DIPARTIMENTO DI SCIENZE AGRARIE ALIMENTARI E AMBIENTALI

CORSO DI LAUREA IN: SCIENZE FORESTALI DEI SUOLI E DEL PAESAGGIO (LM-73)

MAPPATURA DELLA VEGETAZIONE E DEGLI HABITAT TRAMITE L'ANALISI DELLA FENOLOGIA TELERILEVATA: IL CASO STUDIO DELLA ZSC "IT5320003-GOLA DI FRASASSI"

Vegetation and habitats mapping through remote sensing phenology: a case study of the SAC "IT5320003-Gola di Frasassi"

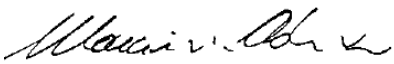
TIPO TESI: sperimentale

Studente:
GIACOMO QUATTRINI

Relatore:
DOTT. SIMONE PESARESI

Correlatori:
PROF.SSA SIMONA CASAVECCHIA

PROF. ADRIANO MANCINI



ANNO ACCADEMICO 2019-2020

SOMMARIO

ELENCO DELLE TABELLE 6

ELENCO DELLE FIGURE 8

ACRONIMI E ABBREVIAZIONI 10

1 INTRODUZIONE 11

2 OBIETTIVI 13

3 MATERIALI E METODI 14

3.1 Area di studio 14

3.1.1. Aspetti geologici e geomorfologici 17

3.1.2. Aspetti climatici 18

3.1.3. Stato attuale delle conoscenze della vegetazione 19

3.2 Immagini telerilevate 21

3.2.1. Raccolta delle immagini Landsat 8 e Sentinel-2 23

3.2.2. Pre-processamento delle immagini Landsat 8 e Sentinel-2 23

3.3 Principali variazioni intra-annuali (stagionali) degli indici di vegetazione telerilevati 25

3.3.1. Serie temporali NDVI e di altri indici di vegetazione tele-rilevati 25

3.3.2. La Functional Principal Component Analysis (FPCA) delle serie temporali 28

3.4 Lo studio della vegetazione 29

3.4.1. La fitosociologia e il rilievo fitosociologico 29

3.4.2. Strategia di campionamento fitosociologico 30

3.4.3. Definizione delle associazioni vegetali: cluster analysis dei dati fitosociologici 30

3.5 Mappatura supervised della vegetazione basata sulla fenologia tele-rilevata e sulla topografia 32

3.5.1. Random forest 32

3.5.2. Training data 33

3.5.2. Predittori spaziali 33

4 RISULTATI 34
4.1 Studio della vegetazione 34
4.1.1. Pheno-clustering delle serie temporali NDVI del Monte Frassasi e campionamento fitosociologico 34
4.1.2. Cluster analysis dei rilievi fitosociologici: le associazioni vegetali 39
4.1.3. Training data 43
4.2 Principali variazioni stagionali degli indici vegetazionali telerilevati 47
4.2.1. Variazioni stagionali derivate dalle serie temporali bisettimanali NDVI Landsat 8 47
4.2.2. Variazioni stagionali derivate dalle serie temporali bisettimanali NDVI Sentinel-2 48
4.2.3. Variazioni stagionali derivate dalle serie temporali settimanali NDVI Sentinel-2 49
4.2.4. Variazioni stagionali derivate dalle serie temporali settimanali GNDVI Sentinel-2 50
4.2.5. Variazioni stagionali derivate dalle serie temporali settimanali SAVI Sentinel-2 51
4.2.6. Variazioni stagionali derivate dalle serie temporali settimanali ND705 Sentinel-2 52
4.2.7. Variazioni stagionali derivate dalle serie temporali settimanali MCARI Sentinel-2 53
4.3 Mappatura supervised della vegetazione di primo livello e degli habitat 54
4.3.1 Mappatura basata sulle variabili topografiche e litologiche 54
4.3.2. Mappatura basata sugli FPCA scores delle serie temporali bisettimanali NDVI Landsat 8 55
4.3.3. Mappatura basata sugli FPCA scores delle serie temporali bisettimanali NDVI Sentinel-2 55
4.3.4. Mappatura basata sugli FPCA scores delle serie temporali settimanali NDVI Sentinel-2 56
4.3.5. Mappatura basata sugli FPCA scores delle serie temporali settimanali GNDVI Sentinel-2 57
4.3.6. Mappatura basata sugli FPCA scores delle serie temporali settimanali SAVI Sentinel-2 57
4.3.7. Mappatura basata sugli FPCA scores delle serie temporali settimanali ND705 Sentinel-2 58
4.3.8. Mappatura basata sugli FPCA scores delle serie temporali settimanali MCARI Sentinel-2 59
4.3.9. Mappatura basata sugli FPCA scores delle serie temporali settimanali SAVI e GNDVI Sentinel-2, delle serie temporali bisettimanali NDVI Landsat 8 e sulle variabili topografiche e litologiche 59
4.4 Mappatura supervised della vegetazione di secondo livello 64

4.4.1 Mappatura basata sulle variabili topografiche e litologiche 64
4.4.2. Mappatura della vegetazione di secondo livello basata sulla classificazione non gerarchica ('flat') delle variabili fenologiche, topografiche e litologiche 65
4.4.3. Mappatura della vegetazione di secondo livello basata sulla classificazione gerarchica delle variabili fenologiche, topografiche e litologiche..... 68

5 DISCUSSIONI E CONCLUSIONI..... 72
5.1 Accuratezza della mappatura 72
5.1.1. Confronto tra Landsat 8 e Sentinel-2 74
5.1.2. Impatto dei diversi indici nelle categorie target..... 75
5.2 Limiti del modello e future ricerche 75

6 APPENDICE 78
6.1 Tabelle fitosociologiche..... 78
6.2 Landsat 8..... 91
6.3 Sentinel-2 93
6.3.1. Aree tematiche Sentinel-2..... 93
6.3.2. Prodotti disponibili 94

7 BIBLIOGRAFIA..... 95

ELENCO DELLE TABELLE

Tabella 3-1: Risoluzioni spaziali Landsat 8 e Sentinel-2 22

Tabella 4-1: Strategia di campionamento fitosociologico stratificato. Il numero dei rilievi fitosociologici è proporzionale alle superfici dei pheno-cluster (strati). 37

Tabella 4-2: Matrice degli errori tra la classificazione prodotta dal modello RF (basato sulle variabili topografiche e litologiche) e quella del training data…….54

Tabella 4-3: Matrice degli errori tra la classificazione prodotta dal modello RF (basato sugli FPCA scores NDVI Landsat 8) e quella del training data 55

Tabella 4-4: Matrice degli errori tra la classificazione prodotta dal modello RF (basato sugli FPCA scores NDVI Sentinel-2 bisettimanali) e quella del training data 56

Tabella 4-5: Matrice degli errori tra la classificazione prodotta dal modello RF (basato sugli FPCA scores NDVI Sentinel-2 settimanali) e quella del training data 56

Tabella 4-6: Matrice degli errori tra la classificazione prodotta dal modello RF (basato sugli FPCA scores GNDVI Sentinel-2) e quella del training data..... 57

Tabella 4-7: Matrice degli errori tra la classificazione prodotta dal modello RF (basato sugli FPCA scores SAVI Sentinel-2) e quella del training data 58

Tabella 4-8: Matrice degli errori tra la classificazione prodotta dal modello RF (basato sugli FPCA scores ND705 Sentinel-2) e quella del training data..... 58

Tabella 4-9: Matrice degli errori tra la classificazione prodotta dal modello RF (basato sugli FPCA scores MCARI Sentinel-2) e quella del training data 59

Tabella 4-10: Tabella sintetica delle migliori producer's accuracy di ogni categoria target ottenute con i diversi indici vegetazionali..... 60

Tabella 4-11: Tabella sintetica delle migliori user's accuracy di ogni categoria target ottenute con i diversi indici vegetazionali..... 60

Tabella 4-112: Matrice degli errori tra la classificazione prodotta dal modello RF (basato sugli FPCA scores GNDVI, SAVI e NDVI Landsat 8 e sulle principali variazioni topografiche e litologiche) e quella del training data. 61

Tabella 4-13: Matrice degli errori tra la classificazione prodotta dal modello RF (basato sulle variabili topografiche e litologiche) e quella del training data……64
Tabella 4-14: producer's accuracy per le categorie target e relativi indici vegetazionali. 65
Tabella 4-15: Matrice degli errori tra la classificazione prodotta dal modello RF (basato sugli FPCA scores GNDVI e NDVI Sentinel-2 e sulle principali variazioni topografiche e litologiche) e quella del training data. 66
Tabella 0-16: Matrice degli errori tra la classificazione prodotta dal modello RF (basato sugli FPCA scores GNDVI e NDVI Sentinel-2 e sulle principali variazioni topografiche e litologiche) e quella del training data.....68
Tabella 0-17: Matrice degli errori tra la classificazione prodotta dal modello RF (basato sugli FPCA scores GNDVI, SAVI e NDVI Sentinel-2 e sulle principali variazioni topografiche e litologiche) e quella del training data……70
Tabella 0-18: Matrice degli errori tra la classificazione prodotta dal modello RF (basato sugli FPCA scores MCARI e NDVI Sentinel-2 e sulle principali variazioni topografiche e litologiche) e quella del training data……...71
Tabella 6-1: Risoluzioni spaziali Landsat 7 ETM+ e Landsat 8 OLI e TIRS..... 92

ELENCO DELLE FIGURE

Figura 1-1: Carta della vegetazione (fitosociologica) della ZSC 'Gola di Frasassi'……..11
Figura 3-1: Vista della Gola di Frasassi. 14
Figura 3-2: Variazione fenologica del Parco Gola della Rossa e di Frasassi. 15
Figura 3-3: Localizzazione della ZSC "IT5320003-Gola di Frasassi" alle diverse scale. 16
Figura 3-4: Carta litologica della ZSC 'Gola di Frasassi' 17
Figura 3-5: Diagramma di Bagnouls e Gaussen per la stazione di "Valmontagnana" 18
Figura 3-6: Risoluzione spettrale (bande) di Landsat 8 e Sentinel-2. 22
Figura 3-7:Identificazione delle nuvole (ed ombre) per l'immagine Sentinel-2. 24
Figura 3-8: Interpolazione dei valori NDVI bisettimanali Landsat 8 26
Figura 3-9: Interpolazione dei valori NDVI bisettimanali Sentinel-2 26
Figura 3-10: Rappresentazione delle specie vegetali proporzionale ai valori di abbondanza. 31
Figura 4-1: Le 2852 serie temporali NDVI bisettimanali 34
Figura 4-2: Barplot degli eignevalues identificati dalla FPCA. 35
Figura 4-3: Variazioni spazio-temporali NDVI identificate dalla FPCA 35
Figura 4-4: Comparazione delle partizioni delle K-medie 37
Figura 4-5: Scores ottenuti dalla FPCA con i relativi gruppi ottenuti dalla partizione. 38
Figura 4-6 : Mappa dei pheno-clusters dell'area del Monte Frasassi 39
Figura 4-7: Siti rilevati fitosociologicamente attribuiti ai boschi di *Ostrya carpinifolia.* 41
Figura 4-8: Sito rilevato fitosociologicamente attribuito ai boschi di *Quercus ilex.* 42
Figura 4-9: Sito rilevato fitosociologicamente attribuito ai boschi di *Quercus pubescens.* 43
Figura 4-10: Il training data composto da 291 punti. 44
Figura 4-11: Il training data composto da 274 punti. 45
Figura 4-12: Esempio di area classificata nel mosaico di gariga e macchia 46
Figura 4-13: Variazioni spazio-temporali NDVI derivate dalle serie temporali bisettimanali Landsat 8 47

