive verranno presi in conto i valori di calibrazione LAI-NDVI di Castelvetro per tutti i PAT in esame.

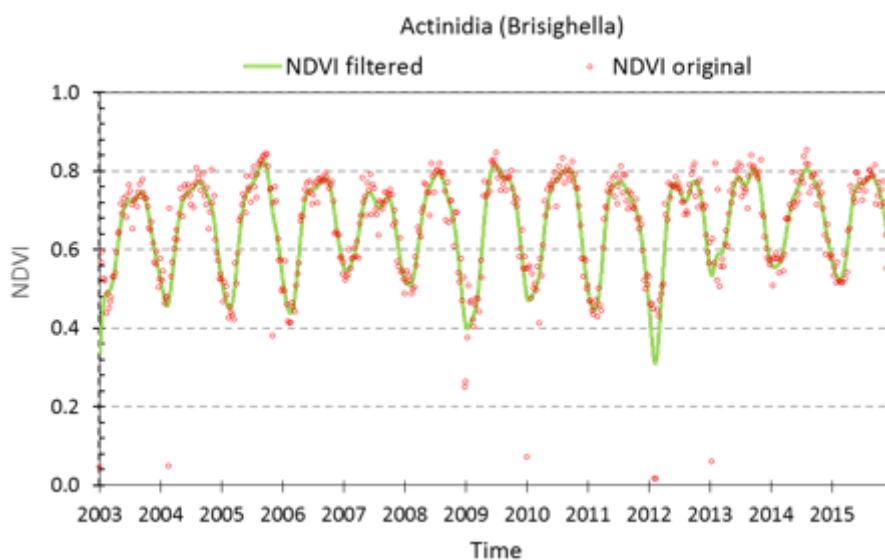


Figura 3-26 – Andamento nel periodo 2003-2015 della serie NDVI MODIS (TERRA&AQUA) *composite* a 16 giorni (M.D13Q1) (originale e filtrata) a 250 m: frequenza complessiva 8 giorni. Dati filtrati e salvati con time step 1 giorno.

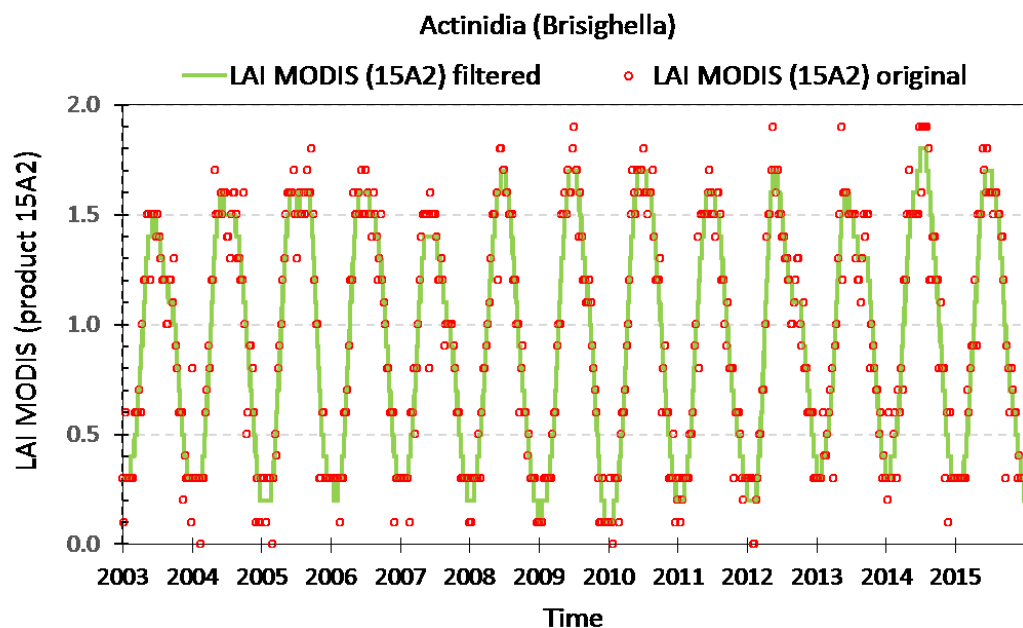


Figura 3-27 – Andamento nel periodo 2003-2015 della serie LAI MODIS (*combined* TERRA&AQUA) composite a 8 giorni (originale e filtrata) con dimensione del pixel 1000. Dati filtrati e salvati con time step 1 giorno.

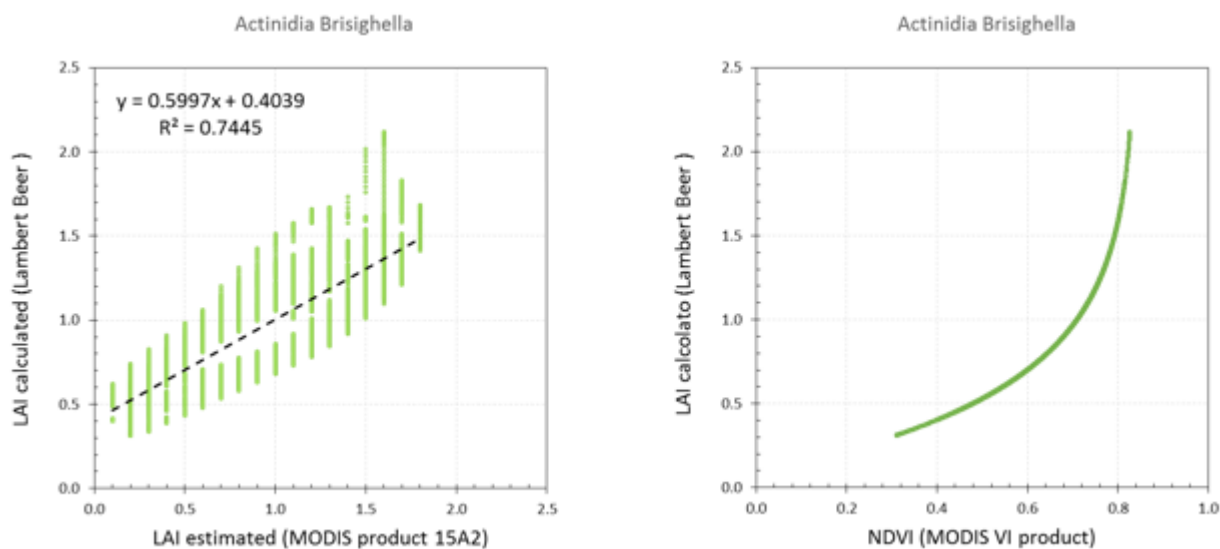


Figura 3-28 – Comparazione nel periodo 2003-2015 della serie giornaliera filtrata di LAI stimato (MODIS *product* 15A2) e della serie giornaliera del LAI derivato dall'NDVI secondo la legge logaritmica di Lambert Beer (figura a sinistra). Risultato della calibrazione della legge logaritmica LAI-NDVI per l'intero periodo 2003-2015 (figura a destra).

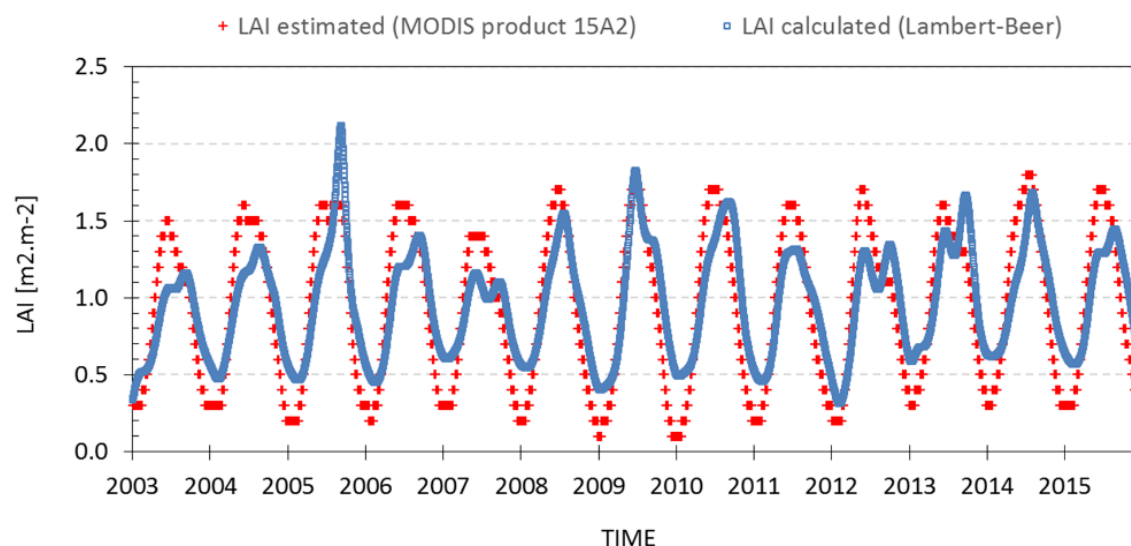


Figura 3-29 – Andamento nel periodo 2003-2015 della serie giornaliera filtrata di LAI stimato (MODIS *product* 15A2) e della serie giornaliera del LAI derivato dall'NDVI secondo la legge logaritmica di Lambert Beer.

3.10 Derivazione dell'evapotraspirazione potenziale

L'evapotraspirazione potenziale per i diversi PAT è stata stimata mediante la relazione P-M FAO56, utilizzando l'albedo (*climate*) ERA-Interim come stima della variabile albedo superficiale e i parametri derivati dalla calibrazione della legge di Lambert-Beer per poter derivare il LAI a partire dai valori di NDVI a 250m filtrati e salvati con time step giornaliero. La resistenza stomatica della singola foglia è stata posta pari a 400 s m^{-1} .

3.11 Caratterizzazione fisica dei suoli all'interno dei PAT

Le caratteristiche idrauliche capacità di campo (θ_{FC} , [-]), punto di appassimento (θ_{WP} , [-]), acqua igroscopica (θ_{HW} , [-]), conducibilità idraulica satura (K_s , [mm.giorno^{-1}]) e porosità (porosity [-]) del suolo all'interno dei PAT sono state stimate mediante funzione di pedo-trasferimento (Saxton and Rawls, 2006), applicate alle componenti argilla e sabbia estratte dai prodotti *Topsoil physical properties for Europe (based on LUCAS topsoil data)* (Ballabio et. al, 2016) e al valore (% in volume) di Organic Matter, posto pari a 2 volte il valore del carbonio organico estratta dal prodotto *Soil*

Organic Carbon Content (D. de Brogniez et al, 2014). Tali prodotti, realizzati dall'European Soil Data Centre (ESDAC) alla risoluzione spaziale di 500 m stati, sono riportati nelle figure a seguire.

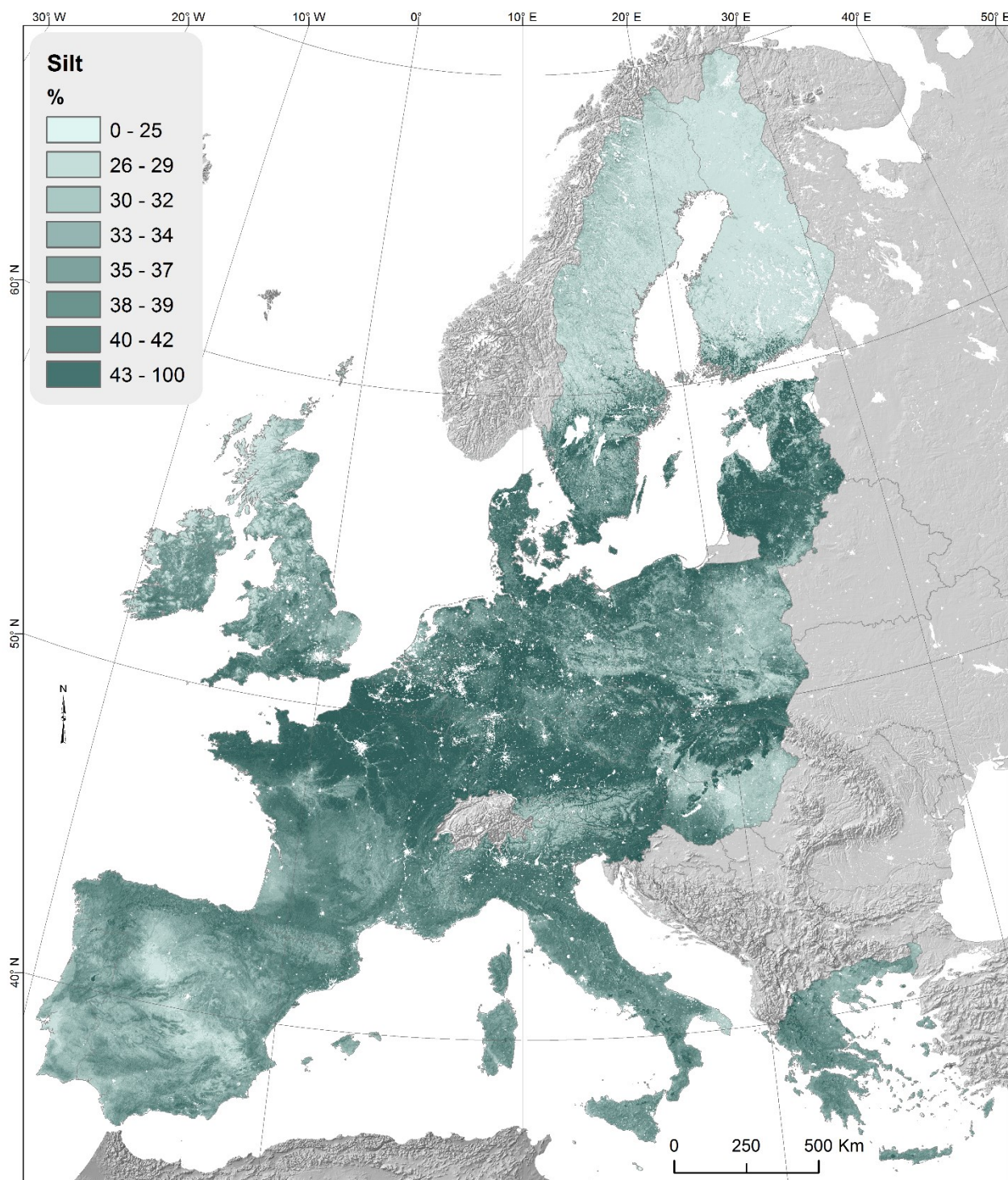


Figura 3-30 – Mappa a scala Europea del contenuto di limo (%) secondo il prodotto *Topsoil physical properties for Europe (based on LUCAS topsoil data)* (Ballabio et. al, 2016) dell' European Soil Data Centre (ESDAC)

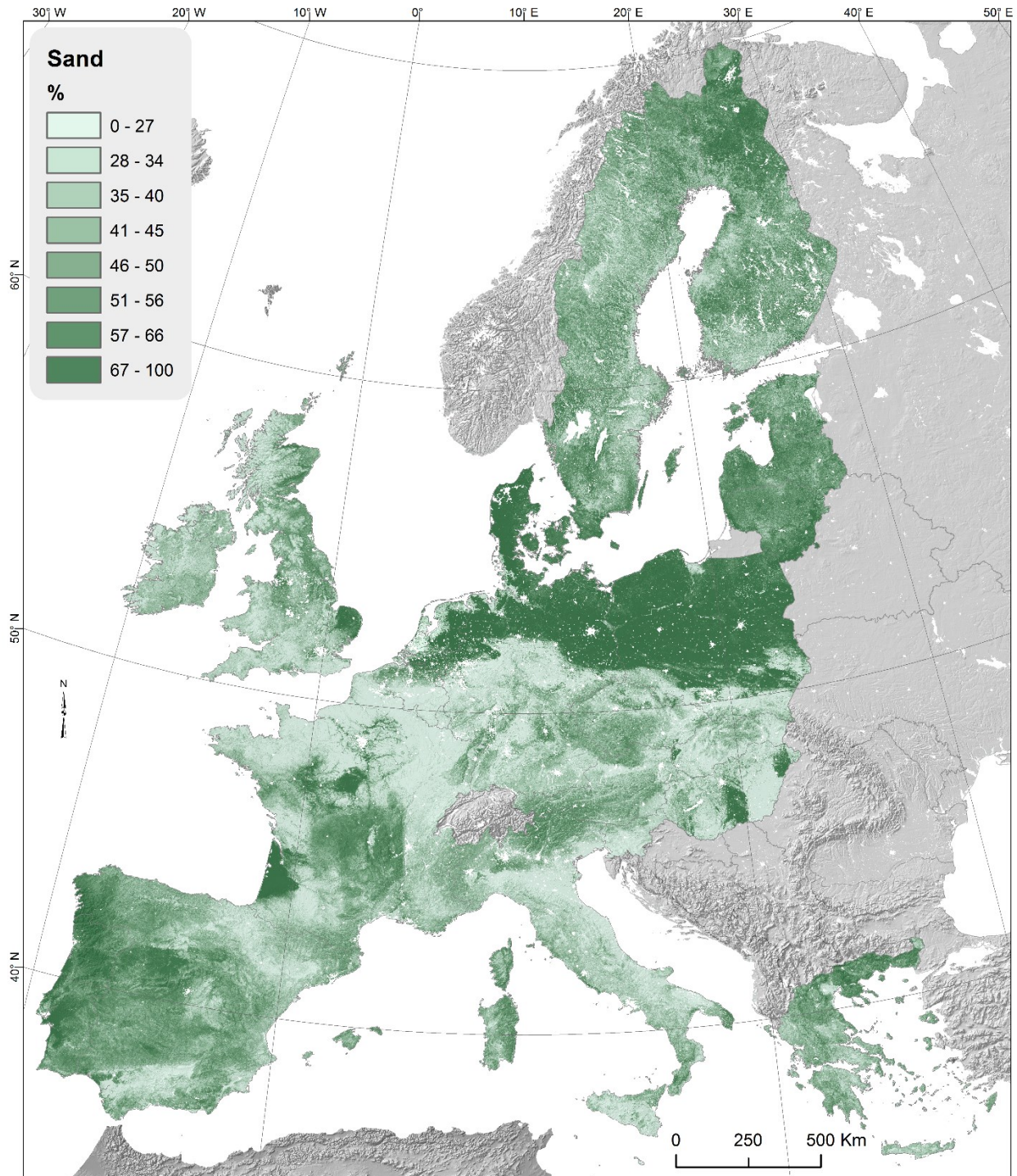


Figura 3-31 – Mappa a scala Europea del contenuto di sabbia (%) secondo il prodotto *Topsoil physical properties for Europe (based on LUCAS topsoil data)* (Ballabio et. al, 2016) dell' European Soil Data Centre (ESDAC)

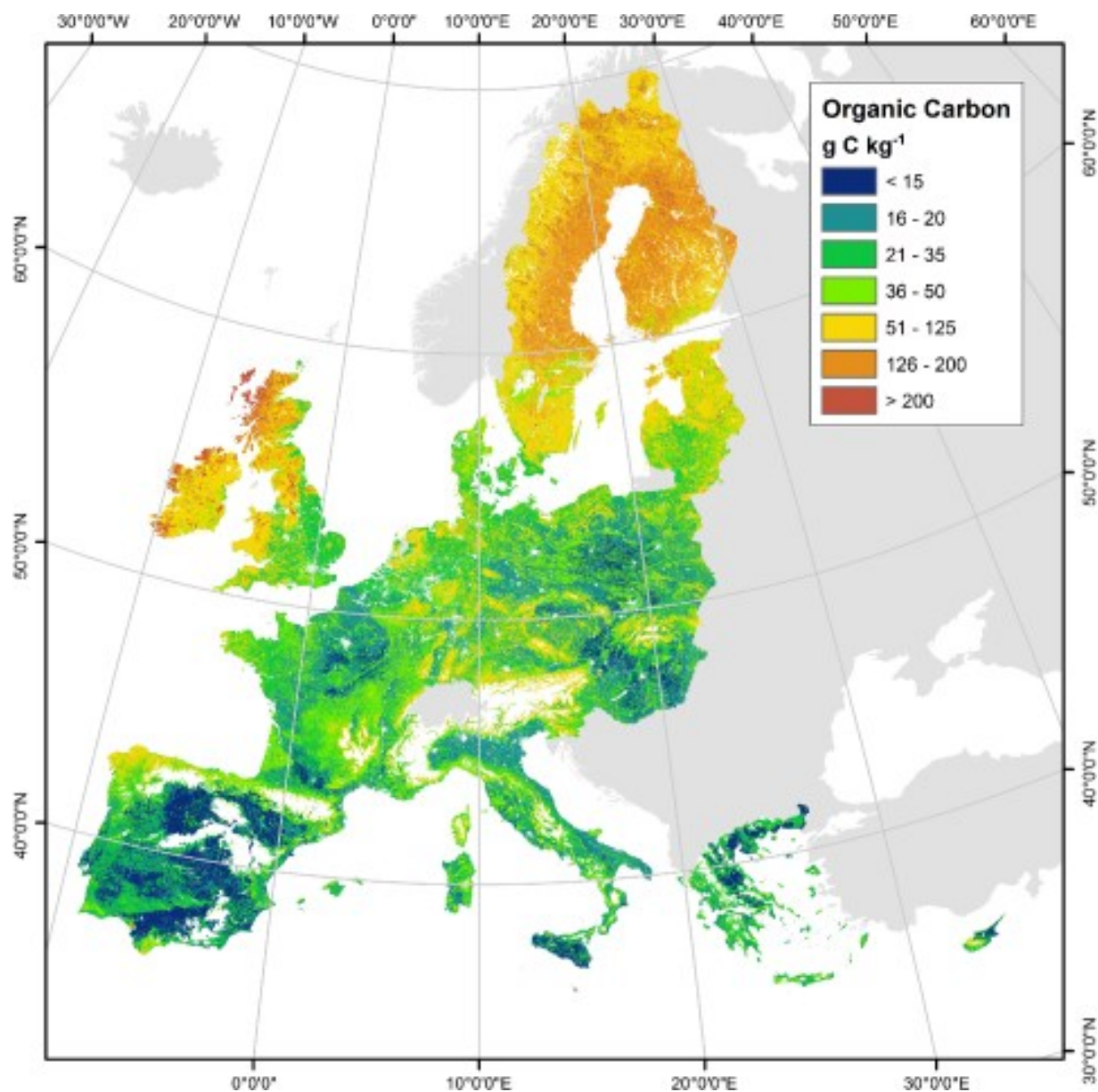


Figura 3-32 – Mappa a scala Europea del contenuto di sostanza organica (g C Kg⁻¹) secondo il prodotto *Soil Organic Carbon Content* (D. de Brogniez et al, 2014) dell'European Soil Data Centre (ESDAC).

Sul sito di validazione di Castelvetrano si è operato un confronto a scala di pixel tra i valori dei parametri fisici del suolo stimati in-situ e calcolati mediante l'applicazione ai prodotti dell'ESDAC di PTF Saxton&Rawls. Tale confronto è riportato in Tabella 3-7.

Tabella 3-7 - Confronto a scala di pixel sul sito di Castelvetrano tra i valori dei parametri fisici del suolo stimati in-situ e derivati da pedotrasfer Saxton&Rawls applicate ai prodotti dell'ESDAC.

Parametri	Descrizione	Valori stimati in-situ	Valori stimati mediante PTF Saxton&Rawls e prodotti ESDAC
θ_{FC} [-]	Capacità di campo	0.32	0.31
θ_{WP} [-]	Punto di appassimento	0.09	0.17
θ_{HW} [-]	Acqua igroscopica	0.04	Costante=0.005
K_s , [mm.giorno ⁻¹]	Conducibilità satura	110.4	30.97
Depth (mm)	Root zone depth	700	Dedotto dal quaderno FAO56
Porosity (-)	Porosità	0.5	0.4

Dalla Tabella 3-7 si osserva come i parametri stimati in-situ e calcolati siano abbastanza simili in valore, a meno del parametro conducibilità satura calcolato che comunque risulta essere dello stesso ordine di grandezza di quello stimato.

Per quanto riguarda i siti PAT il parametro fisico “acqua igroscopica” sarà posto costante e pari a 0.005, mentre il paramero root zone depth sarà dedotto dal quaderno FAO56.

Le caratteristiche idrauliche in formato raster, derivate a partire dai prodotti descritti, sono riportati nelle figure a seguire.

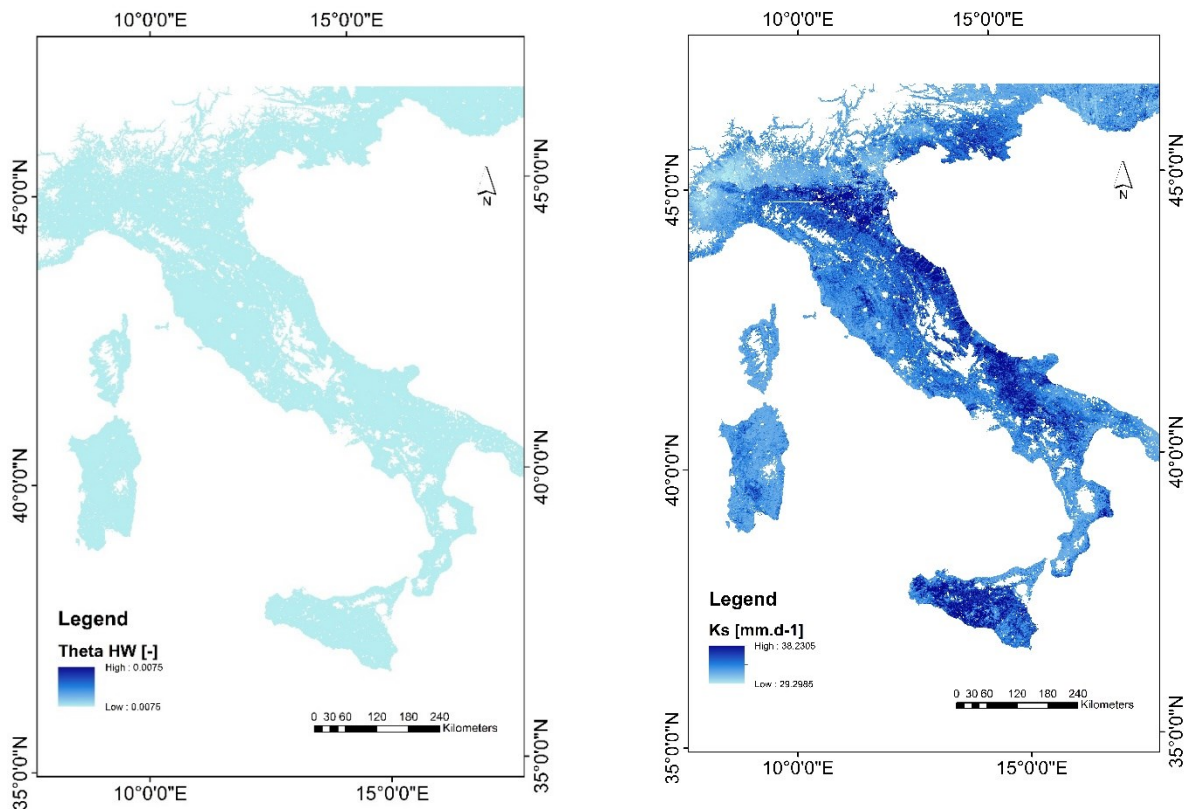


Figura 3-33 – Mappe dell’acqua igroscopica (θ_{HW} , [-]) posta ad un valore costante pari a 0.005 (a sinistra), e mappa della conducibilità idraulica saturata (K_s , [mm.giorno⁻¹]) (a destra).