Figura 4-14: Variazioni spazio-temporali NDVI derivate dalle serie temporali bisettimanali Sentinel-2 48
Figura 4-15: Variazioni spazio-temporali NDVI derivate dalle serie temporali settimanali Sentinel-2 49
Figura 4-16: Variazioni spazio-temporali GNDVI 50
Figura 4-17: Variazioni spazio-temporali SAVI..... 51
Figura 4-18: Variazioni spazio-temporali ND705 52
Figura 4-19: Variazioni spazio-temporali MCARI 53
Figura 4-20: Mappa fisionomica della vegetazione della gola di Frasassi 62
Figura 4-21: Mappa degli habitat della gola di Frasassi 63
Figura 4-22: Mappa fitosociolocica della vegetazione della gola di Frasassi..... 67
Figura 4-23: Spazializzazione gerarchica delle due tipologie di ostrieto..... 69
Figura 4-24: Spazializzazione gerarchica delle due tipologie di lecceta. 70
Figura 4-25: Spazializzazione gerarchica delle due tipologie di querceto..... 71
Figura 5-1: Mappe della vegetazione a confronto. 73
Figura 5-2: Mappe degli habitat a confronto. 73
Figura 5-3: Vista di una porzione della Gola di Frasassi. 74
Figura 5-4: Corrispondenza visiva tra l'uso del suolo assetto spaziale della vegetazione.. 77
Figura 5-5: Cambiamento storico avvenuto nel versante orientale del Monte Frasassi.... 77
Figura 6-1: Confronto delle bande spettrali investigate da Landsat 7 e Landsat 8 92

ACRONIMI E ABBREVIAZIONI

ZSC	ZONA SPECIALE DI CONSERVAZIONE
NDVI	NORMALIZED DIFFERENCE VEGETATION INDEX
MCARI	MODIFIED CHLOROPHYLL ABSORPTION IN REFLECTANCE INDEX
GNDVI	GREEN NORMALIZED DIFFERENCE VEGETATION INDEX
ND705	NORMALIZED DIFFERENCE INDICES – ND705
SAVI	SOIL ADJUSTED VEGETATION INDEX
NDTCI	NORMALIZED DIFFERENCE THERMAL CLOUD INDEX
FPCA	FUNCTIONAL PRINCIPAL COMPONENT ANALYSIS
RF	RANDOM FOREST

1 INTRODUZIONE

Una mappa della vegetazione è il risultato della spazializzazione di predefinite categorie vegetazionali (figura 1-1). Tali mappe, sono ottenibili mediante numerosi e diversi approcci.

La fitosociologia, e cioè lo studio delle associazioni vegetali, ha significativamente contribuito allo sviluppo della mappatura della vegetazione (Pedrotti, 2014). In accordo con la definizione di Braun-Blanquet, le associazioni vegetali possono essere descritte come un "aggruppamento di piante più o meno stabile nel tempo e in equilibrio con l'ambiente, caratterizzato da una composizione floristica determinata, nella quale alcune specie, quasi esclusive, rilevano con la loro presenza un'ecologia particolare ed autonoma." (Braun-Blanquet, et al., 1932). Le mappe fitosociologiche e delle associazioni vegetali hanno una lunga tradizione in Europa, e solo recentemente hanno acquisito una notevole importanza per conseguire gli obiettivi di monitoraggio, gestione e conservazione del territorio imposti da norme comunitarie quali la Direttiva Habitat (92/43/CEE). Dalla produzione di una mappa fitosociologica è possibile derivare una mappa degli habitat: circa il 60% degli habitat naturali e seminaturali elencati nell'allegato I della direttiva, fanno chiaramente riferimento ai sintaxa fitosociologici (es. associazioni vegetali) (Poncet, et al., 2014). La fitosociologia ha dunque un ruolo centrale nella diagnosi degli habitat e nella loro mappatura e se realizzate con continuità (aggiornate ogni 6 anni) sarebbero un importante strumento per il monitoraggio e la valutazione dello stato di conservazione degli habitat stessi (Ichter, et al., 2014). Il metodo maggiormente utilizzato per la mappatura delle associazioni vegetali è di tipo induttivo, il cui punto di partenza è il rilevamento in campagna delle associazioni vegetali. La spazializzazione di queste avviene successivamente mediante l'interpretazione esperta visiva di foto e orto-foto aeree. Tale approccio può essere definito 'tradizionale'. La realizzazione di queste mappe impone una vasta raccolta standardizzata, capillare e continua (nel tempo e nello spazio) dei dati vegetazionali. Le mappe prodotte in maniera tradizionale richiedono un enorme sforzo in termini economici e di tempo, sono raramente aggiornate e non esplicitano quasi mai il grado di accuratezza (Ichter, et al., 2014). Tuttavia, la mappatura della vegetazione può beneficiare delle più recenti e moderne tecnologie di telerilevamento (Corbane, et al., 2015), combinando le analisi dei dati telerilevati con quelle di campagna (Pedrotti, 2014).

Gli aspetti più importanti del telerilevamento sono l'acquisizione continua nel tempo (ad intervalli regolari) dei dati e la loro disponibilità agli utenti spesso gratuita (es. immagini Landsat 8 e Sentinel-2). Questi fattori, uniti alle indagini di campagna, fanno sì che l'uso del telerilevamento sia sempre più preso in considerazione dagli stati membri dell'Unione Europea, per la produzione di mappe della vegetazione, il monitoraggio e la conservazione degli habitat, e quindi per adempiere agli obblighi di comunicazione e reporting previsti dalla Direttiva Habitat. Ciò nonostante, l'impiego del telerilevamento satellitare nella fitosociologia è ancora piuttosto raro.

Il lavoro di questa tesi, si riallaccia a uno dei principali argomenti di studio del gruppo di ricerca Pesaresi/Casavecchia del D3A (Casavecchia, et al., 2020), focalizzato sullo sviluppo di una mappatura della vegetazione (associazioni vegetali) basato sull'integrazione tra i rilevamenti fitosociologici di campagna (osservazioni in campo) e la fenologia di superficie telerilevata (*Land Surface Phenology* – LSP) (Pesaresi, et al., 2020a; Pesaresi, et al., 2020b) .

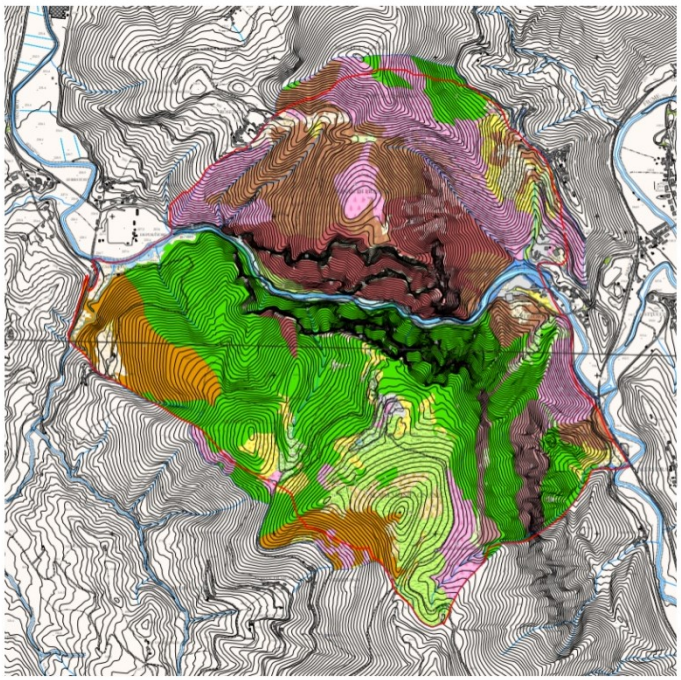


Figura 1-1: Carta della vegetazione (fitosociologica) della ZSC 'Gola di Frasassi' IT5320003 ((Biondi, et al., 2009). Formazioni forestali prevalenti: in verde scuro lo Scutellario columnae-Ostryetum carpinifoliae; in rosa i rimboschimenti; in arancione il Cytiso sessilifolii-Quercetum pubescentis; in rosso il Cyclamino hederifolii-Quercetum ilicis; in verde chiaro le praterie attribuite al Brizo mediae-Brometum erecti.

2 OBIETTIVI

Principale obiettivo di questa tesi è la realizzazione delle mappe della vegetazione (associazioni vegetali) e degli habitat (sensu Direttiva 92/43/CEE) della ZSC Gola di Frasassi, attraverso la metodologia recentemente sviluppata in (Pesaresi, et al., 2020a; Costanzi, et al., 2018; Quattrini, et al., 2017) che integra la fitosociologica con la fenologia di superficie telerilevata (Land Surface Phenology). Quest'ultima è espressa dalle variazioni spazio-temporali dei valori dell'indice di vegetazione (NDVI) derivato dalle immagini satellitari Landsat 8. Inoltre, allo scopo di consolidare e migliorare tale approccio di mappatura, si intende verificare il contributo di altri indici di vegetazione e immagini satellitari (Sentinel-2) all'accuratezza finale delle mappe prodotte.

In sintesi, per raggiungere gli obiettivi sono state eseguite le seguenti attività: (i) analisi fitosociologica di campo al fine di identificare le associazioni vegetali e gli habitat (classi target di mappatura) presenti nella ZSC; (ii) analisi della fenologia di superficie tele-rilevata tramite Functional Principal Component Analsysis (FPCA) delle serie temporali NDVI e di altri indici vegetazioanali; (iii) mappatura delle associazioni vegetali e degli habitat tramite la classificazione supervised delle principali variazioni fenologiche tele-rilevate estratte (tramite la FPCA) dalle serie temporali NDVI (Landsat-8 e Sentinel-2), MCARI, GNDVI, ND705 e SAVI (Sentinel-2) (Daughtry, et al., 2000; Gitelson & Merzlyak, 1998; Sims & Gamon, 2002; Qi, et al., 1994). Infine, è stato effettuato il confronto tra le diverse mappature delle associazioni vegetali prodotte.., GNDVI, ND705 e SAVI (Sentinel-2) (Daughtry, et al., 2000; Gitelson & Merzlyak, 1998; Sims & Gamon, 2002; Qi, et al., 1994). Infine, è stato effettuato il confronto tra le diverse mappature delle associazioni vegetali prodotte.