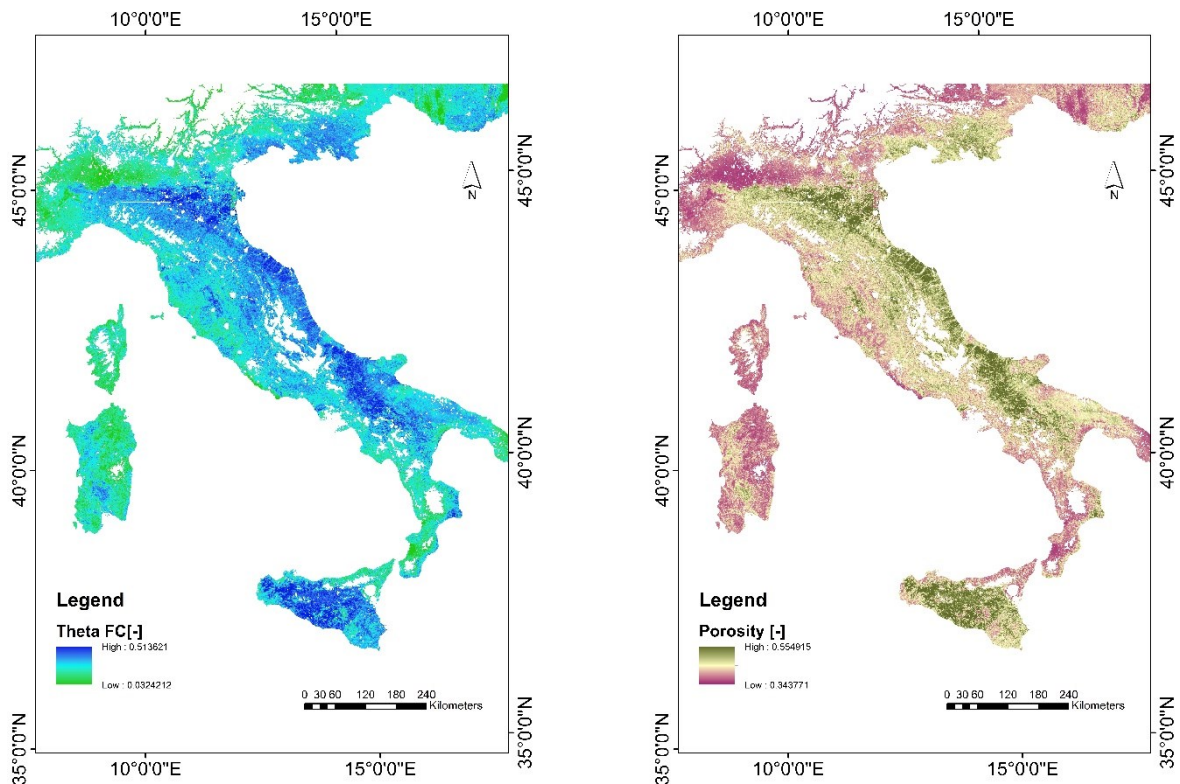


Figura 3-34 – Mappe della capacità di campo (θ_{FC} , [-]) (a sinistra) e della porosità (porosity [-]) (a destra)

3.12 Stima della perdita di suolo per erosione idrica

L'erosione del suolo per effetto dell'acqua è una delle principali minacce per i suoli, con un impatto negativo sui servizi ecosistemici, la produzione agricola, l'acqua potabile e le riserve di carbonio. Per tale studio è stato utilizzato il prodotto “Perdita di suolo nell’Unione Europea per erosione idrica secondo il modello RUSLE2015” alla risoluzione spaziale di 100 m. Tale modello, derivato dalla modifica del modello RUSLE, stima la perdita di suolo in Europa per l'anno di riferimento 2010, mediante fattori di input (l’erosione dovuta alla pioggia, l’erosione determinata dal tipo di suolo, la gestione del suolo, la topografia, le pratiche di sostegno) modellati con set di dati paneuropei. Il modello “RUSLE2015” è definito dalla seguente equazione (Renard et al., 1997):

$$E = R * K * C * LS * P$$

Dove:

- **E** : perdita media annua di suolo ($t\ ha^{-1}\ anno^{-1}$);
- **R** : fattore di erosività dovuta alle precipitazioni ($MJ\ mm\ ha^{-1}\ h^{-1}\ anno^{-1}$);
- **K** : fattore di erodibilità dovuto alla tipologia di suolo ($t\ ha\ H\ ha^{-1}\ MJ^{-1}\ mm^{-1}$);
- **C** : fattore di *cover-management* (adimensionale);
- **LS** : *slope lenght* (adimensionale);
- **P**: fattore di pratiche di supporto (adimensionale).

I dati di input per la stima della perdita di suolo per erosione idrica in l'Europa, mediante il modello RUSLE il 2015 sono riportati nella Figura 3-35.

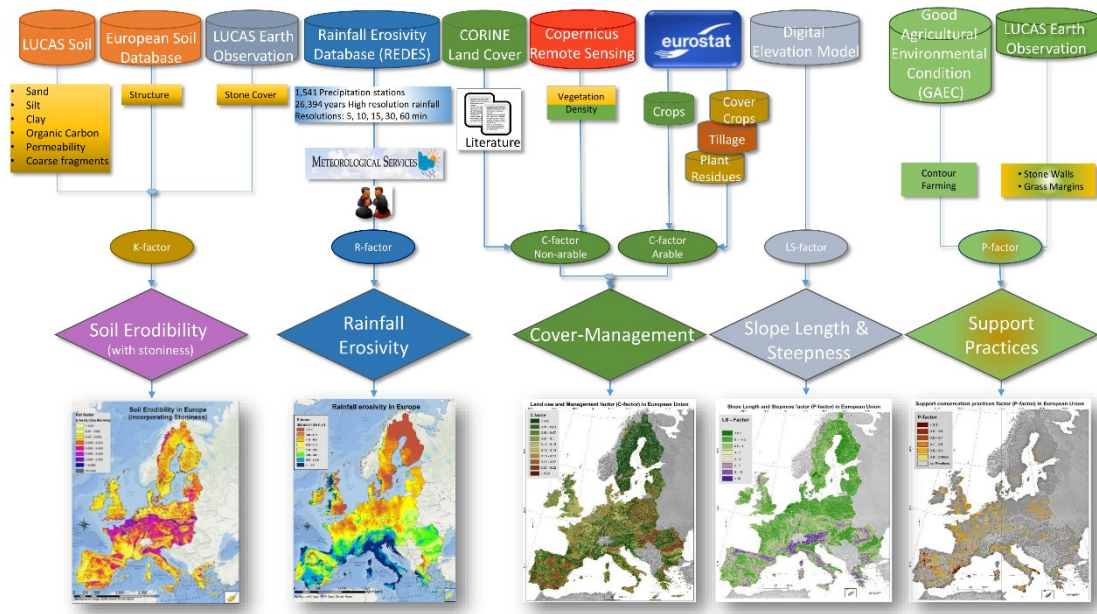


Figura 3-35 – I layer di input per la stima della perdita di suolo per erosione idrica in l'Europa, mediante il modello RUSLE il 2015.

Nella Figura 3-36 è riportato invece il prodotto “perdita di suolo nell’Unione Europea per erosione idrica secondo il modello RUSLE 2015”.

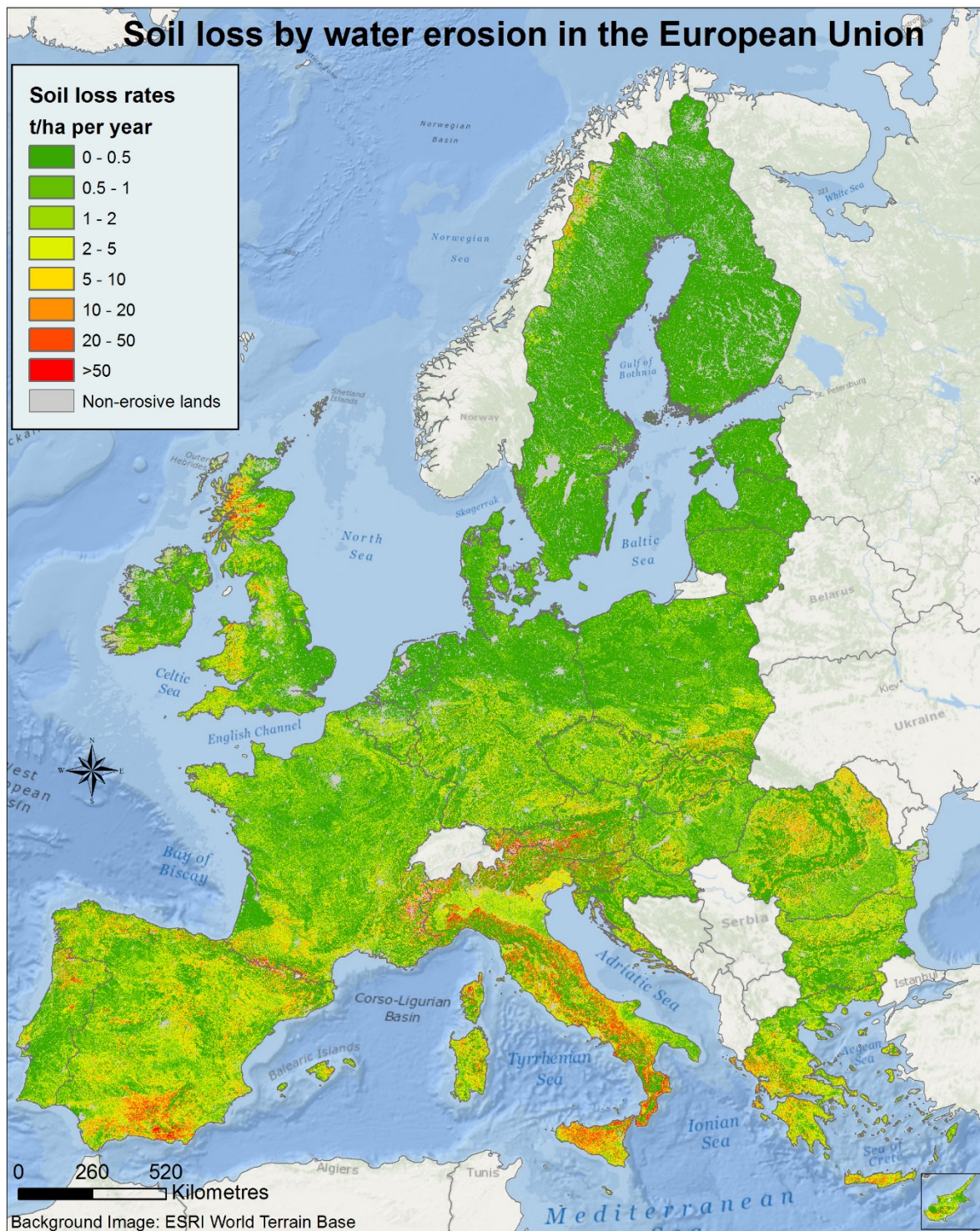


Figura 3-36 – Perdita di suolo nell’Unione Europea per erosione idrica secondo il modello RUSLE2015 (RUSLE2015, sulla base di Renard et al., 1997).

3.13 Stima del deficit/surplus idrico per colture non irrigue o deficit/surplus potenziale

Il deficit/surplus idrico potenziale è stato derivato mediante la relazione

$$S = P_n - ET_p$$

Dove ET_p è l'evapotraspirazione potenziale [mm] derivata mediante il modello PM – FAO56, sulla base del LAI, derivato (mediante calibrazione della legge di Lambert-Beer) dalle serie dell'indice di vegetazione NDVI MODIS filtrate e dell'albedo (climate) ECMWF ERA-Interim. P_n è la precipitazione netta, ridotta in funzione del LAI utilizzando la relazione di Braden (1985) [mm], sulla base della precipitazione totale fornita dai dati di ri-analisi ECMWF ERA-Interim. La differenza S [mm] rappresenta il volume d'acqua massimo a disposizione delle colture. Con tale formulazione viene trascurato il deflusso superficiale (assenza di flussi idrici laterali) e l'irrigazione durante il periodo a cui si riferisce il calcolo.

3.14 Calibrazione del Modello ed estrazione degli eco-indicatori derivanti da processo

Il modello eco-idrologico riceve come input i parametri della vegetazione, del clima e del suolo, e fornisce in output gli eco-indicatori produttività primaria lorda (GPP [$\text{g C.giorno}^{-1}.\text{m}^{-2}$]), produttività primaria netta (NPP [$\text{g C.giorno}^{-1}.\text{m}^{-2}$]), contenuto idrico del suolo (SWC [$\text{m}^3.\text{m}^{-3}$]), evaporazione e traspirazione potenziale [mm.giorno^{-1}], derivata dall'evapotraspirazione potenziale, utilizzando la metodologia proposta da Ritchie (1972), ed il crop water stress index modificato (CWSI* [-]), derivato come complemento ad 1 del coefficiente di stress idrico del suolo K_s nel metodo FAO 56.

Il modello è stato calibrato sul sito test di Castelvetro: i parametri calibrati sono riportati in Tabella 3-8 in grassetto. Il valore dei parametri fisici del suolo derivano da stime in-situ.

Tabella 3-8 – Elenco delle corrispondenze variabili (con relativa unità di misura) e delle costanti utilizzate per il sito di Castelvetro nella descrizione e nella codifica in MATLAB del modello sviluppato.

Nome questo documento	Nome MATLAB	Unità di misura	Valore	Descrizione
n x Zr x Sfc	Theta FC	m ³ m ⁻³	0.32	Theta field capacity
n x Zr x SW	Theta WP	m ³ m ⁻³	0.09	Theta wilting point
n x Zr x Sh	Theta HW	m ³ m ⁻³	0.04	Theta hygroscopic water
Ks	Ks	mm d ⁻¹	110.4	Saturated hydraulic conductivity
Zr	Depth	mm	1000	Root zone depth (simulated soil layer depth)
n	Porosity (-)	-	0.5	Soil porosity
ε _{max}	e_max	g C MJ ⁻¹	0.2	potential LUE
r _{est}	r_ext	-	0.7	radiation extinction by canopy
r_{MANT}	k_rm	g C m⁻² d⁻¹	1.00	mant resp rate
r_{CRESCITA}	k_rg	g C m⁻² d⁻¹	1.00	growth resp rate
k_{TURNOVER}	k_litter	g C m⁻² d⁻¹	0.10	rate of litter prod by leaf fall
k_{CADUTA}	k_litter2	g C m⁻² d⁻¹	0.10	rate of litter prod by turnover
n x Zr x S*	theta_WCs	m³ m⁻³	0.20	water cont max ET
β	beta	-	1.00	Water leakage parameter
k_{MIN}	k_min	d⁻¹	0.10	mineralization rate
k_M	Comp_Micro	-	0.50	SOMDY
k_M	Quoziente_metabolico	-	0.20	SOMDY
	Tmin	°C	0.00	Climatic limiting factors
	Tmax	°C	50.00	Climatic limiting factors
	Topt	°C	30.00	Climatic limiting factors
	Wmin	m³ m⁻³	0.00	Climatic limiting factors
	Wmax	m³ m⁻³	1.00	Climatic limiting factors
	Wopt	m³ m⁻³	0.40	Climatic limiting factors

Alcune grandezze fornite in output dal modello sono state confrontate, a scala di pixel, con dati derivanti da osservazione satellitare. In particolare i valori di GPP e di NPP derivati dal modello sono stati confrontati a scala mensile con i valori derivati dal prodotto MODIS GPP/NPP 17A2 (*composite* ad 8 giorni e alla risoluzione spaziale di 1km); la serie temporale del contenuto di umidità del suolo stimata dal modello è stata confrontata con la serie temporale del contenuto di umidità nel suolo del layer 1 derivato dai dati ERA-Interim e relativo al SWC dello spessore di suolo di 7 cm alla profondità di 0.07 m dal piano campagna (secondo lo schema di Tessel assimilato in ERA-Interim).-Per stimare la capacità predittiva del modello per il solo ecoindicatore SWC è stato utilizzato per il coefficiente di efficienza di Nash-Sutcliffe (NSE) così definito:

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (X_{obs\ i} - X_{model})^2}{\sum_{i=1}^n (X_{obs\ i} - \overline{X_{obs}})^2}$$

dove X_{obs} è il valore di SWC per il layer 1 (profondità 0.07 m dal p.c.) derivato dal dataset ERA-Interim e X_{model} è la SWC in output dal modello. Il coefficiente di efficienza Nash-Sutcliffe può variare da $-\infty$ to 1. Il valore 1 ($NSE = 1$) corrisponde ad una perfetta corrispondenza tra modello e osservazioni. Un valore pari a 0 indica che le previsioni del modello sono precisi come la media dei dati osservati, considerando che un NSE minore di zero ($-\infty < NSE < 0$) si verifica quando la media osservata è un predittore migliore del modello.

4 Risultati

4.1 Ecoindicatori derivanti da dati di osservazione della Terra

4.1.1 Trend delle coperture vegetali

- a) Stima della variabilità di uno stesso PAT all'interno di una singola Sottosezione Ecoregionale;
- b) Stima della variabilità di uno stesso PAT tra diverse Sottosezioni Ecoregionali.

Per la prima elaborazione sono state considerate la serie temporale dell'indice NDVI dei singoli punti PAT, riportati in Tabella 3-5; per la seconda sono state considerate invece le serie temporali media per sottosezione dell'indice NDVI da essa derivate.

Per la prima elaborazione verranno mostrati due esempi tipo ciascun PAT (frutteto, oliveto, vigneto e risaia), per la seconda elaborazione verranno mostrati due esempi tipo relativi al solo PAT frutteto, rimandando all'appendice A l'insieme dei grafici relativi alle serie temporali media e deviazione standard dell'indice NDVI derivate dai punti PAT e suddivisi per sottosezione Ecoregionale.

In questo sotto paragrafo verranno rilevate, nell'ambito delle elaborazioni a) e b), similarità e differenze in termini di ciclicità e in termini di intensità dei valori minimi e massimi annui annuali dell'indice NDVI: i motivi di tali accordi o disaccordi sono legati ad una serie di fattori che è possibile indagare, ma che non sono oggetto di tale studio: il clima, il suolo, la gestione e la differenziazione tra specie intra PAT.

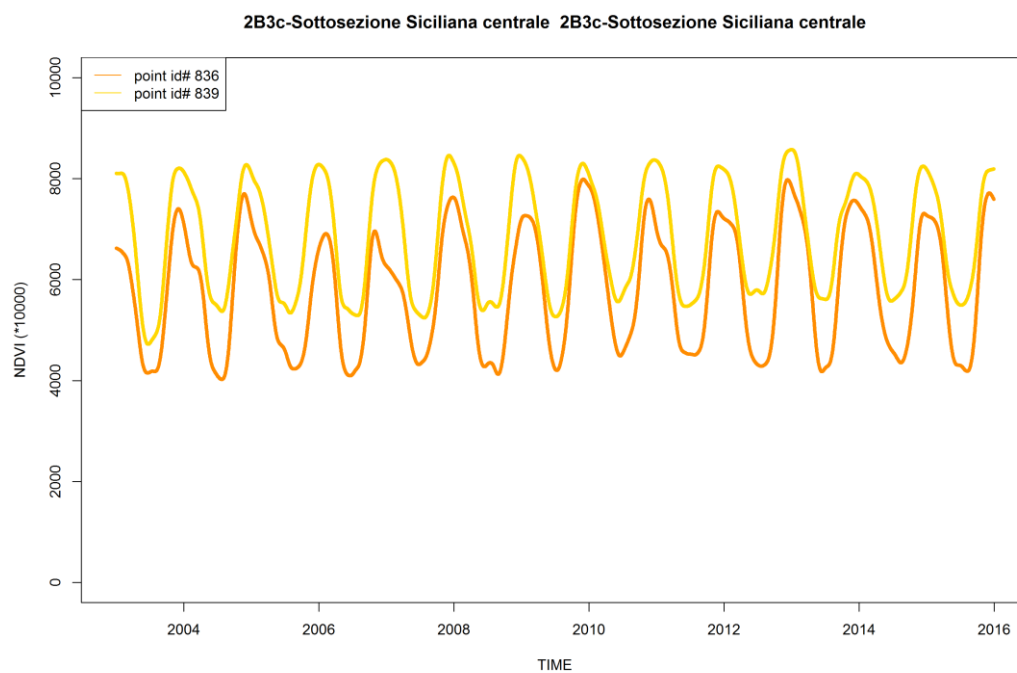


Figura 4-1– Variabilità all’interno della singola sottosezione Ecoregionale: trend dell’indice NDVI per due punti PAT **frutteto** nella sottosezione 2B3c (**Sicilia**).

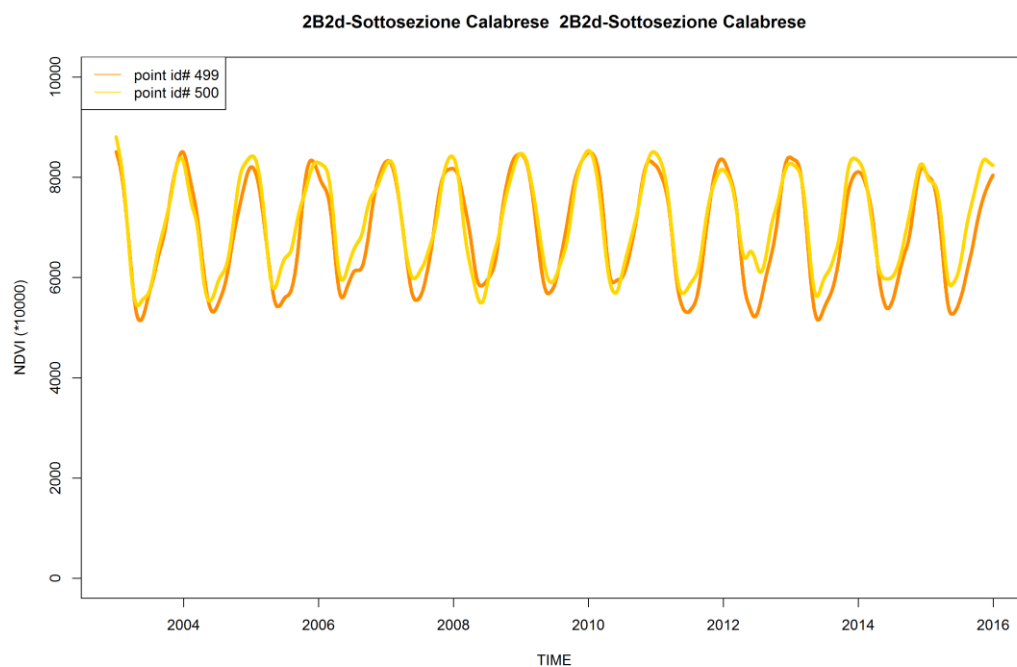


Figura 4-2– Variabilità all’interno della singola sottosezione Ecoregionale: trend dell’indice NDVI per due punti PAT **frutteto** nella sottosezione 2B2d (**Calabria**).

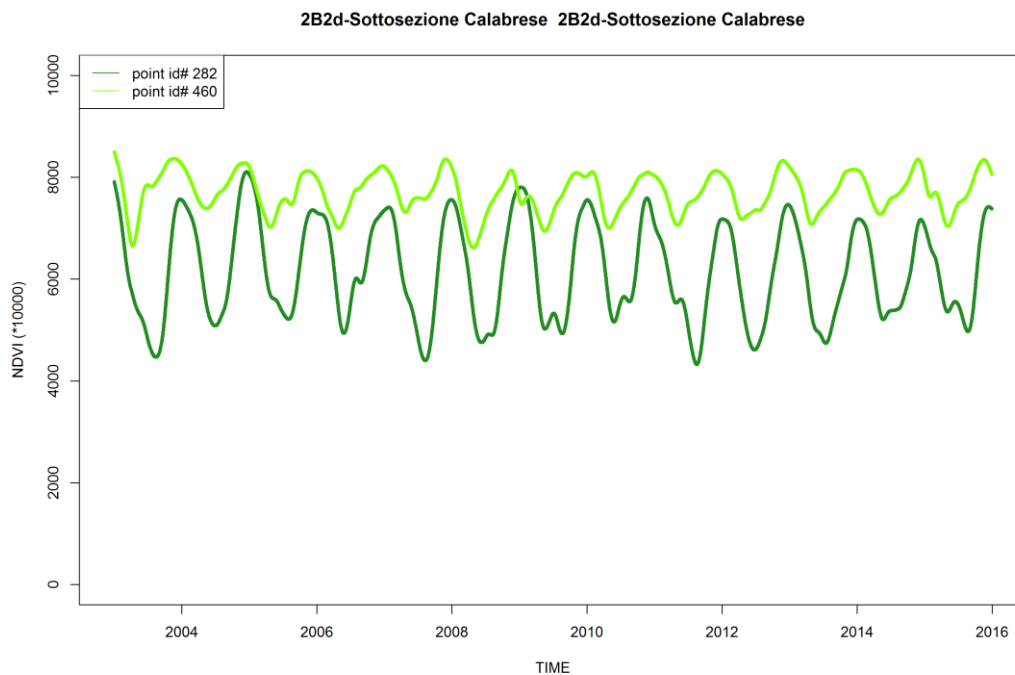


Figura 4-3– Variabilità all’interno della singola sottosezione Ecoregionale: trend dell’indice NDVI per due punti PAT **oliveto** nella sottosezione 2B2d (**Calabria**).

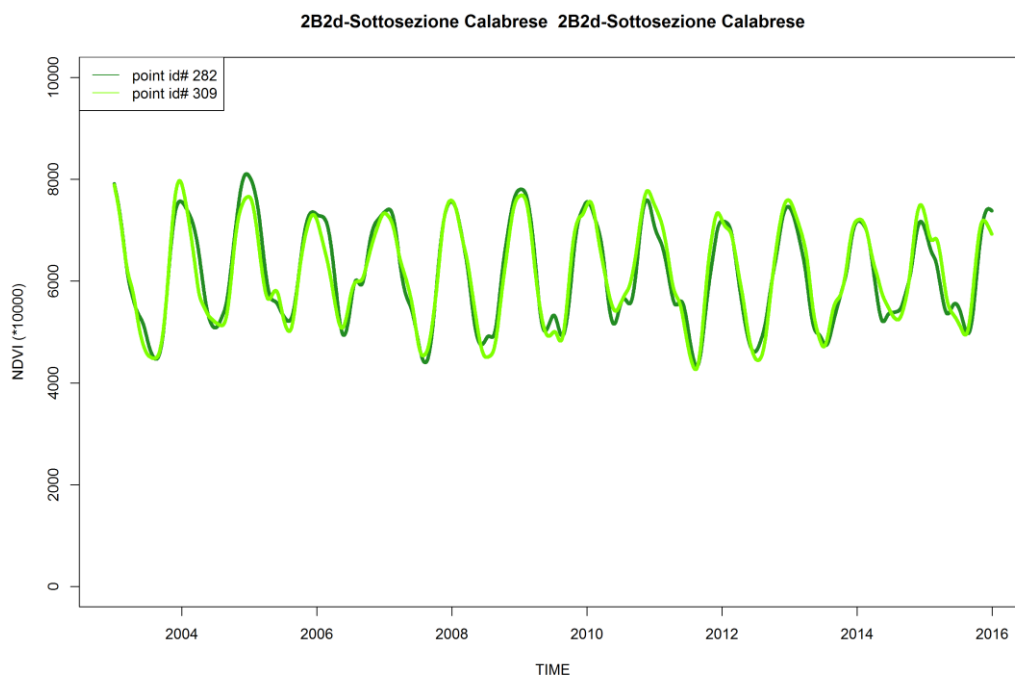


Figura 4-4– Variabilità all’interno della singola sottosezione Ecoregionale: trend dell’indice NDVI per due punti PAT **oliveto** nella sottosezione 2B2d (**Calabria**).

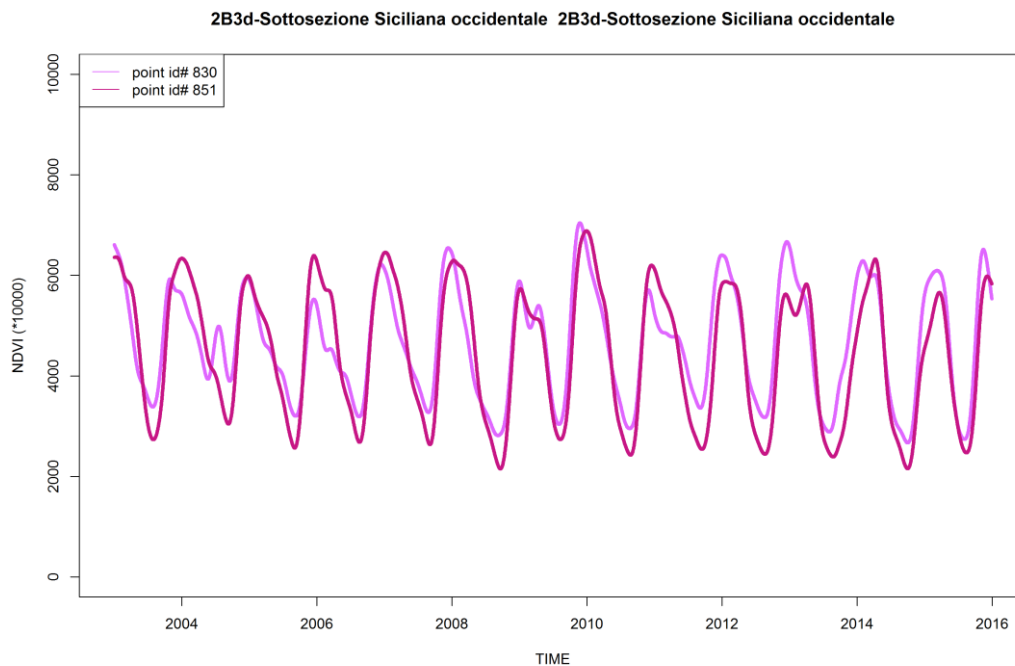


Figura 4-5– Variabilità all’interno della singola sottosezione Ecoregionale: trend dell’indice NDVI per due punti PAT **vigneto** nella sottosezione 2B3d (**Sicilia**).

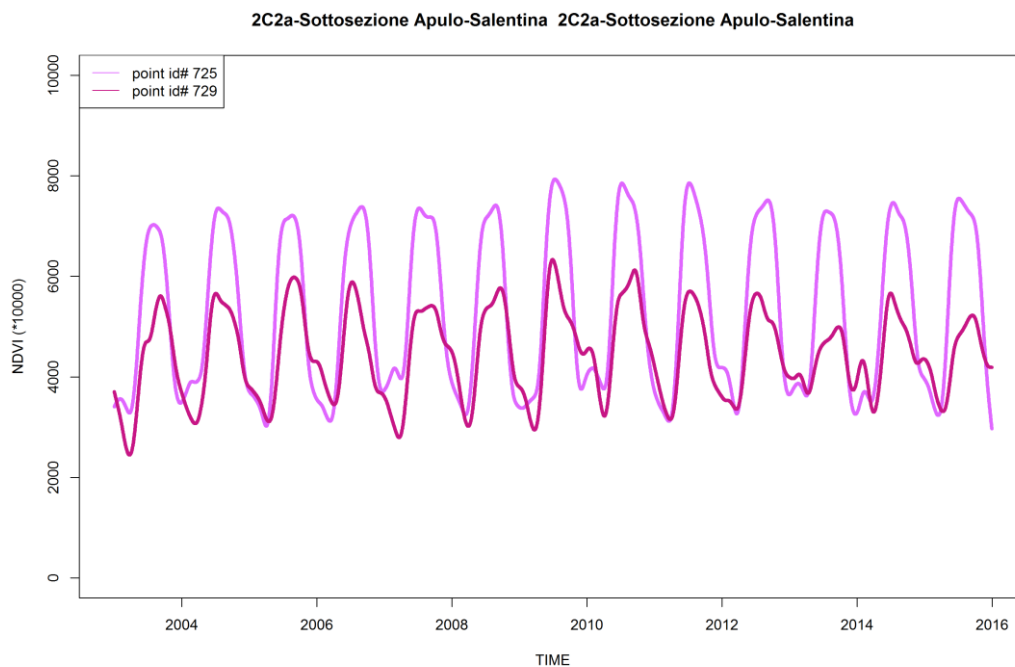


Figura 4-6– Variabilità all’interno della singola sottosezione Ecoregionale: trend dell’indice NDVI per due punti PAT **vigneto** nella sottosezione 2C2a (**Puglia**).