3 MATERIALI E METODI

3.1 Area di studio

Per soddisfare gli obiettivi prefissati e valutare l'affidabilità della metodologia sperimentata, deciso di svolgere lo studio nella zona speciale di conservazione "Gola di Frasassi IT5320003" (figura 3-1), caratterizzato da un'elevata eterogeneità vegetazionale (figura 3-2), dovuta sia alla variabilità topografica e litologica dell'area, sia all'interazione delle attività dell'uomo con le caratteristiche naturali. Lo sfruttamento delle aree naturali e le attività agrosilvopastorali sono stati quindi i fattori che maggiormente hanno modellato l'attuale paesaggio.

Figura 3-1: Vista della Gola di Frasassi. A destra la parete del Monte di Valmontagnana, mentre a sinistra quella del Monte Frasassi.

Il Sito, ricadente nel Parco Naturale Regionale della Gola della Rossa e di Frasassi, si estende per un'area di 728 ha all'interno del territorio montano della Provincia di Ancona, nei rilievi preappenninici compresi nei comuni di Genga e di Fabriano.

Figura 3-2: Variazione fenologica della vegetazione del Parco Naturale Regionale della Gola della Rossa e di Frasassi. In alto durante la stagione estiva (luglio 2020) e in basso durante la stagione invernale (gennaio 2020) dove è evidente la diversa fenologia delle fitocenosi forestali presenti. I boschi a dominanza di caducifogle, a differenza dei rimboschimenti e delle leccete sempreverdi, presentano una marcata defogliazione in questo periodo.

La ZSC indagata è inoltre interamente compreso nella ZPS IT5320017 – Gola della Rossa e di Frasassi. Il limite dell'area a nord è costituito dai rilievi di Monte la Croce e Monte Ginguno e prosegue ad est lungo la strada Provinciale che da Pierosara si dirige verso San Vittore mentre il confine sud è identificabile nell'allineamento abitato di Valtreara – Monte di Valmontagnana - Monte Civitella. Verso ovest la ZSC è invece delimitata dal nucleo abitato di Spineto e dall'area industriale di Pianello. La quota massima del sito è di 931 metri del Monte di Valmontagnana (figura 3-1), mentre la quota minima rilevata è di 200 metri al limite con la sponda sinistra del fiume Esino. La localizzazione del sito è raffigurata in figura 3-3.

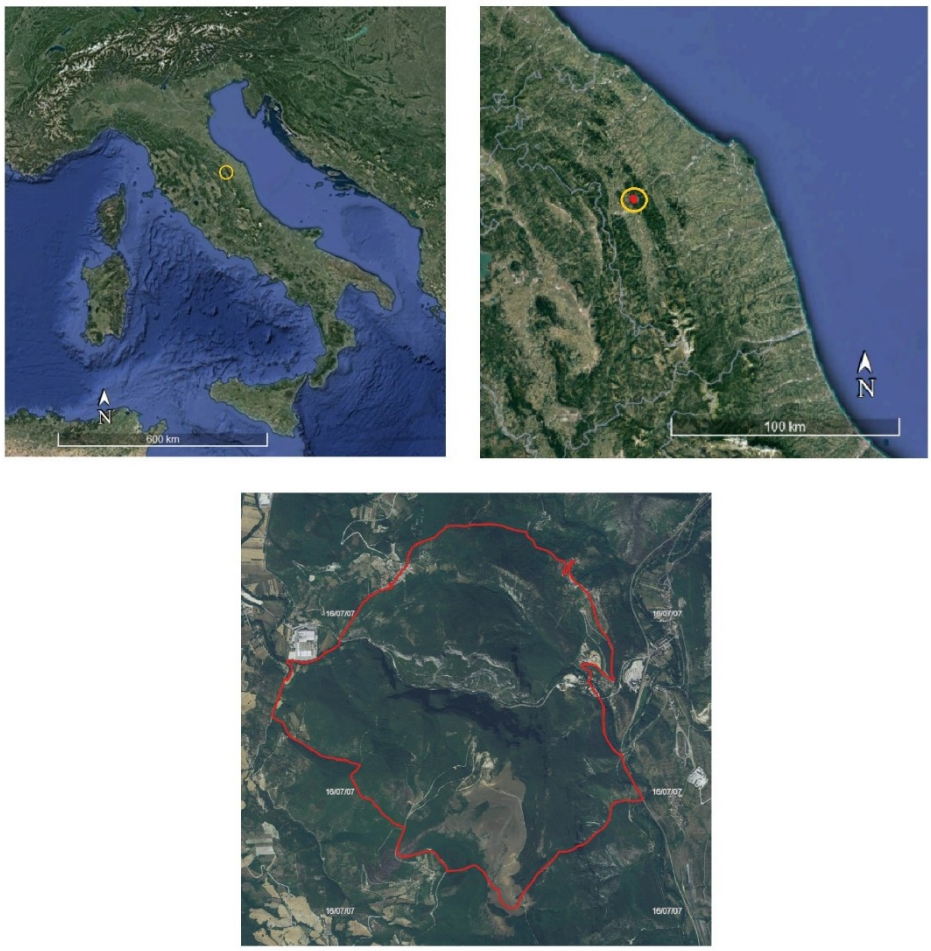


Figura 3-3: Localizzazione della ZSC "IT5320003-Gola di Frasassi" alle diverse scale. A sinistra a scala nazionale, a destra nella regione Marche e in basso a più grande scala. L'area indagata è delimitata dal confine rosso.

3.1.1. Aspetti geologici e geomorfologici

Da un punto di vista geografico-morfologico, l'area di studio è caratterizza dalla presenza di varie formazioni carbonatiche che vanno dal Triassico, con i litotipi della Maiolica, del Calcare massiccio e della formazione del Bugarone, al Cretaceo inferiore, con le Marne a fucoidi, la Scaglia cinerea, la Scaglia bianca, rossa e variegata. Di più recente formazione sono invece i depositi arenaceo-pelitici riferibili al Miocene e i depositi detritici di falda, di composizione variabile, spesso costituiti da elementi a spigolo vivo, riferibili all' Olocene (figura 3-4).

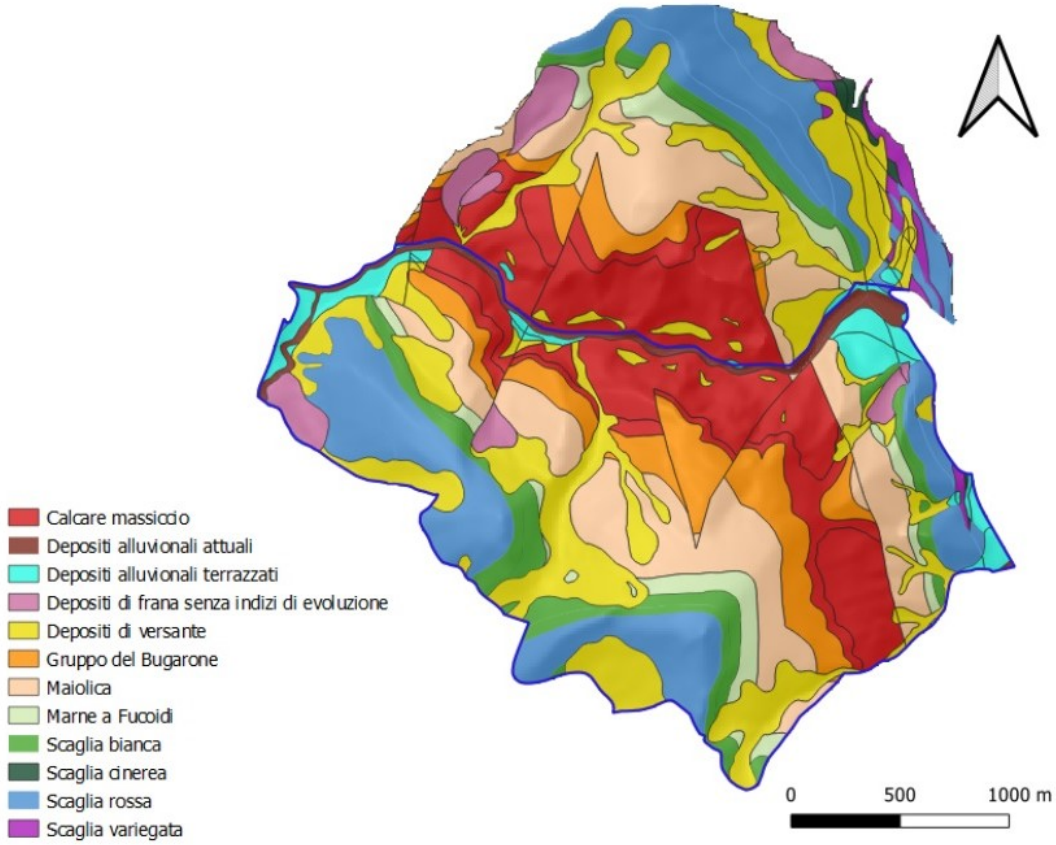


Figura 3-4: Carta litologica della ZSC 'Gola di Frasassi' derivata da Costanzi et al., (2018).

Il sito oggetto di studio si estende sulla cosiddetta "dorsale marchigiana" che ha andamento N/NO – S/SE e che, unitamente alla "dorsale umbro-marchigiana" parallela ad essa e alla depressione che le divide, e cioè il sinclinorio camertino, costituisce il sistema appenninico della Regione in quest'area. La dorsale Marchigiana presenta ripidi versanti in destra e sinistra idrografica del fiume Esino, con frequenti salti rocciosi anche di notevole imponenza ed aree

prive di vegetazione, mentre la fascia orientale è caratterizzata da un paesaggio molto più dolce, costituito da un'ampia zona collinare che degrada verso il mare con pendenze estremamente variabili in relazione alla strutturazione idrografica. Nell'ambito della nostra area di riferimento prevalgono comunque le superfici con pendenza maggiore del 30%.

3.1.2. Aspetti climatici

I dati presi in esame per la caratterizzazione climatica e fitoclimatica dell'area si riferiscono alla stazione di Valmontagnana, di cui sono disponibili 17 anni di osservazione (figura 3-5). Il

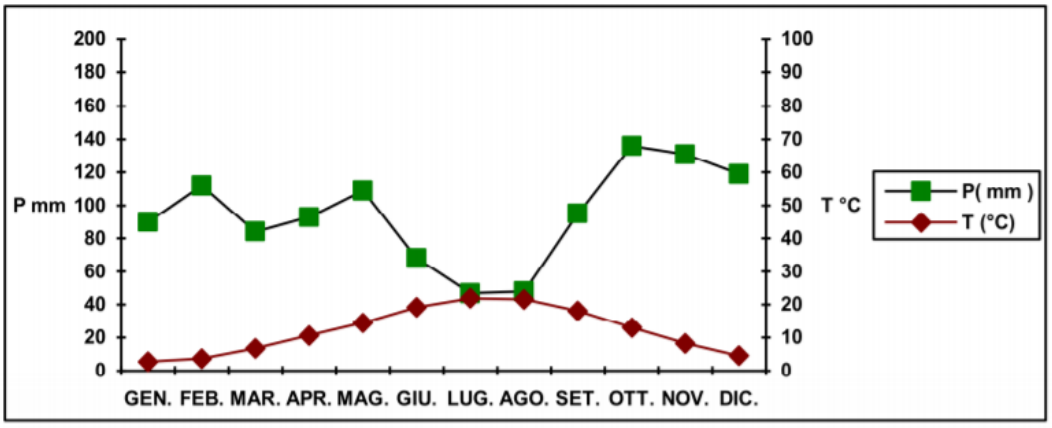


Figura 3-5: Diagramma di Bagnouls e Gaussen (semplificato) per la stazione di "Valmontagnana"

diagramma termopluviometrico di Bagnouls e Gaussen per la stazione di Valmontagnana, mostra che la distribuzione mensile delle piogge presenta un massimo assoluto autunnale nel mese di ottobre (136 mm) ed un minimo estivo nel mese di luglio (47 mm); altrettanto basse sono comunque le precipitazioni del mese di agosto (48 mm). Per quanto riguarda le temperature il mese più caldo in assoluto è luglio, condizione ricorrente per le stazioni continentali marchigiane, mentre il mese più freddo è gennaio, seguito da dicembre e febbraio. L'andamento delle temperature è regolare, con aumento da gennaio ad agosto e poi un graduale decremento. Confrontando le temperature dei vari mesi, possiamo rilevare come i mesi della seconda metà dell'anno siano marcatamente più caldi dei corrispondenti mesi della prima metà. Questo fenomeno è tipico di stazioni con caratteri di mediterraneità, in cui l'effetto del mare prolunga la stagione estiva verso l'inverno ed è un carattere che singolarmente si ritrova nella maggior parte delle stazioni dell'Italia Centro-Settentrionale. Il raffronto tra temperature e precipitazioni dato dal diagramma di Bagnouls e Gaussen, evidenzia una limitata aridità estiva, che si verificherà verosimilmente nelle annate più siccitose.

In base alla carta bioclimatica d'Italia (Pesaresi, et al., 2017), la ZSC appartiene al Macrobioclima temperato perlopiù nella variante submediterrranea. Tale variante indica una debole aridità estiva o per un periodo inferiore a due mesi consecutivi, come evidenziato anche dal diagramma termopluviometrico, e questo influisce in modo determinante nella caratterizzazione della vegetazione presente nella ZSC.

3.1.3. Stato attuale delle conoscenze della vegetazione

L'area di studio, oltre ad una considerevole ricchezza floristica, presenta una importante diversità fitocenotica e degli habitat (sensu Direttiva 92/43/CEE). La loro organizzazione spaziale è rappresentata dalle mappe della vegetazione e degli habitat di (Biondi, et al., 2009) (Costanzi, et al., 2018). La diversità fitocenotica è per lo più determinata dall'elevata variabilità delle caratteristiche litologiche e topografiche dell'area di studio. Facendo riferimento al recente lavoro di tesi magistrale di Costanzi Valentina (Costanzi, et al., 2018) relativo all'area del Monte Valmontagnana, le principali associazioni vegetali presenti sono le seguenti:

Cytiso sessilifolii-Quercetum pubescentis: sono boschi a dominanza di *Quercus pubescens*, con una *canopy* piuttosto aperta (85%) ed una altezza media di 7,5 m. Nello strato arboreo è costantemente presente *Fraxinus ornus*, spesso *Ostrya carpinifolia* mentre è meno frequente *Acer obtusatum*. Lo strato arbustivo (*Juniperus oxycedrus, Cotinus coggygra, Spartium junceum* e *Cytisus sessilifolius*) è piuttosto abbondante. Nello strato erbaceo sono frequenti *Osyris alba*, *Brachypodium rupestre* e *Teucrium chamaedrys*. Tale fitocenosi appartiene all'habitat 91AA*.

Cephalanthero longifoliae-Quercetum ilicis: sono boschi a dominanza di *Quercus ilex*, con una canopy totale (100%) e un'altezza media di 7m. Si sviluppa in aree molto pendenti su litologie di calcare massiccio e formazione del bugarone. Nello strato arboreo sono presenti *Fraxinus ornus*, *Acer monspessulanum*, *Ostrya carpinifolia, Quercus pubescens e Phillyrea latifolia*. Nello strato erbaceo sono frequenti: *Melica uniflora*, *Melittis melissophyllum*, *Rubia peregrina*, *Arabis turrita* e *Cyclamen hederifolium.* Tale fitocenosi appartiene all'habitat 9340.

Scutellario columnae-Ostryetum carpinifoliae: sono boschi con una canopy piuttosto densa e chiusa (95%) ed una altezza arborea media di 13 m. Nello strato arboreo sono presenti *Acer obtusatum, Fraxinus ornus, Quercus cerris, Corylus avellana, Sorbus torminalis e Quercus pubescens*. Nello strato arbustivo sono costantemente presenti, *Cotinus coggygria,*

Cornus mas, Crataegus monogyna e Euonymus latifolius. Nello strato erbaceo invece sono frequenti *Cyclamen hederifolium, Helleborus foetidus, Daphne laureola, Euphorbia amygdaloides, Hepatica nobilis, Buglossoides purpurocaerulea, Lathyrus venetus, Viola reichenbachiana, Primula vulgaris, Helleborus viridis* ssp. *bocconei Asparagus acutifolius* e spesso *Ruscus aculeatus*.

Asparago acutifolii-Ostryetum carpinifoliae: sono boschi con una *canopy* piuttosto chiusa (95%) ed una altezza media di circa 10m. Nello strato arboreo sono frequenti ed abbondanti *Quercus ilex, Acer monspessulanum, Acer obtusatum, Quercus pubescens, Sorbus aria* e *Phillyrea latifolia*. Nello strato arbustivo sono frequenti *Cotinus coggygria, Coronilla emerus, Juniperus oxycedrus, Viburnum tinus* e *Crataegus monogyna*. Nello strato erbaceo, invece sono frequenti *Daphne laureola, Euphorbia amygdaloides, Asparagus acutifolius, Hepatica nobilis, Brachypodium rupestre, Rubia peregrina, Ceterach officinarum, Arabis turrita, Echinops siculus* e *Cyclamen hederifolium*.

Spartio juncei-Cytisetum sessilifolii var. a Spartium junceum: rientrano in questa associazione sia cespuglieti che mantelli di vegetazione, caratterizzati in genere da una elevata copertura. Tale associazione si sviluppa prevalentemente su aree poco pendenti e su litologie calcareo-marnose (ad es. scaglia bianca) in seguito al recupero di aree prative abbandonate. Questa variante è legata a suoli più o meno evoluti e profondi ed è caratterizzata dalla rilevante presenza dello *Spartium junceum*.

***Spartio juncei-Cytisetum sessilifolii var. a Juniperus oxycedrus e J. Communis*:** tale associazione si sviluppa nei settori più elevati del Monte di Valmontagnana sui substrati calcarei. Rispetto alla variante precedentemente descritta, questa risulta essere più pioniera, riuscendo a svilupparsi anche su litosuoli. Tale associazione è riferibile all'habitat 5130 - Formazioni a Juniperus communis su lande o prati calcicoli.

Asperulo purpureae-Brometum erecti: tale associazione occupa perlopiù i settori sommitali di Monte Valmontagnana sui substrati calcarei e calcareo-marnosi. La fitocenosi appartiene all'habitat 6210 'Formazioni erbose secche seminaturali e facies coperte da cespugli su substrato calcareo (*Festuca Brometalia*)'.

Rimboschimenti: i rimboschimenti di conifere sono presenti in tutta l'area di studio, sui versanti con elevata pendenza e su litologie calcaree, con una diffusione piuttosto irregolare. Si tratta di una formazione boschiva non naturale ma ricreata artificialmente, quando nei decenni passati, si voleva rimboschire rapidamente le pendici delle montagne soggette ad erosione. Gli impianti sono stati eseguiti per lo più con resinose tra le quali: il *Pinus nigra*,

Pinus pinea, *Pinus pinaster*, *Pinus halepensis*, *Abies alba* e *Abies cephalonica*, oltre che una notevole quantità di cedri e cipressi.

Boschi ripariali: le formazioni ripariali sono attribuite al *Salici albae-Populetem nigrae* e al *Rubo-Salicetum albae.* Tali formazioni appartengono all'habitat 92A0 e occupano i settori planiziali sui depositi alluvionali recenti con elevata umidità.

3.2 Immagini telerilevate

Le immagini tele-rilevate sono capaci di fornire molteplici informazioni, sia qualitative che quantitative sulla natura delle superfici osservate. Il beneficio maggiore o più importante nell'usare il telerilevamento satellitare nel monitoraggio e nella mappatura della vegetazione e degli habitat, consiste nella multi-temporalità di tali immagini. Queste, infatti, documentano a intervalli regolari di tempo una stessa zona consentendo di estrarre ulteriori informazioni sulle variazioni nel tempo dell'ambiente naturale (Rodwell, et al., 2014). La frequenza di osservazione dei satelliti, che varia da più volte al giorno a 16-18 giorni, consente di comprendere il comportamento stagionale di caratteristiche biologicamente significative delle diverse specie (e comunità) vegetali e di descrivere la fenologia di una determinata superficie (ForWarn II, 2017).

Ad oggi, vi è una vasta tipologia di dati satellitari disponibili, che si distinguono in base alle diverse risoluzioni spaziali, temporali e radiometriche. Tra quelle gratuitamente accessibili e maggiormente utilizzate vi sono le immagini satellitari Landsat 8 e Sentinel-2. I satelliti di tipo Landsat 8, sono operativi dal 2013 ed hanno una risoluzione temporale di 16 giorni. Montano a bordo due sensori: l'Operational Land Imager (OLI) con una risoluzione spaziale di 30 metri, ed il Thermal Infrared Sensor (TIRS) con una risoluzione spaziale di 100 metri (NASA Landsat Science, 2020). I satelliti di tipo Sentinel-2 invece, lanciati in orbita nel 2015, si distinguono dai primi grazie ad una notevole riduzione dei tempi di rivisitazione, che sono di 5 giorni, e grazie al sensore multispettrale (MSI) che montano a bordo, in grado di acquisire immagini con una risoluzione spaziale di 10, 20 e 60 metri nelle diverse bande (European Space Agency, 2015). Nella figura 3-4 sono mostrate le bande spettrali investigate dai due diversi satelliti mentre in tabella 3-1 sono riportate le risoluzioni spaziali per le diverse bande Landsat 8 e Sentinel-2. Per entrambi i satelliti invece la risoluzione radiometrica risulta essere di 12 bit con una capacità di acquisire immagini in un range di valori di intensità luminosa che va da 0 a 4096. In appendice sono riportate ulteriori caratteristiche delle missioni Landsat 8 e Sentinel-2.