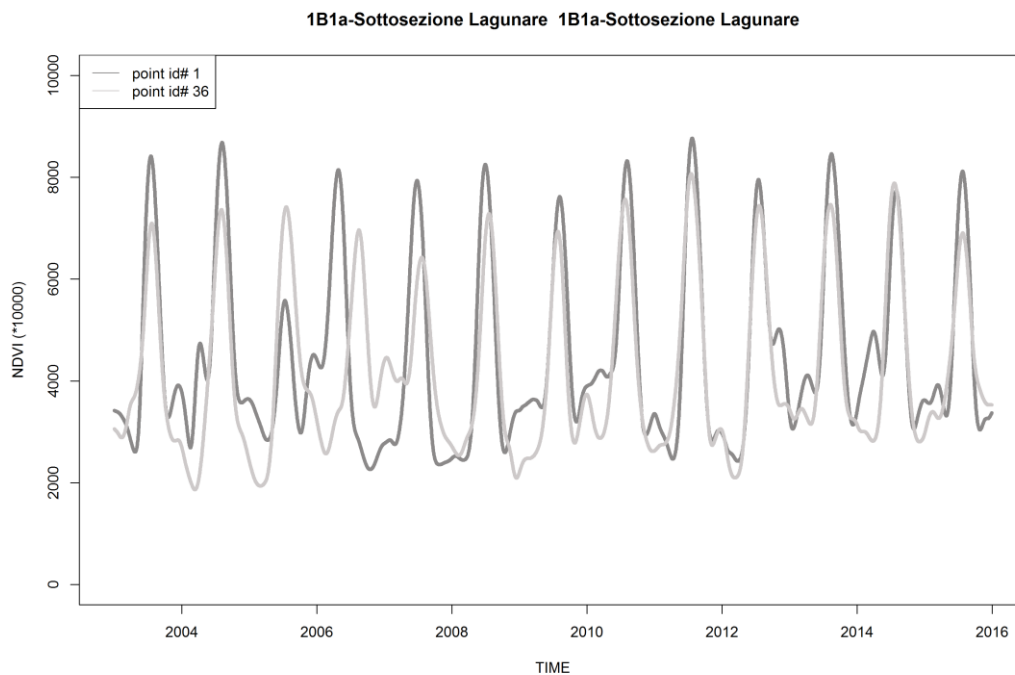


Figura 4-7– Variabilità all’interno della singola sottosezione Ecoregionale: trend dell’indice NDVI per due punti PAT **risaia** nella sottosezione 1B1a (**Veneto**).

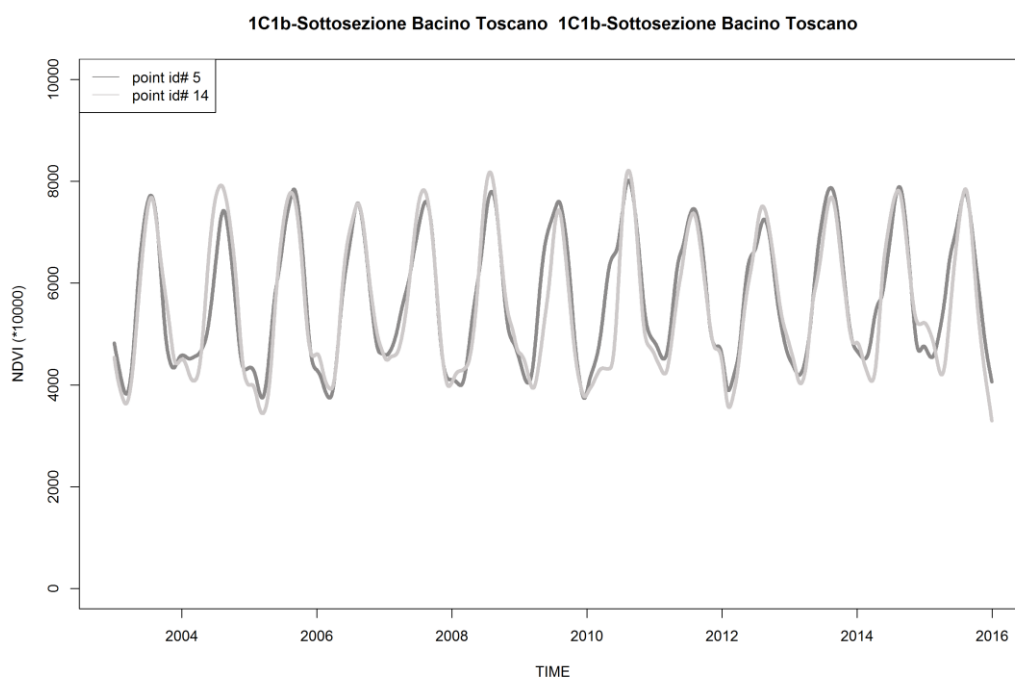


Figura 4-8– Variabilità all’interno della singola sottosezione Ecoregionale: trend dell’indice NDVI per due punti PAT **risaia** nella sottosezione 1C1b (**Veneto**).

Dai risultati di questa prima comparazione è possibile affermare che *per uno stesso PAT all'interno di una medesima sottosezione Ecoregionale* si riscontano andamenti quasi sempre concordi in termini di ciclicità, ovvero nei valori minimi e massimi annui dell'indice NDVI; questi valori presentano una *sincronia di fase*, pur con le distinzioni stagionali legate a ciascuna tipologia di PAT, ad esempio: NDVI minimo in estate e massimo in inverno per frutteto e oliveto; viceversa, NDVI massimo in estate e minimo in inverno per vigneto e risaia. I valori minimi e massimi dell'indice NDVI risultano prossimi per ciascun PAT all'interno della medesima sottosezione, ad eccezione di alcuni casi isolati che presentano peculiarità dovute a fattori pedoclimatici e specie-specifici, il cui approfondimento non rientra nello scopo del presente studio.

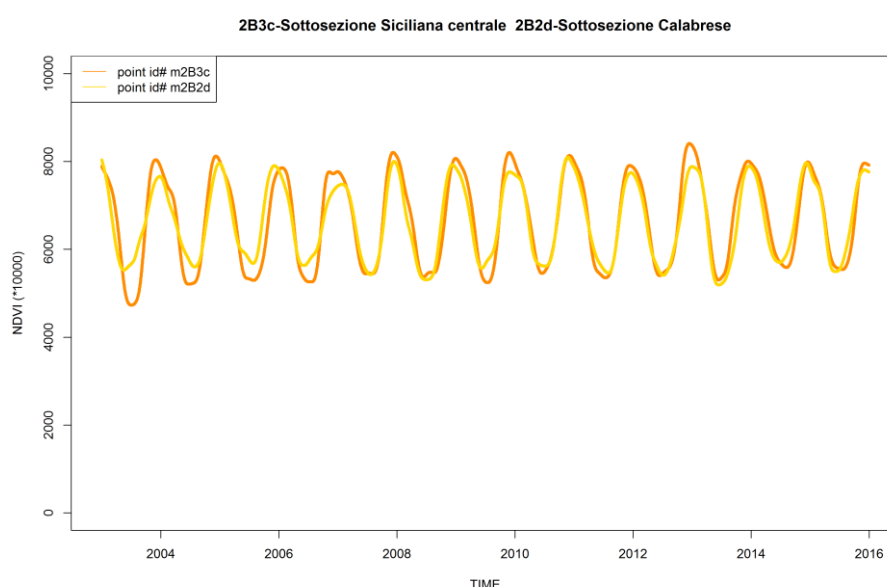


Figura 4-9 – Variabilità dei PAT tra sottosezioni Ecoregionali: accordo in termini di ciclicità (valori minimi e massimi annui in fase: ciclo con NDVI minimo in estate e massimo in inverno) e di intensità (similarità in valore per il minimo ed il massimo annuo dell'indice di vegetazione) della serie temporale media dell'indice NDVI per il PAT frutteto nelle due sottosezioni Ecoregionali 2B3c (Sicilia) e 2B2d (Calabria).

Dai risultati della seconda comparazione è possibile affermare che *per uno stesso PAT all'interno di diverse sottosezioni* è possibile riscontare andamenti quasi sempre concordi in termini di ciclicità, ma non nell'intensità a causa della variabilità pedoclimatica tra le sottosezioni Ecoregionali. Ad esempio,

in Figura 4-10 si evidenzia come, nel caso del PAT “Frutteto” per due diverse sottosezioni Ecoregionali in Sicilia e Calabria i minimi e massimi annui dell’indice NDVI presentano sincronia di fase, mentre i corrispondenti valori sono sfalsati.

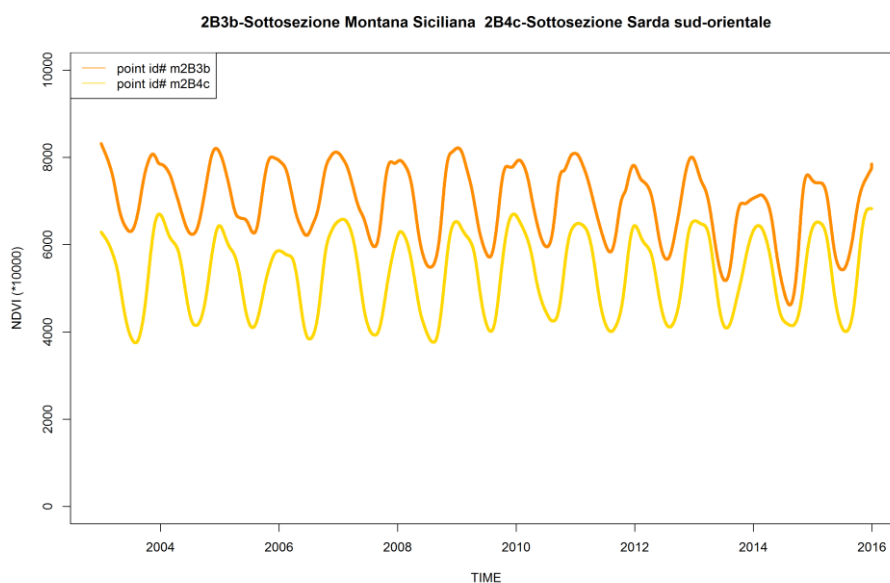


Figura 4-10 –Variabilità dei PAT tra diverse sottosezioni Ecoregionali: accordo in termini di ciclicità (valori minimi e massimi annui in fase: ciclo con NDVI minimo in estate e massimo in inverno) ma non in termini di intensità (difformità in valore per il minimo ed il massimo annuo dell’indice di vegetazione) della serie temporale media dell’indice NDVI per il PAT frutteto nelle due sottosezioni Ecoregionali 2B3b (Sicilia) e 2B4c (Sardegna).

4.1.2 Variazioni temporali (intra-annuali ed inter-annuali) delle coperture vegetali

L’NDVI massimo annuo è una misura della produttività complessiva e della biomassa della vegetazione. La variazione intra-annuale ($NDVI_{massimo} - NDVI_{minimo}$) fornisce invece informazioni della variabilità della produttività. Per il presente studio sono stati derivati per i PAT in esame (frutteto, oliveto, vigneto, risaia) il valore massimo, minimo, l’ampiezza (amplitude) dell’indice NDVI e le differenze dell’NDVI massimo tra gli anni 2003-2009 ($NDVI_{massimo\ 2009} - NDVI_{massimo\ 2003}$), tra gli anni 2009-2015 ($NDVI_{massimo\ 2015} - NDVI_{massimo\ 2009}$), tra gli anni 2003-2015 ($NDVI_{massimo\ 2015} - NDVI_{massimo\ 2003}$). I valori massimi annuali dell’indice NDVI sono relativi alla media dei 13 anni disponibili per le analisi (valori nel periodo 2003-2015)

derivata dalle serie temporali dell'indice NDVI dei punti per ciascun PAT nelle diverse sottosezioni Ecoregionali d'Italia. I risultati sono riportati nelle figure a seguire.

Tabella 4-1 – Elenco delle corrispondenze tra Sottosezioni Ecoregionali e Regioni D'Italia

Sottosezione Ecoregionale	Regione
1B1a-Sottosezione Lagunare	Emilia Romagna Veneto
1B1b-Sottosezione Alta e Bassa Pianura	Emilia Romagna Lombardia
1C1b-Sottosezione Bacino Toscano	Toscana
1C2b-Sottosezione Laziale-Abruzzese	Abruzzo
2B1b-Sottosezione Maremmana	Toscana
2B2a-Sottosezione Campana	Campania
2B2b-Sottosezione Lucana	Basilicata Calabria
2B2c-Sottosezione Cilentana	Campania
2B2d-Sottosezione Calabrese	Calabria
2B3a-Sottosezione Iblea	
2B3b-Sottosezione Montana Siciliana	Sicilia
2B3c-Sottosezione Siciliana centrale	
2B3d-Sottosezione Siciliana occidentale	
2B4a-Sottosezione Sarda sud-occidentale	
2B4b-Sottosezione Sarda Nord occidentale	Sardegna
2B4c-Sottosezione Sarda sud-orientale	
2C1a-Sottosezione Centrale	Abruzzo
2C2a-Sottosezione Apulo-Salentina	Basilicata Puglia
2C2b-Sottosezione Garganica	Puglia

I risultati, riportati nelle figure a seguire, possono essere così sintetizzati:

La maggiore ampiezza di NDVI (NDVI massimo - NDVI minimo) intra-annuale si riscontra in ordine crescente per i PAT Frutteto, Oliveto, Risaia e Vigneto. Per quanto riguarda la produttività inter-annuale, intesa come differenza (NDVI massimo - NDVI minimo) in tre periodi (2003-2009, 2009-20015 e 2003-20015), fra i PAT Frutteto, Oliveto e Risaia si riscontrano andamenti crescenti, eccetto per il frutteto relativamente al 2009-2015 e per il vigneto relativamente variazioni inter-annuali 2003-2009 e 2003-2015.

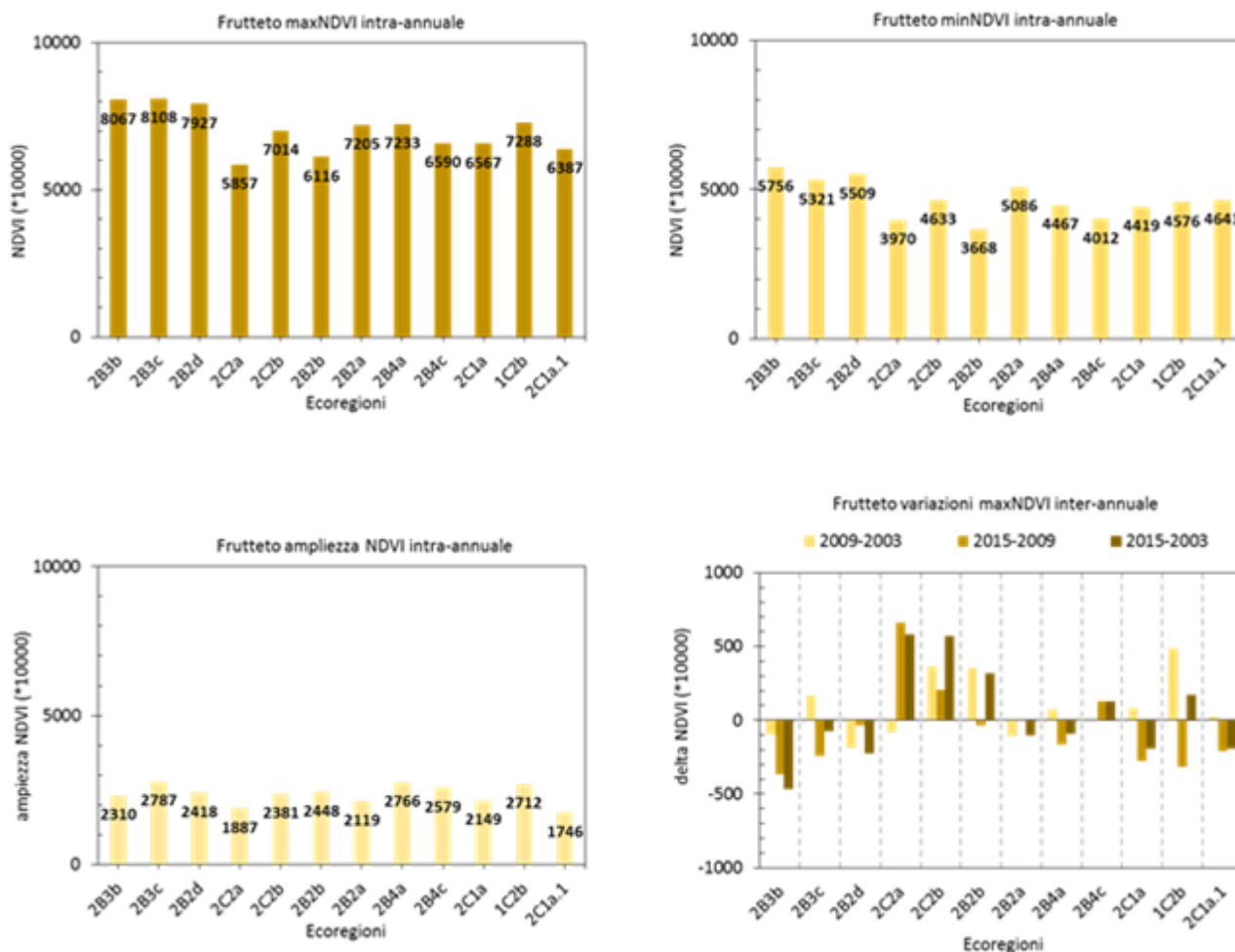


Figura 4-11 – NDVI massimo, NDVI minimo, ampiezza NDVI (NDVI massimo - NDVI minimo) intra-annuale, variazioni inter-annuale NDVI massimo (tra gli anni 2003-2009, 2009-2015 e 2003-2015) per il PAT frutteto nelle sottosezioni Ecoregionali d'Italia, riportate in dettaglio in Tabella 4-1.

Per il PAT frutteto si riscontra:

- Per le differenze tra gli anni 2003-2009 un andamento crescente della produttività (media=86; deviazione standard=204);
- Per le differenze tra gli anni 2009-2015 un andamento decrescente della produttività (media=-54; deviazione standard=274);
- Per le differenze tra gli anni 2003-2015 un andamento crescente della produttività (media=35; deviazione standard=310).

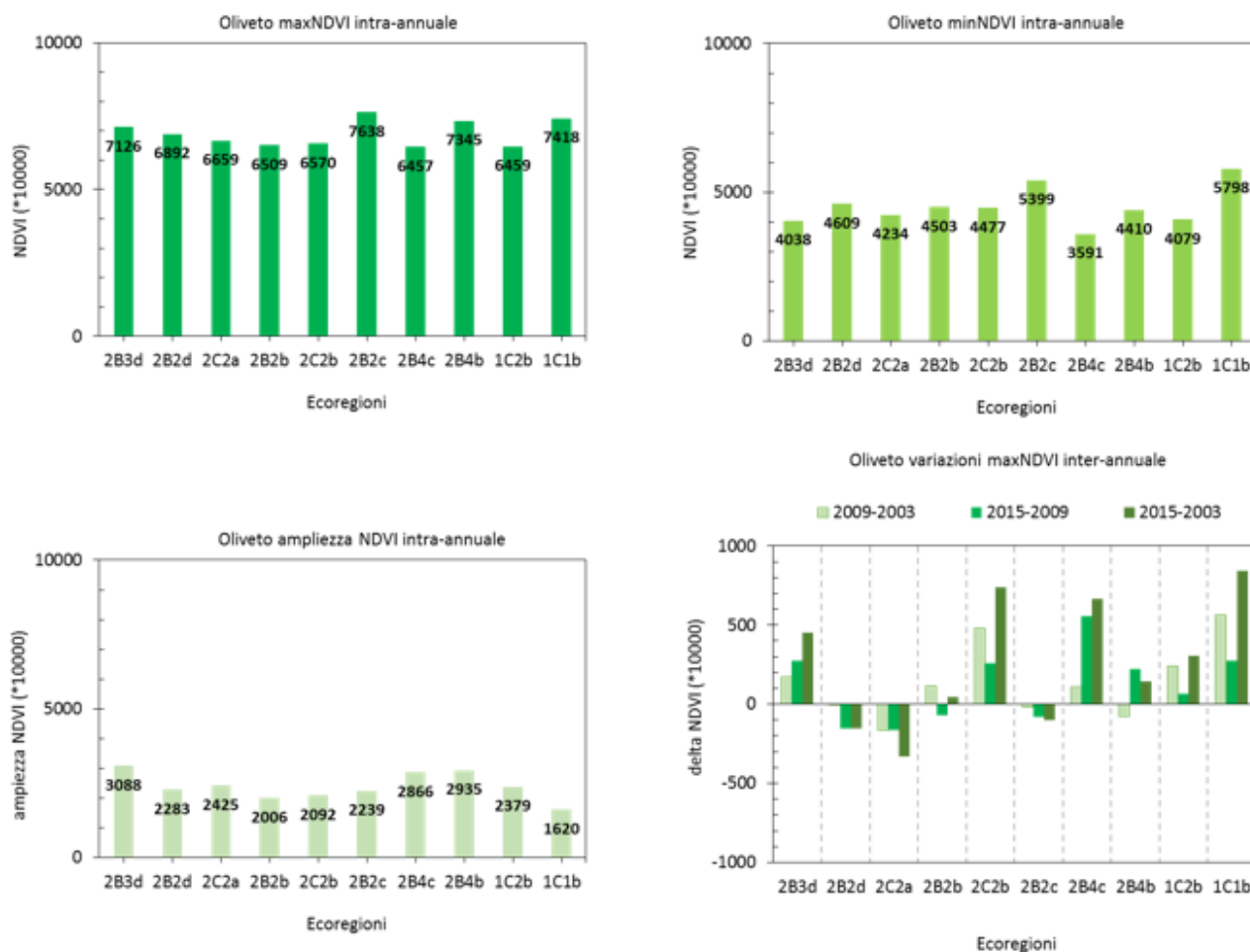


Figura 4-12 – NDVI massimo, NDVI minimo, ampiezza NDVI (NDVI massimo - NDVI minimo) intra-annuale, variazioni inter-annuale NDVI massimo (tra gli anni 2003-2009, 2009-2015 e 2003-2015) per il PAT Oliveto nelle sottosezioni Ecoregionali d'Italia, riportate in dettaglio in Tabella 4-1.

Per il PAT Oliveto si riscontra:

- Per le differenze tra gli anni 2003-2009 un andamento crescente della produttività (media=141; deviazione standard=222);
- Per le differenze tra gli anni 2009-2015 un andamento crescente della produttività (media=119; deviazione standard=225);
- Per le differenze tra gli anni 2003-2015 un andamento crescente della produttività (media=260; deviazione standard=385).

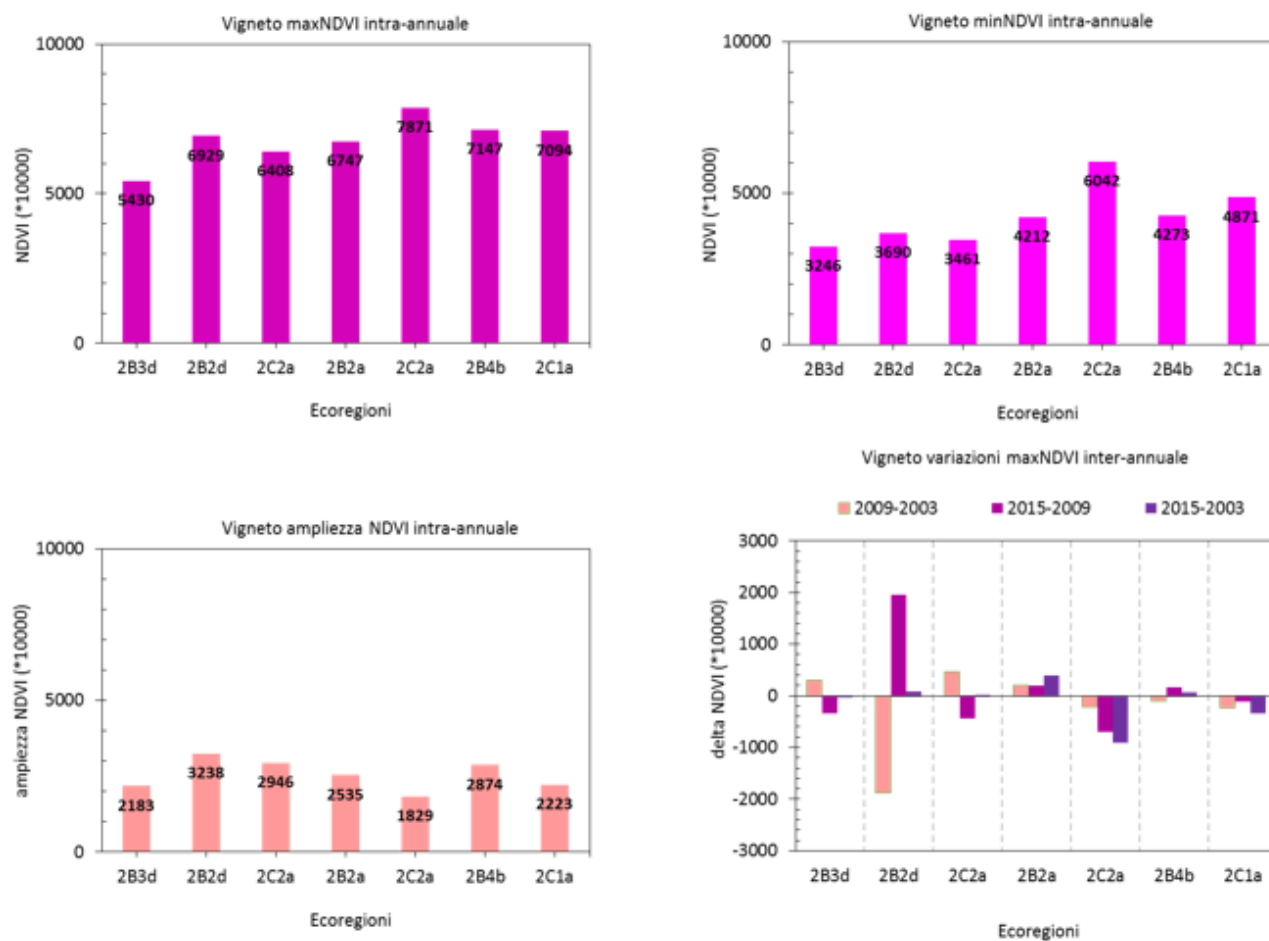


Figura 4-13 – NDVI massimo, NDVI minimo, ampiezza NDVI (NDVI massimo - NDVI minimo) intra-annuale, variazioni inter-annuale NDVI massimo (tra gli anni 2003-2009, 2009-2015 e 2003-2015) per il PAT Vigneto nelle sottosezioni Ecoregionali d'Italia, riportate in dettaglio in Tabella 4-1.

Per il PAT Vigneto si riscontra:

- Per le differenze tra gli anni 2003-2009 un andamento decrescente della produttività (media=-206; deviazione standard=726);
- Per le differenze tra gli anni 2009-2015 un andamento fortemente crescente della produttività (media= 104; deviazione standard=813);
- Per le differenze tra gli anni 2003-2015 un andamento leggermente decrescente della produttività (media=-102; deviazione standard=383).