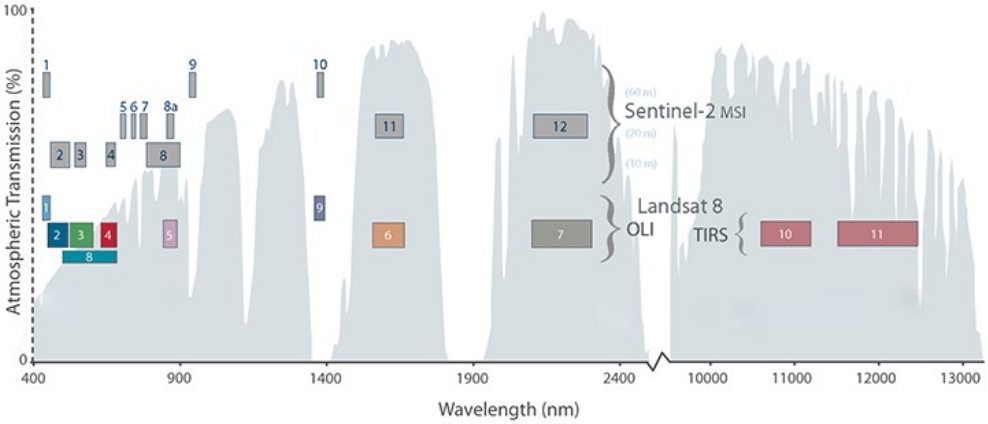


Figura 3-6: Risoluzione spettrale (bande) di Landsat 8 e Sentinel-2. Landsat 8, grazie ai due sensori OLI e TIRS acquisisce immagini su 11 canali (10 + pancromatico) nel visibile, vicino infrarosso (VNIR), nella banda dell'infrarosso ad onde corte (SWIR) e in quella dell'infrarosso termico (TIRS). Sentinel-2 è in grado invece di acquisire immagini su 13 canali nel visibile, vicino infrarosso (VNIR) e nella banda dell'infrarosso ad onde corte (SWIR) (European Space Agency, 2015).

Tabella 3-1: Risoluzioni spaziali Landsat 8 e Sentinel-2

Landsat 8 OLI				**Sentinel-2**			
bande	*Regione spettrale*	*Lunghezza d'onda*	*Risoluzione (m)*	*bande*	*Regione spettrale*	*Lunghezza d'onda*	*Risoluzione (m)*
1	Ultra-blue	0.433-0.453	30	1	Coastal aerosol	0.433	60
2	Blue	0.450-0.515	30	2	Blue	0.490	10
3	Green	0.525-0.600	30	3	Green	0.560	10
4	Red	0.630-0.680	30	4	Red	0.665	10
5	NIR	0.845-0.885	30	5	Red Edge	0.705	20
6	SWIR	1.560-1.660	30	6	Red Edge	0.740	20
7	SWIR	2.100-2.300	30	7	Red Edge	0.783	20
8	Pan	0.500-0.680	15	8	NIR	0.842	10
9	Cirrus	1.360-1.390	30	8A	Red Edge	0.865	20
10	TIR	10.60-11.20	100	9	Water vapour	0.945	60
11	TIR	11.50-12.50	100	10	SWIR - Cirrus	1.375	60
				11	SWIR	1.610	20
				12	SWIR	2.190	20

Si utilizzeranno le immagini satellitari Landsat 8 per una classificazione '*unsupervised*' delle serie temporali NDVI per guidare il campionamento a terra della vegetazione (vedi sezione 4.1). Inoltre, effettueremo una classificazione '*supervised*' (vedi sezione 4.3) delle serie temporali Landsat 8 e Sentinel-2 e metteremo a confronto i risultati ottenuti.

3.2.1. Raccolta delle immagini Landsat 8 e Sentinel-2

Tramite il portale Earth Explorer del sito dell'USGS (https://earthexplorer.usgs.gov/), sono state collezionate 53 immagini Landsat 8 riferibili al periodo agosto 2013-aprile 2020. Tramite l'utilizzo, invece, del package "sen2r" (Ranghetti & Busetto, 2020) del software 'R' (R Development Core Team, 2013), sono state collezionate 93 immagini Sentinel-2 riferibili al periodo aprile 2017-aprile 2020.

Il package "sen2r" permette di accedere all'archivio dei prodotti Sentinel-2, e di poterne elaborare i dati una volta selezionata l'area di interesse, la finestra temporale e la percentuale di copertura nuvolosa massima accettabile all'interno della scena. Tale strumento mette a disposizione degli utenti diverse tipologie di prodotti, distinti in base al livello di pre-processamento, tra cui immagini Livello-1C con valori di riflettanza TOA (*Top Of Atmosphere*) e immagini Livello-2A con valori di riflettanza BOA (*Bottom Of Atmosphere*). Nel caso in cui le immagini di Livello-2A non fossero prontamente disponibili, l'utente ha la possibilità di generarle a partire da quelle di Livello-1C presenti nell'archivio. Ciò è reso possibile dall'utilizzo dell'algoritmo "sen2cor" (European Space Agency, 2020), il quale, usando come dati di input i valori di riflettanza TOA delle immagini di Livello-1C, esegue la correzione atmosferica e topografica per ottenere valori di riflettanza BOA.

A supporto del nostro studio di monitoraggio della vegetazione, per soddisfare gli obiettivi prefissati, sono state collezionate immagini di Livello-2A (corrette sia atmosfericamente che topograficamente) disponibili.

3.2.2. Pre-processamento delle immagini Landsat 8 e Sentinel-2

Tutte le immagini Landsat 8 e Sentinel-2, già atmosfericamente e topograficamente normalizzate, sono state ritagliate con i limiti amministrativi della ZSC 'Gola di Frasassi' IT5320003. Successivamente sono state identificate e rimosse dalle immagini le nuvole e le relative ombre proiettate sulla superficie terrestre al fine di ottenere dati liberi da eventuali distorsioni, pienamente utilizzabili nelle analisi ecologiche richieste dagli obiettivi di questo studio. Tale procedimento prevede una fase di rilevamento all'interno della scena dei pixel

identificabili come nuvola e ombra delle nuvole e una seconda fase di mascheramento di tali pixel. Esistono diverse metodologie per rilevare le nuvole all'interno della scena indagata e quello da noi utilizzato si basa sull'analisi del loro specifico comportamento spettrale. Generalmente, infatti, le nuvole risultano avere una bassa riflettanza nella regione dell'infrarosso termico e un'alta riflettanza nelle lunghezze d'onda più corte, specialmente nel Blu (Leutner, et al., 2019). Per il mascheramento delle nuvole, dunque, e delle loro ombre sulla superficie abbiamo utilizzato il *Normalized Difference Thermal Cloud Index* (NDTCI) (Leutner, et al., 2019), che nel caso specifico, ha previsto l'utilizzo della banda 2 del Blu (458-523 nm) e 11 dello SWIR (1565-1655 nm). Con l'obiettivo di escludere dall'analisi tutti i pixel associati a nuvole e ombre abbiamo impostato per ogni scena un valore soglia di NDTCI, che fosse in grado, caso per caso, di interpretare al meglio la copertura nuvolosa. Nel caso delle nuvole, il valore soglia di NDTCI era generalmente compreso tra -0.1 e 0.15, mentre nel caso delle ombre delle nuvole tra 0.80 e 0.87. Tutti i pixel che rientravano all'interno di questi valori, automaticamente venivano esclusi dalla scena. Questo semplice approccio ci ha permesso di ottenere scene prive di nuvole (ad esempio vedi figura 3-7).

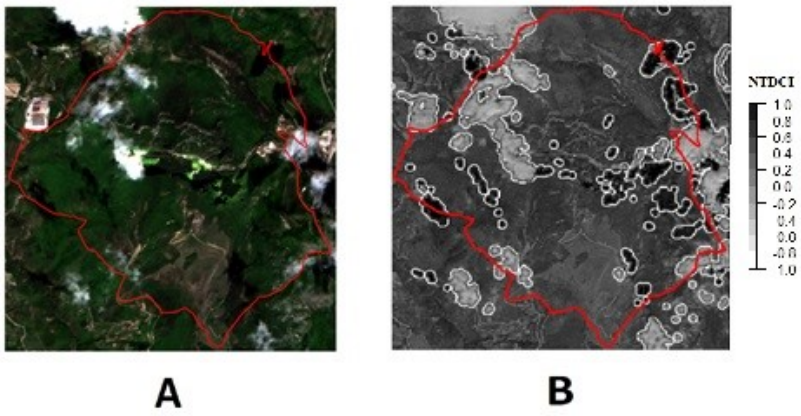


Figura 3-7: Risultato dell'identificazione delle nuvole (ed ombre) per l'immagine Sentinel-2 del 21/04/2017. A) Immagine RGB dove è evidente la copertura nuvolosa. B) Immagine NTDCI con identificazione delle nuvole e delle loro ombre successivamente mascherate.

Prima di procedere alla realizzazione delle serie temporali è stato necessario effettuare la co-registrazione delle immagini in modo da poterle correttamente sovrapporre una all'altra, e ottenere così un perfetto allineamento degli strati informativi. La co-registrazione è un passo fondamentale nella pre-processamento delle immagini satellitari per l'analisi ecologica, dal

momento che un errore di co-registrazione può causare errori significativi come uno sfasamento dei pixel e quindi delle informazioni ivi contenute (Sundaresan, et al., 2007; Young, et al., 2017).

Tutte le fasi di pre-processamento sono state effettuate tramite specifiche librerie del software 'R'. In dettaglio, sono stati utilizzati il package 'RStoolbox' (Leutner, et al., 2019) e 'raster' (Hijmans, 2020).

3.3 Principali variazioni intra-annuali (stagionali) degli indici di vegetazione telerilevati

3.3.1. Serie temporali NDVI e di altri indici di vegetazione tele-rilevati

Per la realizzazione delle serie temporali, sono state utilizzate le 53 immagini di secondo livello Landsat 8, e le 93 immagini Sentinel-2.

Per tutte le scene acquisite e pre-processate (Landsat 8 e Senitnel 2) è stato eseguito il calcolo NDVI tramite l'utilizzo della banda del RED (ρ675) e della banda del NIR (ρ850). La formula utilizzata è dunque la seguente: (NIR-RED) / (NIR+RED). Le superfici NDVI ottenute sono state poi ordinate cronologicamente in funzione del DoY (Days of Year). Per le superfici derivate dalle immagini Landsat 8 è stato calcolato il valore NDVI medio bi-settimanale (26 bi-settimane in un anno), mentre per le superfici derivate dalle immagini Sentinel-2, che hanno una maggiore risoluzione temporale, è stato possibile calcolare anche il valore NDVI medio settimanale (52 settimane). I valori settimanali o bisettimanali sono stati interpolati tramite la "circular cubic splines regression" che permette di ottenere serie temporali 'lisciate' prive di 'noise data' e valori outliers (figure 3-8 e 3-9). La "circular cubic splines regression" implementata nei metodi di regressione GAM (generalized additive models) suddivide l'intervallo dei valori in sotto-intervalli (*knots*). Il numero dei sotto-intervalli con cui suddividere la curva, nel nostro caso è stato scelto dal software in relazione ad una procedura di cross-validation (library mgcv) (Wood, 2016). In questa maniera la procedura di interpolazione è in grado di individuare autonomamente il numero ottimale di sotto-intervalli per ottenere un miglior *fitting* dei punti.

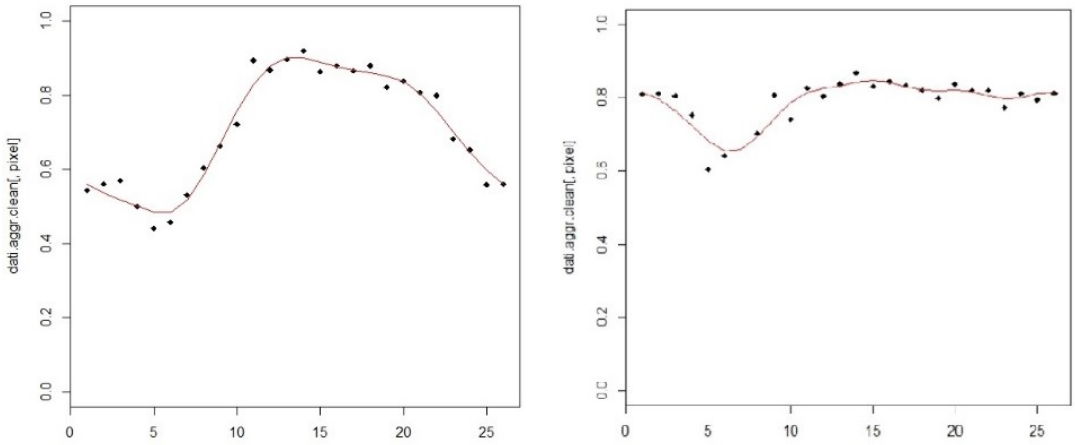


Figura 3-8: Interpolazione dei valori NDVI bisettimanali Landsat 8 di due pixel dell'area di studio attraverso il modello di regressione "cubic splines regression".

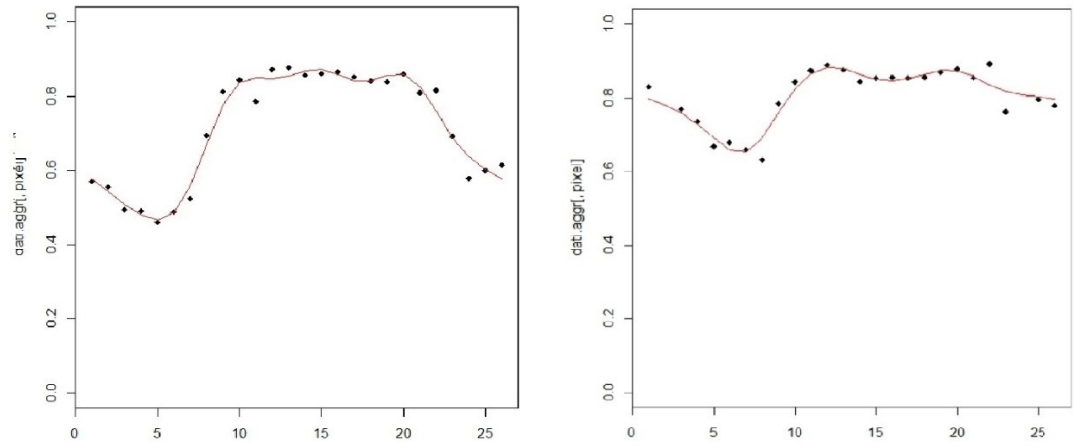


Figura 3-9: Interpolazione dei valori NDVI bisettimanali Sentinel-2 di due pixel dell'area di studio attraverso il modello di regressione "cubic splines regression".

L'uso delle serie temporali tele-rilevate rappresenta l'aspetto centrale della Land Surface Phenology (LSP) che indaga le variazioni stagionali e annuali delle superfici vegetate tramite l'utilizzo del telerilevamento. L'analisi delle serie temporali NDVI con l'analisi funzionale dei dati in particolare con la Functional Principal Component Analysis (FPCA) rappresenta un metodo innovativo per comprendere la dinamica fenologica di un paesaggio vegetale integrabile con le analisi fitosociologiche (Pesaresi, et al., 2020a).

La realizzazione delle serie temporali è stata fata tramite il software "R versione 3.6.0", il package 'Lubridate' (Grolemund & Wickham, 2011), 'RStoolbox' (Leutner, et al., 2019), 'raster' (Hijmans, 2020) e 'mgcv' (Wood, 2016).

Analogamente alle serie temporali NDVI, sono state realizzate serie temporali di altri indici vegetazionali che prendono in considerazione bande spettrali differenti, utili ad interpretare e discriminare specifiche caratteristiche della vegetazione (Hiphen, 2019; Xue & Su, 2017; Harris Geospatial, 2020). Oltre al comune indice NDVI, sono state realizzate le serie temporali dei seguenti indici:

Modified Chlorophyll Absorption in Reflectance Index (MCARI)

L'indice MCARI prende in considerazione la banda del NIR (ρ850), la prima banda del RED EDGE (ρ710) e la banda del GREEN (ρ570), ed è in grado di fornire dei valori di assorbimento della clorofilla senza che questi risultino essere influenzati dalle diverse condizioni di illuminazione, dalla riflettanza di sfondo del suolo o da altri oggetti non fotosintetici osservati (Daughtry, et al., 2000).

$$MCARI = ((\rho850-\rho710) – 0.2 \times (\rho850-\rho570)) / \rho710$$

Green Normalized Difference Vegetation Index (GNDVI)

Il GNDVI (Gitelson & Merzlyak, 1998) utilizza le bande del NIR (ρ850) e del GREEN (ρ570) ed è un indice di vegetazione comunemente usato per determinare l'assorbimento di acqua e azoto nella chioma della pianta.

$$GNDVI = (\rho850 - \rho570) / (\rho850 + \rho570)$$

Soil Adjusted Vegetation Index (SAVI)

L'indice SAVI (Qi, et al., 1994) è in grado di descrivere al meglio i sistemi dinamici suolo-vegetazione e viene infatti utilizzato per correggere l'indice NDVI nelle aree in cui la copertura vegetativa è bassa (< 40%). Le bande utilizzate da tale indice sono il NIR (ρ850) e la banda del RED (ρ675).

$$SAVI = ((\rho850 – \rho675) / (\rho850 + \rho675 + L)) \times (1+ L)$$

L è il fattore di correzione di luminosità del suolo. Tale valore varia in base alla quantità o alla copertura della vegetazione presente: nelle regioni a vegetazione molto alta, L = 0; mentre in aree prive di vegetazione, L = 1. In genere, un L = 0.5 funziona bene nella maggior parte delle situazioni ed è il valore predefinito utilizzato.

Normalized Difference Indices ND705

Tale indice (Sims & Gamon, 2002) utilizza la banda del NIR (ρ850) e la seconda banda del RED EDGE (ρ730) attraverso la seguente formula:

$$ND705 = (\rho850 - \rho730) / (\rho850 + \rho730)$$

Relativamente all'indice NDVI, le serie temporali sono dunque state derivate sia da immagini Landsat 8 che da immagini Sentinel-2, e in questo ultimo caso prendendo in considerazione una volta i valori medi bi-settimanali e una volta quelli settimanali, mentre per tutti gli altri indici vegetazionali utilizzati, le serie temporali sono state derivate esclusivamente dalle immagini Sentinel-2, prendendo in considerazione i valori medi settimanali (52 valori).

3.3.2. La Functional Principal Component Analysis (FPCA) delle serie temporali

Le serie temporali dei diversi indici vegetazionali bene si adattano a essere analizzate tramite le tecniche 'Functional Data Analysis'(FDA), che permettono di discriminarle in accordo alle loro principali variazioni stagionali. In particolare, è stata utilizzata la Functional Principal Component Analysis (FPCA) in grado di considerare come unità statistica di base l'intera serie temporale. La PCA standard, invece, avrebbe considerato i valori medi bi-settimanali o settimanali degli indici come valori indipendenti svincolati dall'ordine cronologico e per tale ragione non è ottimale per l'analisi delle serie temporali. I più importanti risultati della FPCA sono gli 'eigenvalues' (che misurano la variazione spiegata da ogni componente), gli 'scores' (punteggi) che di fatto quantificano le somiglianze tra le serie temporali e le 'eigenfunction' o armoniche (che sostituiscono gli 'eigenvector' nella PCA classica), che mostrano le maggiori variazioni funzionali per ogni componente (Hurley, et al., 2014). Con l'obiettivo di identificare le principali variazioni spazio-temporali fenologiche della vegetazione abbiamo applicato la FPCA alle serie temporali dei diversi indici vegetazionali studiati. Gli scores delle principali componenti funzionali di fatto rappresentano delle variabili quantitative che descrivono le principali variazioni (ortogonali) fenologiche

nell'area di studio e sono l'oggetto principale delle successive analisi. Gli scores (che descrivono in forma quantitativa le principali variazioni stagionali fenologiche) saranno usati sia per la classificazione *unsupervised* delle serie temporali, al fine di ottenere i '*pheno-clusters'* utili a guidare il rilevamento della vegetazione a terra (in dettaglio sezione 4.1.1.), e sia come predittori spaziali nel processo di mappatura o classificazione *supervised (*in dettaglio sezioni 4.4 e 4.5).

3.4 Lo studio della vegetazione

3.4.1. La fitosociologia e il rilievo fitosociologico

La fitosociologia è una disciplina scientifica con un'alta connotazione ecologica e biogeografica e presenta i seguenti capisaldi: (i) lo studio delle comunità vegetali, della loro composizione e del loro ruolo ecologico, attraverso il riconoscimento di un *pool* di specie 'caratteristiche' che permettano di classificare la vegetazione in unità discrete chiamate "associazioni vegetali"; (ii) l'analisi delle relazioni tra le comunità vegetali e le condizioni ambientali (sinecologia); (iii) lo studio dell'evoluzione delle comunità vegetali dalla loro nascita al loro declino (Singenetica); (iv) lo studio della distribuzione delle comunità vegetali (Sincorologia); la classificazione e l'ordinamento delle comunità vegetali all'interno di una scala gerarchica (Sinsistematica). La fitosociologia si basa, inoltre, su tre livelli di analisi. Il primo livello è quello floristico-ecologico basato sul riconoscimento delle associazioni vegetali. Il secondo è quello sinfitosociologico basato sullo studio delle relazioni temporali tra le diverse associazioni, in grado di definire le serie dinamiche di vegetazione. Il terzo è quello geosinfitosociologico, definito anche fitosociologia di paesaggio che attraverso la conoscenza della distribuzione spaziale delle diverse serie di vegetazione, riconosce unità paesaggistiche omogenee in termini di caratteristiche bioclimatiche e geografiche (Pesaresi, et al., 2020b). In questo lavoro ci soffermiamo sull'analisi e identificazione delle distinte associazioni vegetali presenti all'interno della nostra area di studio.