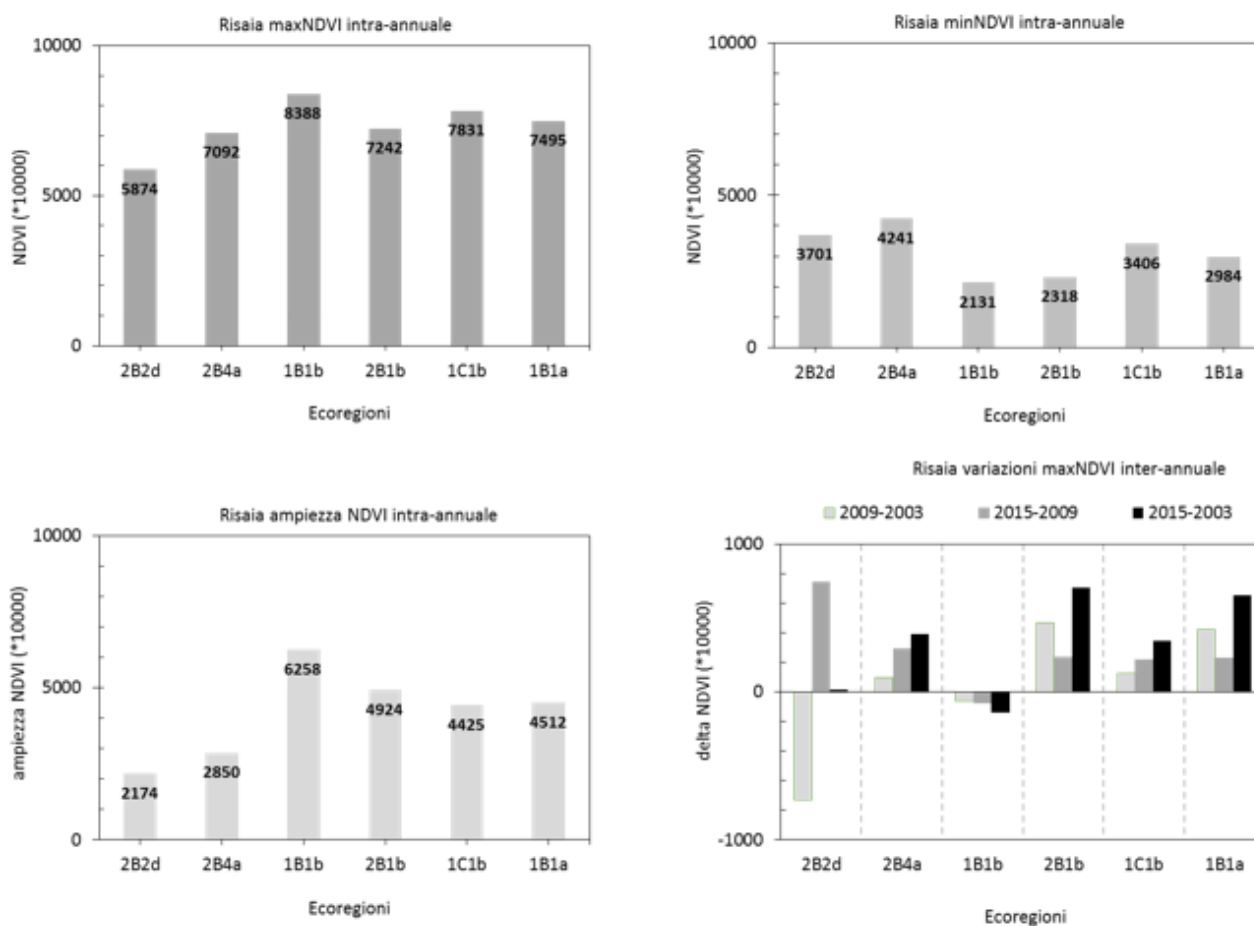


Figura 4-14 – NDVI massimo, NDVI minimo, ampiezza NDVI (NDVI massimo - NDVI minimo) intra-annuale, variazioni inter-annuale NDVI massimo (tra gli anni 2003-2009, 2009-2015 e 2003-2015) per il PAT Risaia nelle sottosezioni Ecoregionali d’Italia, riportate in dettaglio in Tabella 4-1.

Per il PAT Risaia si riscontra:

- Per le differenze tra gli anni 2003-2009 un andamento crescente della produttività (media=55; deviazione standard=396);
- per le differenze tra gli anni 2009-2015 un andamento crescente della produttività (media=275; deviazione standard=241);
- per le differenze tra gli anni 2003-2015 un andamento crescente della produttività (media=330; deviazione standard=308).

4.1.3 Indici bio-metrici caratteristici (Land Surface Phenology, LSP).

Delle metriche fenologiche, descritte in Tabella 2-3 e derivate su base raster, verranno mostrate l'inizio della stagione di crescita (SOST, start of season o green-up), la durata della stagione di crescita (LOS length of season o DUR, duration) e la somma dei valori di NDVI per il periodo della stagione di crescita (Large integrated value, LIV). Le stime sono relative alla media dei 13 anni disponibili per le analisi (valori nel periodo 2003-2015), prendendo in conto nell'ambito di ciascuna sottosezioni Ecoregionale d'Italia la serie temporale media dell'indice NDVI per PAT.

I risultati possono essere così riassunti, alla luce di quanto riportato in Figura 4-15, Figura 4-16 e Figura 4-17:

- Il parametro fenologico “Inizio della stagione di crescita”, sia in termini intra annuali che inter annuali, assume valore molto simile per i PAT Frutteto, Risaia e Vigneto (DoY 116, 114 e 105 rispettivamente) e maggiore per il PAT Oliveto (DoY 132) mentre la minore variabilità, inter annuale ed intra annuale, è riscontrabile per il PAT Risaia.
- Il parametro fenologico “Durata della stagione di crescita”, sia in termini intra annuali che inter annuali, assume valore molto simile per i PAT Frutteto, Oliveto e Vigneto (rispettivamente numero di giorni pari a 157, 144 e 155) e minore per il PAT Risaia (122 giorni) che presenta anche la minore variabilità rispetto agli altri PAT. Ciò è giustificato dal fatto che, secondo quanto indicato dall'ENR (<http://enterisi.it/servizi/>), il ciclo che va dalla semina alla maturazione è di 150-180 giorni che tra i punti PAT risaia in esame vi sono risaie con semina interrata e risaie con semina in acqua: per quest'ultime però la sommersione avviene 30-40 giorni dopo la semina, quando la vegetazione è già sufficientemente sviluppata.
- Il parametro fenologico “Large Integral Value”, sia in termini intra annuali che inter annuali, assume valore molto simile per i PAT Frutteto, Oliveto e Vigneto (104, 86 e 93 rispettivamente) e minore per il PAT Risaia (78) che presenta anche la minore variabilità rispetto agli altri PAT.

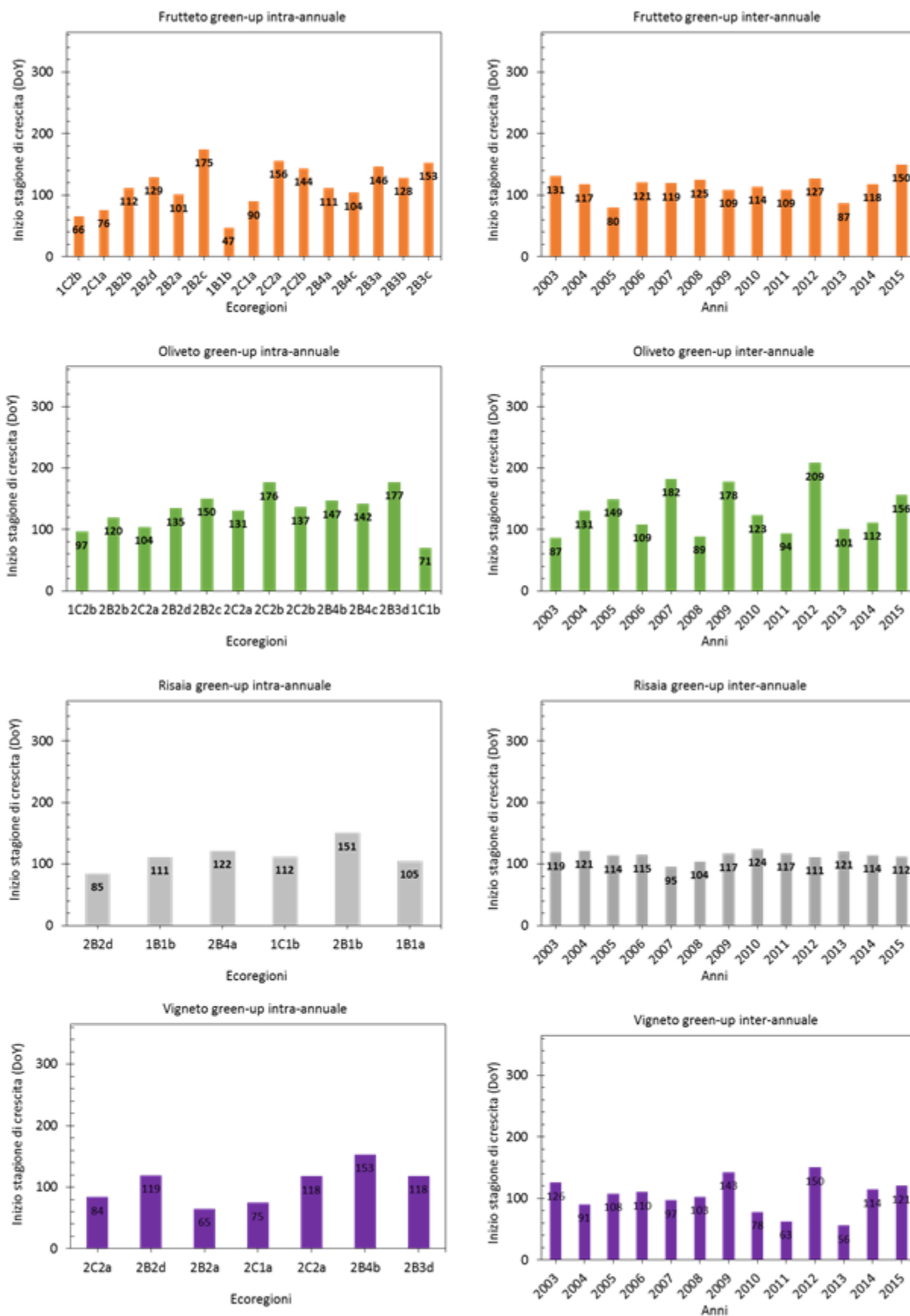


Figura 4-15 – Inizio della stagione di crescita: confronto tra valori intra annuali (valori medi tra anni per sottosezione e PAT nelle sottosezioni Ecoregionali) (sinistra), confronto tra valori inter annuali (valori medi per anno per sottosezioni e PAT nelle sottosezioni Ecoregionali) (destra).

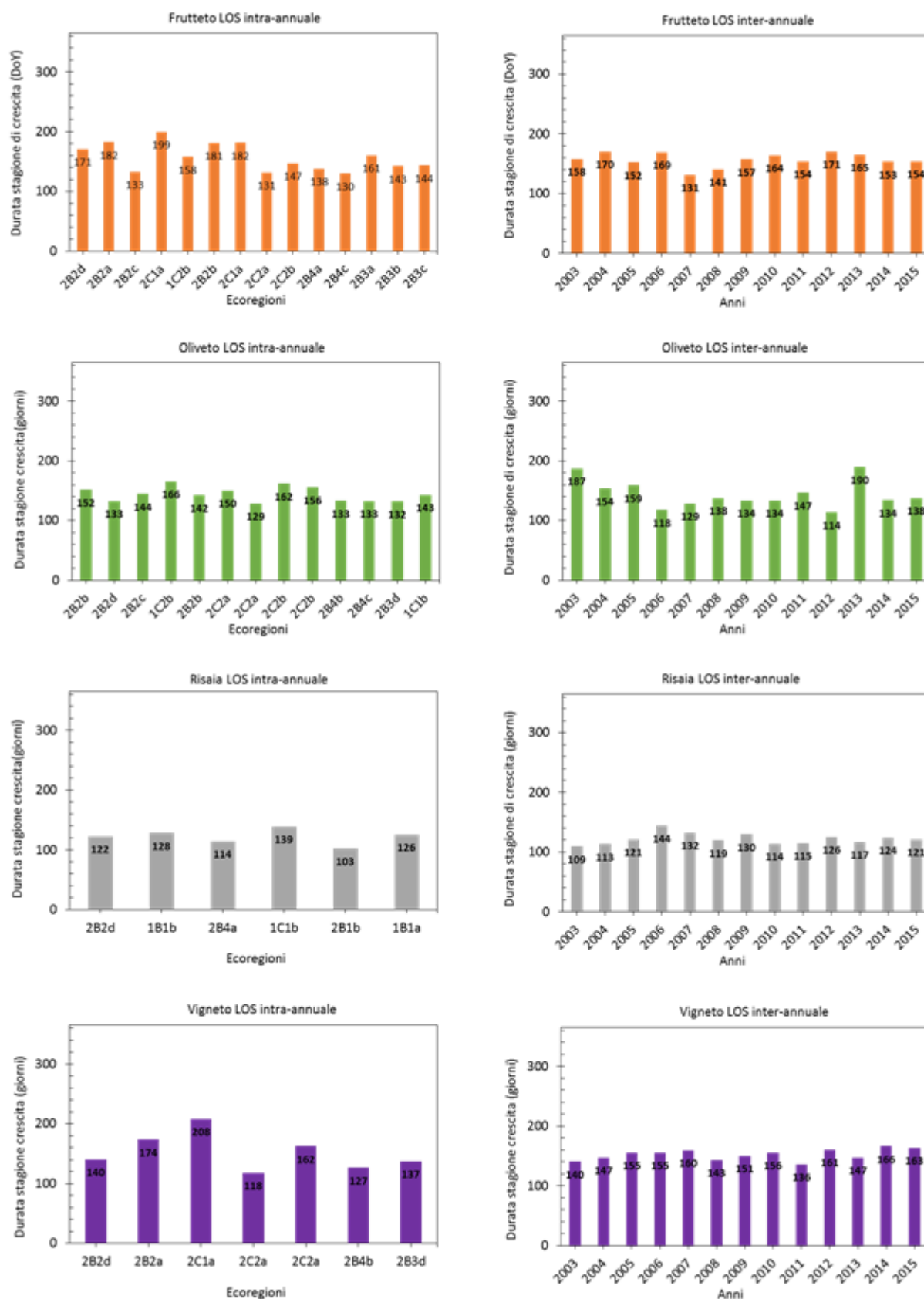


Figura 4-16– Durata della stagione di crescita: confronto tra valori intra annuali (valori medi tra anni per sottosezione e PAT nelle sottosezioni Ecoregionali) (sinistra), confronto tra valori inter annuali (valori medi per anno per sottosezioni e PAT nelle sottosezioni Ecoregionali) (destra).

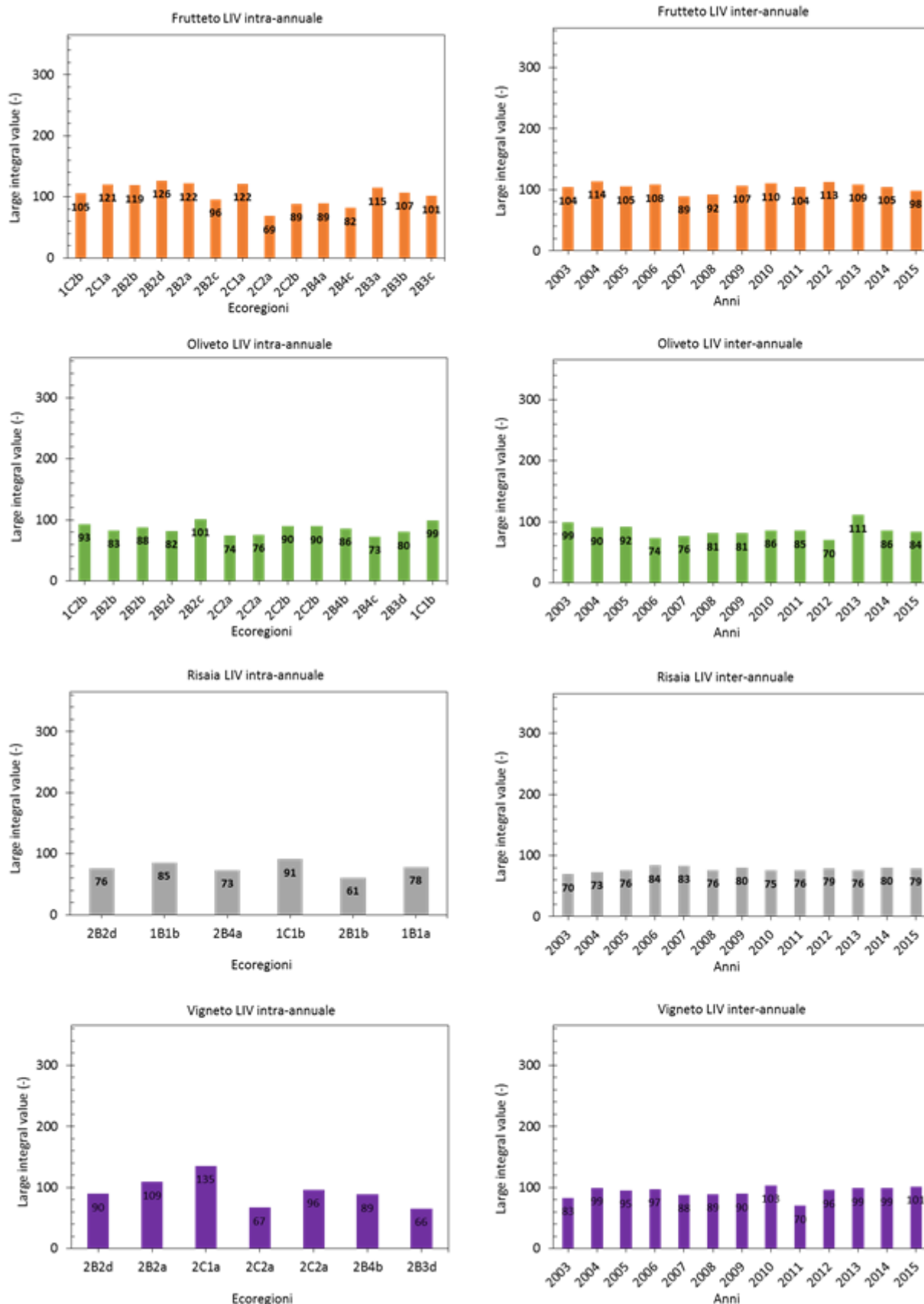


Figura 4-17 - Somma dei valori di NDVI per la durata della stagione di crescita: confronto tra valori intra annuali (valori medi tra anni per sottosezione e PAT nelle sottosezioni Ecoregionali) (sinistra), confronto tra valori inter annuali (valori medi per anno per sottosezioni e PAT nelle sottosezioni Ecoregionali) (destra).

4.2 Ecoindicatori derivanti da processi/simulazioni.

4.2.1 Deficit potenziale

Il periodo di riferimento di tale elaborazione, sulla base dei parametri fenologici inizio e durata della stagione irrigua, derivati per i diversi PAT in esame e riportati in Tabella 4-3 (sulla base delle metriche fenologiche riportate in Tabella 4-2) è di 5 mesi (da maggio a settembre).

Tabella 4-2 – Metriche fenologiche inizio, durata e fine della stagione di crescita, derivate per i diversi PAT: valori medi intra-annuali.

PAT	Inizio della stagione di crescita (DOY)	Durata della stagione di crescita (giorni)	Fine della stagione di crescita (DOY)
Frutteto	116	157	273
Risaia	114	122	236
Vigneto	105	155	260
Oliveto	132	144	276

Tabella 4-3 –Date di inizio e fine della stagione di crescita derivate per i diversi PAT: valori medi intra-annuali.

PAT	Inizio della stagione irrigua	Fine della stagione irrigua
Frutteto	26-apr	30-set
Risaia	24-apr	24-ago
Vigneto	15-apr	17-set
Oliveto	12-mag	3-ott

Il calcolo delle grandezze precipitazione netta ed evapotraspirazione potenziale si basa sulle medie mensili nel periodo 2003-2013. I risultati, mostrati nella figure a seguire, riguardano

- il deficit/surplus intra-annuale (media nel periodo giugno-settembre tra gli anni 2003-2015, per ciascun PAT e relativa sottosezione Ecoregionale);
- il deficit/surplus inter-mensile (media in ciascun mese del periodo giugno-settembre tra gli anni 2003-2015 tra medesimo PAT di diverse sottosezioni Ecoregionali).

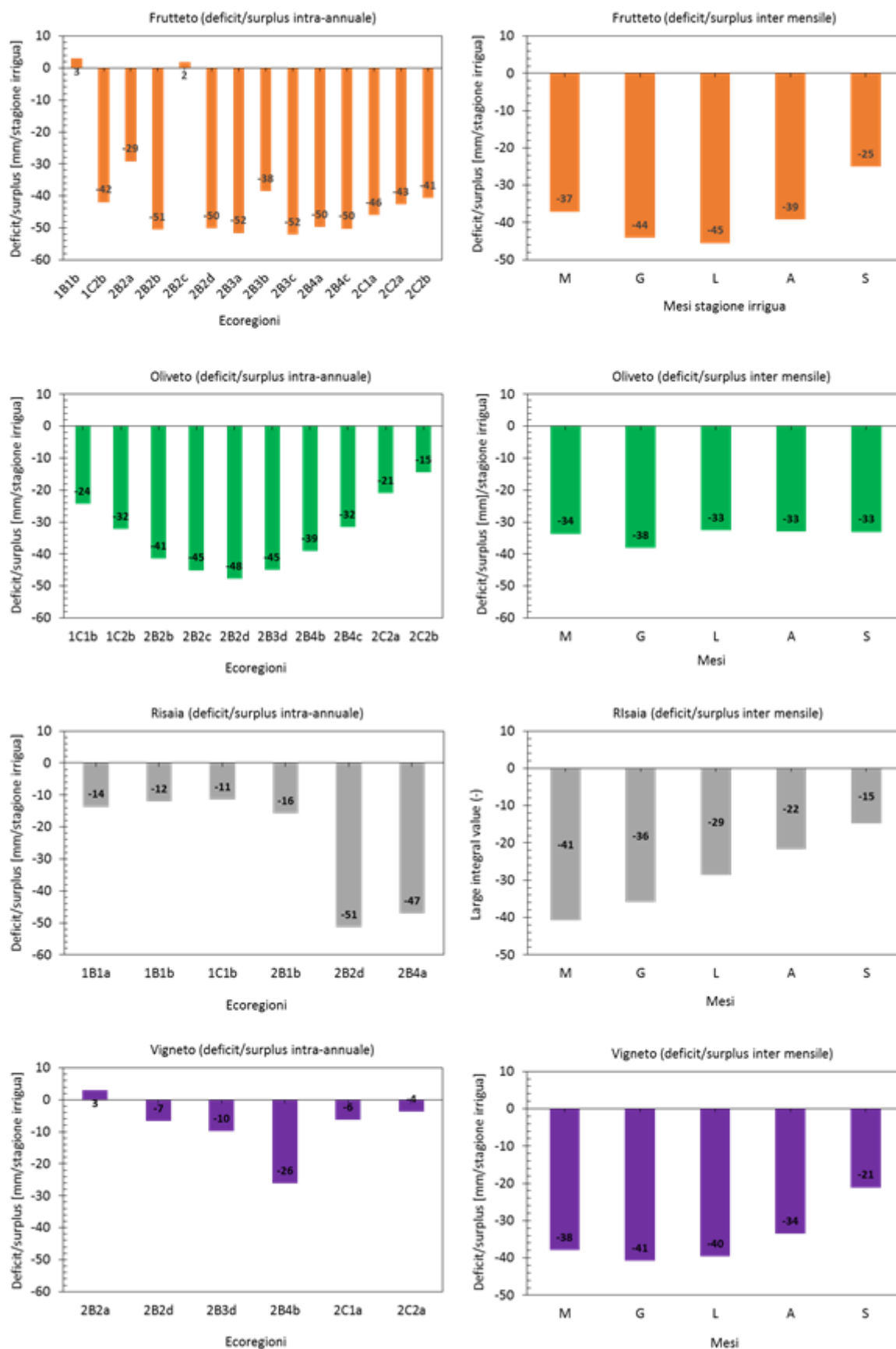


Figura 4-18 – Deficit/surplus potenziale: delle: confronto tra valori intra annuali (nel periodo giugno-settembre tra gli anni 2003-2015, per ciascun PAT e relativa sottosezione Ecoregionale) (sinistra), confronto tra valori intra annuale (valori medi per mese per sottosezioni di medesimo PAT nelle Ecoregioni) (destra).

Dai risultati mostrati in Figura 4-18 è possibile affermare che:

- Dalle variazioni intra-annuali, che riguardano le singole sottosezioni Ecoregionali per un medesimo PAT, si riscontra sempre un **deficit** idrico potenziale. L'unica eccezione si riscontra per il PAT Frutteto nelle sottosezioni 1B1b (Sottosezione Alta e Bassa Pianura) e 2B2c (Sottosezione Cilentana) in cui si registra un **surplus** medio inter annuale rispettivamente di 2 e 5 mm/stagione irrigua (giugno-settembre nel periodo 2003-2015).
- Dalle variazioni inter-annuali, che riguardano le diverse sottosezioni Ecoregionali per un medesimo PAT, si riscontra che i valori medi mensili (per i mesi da maggio a luglio, nel periodo 2003-2015) per i PAT Frutteto, Oliveto e Vigneto registrano un deficit idrico potenziale di 8 mm/mese. Tale valore risulta inferiore ai 14 mm/mese riscontrati per il PAT Risaia che presenta, assieme al PAT Frutteto una minore variabilità inter-annuale (deviazione standard= 12mm/mese) rispetto ai PAT Oliveto e Vigneto che presentano rispettivamente una deviazione standard di 21 e di 16mm /mese.

4.2.2 Perdita di suolo per erosione idrica stimata dal modello RUSLE2015.

L'erosione del suolo per effetto dell'acqua è stata valutata sulla base del prodotto "Perdita di suolo nell'Unione Europea per erosione idrica secondo il modello RUSLE2015" alla risoluzione spaziale di 100 m. Nei grafici successivi sono riportati i risultati di tale elaborazione riferiti ai valori medi estratti per ciascun PAT (Oliveto, Frutteto, Vigneto e Risaia) all'interno delle diverse sottosezioni Ecoregionali. Considerando i valori media e deviazione standard, riportati in Figura 4-19, Figura 4-20, Figura 4-21 e Figura 4-22, si deduce che la maggiore erosione per perdita di acqua - sulla base dei punti selezionati - si registra per il PAT oliveto. Difatti per questo l'erosione per perdita di acqua in alcune sottosezioni Ecoregionali è tre volte superiore al valore limite massimo fissato dall'USDA (United States Department of Agriculture) pari a 11,2 t/ha/anno e cinque volte il valore limite massimo secondo l'Ocse1(2001) pari a 6 t/ha/anno.

Considerando invece i soli valori medi, la maggiore presenza di erosione si registra per il PAT frutteto nella sottosezione Cilentana (2B2c), con valore medio superiore a 30 t/ha/anno.

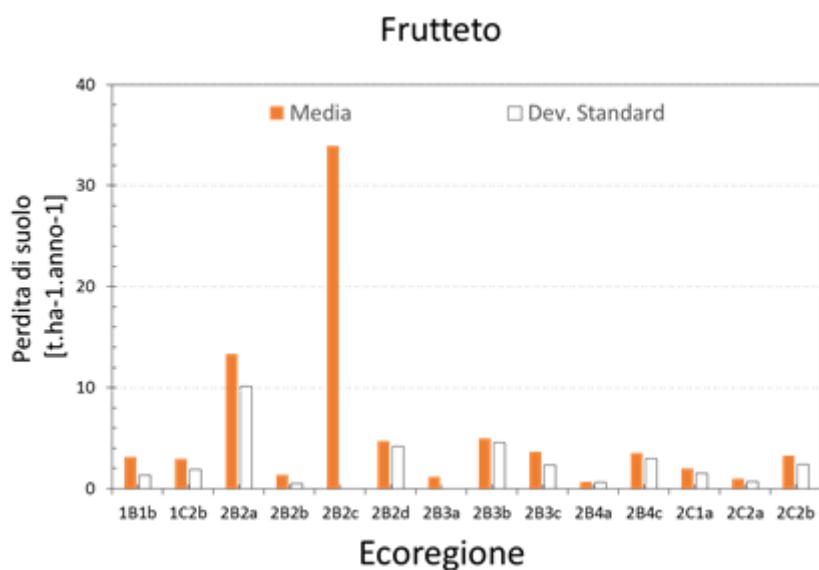


Figura 4-19 – Perdita di suolo per erosione idrica stimata dal modello RUSLE2015 per il PAT frutteto (valori medi e deviazione standard all'interno delle sottosezioni Ecoregionali di riferimento riportate in dettaglio in Tabella 4-1).

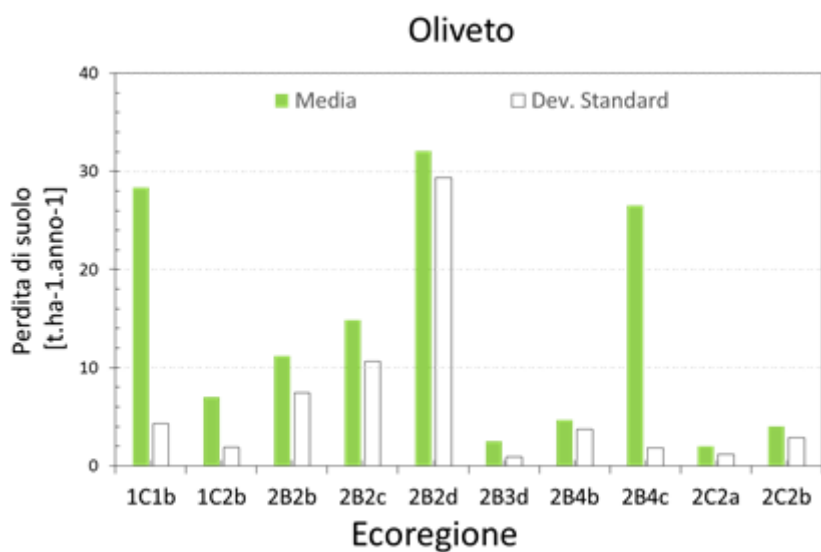


Figura 4-20 – Perdita di suolo per erosione idrica stimata dal modello RUSLE2015 per il PAT oliveto (valori medi e deviazione standard all'interno delle sottosezioni Ecoregionali di riferimento riportate in dettaglio in Tabella 4-1).