Strumento base per tale studio è il rilievo fitosociologico, proposto da Braun-Blanquet (Braun-Blanquet, et al., 1932). Questo consiste nel selezionare un'area omogenea da un punto di vista vegetazionale e ambientale. Per tale area si riportano le principali caratteristiche stazionali (es. altitudine, esposizione, pendenza, litologia, morfologia, etc). Successivamente all'interno dell'area omogenea, più precisamente nell'area minima di rilevamento, sono elencate tutte le specie vegetali presenti. Quindi, ad ogni specie viene associato un valore quantitativo in accordo alla scala di abbondanza-dominanza di Braun-Blanquet i cui valori corrispondono a distinte classi percentuali (non equidistanti) di copertura: 5 (75-100%), 4 (50-

75%), 3 (25-50%), 2 (5-25%), 1 (1-5%), + (specie è presente con ricoprimento molto scarso). Le stime sono fatte visivamente. Infine, si quantificano le altezze e i gradi di ricoprimento complessivi dei diversi strati della vegetazione (es. strato arboreo, lianoso, arbustivo, erbaceo per le foreste).

3.4.2. Strategia di campionamento fitosociologico

Per effettuare un campionamento fitosociologico efficiente in termini di tempo e di costi, i siti su cui effettuare i rilievi fitosociologici sono stati selezionati adottando un campionamento randomizzato a strati. Gli strati del campionamento sono rappresentati dalle classi ottenute da una preliminare classificazione delle serie temporali NDVI Landsat 8 (pheno-clustering) (Pesaresi, et al., 2020b). Per ottenere i 'pheno-clusters', abbiamo applicato la FPCA alle serie temporali NDVI Landsat 8 esclusivamente per l'area Monte di Frasassi. Quindi abbiamo applicato la tecnica di clustering 'unsupervised' delle K-medie agli FPCA 'scores' delle prime tre componenti principali. La funzione "cascadeKM" del pacchetto "vegan" in 'R', ci ha permesso di identificare (tramite il Simplex Structural Index) il numero ottimale di clusters (compreso tra 3 e 15). I cluster ottenuti, definibili 'pheno-clusters', rappresentano gruppi di pixel, e quindi territori, con caratteristiche fenologiche e/o dinamiche NDVI distintamente omogenee. In accordo ai 'pheno-clusters' ottenuti, che ipotizziamo siano corrispondenti alle diverse fitocenosi nell'area di studio, sono stati collocati i punti di campionamento in modo proporzionale alla superficie di ogni cluster. I punti selezionati in accordo ai 'pheno-clusters' e alle caratteristiche topografiche dell'area, sono stati inseriti in Locus GIS, un'applicazione Android adatta all'uso di dati geospaziali su telefoni o tablet, che supporta file vettoriali (es. shp) e ne consente la visualizzazione sulla mappa, e la loro modifica (Asamm Software, 2014). Tramite Locus Gis è stato possibile raggiungere i luoghi dove effettuare i rilievi fitosociologici secondo la metodologia precedentemente descritta. Il campionamento così eseguito, ci ha permesso, di costituire una matrice fitosociologica bruta multidimensionale (69 rilievi x 171 specie) che rappresenta la variazione delle abbondanze delle specie vegetali nell'area del Monte Frasassi.

3.4.3. Definizione delle associazioni vegetali: cluster analysis dei dati fitosociologici

Le analisi fitosociologiche di campo condotte in questo studio (relative al Monte Frasassi), unitamente a quelle effettuate sul Monte Valmontagnana in Costanzi et al., (2018), ci hanno consentito di ottenere una matrice fitosociologica dei dati di abbondanza delle specie vegetali dell'intera ZSC Gola di Frasassi.

Per discriminare le comunità vegetali presenti, la partizione della matrice fitosociologica è stata generata mediante successive divisioni (clustering gerarchico divisivo).
La matrice è stata dapprima partizionata tramite una *cluster analysis* gerarchica (legame Ward) applicando la distanza della corda sui valori percentuali di abbondanza delle specie. Di fatto tale cluster ha l'obiettivo di partizionare la matrice in accordo alle principali fisionomie forestali (attribuendo ad una specifica categoria fisionomica anche quei rilievi in cui non è presente una netta dominanza di una delle specie arboree). I dati percentuali, infatti, durante il clustering danno maggior peso alle specie arboree (figura 3-9 A). La prima *cluster analysis* ha individuato tre principali cluster corrispondenti ai boschi a dominanza di *Ostrya carpinifolia*, *Quercus ilex* e *Quercus pubescens*. All'interno di ognuno dei tre cluster è stata effettuata una *Fuzzy cluster analysis* (identificando il numero ottimale di gruppi tramite l'indice PEN). I dati di abbondanza delle specie sono stati preventivamente *log chord* trasformati allo scopo di normalizzare l'effetto della copertura tra le specie arboree, arbustive ed erbacee. In questa maniera anche le specie di piccole dimensioni come quelle erbacee hanno un ruolo importante durante il clustering (figura 3-9 B). Tali analisi in definitiva hanno permesso di raggruppare i siti forestali (rilievi fitosociologici) sulla base sia della similarità fisionomica che floristica.

Figura 3-10: Rappresentazione grafica delle specie vegetali proporzionale ai valori di abbondanza utilizzati nella cluster analysis della vegetazione. A) I Valori percentuali di abbondanza danno un peso maggiore alle specie arboree. Tali valori sono adatti per una analisi fisionomica. B) la normalizzazione (log chord) dei valori percentuali fa emergere l'importanza delle specie erbacee e riduce la differenza con quelle arboree. Tali valori

sono utili per l'individuazione delle associazioni vegetali (clustering) all'interno di ciascuna categoria fisionomica (Podani, 2007).

3.5 Mappatura supervised della vegetazione basata sulla fenologia tele-rilevata e sulla topografia

3.5.1. Random forest

Per discriminare e mappare le tipologie vegetazionali è stato usato come classificatore supervised il Random Forest (RF). Il RF è un metodo di classificazione basato su alberi decisionali non correlati, in grado di aggregare i risultati di più alberi (*ntree*) per incrementare l'accuratezza della classificazione finale. Gli alberi decisionali vengono creati da sottoinsiemi casuali del nostro training data definiti "*in-bag-samples*", che risultano essere, di fatto, diversi dal data set originario. Alcuni dati non vengono quindi presi in considerazione nella costruzione di uno specifico albero, e vengono definiti "*out-of-bag samples*". Questi dati ci permettono di fare una previsione di quello che viene definito errore "*out-of-bag*" (OOB), in grado di stimare il tasso di errore del classificatore e di convalidare, di fatto, la previsione del modello. La valutazione dell'errore e quindi dell'accuratezza della mappatura avviene tramite il calcolo delle "matrici di confusione", dette anche matrici di errore e tramite il calcolo della '*Producer's accuracy'* e della '*User's accuracy'*. La '*Producer's accuracy'* si ottiene dividendo il numero dei pixel classificati correttamente in una categoria per il numero dei punti rilevati a terra per quella categoria. La '*User's accuracy'* invece si ottiene dividendo il numero di pixel classificati correttamente in una categoria per il numero totale dei punti classificati in quella determinata categoria (Congalton, 2001).

Per discriminare e mappare le tipologie vegetazionali è stato usato come classificatore supervised il Random Forest (RF). Il RF è un metodo di classificazione basato su alberi decisionali non correlati, in grado di aggregare i risultati di più alberi (*ntree*) per incrementare l'accuratezza della classificazione finale. Gli alberi decisionali vengono creati da sottoinsiemi casuali del nostro training data definiti "*in-bag-samples*", che risultano essere, di fatto, diversi dal data set originario. Alcuni dati non vengono quindi presi in considerazione nella costruzione di uno specifico albero, e vengono definiti "*out-of-bag samples*". Questi dati ci permettono di fare una previsione di quello che viene definito errore "*out-of-bag*" (OOB), in grado di stimare il tasso di errore del classificatore e di convalidare, di fatto, la previsione del modello. La valutazione dell'errore e quindi dell'accuratezza della mappatura avviene tramite il calcolo delle "matrici di confusione", dette anche matrici di errore e tramite il calcolo della '*Producer's accuracy'* e della '*User's accuracy'*. La '*Producer's accuracy'* si ottiene

dividendo il numero dei pixel classificati correttamente in una categoria per il numero dei punti rilevati a terra per quella categoria. La '*User's accuracy'* invece si ottiene dividendo il numero di pixel classificati correttamente in una categoria per il numero totale dei punti classificati in quella determinata categoria (Congalton, 2001). Il RF classifica i predittori, in accordo alla loro capacità di discriminare le classi target. L'importanza dei predittori viene valutata sulla base dell'indice normalizzato *Mean Decrease Accuracy.* Più alto sarà il valore dell'indice, maggiore sarà l'importanza del predittore.

3.5.2. Training data

Per effettuare una classificazione *supervised* delle associazioni vegetali e una loro mappatura, è necessario costruire un set di dati di riferimento (training data) delle classi target da mapper (tipologie vegetazionali) che sia omogeneamente distribuito nell'intera area di studio. Il set di dati di riferimento finale (training data) è stato ottenuto combinando il risultato della *cluster analysis* dei rilievi fitosociologici con ulteriori ispezioni speditive in campo (che hanno permesso di attribuire i pixel visitati a uno dei gruppi identificati tramite la *cluster analysis*) e con l'interpretazione visiva di immagini aeree ad alta risoluzione utilizzata esclusivamente per le classi target non rilevate in campo (es. le aree coltivate o post-abbandono, le aree urbane, i rimboschimenti e le aree ripariali).

3.5.2. Predittori spaziali

Il RF è stato applicato agli scores individuati dalla FPCA delle serie temporali dei diversi indici vegetazionali (NDVI Landsat 8, NDVI Sentinel-2, MCARI, GNDVI, ND705 e SAVI). La producer's accuracy, la user's accuracy e l'accuratezza globale delle mappature ottenute ci ha permesso di confrontare le perfomance dei diversi indici utilizzati. Poiché la topografia e la litologia possono contribuire alla spazializzazione della vegetazione, il RF è stato applicato anche alle principali variazioni topografiche e litologiche dell'area calcolati nella tesi di Valentina Costanzi (2018). Questo ci ha permesso di confrontare il contributo della topografia rispetto a quello della fenologia.

4 RISULTATI

4.1 Studio della vegetazione

4.1.1. Pheno-clustering delle serie temporali NDVI del Monte Frassasi e campionamento fitosociologico

L'ordinamento cronologico delle mappe NDVI collezionate ci ha permesso di ottenere 2852 serie NDVI bisettimanali (figura 4-1): ognuna per i pixel (30m di risoluzione) contenuti all'interno della superficie forestata del Monte Frasassi.