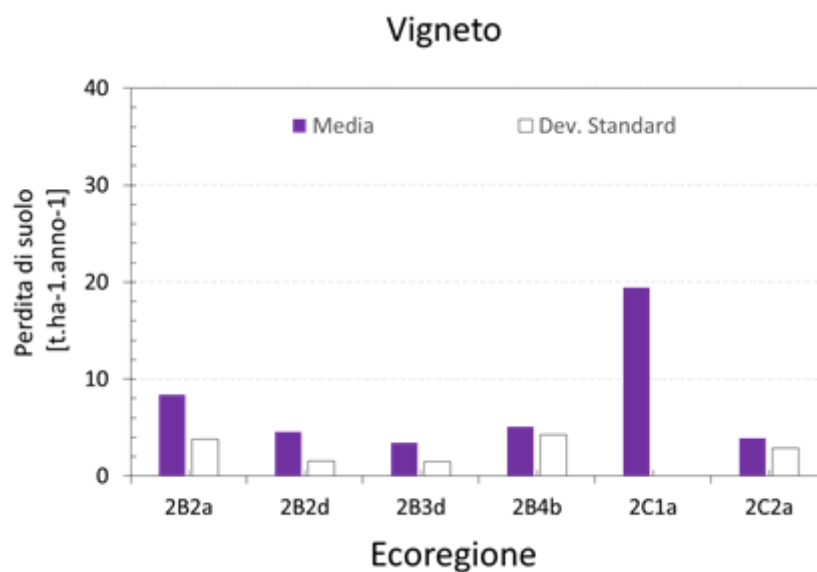


Figura 4-21– Perdita di suolo per erosione idrica stimata dal modello RUSLE2015 per il PAT vigneto (valori medi e deviazione standard all'interno delle sottosezioni Ecoregionali di riferimento riportate in dettaglio in Tabella 4 1).

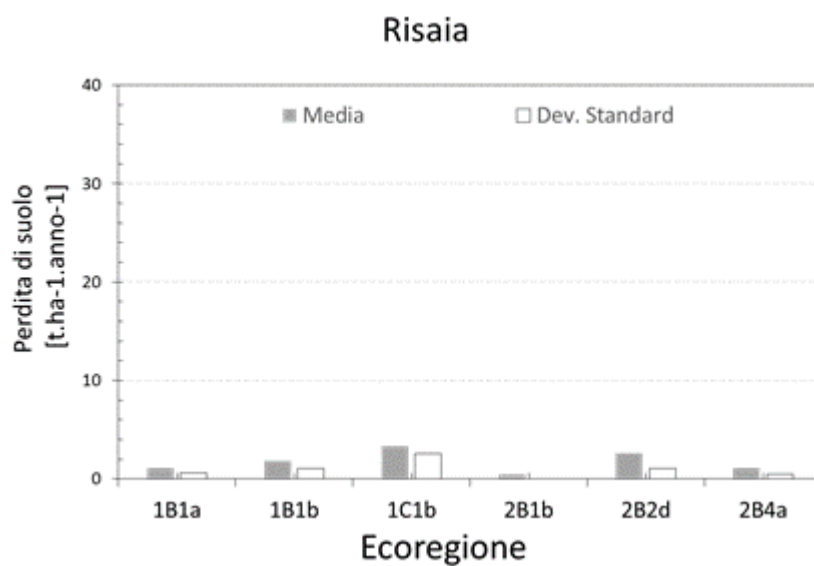


Figura 4-22– Perdita di suolo per erosione idrica stimata dal modello RUSLE2015 per il PAT risaia (valori medi e deviazione standard all'interno delle sottosezioni Ecoregionali di riferimento riportate in dettaglio in Tabella 4 1).

4.2.3 Produzione primaria lorda (GPP), produzione primaria netta (NPP), crop water stress index (CWSI*), soil water content (SWC)

Il modello eco-idrologico descritto nel paragrafo 2.5 riceve come input i dati climatici ECMWF ERA-Interim a scala giornaliera (paragrafo 3.7), gli andamenti giornalieri dei parametri biofisici della vegetazione (paragrafo 3.9) e le informazioni sulla caratterizzazione fisica dei suoli (paragrafo 3.11); l'output consiste nei seguenti eco-indicatori (Figura 1): produttività primaria lorda (GPP [$\text{g C.giorno}^{-1}.\text{m}^{-2}$]), produttività primaria netta (NPP [$\text{g C.giorno}^{-1}.\text{m}^{-2}$]), contenuto idrico del suolo (SWC [$\text{m}^3.\text{m}^{-3}$]) e crop water stress index CWSI*, derivato come complemento ad 1 del coefficiente di stress idrico del suolo K_s nel metodo FAO 56.

Alcune grandezze fornite in output dal modello sono state confrontate, a scala di pixel, con dati derivanti da osservazione satellitare. In particolare i valori di GPP e di NPP derivati dal modello sono stati confrontati a scala mensile con i valori derivati dal prodotto MODIS GPP/NPP 17A2 (*composite* ad 8 giorni e alla risoluzione spaziale di 1km); la serie temporale del contenuto di umidità del suolo stimata dal modello è stata confrontata con la serie temporale del contenuto di umidità nel suolo del layer 1 (SWC del primo strato di suolo superficiale, dello spessore di 7 cm secondo lo schema di Tessel) derivato dai dati ECMWF ERA-Interim. Per stimare la capacità predittiva del modello rispetto all'ecoindicatore SWC è stato utilizzato il coefficiente di efficienza di Nash-Sutcliffe (NSE).

Verranno prima riportati e discussi i risultati relativi ai siti di calibrazione-validazione di Castelvetro (PAT Oliveto) e Brisighella (non-PAT Actinidia) e poi per il PAT Frutteto in due sottosezioni Ecoregionali (prime due righe in grassetto di Tabella 4-4), mentre la restante parte dei risultati verrà riportata nell'appendice B.

Tabella 4-4 – PAT (Frutteto, Oliveto, Vigneto e Risaia) selezionati all'interno delle diverse sottosezioni Ecoregionali per i quali sono stati derivati gli ecoindicatori forniti dal modello ecoidrologico.

Codice	Sottosezione Ecoregionale	PAT	Regione
1C2b	1C2b-Sottosezione Laziale-Abruzzese	Frutteto	Abruzzo
2B2a	2B2a-Sottosezione Campania	Frutteto	Campania
2B2b	2B2b-Sottosezione Lucana	Frutteto	Basilicata
2B2c	2B2c-Sottosezione Cilentana	Frutteto	Campania
2B2d	2B2d-Sottosezione Calabrese	Frutteto	Calabria
2B3a	2B3a-Sottosezione Iblea	Frutteto	Sicilia
2B3b	2B3b-Sottosezione Montana Siciliana	Frutteto	Sicilia
2B3c	2B3c-Sottosezione Siciliana centrale	Frutteto	Sicilia
2B4a	2B4a-Sottosezione Sarda sud-occidentale	Frutteto	Sardegna
2C1a	2C1a-Sottosezione Centrale	Frutteto	Abruzzo
2C2a	2C2a-Sottosezione Apulo-Salentina	Frutteto	Puglia
2C2b	2C2b-Sottosezione Garganica	Frutteto	Puglia
1C2b	1C2b-Sottosezione Laziale-Abruzzese	Oliveto	Abruzzo
2B2b	2B2b-Sottosezione Lucana	Oliveto	Calabria
2B2c	2B2c-Sottosezione Cilentana	Oliveto	Campania
2B2d	2B2d-Sottosezione Calabrese	Oliveto	Calabria
2B3d	2B3d-Sottosezione Siciliana occidentale	Oliveto	Sicilia
2B4b	2B4b-Sottosezione Sarda Nord occidentale	Oliveto	Sardegna
2B4c	2B4c-Sottosezione Sarda sud-orientale	Oliveto	Sardegna
2C2a	2C2a-Sottosezione Apulo-Salentina	Oliveto	Puglia
2C2b	2C2b-Sottosezione Garganica	Oliveto	Puglia
1B1a	1B1a-Sottosezione Lagunare	Risaia	Emilia Romagna
1B1a	1B1a-Sottosezione Lagunare	Risaia	Veneto
1B1b	1B1b-Sottosezione Alta e Bassa Pianura	Risaia	Lombardia
1C1b	1C1b-Sottosezione Bacino Toscano	Risaia	Toscana
1C1b	1C1b-Sottosezione Bacino Toscano	Risaia	Toscana
2B1b	2B1b-Sottosezione Maremmana	Risaia	Toscana
2B2d	2B2d-Sottosezione Calabrese	Risaia	Calabria
2B4a	2B4a-Sottosezione Sarda sud-occidentale	Risaia	Sardegna
2B2a	2B2a-Sottosezione Campania	Vigneto	Campania
2B2d	2B2d-Sottosezione Calabrese	Vigneto	Calabria
2B3d	2B3d-Sottosezione Siciliana occidentale	Vigneto	Sicilia
2B4b	2B4b-Sottosezione Sarda Nord occidentale	Vigneto	Sardegna
2C1a	2C1a-Sottosezione Centrale	Vigneto	Abruzzo
2C2a	2C2a-Sottosezione Apulo-Salentina	Vigneto	Puglia
2C2a	2C2a-Sottosezione Apulo-Salentina	Vigneto	Basilicata
2C2a	2C2a-Sottosezione Apulo-Salentina	Vigneto	Puglia

Dalla Figura 4-23 e dalla Figura 4-24 è possibile osservare che il modello simula contenuti idrici nel suolo che, sulla base del coefficiente di efficienza Nash-Sutcliffe, sono molto simili ai valori del

contenuto di umidità nel suolo stimato dai dati ERA-Interim per il sito di calibrazione di Brisighella (NSE= 0.34), a differenza di quanto accade per il sito di Castelvetro (NSE= - 5.65). Inoltre i massimi di SWC si registrano in corrispondenza dell'intensificarsi delle precipitazioni e valori minimi in corrispondenza di assenza di piogge come da attendersi. I valori di plateau si registrano in corrispondenza di lunghi periodi di piovosità in cui il suolo raggiunge la massima saturazione.

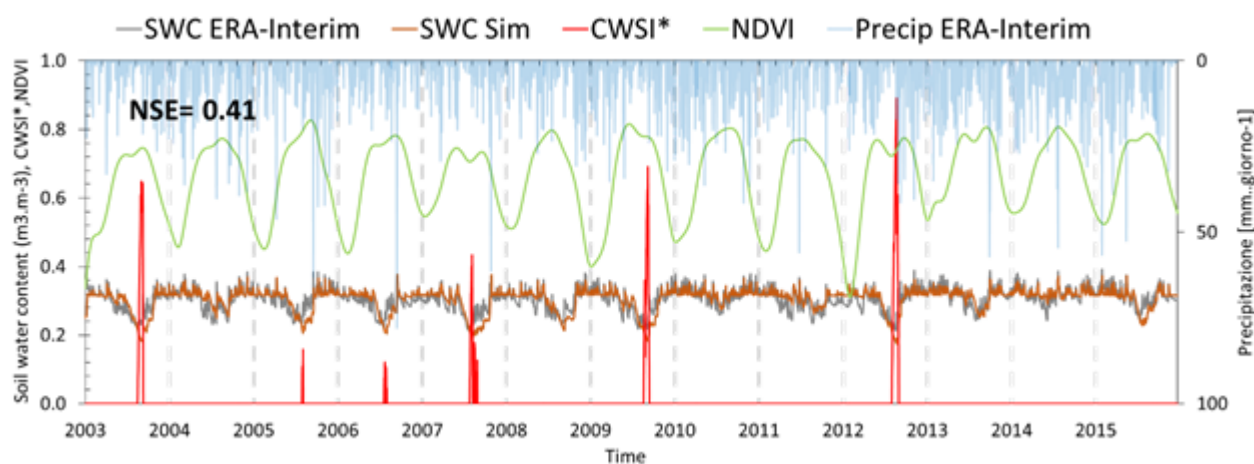


Figura 4-23– Sito di Brisighella: serie temporale a scala giornaliera di contenuto idrico nel suolo simulati da modello e derivato dai dati ECMWF ERA-Interim (layer 1, profondità 0.07m dal p.c.), con serie temporale del crop water stress index semplificato (CWSI*) derivato dal modello soil water balance FAO56, precipitazioni totali derivate da ECMWF ERA-Interim ed indice di vegetazione NDVI MODIS VI.

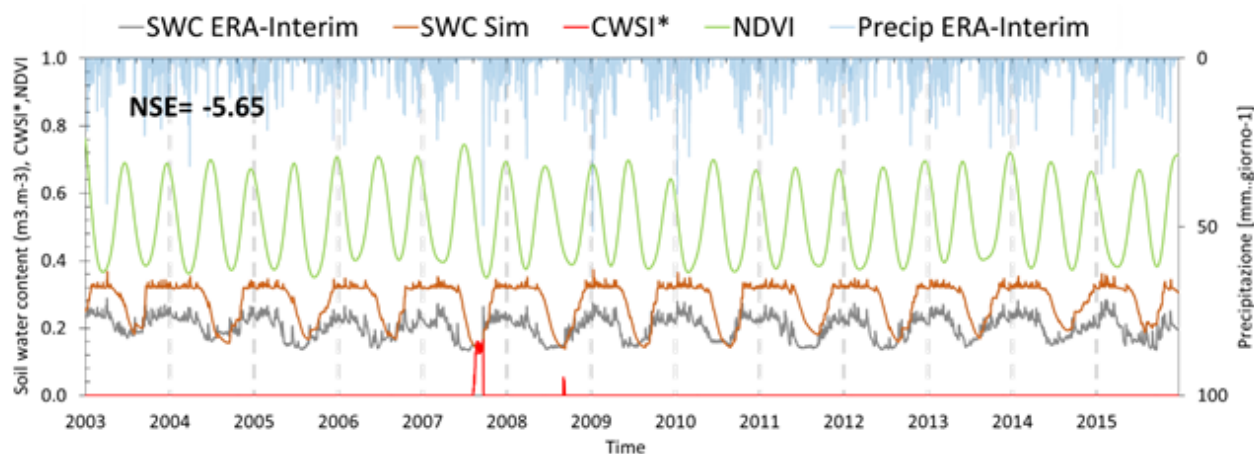


Figura 4-24– Sito di Castelvetro: serie temporale a scala giornaliera di contenuto idrico nel suolo simulati da modello e derivato dai dati ECMWF ERA-Interim (layer 1, profondità 0.07m dal p.c.), con serie temporale del crop water stress index semplificato (CWSI*) derivato dal modello soil water balance FAO56, precipitazioni totali derivate da ECMWF ERA-Interim ed indice di vegetazione NDVI MODIS VI.

Dalla Figura 4-25 è possibile osservare che il modello simula valori di GPP e di NPP sincroni, ma con diversa ciclicità in quanto la GPP ha andamenti in linea con i cicli stagionali di crescita (stimati dall'indice spettrale NDVI) e di regime termico (stimati dalla temperatura), ovvero è massimo in corrispondenza del picco di NDVI e di temperatura dell'aria ed è nullo in corrispondenza del minimo dell'indice spettrale e della temperatura, risultando, come atteso, sempre positiva durante la serie temporale. La NPP mostra, rispetto alla GPP una doppia ciclicità, presentando valori di picco sia in corrispondenza dei massimi che dei minimi di GPP ed assume per tutta la durata della serie valori negativi.

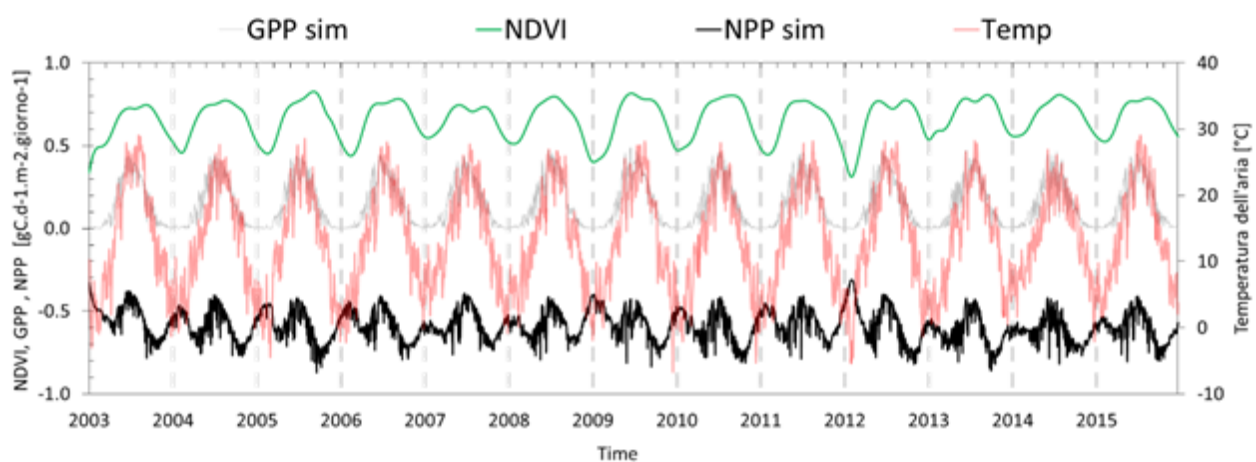


Figura 4-25– Sito di Brisighella: serie temporale a scala giornaliera di contenuto della produzione primaria lorda (GPP) e netta (NPP) simulata dal modello con serie temporale dell'indice di vegetazione NDVI MODIS VI e della temperatura derivata dai dati ECMWF ERA-Interim.

Dalla Figura 4-26 è possibile osservare che il modello simula valori di GPP e di NPP sincroni e con la stessa ciclicità in quanto sia la GPP che la NPP presentano andamenti in linea con i cicli stagionali di crescita (stimati dall'indice spettrale NDVI) e di regime termico (stimati dalla temperatura), ovvero hanno valori massimi in corrispondenza del picco di NDVI e di temperatura dell'aria e valori minimi in corrispondenza del minimo dell'indice spettrale e di temperatura dell'aria. Per tutta la durata della serie la GPP assume valori positivi (nulli in corrispondenza dei minimi), mentre la NPP presenta valori negativi, e talora meno valori positivi in brevi intervalli temporali in corrispondenza dei massimi stagionali.

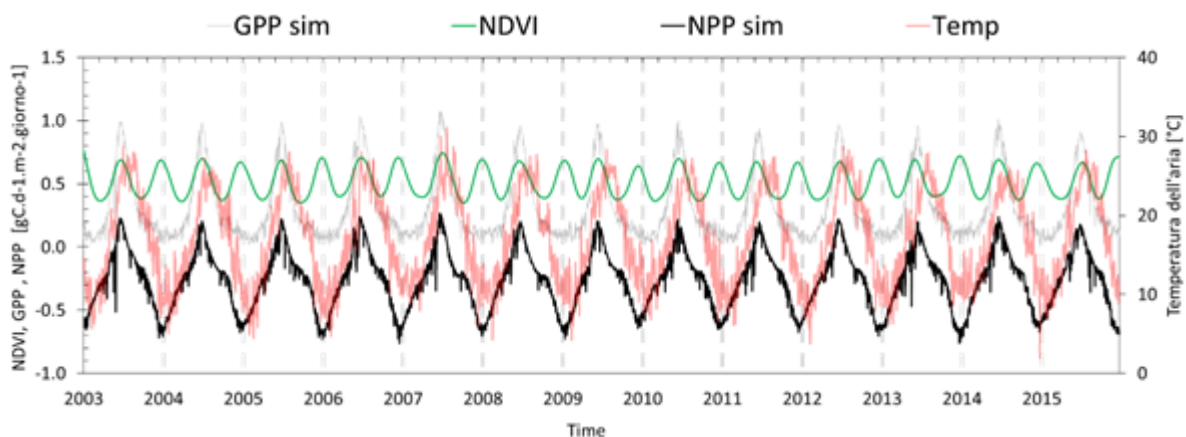


Figura 4-26– Sito di Castelvetrano: serie temporale a scala giornaliera di contenuto della produzione primaria lorda (GPP) e netta (NPP) simulata dal modello con serie temporale dell'indice di vegetazione NDVI MODIS VI e della temperatura derivata dai dati ECMWF ERA-Interim.

In Figura 4-27 sono riportati gli output SWC e CWSI* del modello ecoidrologico, unitamente alle grandezze precipitazioni ed indice di vegetazione, per uno stesso PAT (frutteto) in diverse sottosezioni Ecoregionali: 1C2b-Abruzzo (in alto) e 2B2a-Campania (in basso).

In Figura 4-28, per uno stesso PAT (frutteto) in diverse sottosezioni Ecoregionali - 1C2b-Abruzzo (in alto) e 2B2a-Campania (in basso) - sono riportati i corrispondenti output GPP ed NPP, assieme alle grandezze temperatura dell'aria ed indice di vegetazione.

Da un confronto tra gli output SWC e CWSI* del modello ecoidrologico riportati in Figura 4-27 è possibile interpretare gli output della Figura 4-28: in particolare durante tutto il periodo di analisi per lo stesso PAT (frutteto) si hanno condizioni di stress (stimato dal CWSI*) con maggiore frequenza per il frutteto della sottosezione Ecoregionale 2B2a-Campania rispetto allo stesso PAT frutteto della sottosezione Ecoregionale 1C2b-Abruzzo: ciò è dovuto a periodi estivi privi di piogge in cui il contenuto idrico nel suolo agisce da fattore limitante rispetto ai processi fotosintetici con una conseguente diminuzione dei valori di GPP (picchi di GPP durante la stagione irrigua di intensità minore per il frutteto nella sottesezione 2B2a-Campania rispetto alla sottesezione 1C2b-Abruzzo). A conferma di ciò in Figura 4-29, nel periodo (2003-2015) per il PAT frutteto nella sottesezione

1C2b-Abruzzo si hanno valori cumulati di GPP e di NPP rispettivamente pari a 10.68 e 8.18 Kg C.m-2, mentre per il PAT frutteto nella sottosezione 2B2a-Campania si hanno valori molto inferiori e pari a 1.68 e -1.43 Kg C.m-2.

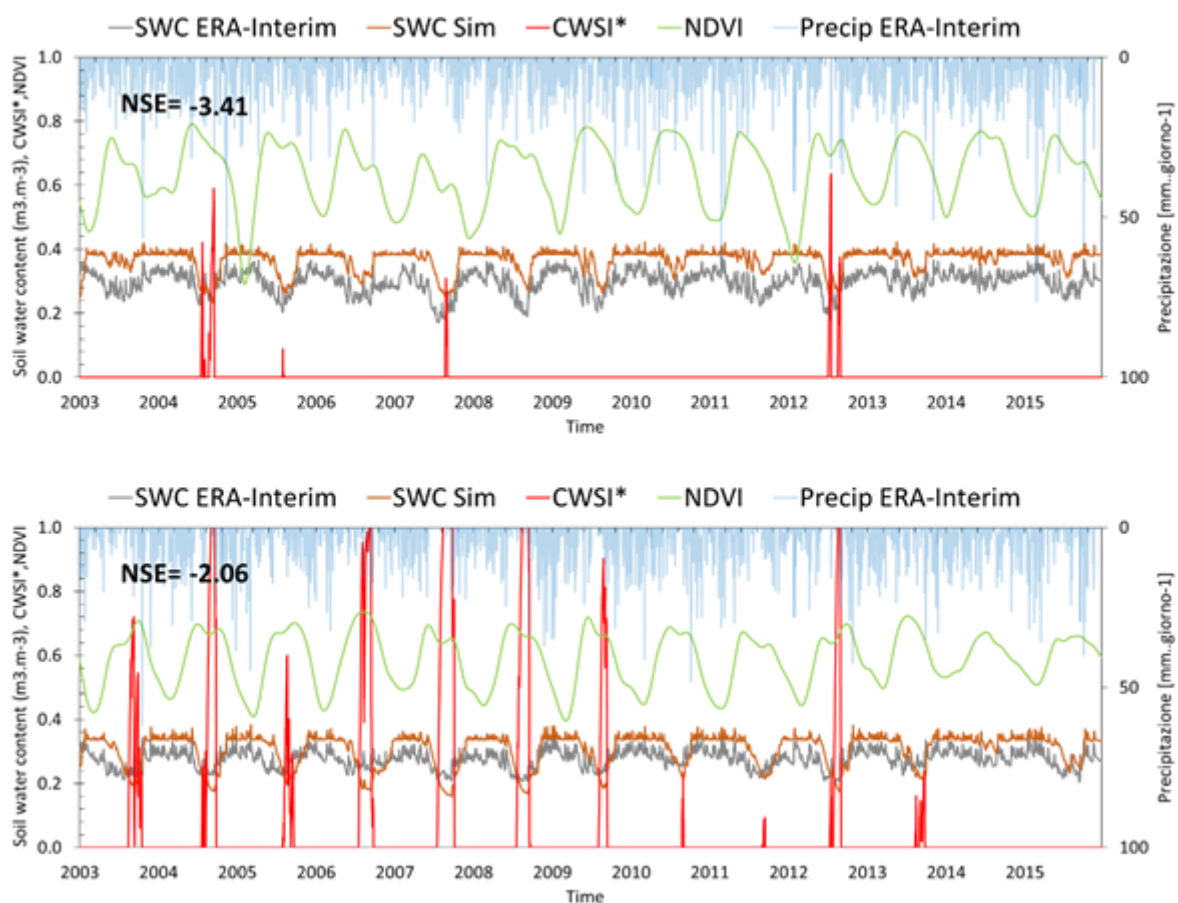


Figura 4-27 – PAT frutteto nelle sottosezioni Ecoregionali 1C2b-Abruzzo (in alto) e 2B2a-Campania (in basso): serie temporale a scala giornaliera di contenuto idrico nel suolo simulati da modello e derivato dai dati ERA-Interim (layer 1, profondità 0.07m dal p.c.), con serie temporale del crop water stress index semplificato (CWSI*) derivato dal modello soil water balance FAO56, precipitazioni totali, derivate da ERA-Interim ed indice di vegetazione NDVI MODIS VI.

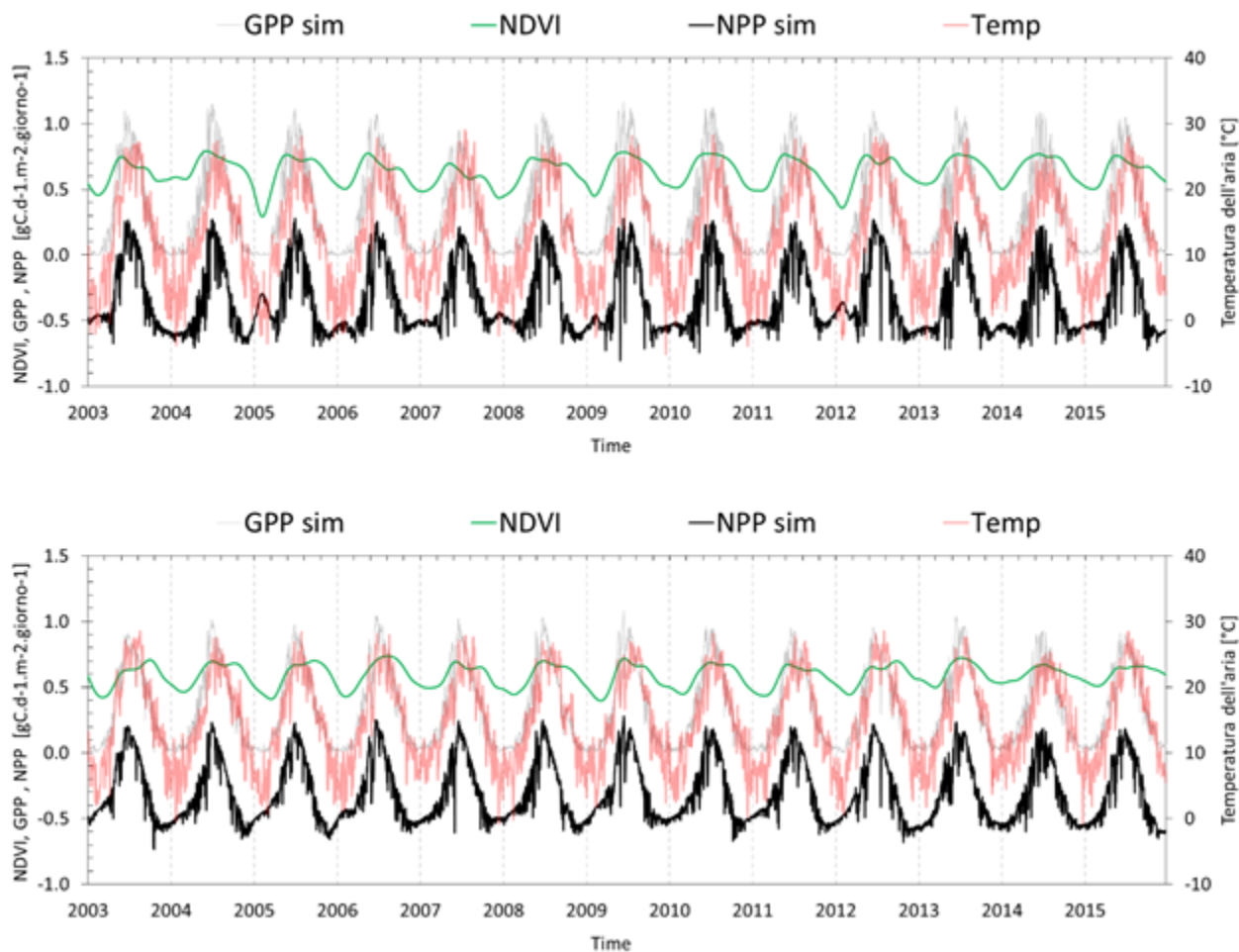


Figura 4-28– PAT frutteto nelle sottosezioni Ecoregionali 1C2b-Abruzzo (in alto) e 2B2a-Campania (in basso): serie temporale a scala giornaliera di contenuto della produzione primaria lorda (GPP) e netta (NPP) simulata dal modello con serie temporale dell'indice di vegetazione NDVI MODIS VI e della temperatura derivata dai dati ERA-Interim.

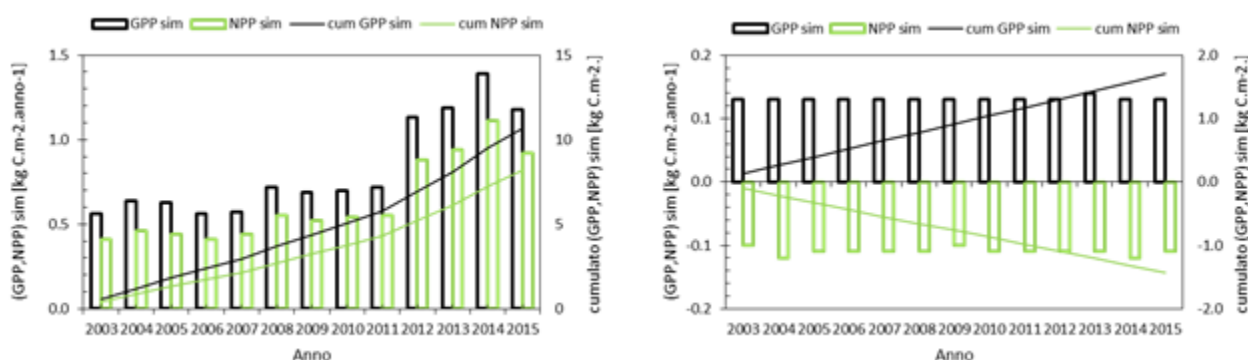


Figura 4-29 – Valori cumulati anni e nel periodo (2003-2015) della GPP e della NPP per il PAT frutteto nelle sottosezioni Ecoregionali 1C2b-Abruzzo (a destra) e 2B2a-Campania (a sinistra).

4.3 Conclusioni

Il progetto di tesi caratterizza da un punto di vista quantitativo i processi eco-idrologici che regolano gli scambi di massa e di energia nel sistema suolo-pianta-atmosfera all'interno dei PAT (Paesaggi Agricoli Tradizionali) delle sottosezioni Ecoregionali d'Italia, mettendo così in luce l'impatto che il loro comportamento eco-idrologico esercita sulla multifunzionalità di tali sistemi (dalla produzione agraria al grado di protezione del territorio) e definendo alcuni "indicatori eco-idrologici" per le tipologie di paesaggio analizzate.

Il contributo innovativo di questo lavoro è consistito nello sviluppo di una procedura d'analisi del comportamento ecoidrologico dei sistemi agricoli basata sull'integrazione fra dati di Osservazione della Terra e di un modello semplificato di bilancio idrologico e del Carbonio; i dati di input utilizzati per la procedura sono stati individuati secondo un criterio di omogeneità e coerenza in modo da poter effettuare in maniera adeguata la comparazione dei risultati ottenuti per i PAT presenti nelle diverse sottosezioni Ecoregionali d'Italia. Questo tipo di approccio è oggi necessario per comprendere e analizzare secondo un approccio quantitativo la valenza multifunzionale dei sistemi agrari tradizionali, puntando al loro recupero e valorizzazione.

Lo studio ha riguardato due tipologie di indicatori; un primo gruppo, ottenuto da dati di Osservazione della Terra (serie multi temporale con frequenza complessiva di 8 giorni dell'indice di vegetazione NDVI composite a 16 giorni, derivato dal sensore MODIS TERRA ed AQUA, successivamente filtrati per rimuovere la presenza di nuvole e delle ombre da esse prodotte) per caratterizzare la dinamica vegetazionale (vigore delle coperture vegetali, variazioni temporali (intra ed inter-annuali), indici bio-metrici caratteristici). Un secondo gruppo di indicatori è stato derivato dall'applicazione di un modello eco-idrologico, per la stima dei flussi di evaporazione e di traspirazione potenziali, della produzione primaria lorda (GPP) e netta (NPP), dell'insorgenza di condizioni di stress idrico (crop water stress index, CWSI*) e del contenuto idrico nel suolo (soil water content, SWC). Il modello

eco-idrologico prende in conto come input forcing le condizioni di copertura vegetale (derivanti dal primo gruppo di eco-indicatori), il dato meteorologico (derivato da dati di ri-analisi ECMWF ERA-Interim), le caratteristiche idrauliche del suolo, derivate da semplici funzioni di pedo-trasferimento (PTF) applicate ai prodotti Topsoil physical properties e Soil Organic Carbon Content dell'European Soil Data Centre (ESDAC). Alcuni parametri del modello sono stati ricavati dal confronto con misure sperimentali nei siti di Castelvetrano (Oliveto in provincia di Trapani, PAT) e Brisighella (Actinidia in provincia di Ravenna, non-PAT). Infine il “deficit/surplus idrico potenziale” è stato desunto a partire dai dati analizzati, mentre i processi di erosione del suolo sono stati stimati in base al modello “RUSLE 2015” del JRS.

I risultati ottenuti con risoluzione temporale giornaliera per il periodo 2003-2015 sono stati aggregati al fine di sintetizzare in maniera più efficace la risposta dei PAT nell'ambito dei processi eco-idrologici con lo scopo di migliorare la classificazione e la caratterizzazione dei PAT, nonché per individuare strategie di pianificazione e gestione del paesaggio.

Per quanto riguarda l'operazione preliminare (*pre-processing*) di filtraggio dei dati è possibile affermare che:

- il metodo Whittaker- Hederson è sensibile alle variazioni del parametro λ ed n -Iter. In particolare, negli intervalli indagati di λ , la curva di *smoothing* assume andamenti più regolari e quindi visivamente più “gradevoli” al crescere di λ (dal valore 10 al valore 10000), ma si registra globalmente una perdita di fedeltà (*over-fitting*) rispetto ai dati di partenza, quantificato dall'aumento dell'errore R_{cp} . In corrispondenza dei valori indagati per il parametro n -Iter si registra uno spostamento della curva di *smoothing* verso l'alto (*upper envelop*) nei tratti in prossimità dei minimi e dei massimi, con una perdita di fedeltà (*over-fitting*) rispetto ai dati di partenza, quantificato dall'aumento dell'errore R_{cp} .

- Il valore consigliato per il parametro n-Iter pari a 1 (corrispondente ad due iterazioni) produce, a scala regionale e a scala di pixel, il minore errore Rcp: in generale Rcp diminuisce passando da n-Iter =0 a n-Iter=1 ed aumenta nel passare da n-Iter=1 ad n-Iter=4.
- Valori maggiori dell'errore quadratico medio (Rcp) si registrano in corrispondenza di aree montuose (Figura 3-4 Figura 3-4): ciò è dovuto molto probabilmente ad una persistenza di rumore (nuvole e delle ombre prodotte dalle nuvole) che l'algoritmo di composite non è in grado di rimuovere e che sono rilevati dall'algoritmo di smoothing durante il filtraggio.

I valori scelti sulla base di tale considerazioni sono $\lambda=1000$ e n-Iter=1 (corrispondente a due iterazioni).

Per quanto riguarda il Trend delle coperture vegetali è possibile affermare che:

per uno stesso PAT all'interno di una medesima sottosezione Ecoregionale si riscontrano andamenti quasi sempre concordi in termini di ciclicità, ovvero nei valori minimi e massimi annui dell'indice NDVI; questi valori presentano una *sincronia di fase*, pur con le distinzioni stagionali legate a ciascuna tipologia di PAT, ad esempio: NDVI minimo in estate e massimo in inverno per frutteto e oliveto; viceversa, NDVI massimo in estate e minimo in inverno per vigneto e risaia. Analogamente *per uno stesso PAT all'interno di diverse sottosezioni* è possibile riscontare andamenti quasi sempre concordi in termini di ciclicità, ma non nell'intensità a causa della variabilità pedoclimatica tra le sottosezioni Ecoregionali.

Per quanto riguarda le variazioni temporali (inter ed intra-annuali) delle coperture vegetali è stato possibile osservare che la maggiore ampiezza di NDVI (NDVI massimo - NDVI minimo) intra-annuale si riscontra in ordine crescente per i PAT Frutteto, Oliveto, Risaia e Vigneto. Per quanto riguarda la produttività inter-annuale, intesa come differenza (NDVI massimo - NDVI minimo) in tre periodi (2003-2009, 2009-20015 e 2003-20015), fra i PAT Frutteto, Oliveto e Risaia si riscontrano

andamenti crescenti, eccetto per il frutteto relativamente al 2009-2015 e per il vigneto relativamente variazioni inter-annuali 2003-2009 e 2003-2015.

Per quanto riguarda le statistiche gli indici bio-metrici caratteristici (Land Surface Phenology, LSP) i PAT Frutteto, Oliveto e Vigneto presentano in termini intra annuali ed inter annuali valori simili per i parametri fenologici “Large Integral Value” e “Durata della stagione di crescita” e sempre maggiori rispetto al PAT Risaia. Discorso diverso invece è per il parametro fenologico “Inizio della stagione di crescita” per il quale i PAT Frutteto, Risaia e Vigneto registrano valori intra annuali ed inter annuali simili tra loro e maggiori che per il PAT Oliveto, come sarebbe stato da attendersi in relazione al ciclo vegetativo atteso. La minore variabilità, inter annuale ed intra annuale, riscontrabile per tutti i parametri fenologici, si ha per il PAT Risaia.

Per quanto riguarda **il deficit/surplus idrico potenziale** è possibile affermare che:

- Dalle variazioni intra-annuali, che riguardano le singole sottosezioni Ecoregionali per un medesimo PAT, si riscontra sempre un **deficit** idrico potenziale. L’unica eccezione si riscontra per il PAT Frutteto nelle sottosezioni 1B1b (Sottosezione Alta e Bassa Pianura) e 2B2c (Sottosezione Cilentana) in cui si registra un **surplus** medio inter annuale rispettivamente di 2 e 5 mm/stagione irrigua (giugno-settembre nel periodo 2003-2015).
- Dalle variazioni inter-annuali, che riguardano le diverse sottosezioni Ecoregionali per un medesimo PAT, si riscontra che i valori medi mensili (per i mesi da maggio a luglio, nel periodo 2003-2015) per i PAT Frutteto, Oliveto e Vigneto registrano un deficit idrico potenziale di 8 mm/mese. Tale valore risulta inferiore ai 14 mm/mese riscontrati per il PAT Risaia che presenta, assieme al PAT Frutteto una minore variabilità inter-annuale (deviazione standard= 12mm/mese) rispetto ai PAT Oliveto e Vigneto che presentano rispettivamente una deviazione standard di 21 e di 16mm /mese.

Per quanto attiene **la perdita di suolo per erosione idrica** è possibile affermare che:

- In alcune sottosezioni Ecoregionali è tre volte superiore al valore limite massimo fissato dall'USDA (United States Department of Agriculture,) pari a 11,2 t/ha/anno;
- cinque volte il valore limite massimo secondo l'Ocse1(2001) pari a 6 t/ha/anno.
- Considerando i valori media e deviazione standard la maggiore erosione per perdita di acqua - sulla base dei punti selezionati - si registra per il PAT oliveto.
- Considerando invece i soli valori medi, la maggiore presenza di erosione si registra per il PAT frutteto nella sottosezione Cilentana (2B2c), con valore medio superiore a 30 2 t/ha/anno.

Per quanto riguarda le componenti simulate dal modello ecoidrologico è possibile affermare che:

il contenuto idrico nel suolo simulato per il sito di calibrazione di Brisighella ha una buona vicinanza, stimata in termini di coefficiente di efficienza Nash-Sutcliffe, ai valori del contenuto di umidità nel suolo derivato dai dati ERA-Interim (NSE= 0.34), mentre un minore accordo si verifica per il sito di Castelvetro (NSE= - 5.65).

Per i restanti siti PAT selezionati, e riportati in Tabella 4-4, i valori del coefficiente di efficienza Nash-Sutcliffe, mediamente si attesta intorno a NSE=0, ovvero le previsioni del modello sono precise come la media dei dati osservati.

I valori di GPP simulati dal modello, da una comparazione tra valori cumulati a scala mensile, risultano mediamente di un ordine di grandezza inferiore rispetto ai valori di GPP derivati dal prodotto MODIS17A2.

Da una comparazione tra valori cumulati a scala annuale di GPP e di NPP per uno stesso PAT in diverse sottosezioni Ecoregionali il modello evidenzia come la presenza di fattori limitanti (ad esempio una riduzione del SWC, evidenziato dal CWSI*) determini una riduzione della GPP e della NPP, in linea con le attese.

Il modello ecoidrologico - alla luce della calibrazione sui siti di Castelvetro e di Brisighella e alla luce dei risultati sui PAT selezionati - è riconoscibile come un prototipo innovativo di sistema

integrato basato su modelli di calcolo e sensori satellitari per il monitoraggio ambientale, finalizzato alle conoscenze sulla variabilità del bilancio dell'acqua e del carbonio negli ecosistemi terrestri, ovvero segue le priorità fondamentali segnalate nel programma quadro di ricerca e innovazione di "Horizon 2020"; più in particolare nell'ambito delle "sfide della società" che prevede azioni per il clima, l'agricoltura sostenibile, l'uso efficiente delle risorse, nonché interventi per il sostegno alle politiche ed all'innovazione rurale.

Appendice A: variabilità dei singoli PAT all'interno delle singole sottosezioni di una medesima Regione: confronto tra medie e deviazioni standard derivate dalle serie NDVI dei punti selezionati.

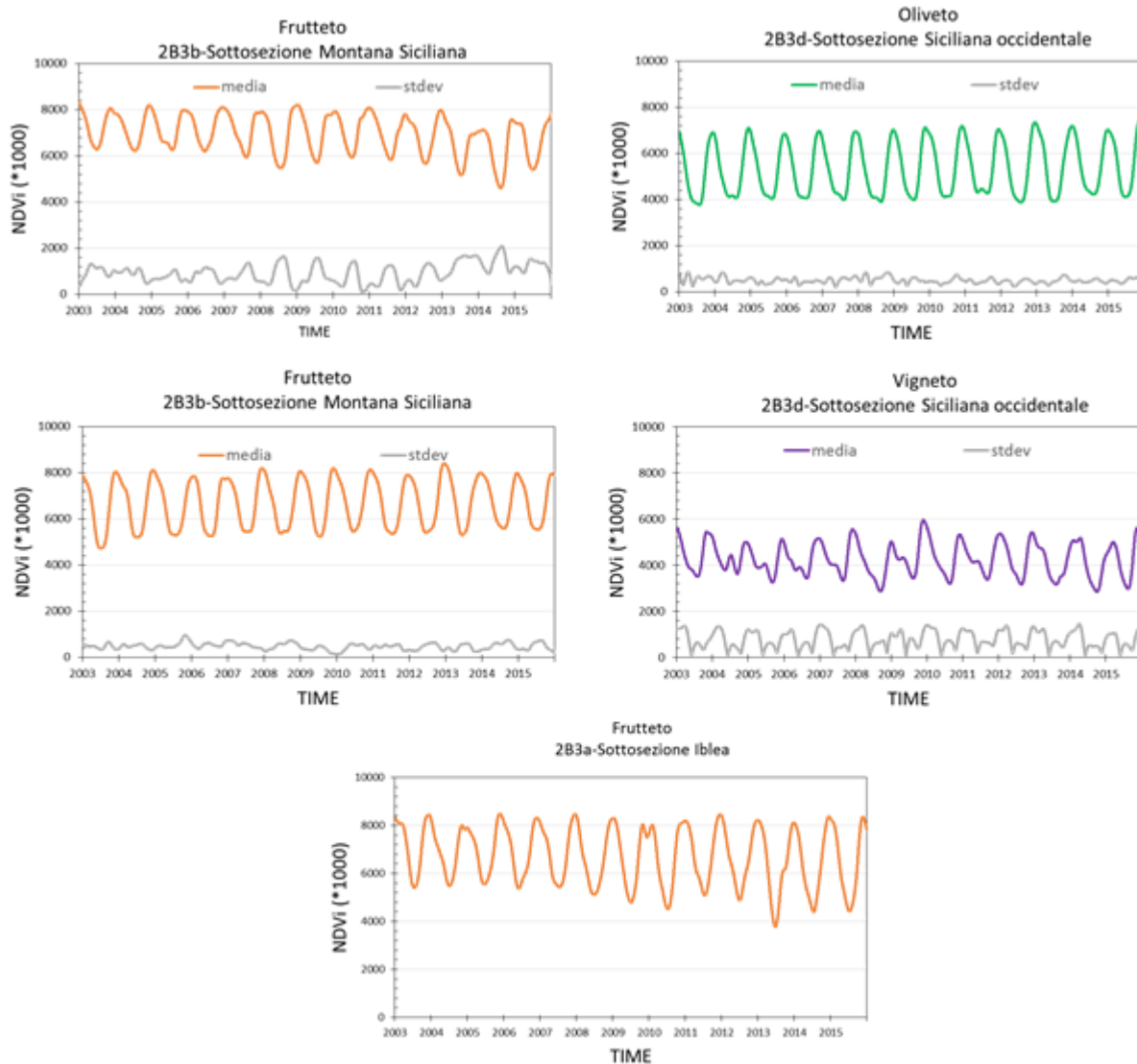


Figure 1 – Trend della statistica media e deviazione standard dell'indice NDVI per i PAT Frutteto, Oliveto e vigneto per le sottosezioni Ecoregionali della Sicilia.

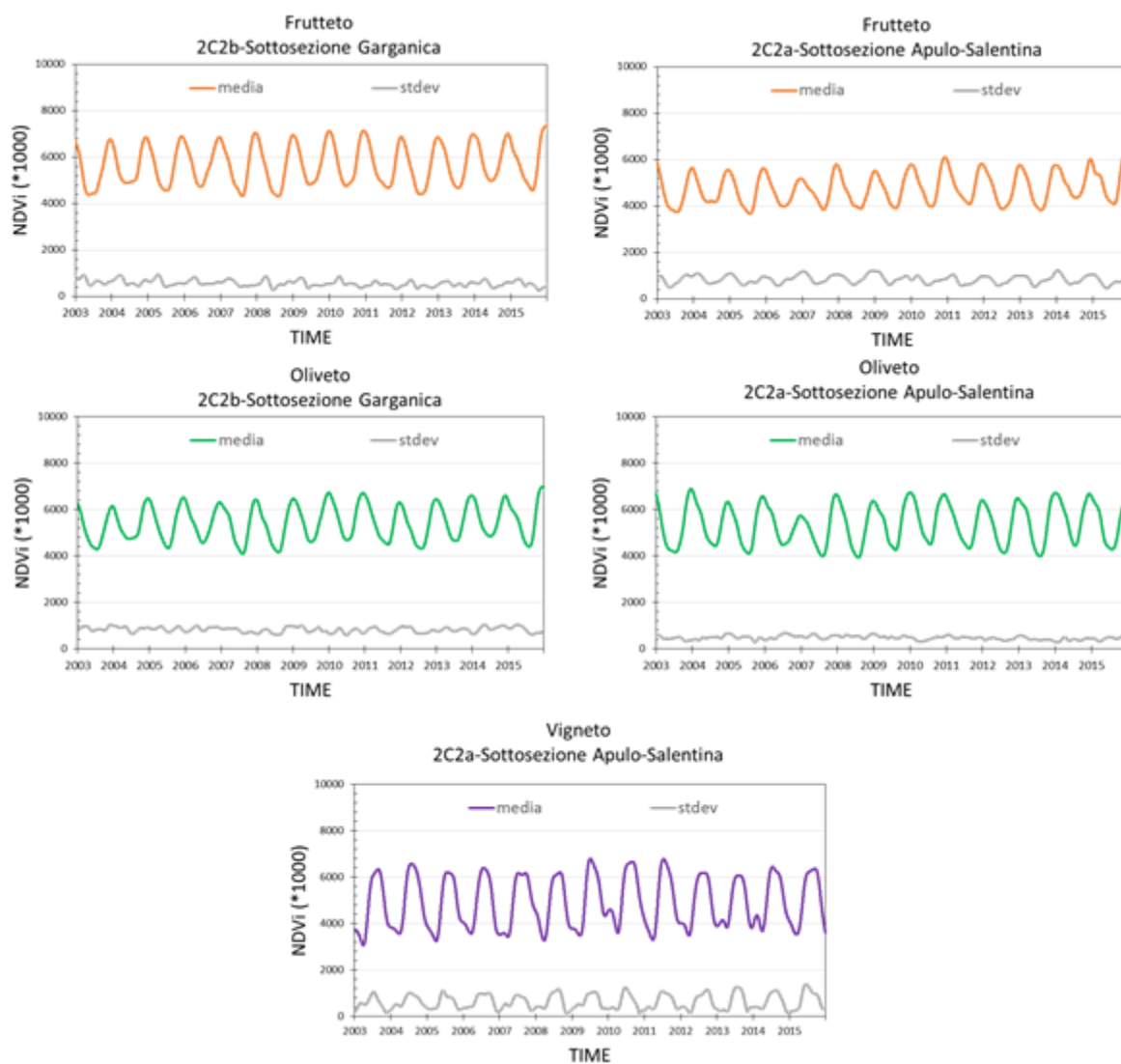


Figure 2 – Trend della statistica media e deviazione standard dell'indice NDVI per i PAT Frutteto, Oliveto e vigneto delle sottosezioni Ecoregionali della Puglia.

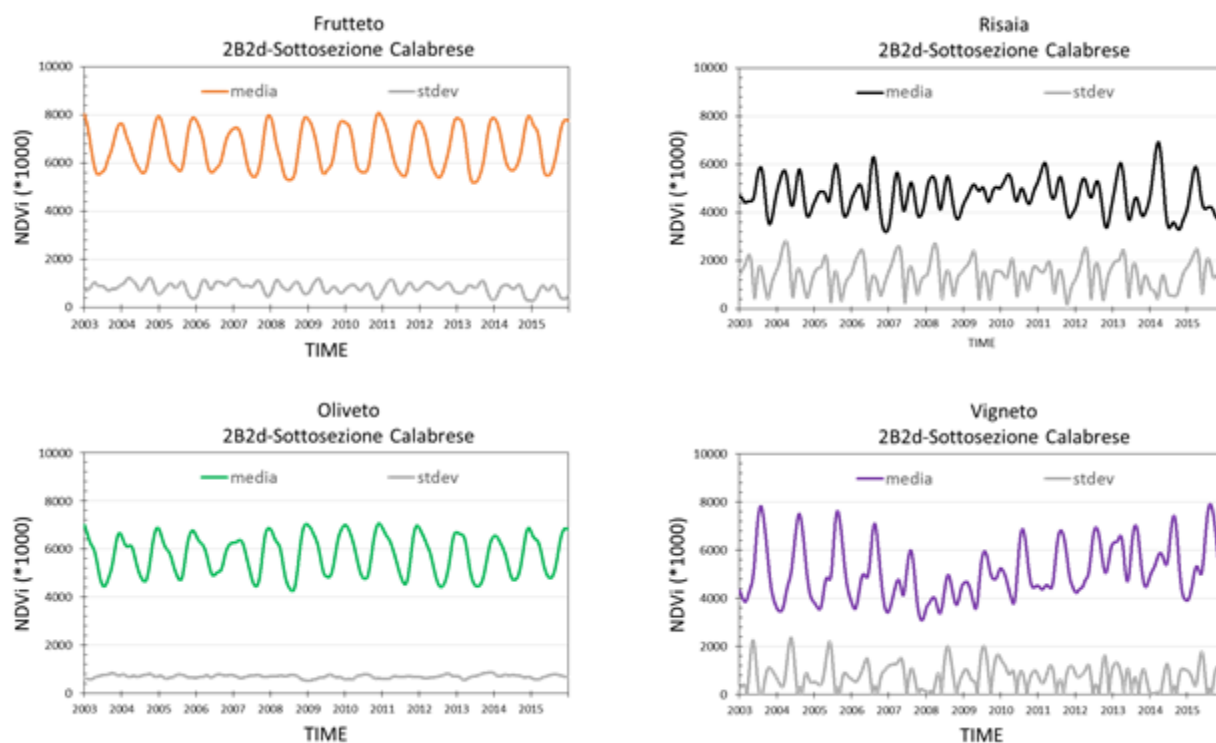


Figure 3 – Trend della statistica media e deviazione standard dell'indice NDVI per i PAT frutteto, risaia, oliveto e vigneto all'interno delle sottosezioni Ecoregionali della Calabria.

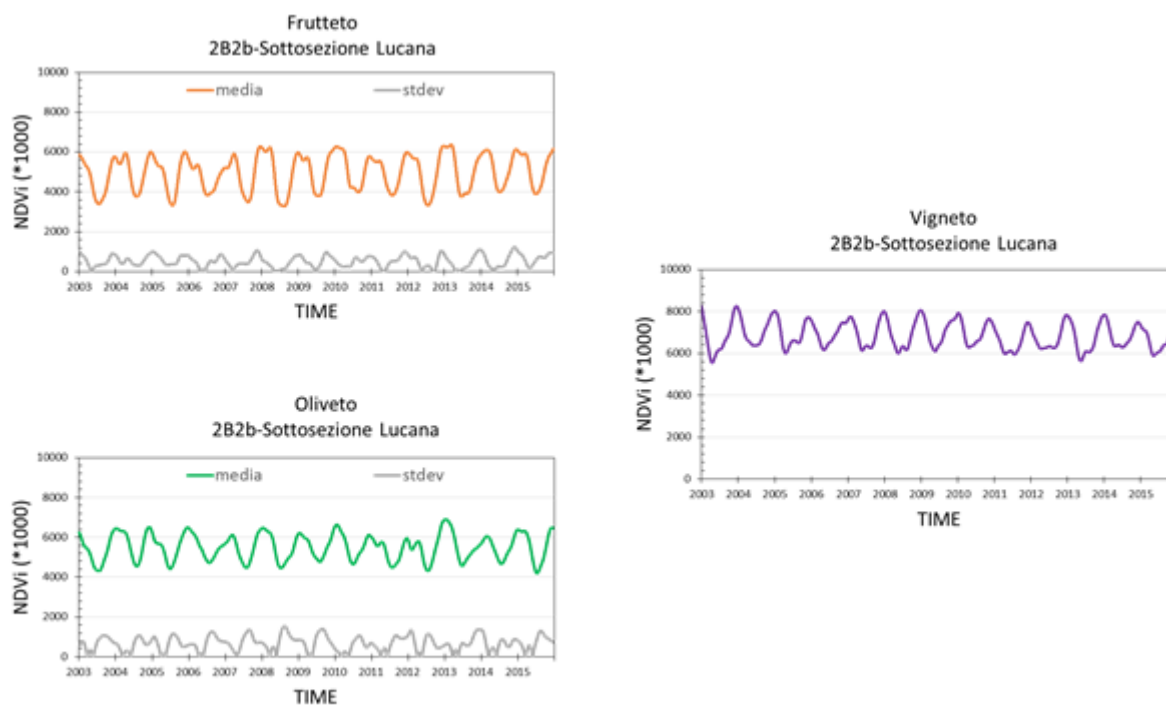


Figure 4 – Trend della statistica media e deviazione standard dell'indice NDVI per i PAT frutteto, oliveto e vigneto all'interno delle sottosezioni delle sottosezioni Ecoregionali della Basilicata.

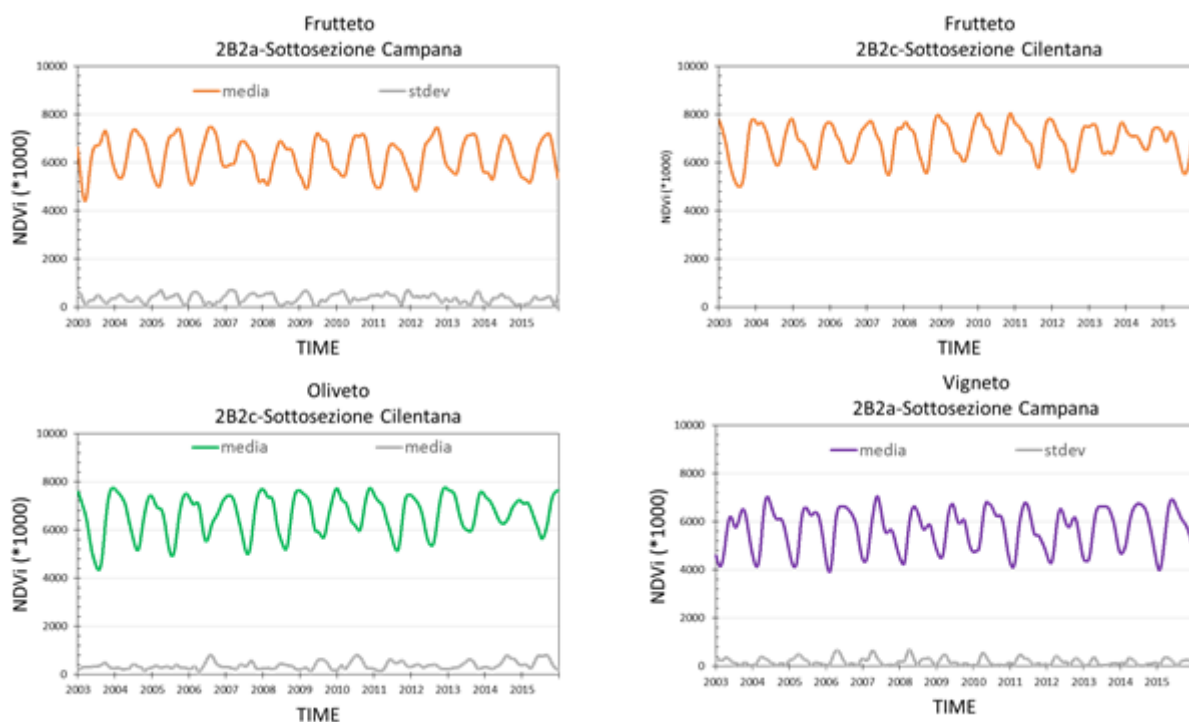


Figure 5 – Trend della statistica media e deviazione standard dell'indice NDVI per i PAT frutteto, oliveto e vigneto all'interno delle sottosezioni Ecoregionali della Campania.

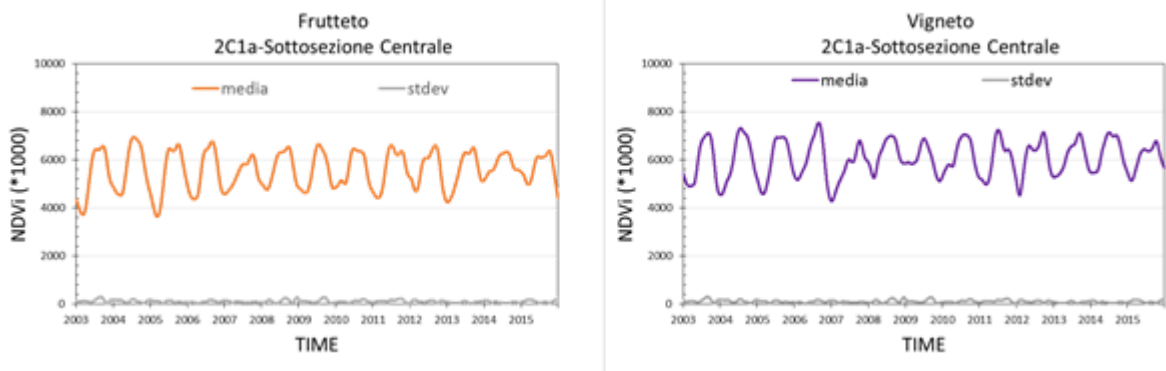


Figure 6 – Trend della statistica media e deviazione standard dell'indice NDVI per i PAT frutteto e vigneto all'interno delle sottosezioni Ecoregionali del Molise.

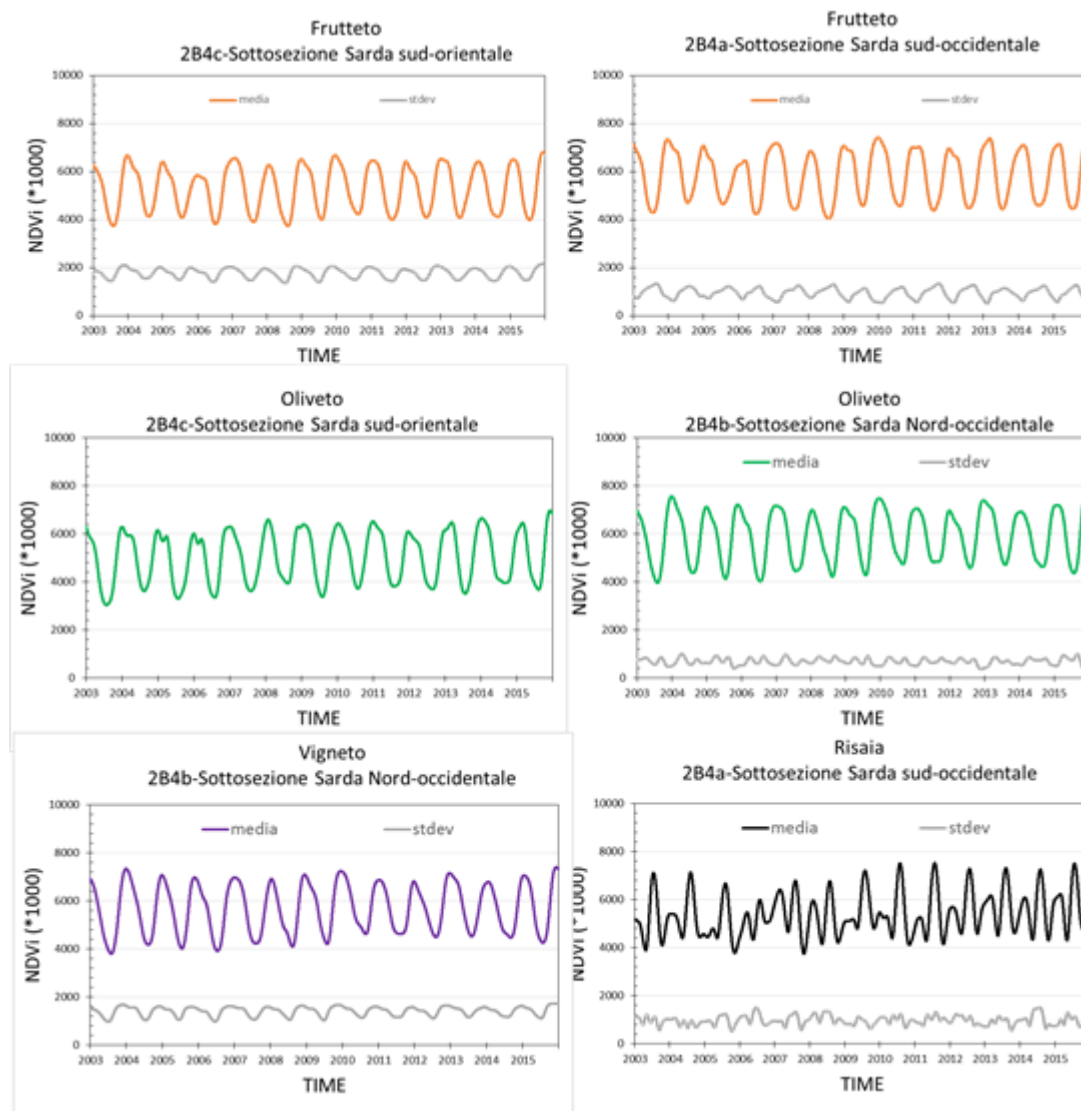


Figure 7 – Trend della statistica media e deviazione standard dell'indice NDVI per i PAT frutteto, oliveto, vigneto e risaia all'interno delle sottosezioni Ecoregionali della Sardegna.

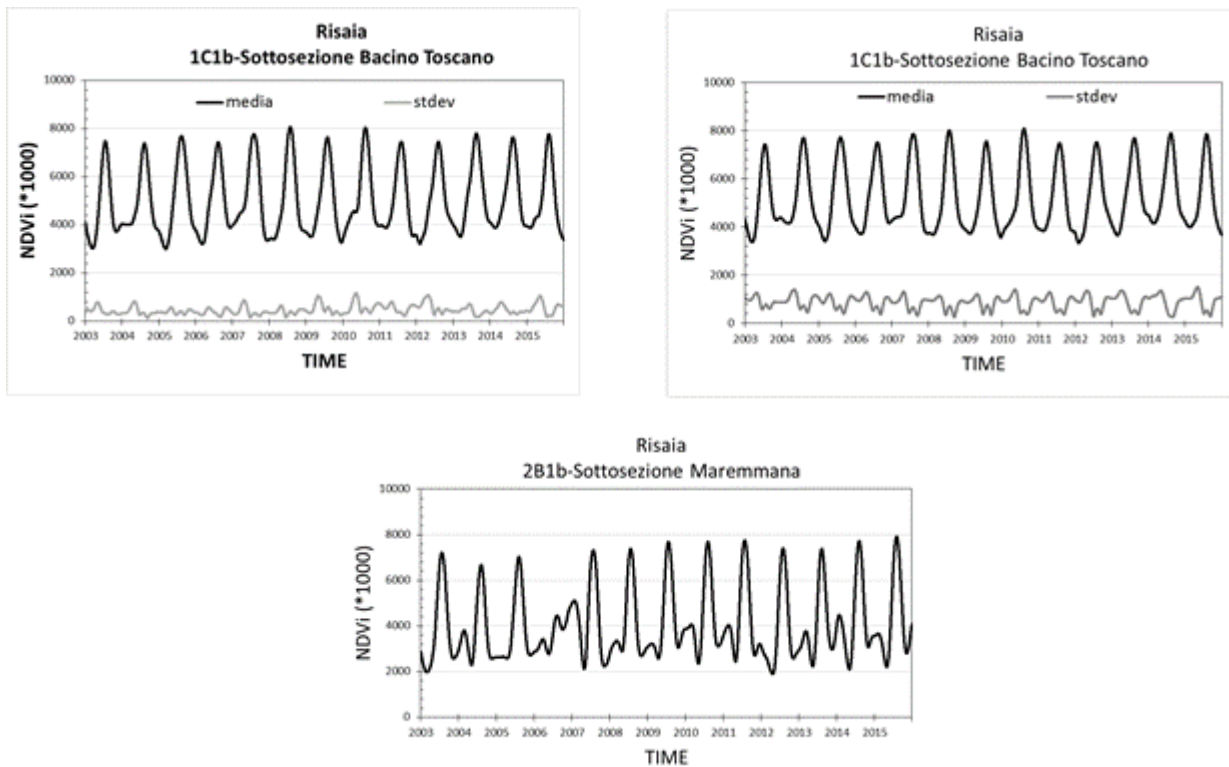


Figure 8 – Trend della statistica media e deviazione standard dell'indice NDVI per il PAT risaia all'interno delle sottosezioni Ecoregionali della Toscana.

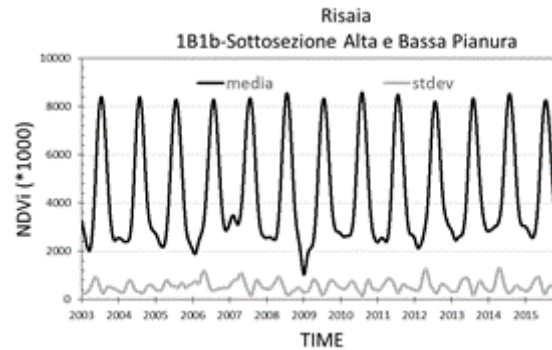


Figure 9 – Trend della statistica media e deviazione standard dell'indice NDVI per il PAT risaia all'interno di una sottosezioni Ecoregionali della Lombardia.

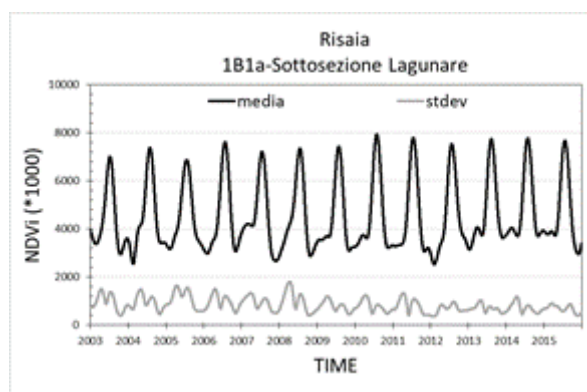


Figure 10 – Trend della statistica media e deviazione standard dell'indice NDVI per il PAT risaia all'interno di una sottosezioni Ecoregionali del Veneto.

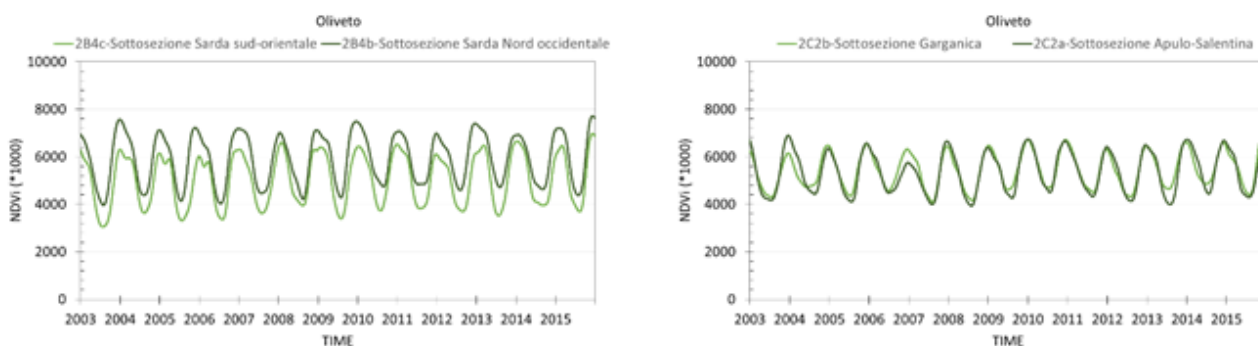


Figure 11 – Variabilità dei PAT tra sottosezioni di una medesima Regione: confronto nella dinamica intra-annuale tra due serie temporali dell'indice NDVI per il PAT Oliveto all'interno delle sottosezioni 2B4c e 2B4b delle sottosezioni Ecoregionali della Sardegna (a sinistra) e all'interno delle sottosezioni 2C2b e 2C2a delle sottosezioni Ecoregionali della Puglia (a destra).

Appendice B: Produzione primaria lorda (GPP), produzione primaria netta (NPP), crop water stress index (CWSI*), soil water content (SWC) per i PAT all'interno di alcune sottosezioni Ecoregionali.

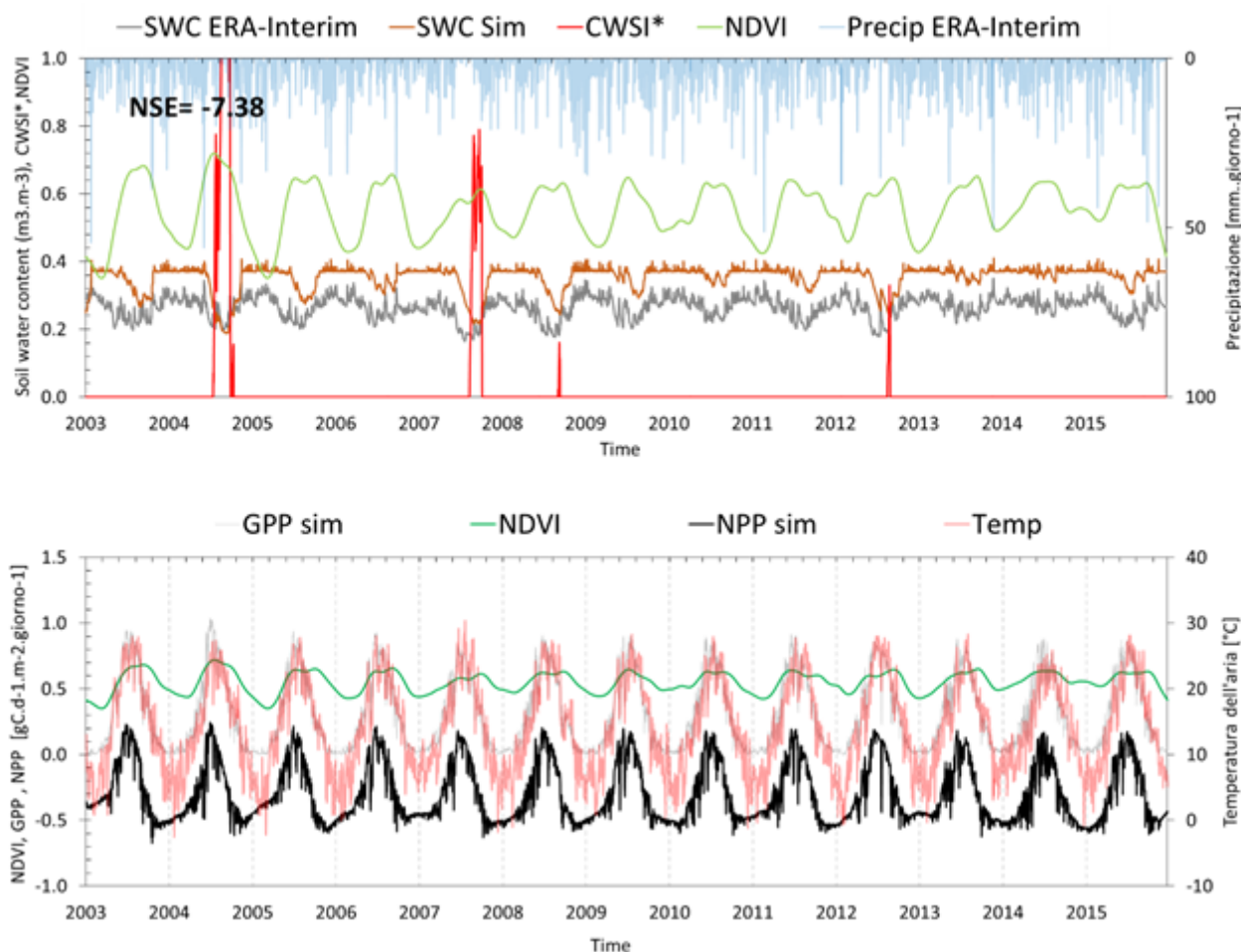


Figura 0-1– Frutteto-2C1a-Abruzzo-id-181: serie temporale a scala giornaliera di contenuto idrico nel suolo simulati da modello e derivato dai dati ECMWF ERA-Interim (layer 1, profondità 0.07m dal p.c.), con serie temporale del crop water stress index semplificato (CWSI*) derivato dal modello soil water balance FAO56, precipitazioni totali derivate da ECMWF ERA-Interim ed indice di vegetazione NDVI MODIS VI (**in alto**). Serie temporale a scala giornaliera di contenuto della produzione primaria lorda (GPP) e netta (NPP) simulata dal modello con serie temporale dell'indice di vegetazione NDVI MODIS VI e della temperatura derivata dai dati ECMWF ERA-Interim (**in basso**).

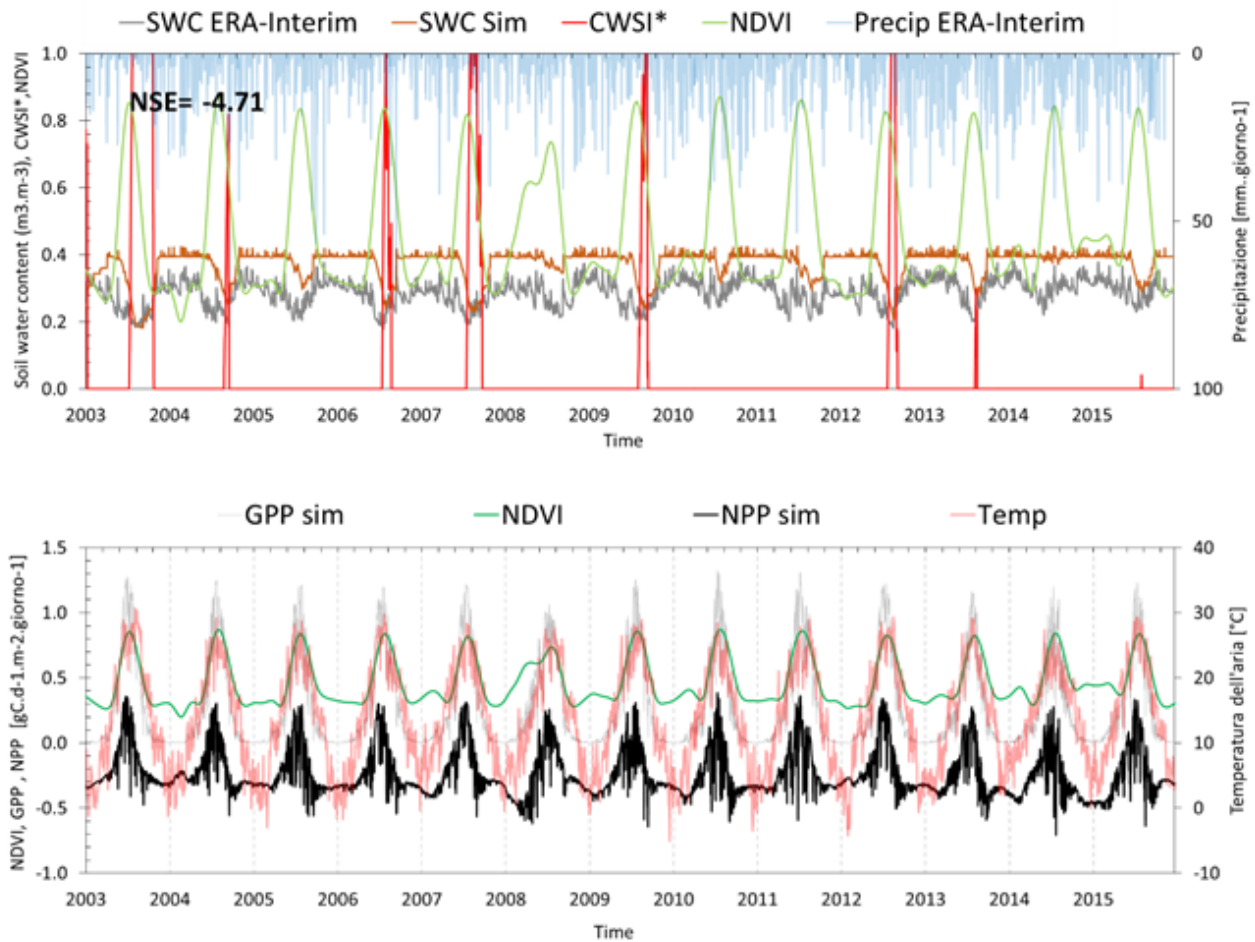


Figura 0-2– Risaia con semina interrata- 1B1a-Emilia_Romagna-id-405: serie temporale a scala giornaliera di contenuto idrico nel suolo simulati da modello e derivato dai dati ECMWF ERA-Interim (layer 1, profondità 0.07m dal p.c.), con serie temporale del crop water stress index semplificato (CWSI*) derivato dal modello soil water balance FAO56, precipitazioni totali derivate da ECMWF ERA-Interim ed indice di vegetazione NDVI MODIS VI (**in alto**). Serie temporale a scala giornaliera di contenuto della produzione primaria lorda (GPP) e netta (NPP) simulata dal modello con serie temporale dell'indice di vegetazione NDVI MODIS VI e della temperatura derivata dai dati ECMWF ERA-Interim (**in basso**).

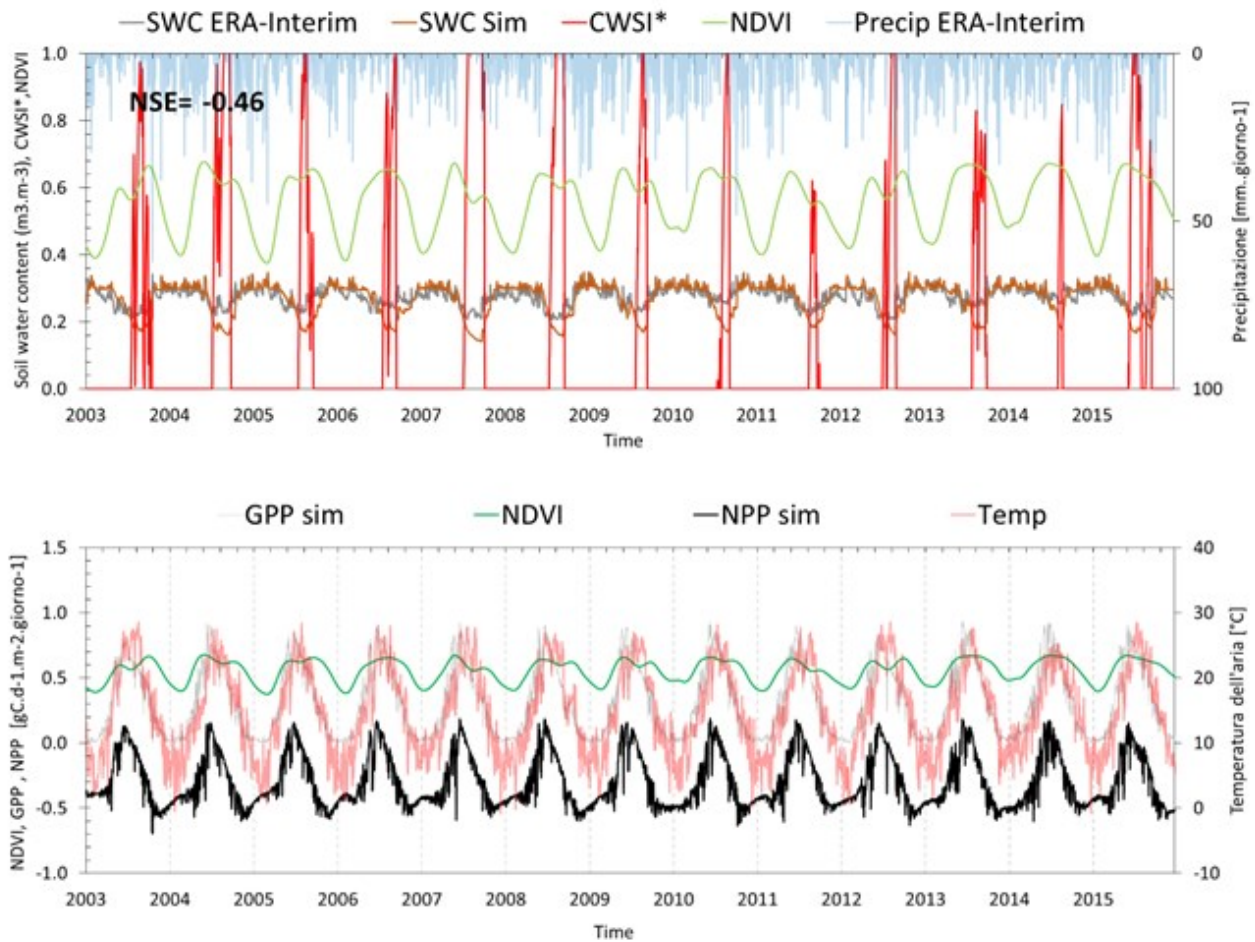


Figura 0-3– Vigneto-2B2a-Campania-id-166: serie temporale a scala giornaliera di contenuto idrico nel suolo simulati da modello e derivato dai dati ECMWF ERA-Interim (layer 1, profondità 0.07m dal p.c.), con serie temporale del crop water stress index semplificato (CWSI*) derivato dal modello soil water balance FAO56, precipitazioni totali derivate da ECMWF ERA-Interim ed indice di vegetazione NDVI MODIS VI (**in alto**). Serie temporale a scala giornaliera di contenuto della produzione primaria lorda (GPP) e netta (NPP) simulata dal modello con serie temporale dell'indice di vegetazione NDVI MODIS VI e della temperatura derivata dai dati ECMWF ERA-Interim (**in basso**).

5 Bibliografia

- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., Smith, M., & W, a B. (1998). Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements - FAO Irrigation and drainage paper 56. *Irrigation and Drainage*, 1–15. <http://doi.org/10.1016/j.eja.2010.12.001>
- Antrop, M. (1997). The concept of traditional landscapes as a base for landscape evaluation and planning. The example of Flanders Region. *Landscape and Urban Planning*, 38(1-2), 105–117. [http://doi.org/10.1016/S0169-2046\(97\)00027-3](http://doi.org/10.1016/S0169-2046(97)00027-3)
- Anyamba, a., & Eastman, J. R. (1996). Interannual variability of NDVI over Africa and its relation to El Niño/Southern Oscillation. *International Journal of Remote Sensing*, 17(13), 2533–2548. <http://doi.org/10.1080/01431169608949091>
- Arvor, D., Jonathan, M., Meirelles, M. S. P., Dubreuil, V., & Durieux, L. (2011). Classification of MODIS EVI time series for crop mapping in the state of Mato Grosso, Brazil. *International Journal of Remote Sensing*, 32(22), 7847–7871. <http://doi.org/10.1080/01431161.2010.531783>
- Atkinson, P. M., Jeganathan, C., Dash, J., & Atzberger, C. (2012). Inter-comparison of four models for smoothing satellite sensor time-series data to estimate vegetation phenology. *Remote Sensing of Environment*, 123, 400–417. <http://doi.org/10.1016/j.rse.2012.04.001>
- Atzberger, C. (2013). Advances in remote sensing of agriculture: Context description, existing operational monitoring systems and major information needs. *Remote Sensing*. <http://doi.org/10.3390/rs5020949>
- Atzberger, C., & Eilers, P. H. C. (2011). A time series for monitoring vegetation activity and phenology at 10-daily time steps covering large parts of South America. *International Journal of Digital Earth*, 4(5), 365–386. <http://doi.org/10.1080/17538947.2010.505664>
- Atzberger, C., & Eilers, P. H. C. (2011). Evaluating the effectiveness of smoothing algorithms in the absence of ground reference measurements. *International Journal of Remote Sensing*, 32(13), 3689–3709. <http://doi.org/10.1080/01431161003762405>
- Azzali, S., & Menenti, M. (2000). Mapping vegetation-soil-climate complexes in southern Africa using temporal Fourier analysis of NOAA-AVHRR NDVI data. *International Journal of Remote Sensing*, 21(5), 973–996. <http://doi.org/10.1080/014311600210380>
- Badeck, F. W., Bondeau, A., Böttcher, K., Doktor, D., Lucht, W., Schaber, J., & Sitch, S. (2004). Responses of spring phenology to climate change. *New Phytologist*. <http://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2004.01059.x>
- Badhwar, G. D., Austin, W. W., & Carnes, J. G. (1982). A semi-automatic technique for multitemporal classification of a given crop within a landsat scene. *Pattern Recognition*, 15(3), 217–230. [http://doi.org/10.1016/0031-3203\(82\)90073-5](http://doi.org/10.1016/0031-3203(82)90073-5)
- Ballabio C., Panagos P., Montanarella L. Mapping topsoil physical properties at European scale using the LUCAS database (2016) *Geoderma*, 261 , pp. 110-123.

- Beck, P. S., Atzberger, C., Høgda, K. A., Johansen, B., & Skidmore, A. K. (2006). Improved monitoring of vegetation dynamics at very high latitudes: A new method using MODIS NDVI. *Remote Sensing of Environment*, 100(3), 321–334. <http://doi.org/10.1016/j.rse.2005.10.021>
- Blasi, C., Capotorti, G., & Frondoni, R. (2005). Defining and mapping typological models at the landscape scale. *Plant Biosystems*, 139(2), 155–163. <http://doi.org/10.1080/11263500500163629>
- Blasi, C., Capotorti, G., Copiz, R., Guida, D., Mollo, B., Smiraglia, D., & Zavattoni, L. (2014). Classification and mapping of the ecoregions of Italy. *Plant Biosystems*, 3504(May 2015), 37–41. <http://doi.org/10.1080/11263504.2014.985756>
- Bolton, D. K., & Friedl, M. A. (2013). Forecasting crop yield using remotely sensed vegetation indices and crop phenology metrics. *Agricultural and Forest Meteorology*, 173, 74–84. <http://doi.org/10.1016/j.agrformet.2013.01.007>
- Boschetti, M., Stroppiana, D., Brivio, P. a., & Bocchi, S. (2009). Multi-year monitoring of rice crop phenology through time series analysis of MODIS images. *International Journal of Remote Sensing*, 30(18), 4643–4662. <http://doi.org/10.1080/01431160802632249>
- Braden H. (1985). Ein Energiehaushalts- und Verdunstungsmodell fuer Wasser- und Stoffhaushaltsuntersuchungen landwirtschaftlich genutzter Einzugsgebiete, 42Mitt. Deutsch, Bodenk, Gesellschaft (1985) pp. 294–299
- Bradley, B. A., Jacob, R. W., Hermance, J. F., & Mustard, J. F. (2007). A curve fitting procedure to derive inter-annual phenologies from time series of noisy satellite NDVI data. *Remote Sensing of Environment*, 106(2), 137–145. <http://doi.org/10.1016/j.rse.2006.08.002>
- Cammalleri, C., et al. "Combined use of eddy covariance and sap flow techniques for partition of ET fluxes and water stress assessment in an irrigated olive orchard." *Agricultural water management* 120 (2013): 89-97.
- Chen, J., Jönsson, P., Tamura, M., Gu, Z., Matsushita, B., & Eklundh, L. (2004). A simple method for reconstructing a high-quality NDVI time-series data set based on the Savitzky-Golay filter. *Remote Sensing of Environment*, 91(3-4), 332–344. <http://doi.org/10.1016/j.rse.2004.03.014>
- Chuvieco, E., Ventura, G., Martín, M. P., & Gómez, I. (2005). Assessment of multitemporal compositing techniques of MODIS and AVHRR images for burned land mapping. *Remote Sensing of Environment*, 94(4), 450–462. <http://doi.org/10.1016/j.rse.2004.11.006>
- Cihlar, J., & Manak, D. (1994). Evaluation of Compositing Algorithms for AVHRR Data Over Land. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 32(2), 427–437. <http://doi.org/10.1109/36.295057>
- Curnel, Y., & Oger, R. (2004). Agrophenology Indicators From Remote Sensing: State of the Art. *Isprs.Org*, 31–38. Retrieved from http://www.isprs.org/proceedings/XXXVI/8-W48/31_XXXVI-8-W48.pdf
- de Brogniez, Delphine, et al. "A map of the topsoil organic carbon content of Europe generated by a generalized additive model." *European Journal of Soil Science* 66.1 (2015): 121-134.

- de Jong, R., de Bruin, S., de Wit, A., Schaepman, M. E., & Dent, D. L. (2011). Analysis of monotonic greening and browning trends from global NDVI time-series. *Remote Sensing of Environment*, 115(2), 692–702. <http://doi.org/10.1016/j.rse.2010.10.011>
- Dee, D. P., Uppala, S. M., Simmons, A. J., Berrisford, P., Poli, P., Kobayashi, S., ... Vitart, F. (2011). The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 137(656), 553–597. <http://doi.org/10.1002/qj.828>
- Eamus, D., Macinnis-Ng, C. M. O., Hose, G. C., Zeppel, M. J. B., Taylor, D. T., & Murray, B. R. (2005). TURNER REVIEW No. 9 Ecosystem services: an ecophysiological examination. *Australian Journal of Botany*, 53(1), 1–19. <http://doi.org/doi:10.1071/BT04119>
- Eilers, P. H. C. (2003). A perfect smoother. *Analytical Chemistry*. <http://doi.org/10.1021/ac034173t>
- Field, C. V., Schmidt, G. A., Koch, D., & Salyk, C. (2006). Modeling production and climate-related impacts on ¹⁰Be concentration in ice cores. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 111(15). <http://doi.org/10.1029/2005JD006410>
- Forkel, M., Carvalhais, N., Verbesselt, J., Mahecha, M. D., Neigh, C. S. R., & Reichstein, M. (2013). Trend Change detection in NDVI time series: Effects of inter-annual variability and methodology. *Remote Sensing*, 5(5), 2113–2144. <http://doi.org/10.3390/rs5052113>
- Galford, G. L., Melillo, J., Mustard, J. F., Cerri, C. E. P., & Cerri, C. C. (2010). The Amazon frontier of land-use change: Croplands and consequences for greenhouse gas emissions. *Earth Interactions*, 14(15). <http://doi.org/10.1175/2010EI327.1>
- Galford, G. L., Mustard, J. F., Melillo, J., Gendrin, A., Cerri, C. C., & Cerri, C. E. P. (2008). Wavelet analysis of MODIS time series to detect expansion and intensification of row-crop agriculture in Brazil. *Remote Sensing of Environment*, 112(2), 576–587. <http://doi.org/10.1016/j.rse.2007.05.017>
- Gao, X., & Giorgi, F. (2008). Increased aridity in the Mediterranean region under greenhouse gas forcing estimated from high resolution simulations with a regional climate model. *Global and Planetary Change*, 62(3-4), 195–209. <http://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2008.02.002>
- Guérif, M., Blöser, B., Atzberger, C., Clastre, P., Guinot, J.P., Delecolle, R. Identification de parcelles agricoles à partir de la forme de leur évolution radiométrique au cours de la saison de culture. *Photo Interpret*. 1996, 1, 12–22.
- Guswa, A. J., Celia, M., & Rodriguez-Iturbe, I. (2002). Models of soil moisture dynamics in ecohydrology: A comparative study. *Water Resources Research*, 38(9), 1166. <http://doi.org/10.1029/2001WR000826>
- Henderson-Sellers, A., & Wilson, M. F. (1983). Surface albedo data for climatic modeling. *Reviews of Geophysics and Space Physics*, 21(8), 1743–1778. <http://doi.org/10.1029/RG021i008p01743>
- Hermance, J. F. (2007). Stabilizing high-order, non-classical harmonic analysis of NDVI data for average annual models by damping model roughness. *International Journal of Remote Sensing*, 28(12), 2801–2819. <http://doi.org/10.1080/01431160600967128>

- Herrmann, S. M., Anyamba, A., & Tucker, C. J. (2005). Recent trends in vegetation dynamics in the African Sahel and their relationship to climate. *Global Environmental Change*, 15(4), 394–404. <http://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2005.08.004>
- Hertig, E., & Jacobeit, J. (2008). Downscaling future climate change: Temperature scenarios for the Mediterranean area. *Global and Planetary Change*, 63(2-3), 127–131. <http://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2007.09.003>
- Hirosawa, Y., Marsh, S. E., & Kliman, D. H. (1996). Application of standardized principal component analysis of land-cover characterization using multitemporal AVHRR data. *Remote Sensing of Environment*, 58(3), 267–281. [http://doi.org/10.1016/S0034-4257\(96\)00068-5](http://doi.org/10.1016/S0034-4257(96)00068-5)
- Holben, B. N. (1986). Characteristics of maximum-value composite images from temporal AVHRR data. *International Journal of Remote Sensing*, 7(11), 1417–1434. <http://doi.org/10.1080/01431168608948945>
- Hollinger, D. Y., Kelliher, F. M., Byers, J. N., Hunt, J. E., McSeveny, T. M., & Weir, P. L. (1994). Carbon dioxide exchange between an undisturbed old-growth temperate forest and the atmosphere. *Ecology*, 75(1), 134–150. <http://doi.org/10.2307/1939390>
- Huete, A., Didan, K., Miura, T., Rodriguez, E. P., Gao, X., & Ferreira, L. G. (2002). Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*, 83(1-2), 195–213. [http://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00096-2](http://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00096-2)
- Huete, A., Didan, K., Miura, T., Rodriguez, E. P., Gao, X., & Ferreira, L. G. (2002). Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote sensing of environment*, 83(1), 195-213.
- Illera, P., Fernández, a., & Delgado, J. a. (1996). Temporal evolution of the NDVI as an indicator of forest fire danger. *International Journal of Remote Sensing*, 17(6), 1093–1105. <http://doi.org/10.1080/01431169608949072>
- IPCC, 2007. Climate change 2007: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the fourth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. New York: Cambridge University Press, pp 996.
- Jakubauskas, Mark E., David R. Legates, and Jude H. Kastens. "Harmonic analysis of time-series AVHRR NDVI data." *Photogrammetric engineering and remote sensing* 67.4 (2001): 461-470.
- Ji, L., & Peters, A. J. (2003). Assessing vegetation response to drought in the northern Great Plains using vegetation and drought indices. *Remote Sensing of Environment*, 87(1), 85–98. [http://doi.org/10.1016/S0034-4257\(03\)00174-3](http://doi.org/10.1016/S0034-4257(03)00174-3)
- Jin, Y. (2002). How does snow impact the albedo of vegetated land surfaces as analyzed with MODIS data? *Geophysical Research Letters*, 29(10), 12–15. <http://doi.org/10.1029/2001GL014132>
- Jönsson, P., & Eklundh, L. (2002). Seasonality extraction by function fitting to time-series of satellite sensor data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 40(8), 1824–1832. <http://doi.org/10.1109/TGRS.2002.802519>.

- Jönsson, P., & Eklundh, L. (2004). TIMESAT - A program for analyzing time-series of satellite sensor data. *Computers and Geosciences*, 30(8), 833–845. <http://doi.org/10.1016/j.cageo.2004.05.006>
- Kaduk, J., & Heimann, M. (1996). A prognostic phenology scheme for global terrestrial carbon cycle models. *Climate Research*, 6, 1–19. <http://doi.org/10.3354/cr006001>
- Kallberg, P. (2011). Forecast drift in ERA-Interim. *ERA Report Series*, (10), 11. Retrieved from [\\IBSERVER\ID_enl\Reports\ERA Report Series\RS_10.pdf](http://IBSERVER/ID_enl/Reports/ERA%20Report%20Series/RS_10.pdf)
- Källberg, P., 2011: Forecast drift in ERA-Interim, ERA Report Series, No.10, ECMWF, Reading, UK.
- Kandasamy, S., Baret, F., Verger, a., Neveux, P., & Weiss, M. (2013). A comparison of methods for smoothing and gap filling time series of remote sensing observations – application to MODIS LAI products. *Biogeosciences*, 10(6), 4055–4071. <http://doi.org/10.5194/bg-10-4055-2013>
- Kasischke, E. S., French, N. H. F., Harrell, P., Christensen, N. L., Ustin, S. L., & Barry, D. (1993). Monitoring of wildfires in Boreal Forests using large area AVHRR NDVI composite image data. *Remote Sensing of Environment*, 45(1), 61–71. [http://doi.org/10.1016/0034-4257\(93\)90082-9](http://doi.org/10.1016/0034-4257(93)90082-9)
- Kawamura, K., T. Akiyama, H. Yokota, and M. Tsutsumi. 2005. Monitoring of forage conditions with MODIS imagery in the Xilingol steppe, Inner Mongolia. *International Journal of Remote Sensing*, 26, 1423–1436.
- Kerr, J. T., & Ostrovsky, M. (2003). From space to species: ecological applications for remote sensing. *Trends in Ecology & Evolution*, 18(6), 299–305. [http://doi.org/10.1016/s0169-5347\(03\)00071-5](http://doi.org/10.1016/s0169-5347(03)00071-5)
- Landsberg, J. J. (1986). Physiological ecology of forest production. In *Physiological ecology of forest production*.
- Liang, S. 2000. “Narrowband to broadband conversions of land surface albedo I algorithms.” *Remote Sensing of Environment* 76, 213-238.
- Lieth, H. (1974). Purposes of a phenology book. In *Phenology and Seasonality Modeling* (pp. 3–19). <http://doi.org/10.1007/978-3-642-51863-8>
- Lloyd, D. (1990). A phenological classification of terrestrial vegetation cover using shortwave vegetation index imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 11(12), 2269–2279. <http://doi.org/10.1080/01431169008955174>
- Lu, X., Liu, R., Liu, J., & Liang, S. (2007). Removal of Noise by Wavelet Method to Generate High Quality Temporal Data of Terrestrial MODIS Products. *Photogrammetric Engineering Remote Sensing*, 73(10), 1129–1139. <http://doi.org/10.14358/PERS.73.10.1129>
- Matsuda, R., Ohashi-Kaneko, K., Fujiwara, K., Goto, E., & Kurata, K. (2004). Photosynthetic characteristics of rice leaves grown under red light with or without supplemental blue light. *Plant & Cell Physiology*, 45(12), 1870–1874. <http://doi.org/10.1093/pcp/pch203>

- Mattiuzzi, M., Verbesselt, J., & Klisch, A. (2012). MODIS multi-temporal data retrieval and processing toolbox. In Proceedings of the 1st EARSeL Workshop on Temporal Analysis of Satellite Images, 23- 25 May, Mykonos, Greece (p. 4).
- Mazzoleni, Stefano, et al. "New modeling approach to describe and predict carbon sequestration dynamics in agricultural soils." *Carbon Sequestration in Agricultural Soils*. Springer Berlin Heidelberg, 2012. 291-307.
- Meroni, M., Marinho, E., Sghaier, N., Verstrate, M., & Leo, O. (2013). Remote Sensing Based Yield Estimation in a Stochastic Framework — Case Study of Durum Wheat in Tunisia. *Remote Sensing*, 5(2), 539–557. <http://doi.org/10.3390/rs5020539>
- Meroni, M., Rembold, F., Verstraete, M., Gommès, R., Schucknecht, A., & Beye, G. (2014). Investigating the Relationship between the Inter-Annual Variability of Satellite-Derived Vegetation Phenology and a Proxy of Biomass Production in the Sahel. *Remote Sensing*, 6(6), 5868–5884. <http://doi.org/10.3390/rs6065868>
- Moody, E. G., King, M. D., Platnick, S., Schaaf, C. B., & Gao, F. (2005). Spatially complete global spectral surface albedos: Value-added datasets derived from terra MODIS land products. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 43(1), 144–157. <http://doi.org/10.1109/TGRS.2004.838359>
- Moulin, S., Bondeau, A., Delécolle, R. Combining agricultural crop models and satellite observations: From field to regional scales. *Int. J. Remote Sens.* 1998, 19(6), 1021–1036.
- Moulin, S., Kergoat, L., Viovy, N., & Dedieu, G. (1997). Global-scale assessment of vegetation phenology using NOAA/AVHRR satellite measurements. *Journal of Climate*, 10(6), 1154–1170. [http://doi.org/10.1175/1520-0442\(1997\)010<1154:GSAOVP>2.0.CO;2](http://doi.org/10.1175/1520-0442(1997)010<1154:GSAOVP>2.0.CO;2)
- Myneni, R. B., & Williams, D. L. (1994). On the relationship between FAPAR and NDVI. *Remote Sensing of Environment*, 49(3), 200–211. [http://doi.org/10.1016/0034-4257\(94\)90016-7](http://doi.org/10.1016/0034-4257(94)90016-7)
- Peña-Barragán, J. M., Ngugi, M. K., Plant, R. E., & Six, J. (2011). Object-based crop identification using multiple vegetation indices, textural features and crop phenology. *Remote Sensing of Environment*, 115(6), 1301–1316. <http://doi.org/10.1016/j.rse.2011.01.009>
- Porporato, A., & Rodriguez-Iturbe, I. (2002). Ecohydrology - a challenging multidisciplinary research perspective. *Hydrological Sciences*, 47(5), 811. <http://doi.org/10.1080/02626660209492985>
- Qi, J., & Kerr, Y. (1997). On current compositing algorithms. *Remote Sensing Reviews* (15) 235-256. <http://doi.org/10.1080/02757259709532340>
- R Development Core Team, R. (2011). *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. *R Foundation for Statistical Computing* (Vol. 1). <http://doi.org/10.1007/978-3-540-74686-7>
- Reed, Bradley C, Brown, J. F., Vanderzee, D., Loveland, T. R., James W, & Ohlen, D. O. (1994). Measuring phenological variability from satellite imagery. *Journal of Vegetation Science*, 5, 703–714. <http://doi.org/10.2307/3235884>

- Rembold, F., Atzberger, C., Savin, I., & Rojas, O. (2013). Using low resolution satellite imagery for yield prediction and yield anomaly detection. *Remote Sensing*. <http://doi.org/10.3390/rs5041704>
- Renard, K., Foster, G., Weesies, G., McCool, D. and Yoder, D. (1997) Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). USDA Agriculture Handbook #703, 384 p.
- Ritchie, J. T. (1972). Model for predicting evaporation from a row crop with incomplete cover. *Water Resources Research*, 8(5), 1204–1213. <http://doi.org/10.1029/WR008i005p01204>
- Ritchie, J. T. (1972). Model for predicting evaporation from a row crop with incomplete cover. *Water Resources Research*, 8(5), 1204–1213. <http://doi.org/10.1029/WR008i005p01204>
- Rodriguez-Iturbe, I. and A. Porporato (2005). *Ecohydrology of Water-Controlled Ecosystems: Soil Moisture and Plant Dynamics*, Cambridge Univ. Press, Cambridge
- Roerink, G. J., Menenti, M., & Verhoef, W. (2000). Reconstructing cloudfree NDVI composites using Fourier analysis of time series. *International Journal of Remote Sensing*, 21(9), 1911–1917. <http://doi.org/10.1080/014311600209814>
- Sakamoto, T., Wardlow, B.D., Gitelson, A.A. (2011). Detecting spatio-temporal changes of corn developmental stages in the U.S. corn belt using MODIS WDRVI data. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 2011, 49(6 part 1), art. no. 5682035, 1926–1936. <http://doi.org/10.1109/TGRS.2010.2095462>
- Sakamoto, T., Yokozawa, M., Toritani, H., Shibayama, M., Ihitsuka, N., & Ohno, H. (2005). A crop phenology detection method using time-series MODIS data. *Remote Sensing of Environment*, 96(3-4), 366–374. <http://doi.org/10.1016/j.rse.2005.03.008>
- Savitzky, A., & Golay, M. J. E. (1964). Smoothing and Differentiation of Data by Simplified Least Squares Procedures. *Analytical Chemistry*, 36(8), 1627–1639. <http://doi.org/10.1021/ac60214a047>
- Saxton, K.E. , Rawls, W.J. “Soil Water Characteristic Estimates by Texture and Organic Matter for Hydrologic Solutions”. *Soil Science Society of America journal* 2006 Sept-Oct, v. 70, no. 5 pp. 1569-1578.
- Schaaf, C. B., Gao, F., Strahler, A. H., Lucht, W., Li, X., Tsang, T., ... Roy, D. (2002). First operational BRDF, albedo nadir reflectance products from MODIS. *Remote Sensing of Environment*, 83(1-2), 135–148. [http://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00091-3](http://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00091-3)
- Schnelle, F.: *Pflanzen-Phänologie. Probleme der Bioklimatologie Bd. 3. Akadem. Verlagsges. Leipzig* 1955. 299 S., 46 Abb., 14 Kart 24 JAN 2007 <http://doi.org/10.1002/jpln.19560730209>
- Sellers, P. J., Tucker, C. J., Collatz, G. J., Los, S. O., Justice, C. O., Dazlich, D. A., & Randall, D. A. (1994). A global 1° by 1° NDVI data set for climate studies. Part 2: The generation of global fields of terrestrial biophysical parameters from the NDVI. *International Journal of Remote Sensing*, 15(17), 3519–3545. <http://doi.org/10.1080/01431169408954343>
- Sereni E., (1961). *Storia del paesaggio agrario italiano*, editori Laterza, Roma-Bari, 2016

- Sims, D. A., Rahman, A. F., Cordova, V. D., Baldocchi, D. D., Flanagan, L. B., Goldstein, A. H., Hollinger, D. Y., Misson, L., Monson, R. K., Schmid, H. P., Wofsy, S. C., & Xu, L. K. (2005). Midday values of gross CO₂ flux and light use efficiency during satellite overpasses can be used to directly estimate eight-day mean flux. *Agricultural and Forest Meteorology*, 131, 1 e12. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agrformet.2005.04.006>
- Stöckli, R., & Vidale, P. (2004). European plant phenology and climate as seen in a 20-year AVHRR land-surface parameter dataset. *International Journal of Remote Sensing*, 25(17), 3303–3330. <http://doi.org/10.1080/01431160310001618149>
- Tucker, C. J., Vanpraet, C. L., Sharman, M. J., & Van Ittersum, G. (1985). Satellite remote sensing of total herbaceous biomass production in the senegalese sahel: 1980-1984. *Remote Sensing of Environment*, 17(3), 233–249. [http://doi.org/10.1016/0034-4257\(85\)90097-5](http://doi.org/10.1016/0034-4257(85)90097-5)
- Udelhoven, T., Stellmes, M., del Barrio, G., & Hill, J. (2009). Assessment of rainfall and NDVI anomalies in Spain (1989–1999) using distributed lag models. *International Journal of Remote Sensing*, 30(8), 1961–1976. <http://doi.org/10.1080/01431160802546829>
- UNEP, 2009. MAP-Plan Bleu, State of the environment and development in the Mediterranean, UNEP/MAPPlan Bleu. Athens, pp 200.
- Valérie, T., & Marie-Pierre, J. (2006). Tree species identification on large-scale aerial photographs in a tropical rain forest, French Guiana—application for management and conservation. *Forest Ecology and Management*, 225(1-3), 51–61. <http://doi.org/10.1016/j.foreco.2005.12.046>
- Van Leeuwen, W. J. D., Huete, A. R., & Laing, T. W. (1999). MODIS vegetation index compositing approach: A prototype with AVHRR data. *Remote Sensing of Environment*, 69(3), 264–280. [http://doi.org/10.1016/S0034-4257\(99\)00022-X](http://doi.org/10.1016/S0034-4257(99)00022-X)
- Verbesselt, J., Hyndman, R., Newnham, G., & Culvenor, D. (2010). Detecting trend and seasonal changes in satellite image time series. *Remote Sensing of Environment*, 114(1), 106–115. <http://doi.org/10.1016/j.rse.2009.08.014>
- Vermote, E. F., & Vermeulen, a. (1999). Atmospheric correction algorithm: spectral reflectances (MOD09). ATBD Version, 4(April), 1–107.
- Vermote, E. F., El Saleous, N. Z., & Justice, C. O. (2002). Atmospheric correction of MODIS data in the visible to middle infrared: First results. *Remote Sensing of Environment*, 83(1-2), 97–111. [http://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00089-5](http://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00089-5)
- Viovy, N., Arino, O., & Belward, a. S. (1992). The Best Index Slope Extraction (BISE): A method for reducing noise in NDVI time-series. *International Journal of Remote Sensing*, 13(8), 1585–1590. <http://doi.org/10.1080/01431169208904212>
- Vogiatzakis I.N., Griffiths G.H., Melis M.T., Marini A., Careddu M.B. (2006): Landscape Typology in the Mediterranean context: A tool for habitat restoration, *Journal of Mediterranean Ecology* vol. 7, No.1-2-3-4, 2006: 23-30
- Vuolo, F., Atzberger, C. (2012). Exploiting the classification performance of support vector machines with multi-temporal moderate resolution imaging spectro radiometer (MODIS) data in areas of

- agreement and disagreement of existing land cover products. *Remote Sens.* 2012, 4, 3143–3167. <http://doi.org/10.3390/rs4103143>
- Walthall, C. L., Norman, J. M., Welles, J. M., Campbell, G., & Blad, B. L. (1985). Simple equation to approximate the bidirectional reflectance from vegetative canopies and bare soil surfaces. *Applied Optics*, 24(3), 383. <http://doi.org/10.1364/AO.24.000383>
- Wardlow, B. D., Egbert, S. L., & Kastens, J. H. (2007). Analysis of time-series MODIS 250 m vegetation index data for crop classification in the U.S. Central Great Plains. *Remote Sensing of Environment*, 108(3), 290–310. <http://doi.org/10.1016/j.rse.2006.11.021>
- Warmerdam, F. (2008). The Geospatial Data Abstraction Library. In *Open Source Approaches in Spatial Data Handling SE - Advances in Geographic Information Science* (Vol. 2, pp. 87–104). http://doi.org/doi:10.1007/978-3-540-74831-1_5
- White, M. A., de Beurs, K. M., Didan, K., Inouye, D. W., Richardson, A. D., Jensen, O. P., ... Lauenroth, W. K. (2009). Intercomparison, interpretation, and assessment of spring phenology in North America estimated from remote sensing for 1982–2006. *Global Change Biology*, 15(10), 2335–2359. <http://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2009.01910.x>
- White, M. A., Thornton, P. E., & Running, S. W. (1997). A continental phenology model for monitoring vegetation responses to interannual climatic variability. *Global Biogeochemical Cycles*, 11(2), 217–234. <http://doi.org/10.1029/97gb00330>
- Whittaker, E. T. (1923). On a New Method of Graduation. *Proceedings of the Edinburgh Mathematical Society*, 41, 63–75. <http://doi.org/10.1017/S001309150000359X>
- Xin, J., Yu, Z., van Leeuwen, L., & Driessen, P. M. (2002). Mapping crop key phenological stages in the North China Plain using NOAA time series images. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 4(2), 109–117.
- Yuan, W., Liu, S., Zhou, G., Zhou, G., Tieszen, L. L., Baldocchi, D., Wofsy, S. C. (2007). Deriving a light use efficiency model from eddy covariance flux data for predicting daily gross primary production across biomes. *Agricultural and Forest Meteorology*, 143(3-4), 189–207. <http://doi.org/10.1016/j.agrformet.2006.12.001>
- Yuan, W., Liu, S., Zhou, G., Zhou, G., Tieszen, L. L., Baldocchi, D., Wofsy, S. C. (2007). Deriving a light use efficiency model from eddy covariance flux data for predicting daily gross primary production across biomes. *Agricultural and Forest Meteorology*, 143(3-4), 189–207. <http://doi.org/10.1016/j.agrformet.2006.12.001>
- Zhang, X., Friedl, M. A., Schaaf, C. B., Strahler, A. H., Hodges, J. C. F., Gao, F., Huete, A. (2003). Monitoring vegetation phenology using MODIS. *Remote Sensing of Environment*, 84(3), 471–475. [http://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00135-9](http://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00135-9)

Ringraziamenti

Il lavoro è inserito all'interno di un progetto PRIN 2010-2011 sui "Paesaggi Agrari Tradizionali d'Italia" coordinato dal Prof. Guido D'Urso e che coinvolge oltre all'Università degli Studi di Napoli Federico II anche l'Università degli Studi di Catania, l'Università degli Studi di Milano, l'Università degli Studi del Molise, l'Università degli Studi di Palermo, l'Università degli Studi di Perugia e l'Università degli Studi della Toscana.

Ringrazio tutti coloro che hanno reso possibile questo lavoro di ricerca, in particolare il Prof. Guido D'Urso per il suo sostegno ed il suo ottimismo, il Dott. Fabrizio Carteni, il Dott. Francesco Giannino ed il Prof. Stefano Mazzoleni per il supporto nella costruzione del modello eco-idrologico. Un sentito ringraziamento va al Prof. Clement Atzberger e al Dott. Francesco Vuolo per l'ospitalità all'Università di BOKU, in particolare al Dott. Francesco Vuolo sono riconoscente per l'instancabile supporto nello smoothing dei dati MODIS. Un ringraziamento speciale va al gruppo di amici di Ariespace per il loro supporto: Lidia, Ileana, Enrico, Luigi, Marco e *last but not least* l'ing. Carlo De Michele per il suo continuo incoraggiamento. Ringrazio il Prof. Titta Chirico per i consigli in merito all'utilizzo dei dati di ri-analisi ECWF ERA-Interim, ringrazio l'Ing. Enrique Ortiz per la guida all'utilizzo di FEWS e il Dott. Matteo Mattiuzzi per i suoi preziosi suggerimenti nell'utilizzo del pacchetto R. Ringrazio il Dott. Mario Palladino per il suo supporto nell'estrazione delle proprietà fisiche dei suoli. Ringrazio il Dott. Mario Minacapilli per i dati della stazione di Castelvetro e per i suoi suggerimenti tecnici, la Dott.ssa Federica Rossi e il Dott. Osvaldo Facini per i dati della stazione di Brisighella, la Dott.ssa Arianna Facchi e la collega Anna Borghi per il supporto nell'interpretazione dei parametri fenologici derivati per le risaie.

Infine desidero ringraziare i miei genitori, Vittorio e Teresa, e tutta la mia famiglia.