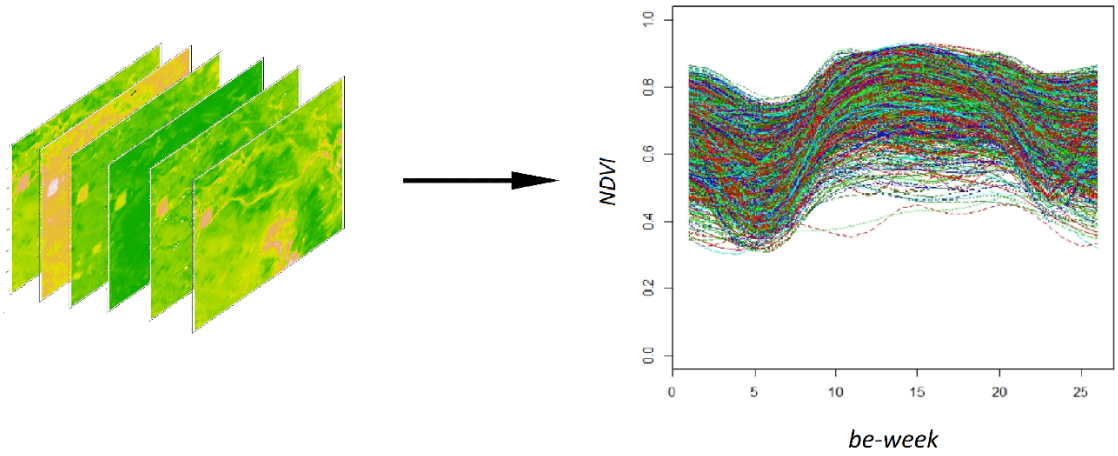


Figura 4-1: Le 2852 serie temporali NDVI bisettimanali derivate delle immagini Landsat 8.

La FPCA delle serie NDVI bisettimanali Landsat 8 dell'area forestale del Monte Frasassi ha identificato cinque componenti funzionali principali che rappresentano distinte variazioni stagionali NDVI. La componente FPCA1 rappresenta il 71.8% della variazione, mentre FPCA2 il 25.6%. Pertanto, le prime due componenti principali spiegano il 97.4% della variazione totale dei valori NDVI.

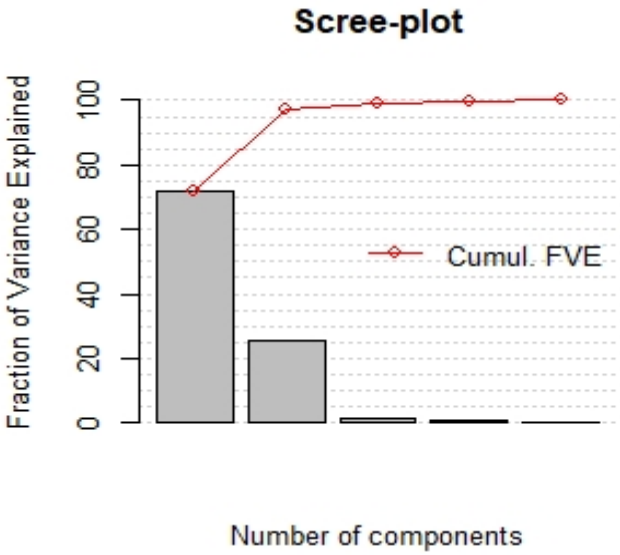


Figura 4-2: Barplot degli eignevalues delle Principali Componenti Funzionali identificate dalla FPCA.

Di seguito sono rappresentate le variazioni temporali e spaziali delle prime 3 componenti principali funzionali che spiegano circa il 99% della variazione totale NDVI.

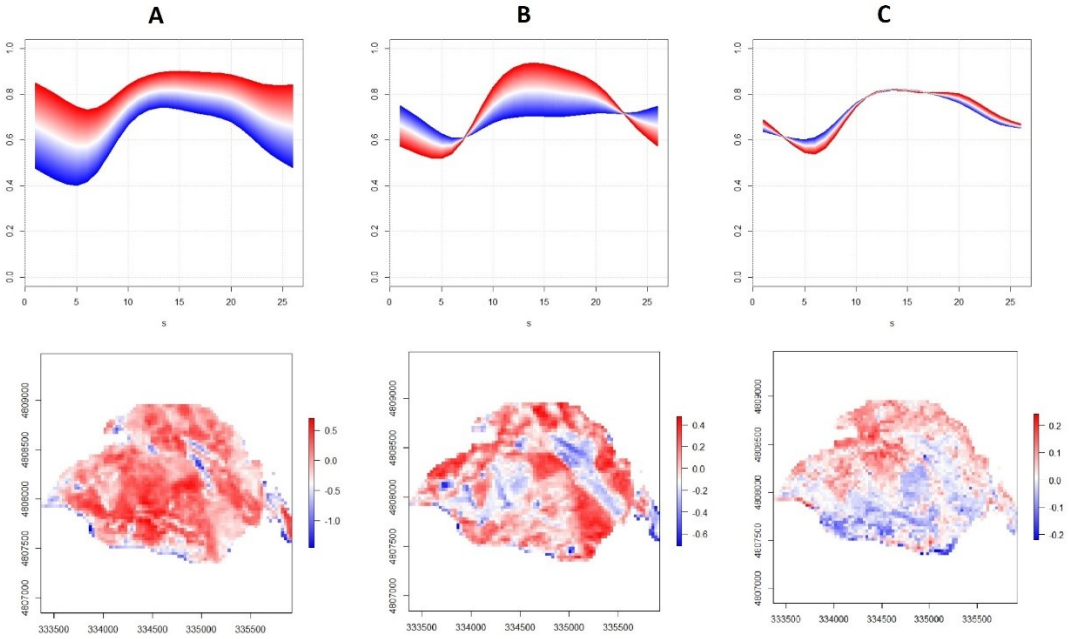


Figura 4-3: Variazioni spazio-temporali NDVI Landsat 8 identificate dalla Functional Principal Component Analysis. Sopra (A, B, C) sono visualizzati gli effetti delle prime tre componenti funzionali principali (variazioni stagionali NDVI) durante l'anno. La linea bianca rappresenta l'andamento NDVI medio nell'area di studio. In blu e rosso le serie

temporali che si comportano in maniera opposta rispetto alla media. Sotto con le stesse colorazioni sono rappresentati i pattern spaziali delle tre Principali Componenti Funzionali.

La componente FPCA1 (71.8%) rappresenta un pattern temporale comune a tutta l'area di studio che mostra un flesso invernale e un incremento dei valori estivi. FPCA1 ordina e separa i pixel che durante tutto l'anno sono sotto la media (in blu figura 4-3 A), rispetto a quelli che invece sono sopra la media (in rosso figura 4-3 A). Il pattern spaziale della FPCA1, e la sovrapposizione di questo all'ortofoto dell'area, ci ha permesso di dedurre che i valori sotto la media corrispondono a coltivi, praterie, arbusteti mentre i valori sopra la media corrispondono ai boschi. La componente FPCA2 (25.6%) ordina e separa invece i pixel che hanno bassi valori in inverno, ma che incrementano d'estate (in rosso figura 4-3 B) dai pixel che hanno valori più o meno costanti tutto l'anno, senza presentare un incremento estivo (in blu figura 4-3 B). La componente FPCA3 (1.3%) rappresenta uno shift nel periodo primaverile e autunnale, di alcune settimane. FPCA3 ordina e separa i pixel i cui valori sembrano abbassarsi in modo più accentuato prima della ripresa primaverile-estiva e che decrescono dopo in autunno (in rosso figura 4-3 C), rispetto a quelli che invece presentano un calo meno evidente nel periodo antecedente la ripresa estiva, e che decrescono prima in autunno (in blu figura 4-3 C).

La partizione delle k-medie effettuata sugli FPCA scores delle prime 3 componenti principali funzionali ha permesso di classificare le 2852 curve NDVI (pixels) in 8 gruppi come suggerito dal Simplex Structural Index (figura 4-5). Nella figura 4-6 è rappresentato lo spazio di ordinamento definito dalle prime 2 componenti funzionali e sovraimposti gli 8 gruppi ottenuti, mentre in figura 4-7 è rappresentato la mappa degli 8 gruppi (pheno-cluusters) utilizzata per selezionare i siti in cui effettuare i rilievi fitosociologici in maniera proporzionale alla superficie dei 'pheno-clusters' (tabella 4-1).

Tabella 4-1: Strategia di campionamento fitosociologico stratificato. Il numero dei rilievi fitosociologici è proporzionale alle superfici dei pheno-cluster (strati).

Pheno-cluster	n° di pixel	Sup. (ha)	n° dei rilievi
1	412	37.1	6
2	506	45.5	8
3	476	42.8	8
4	335	30.1	6
5	136	12.2	3
6	261	23.5	5
7	231	20.8	4
8	495	44.5	8

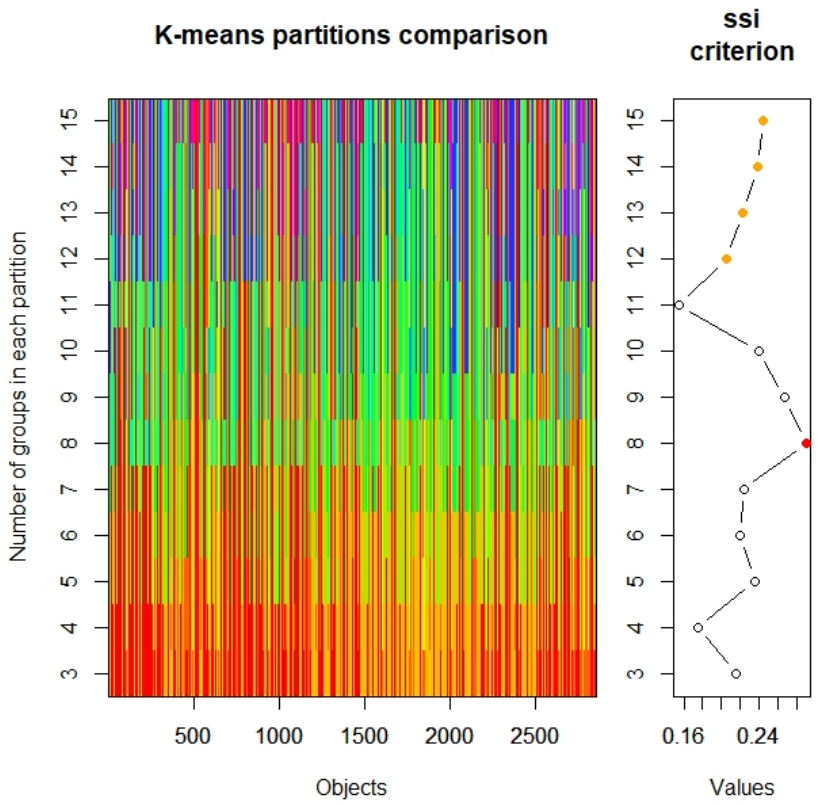


Figura 4-4: Comparazione delle partizioni delle K-medie generate dalla funzione "cascadeKM", con il numero ottimale di partizione (8 clusters) suggerito dall'indice SSI.

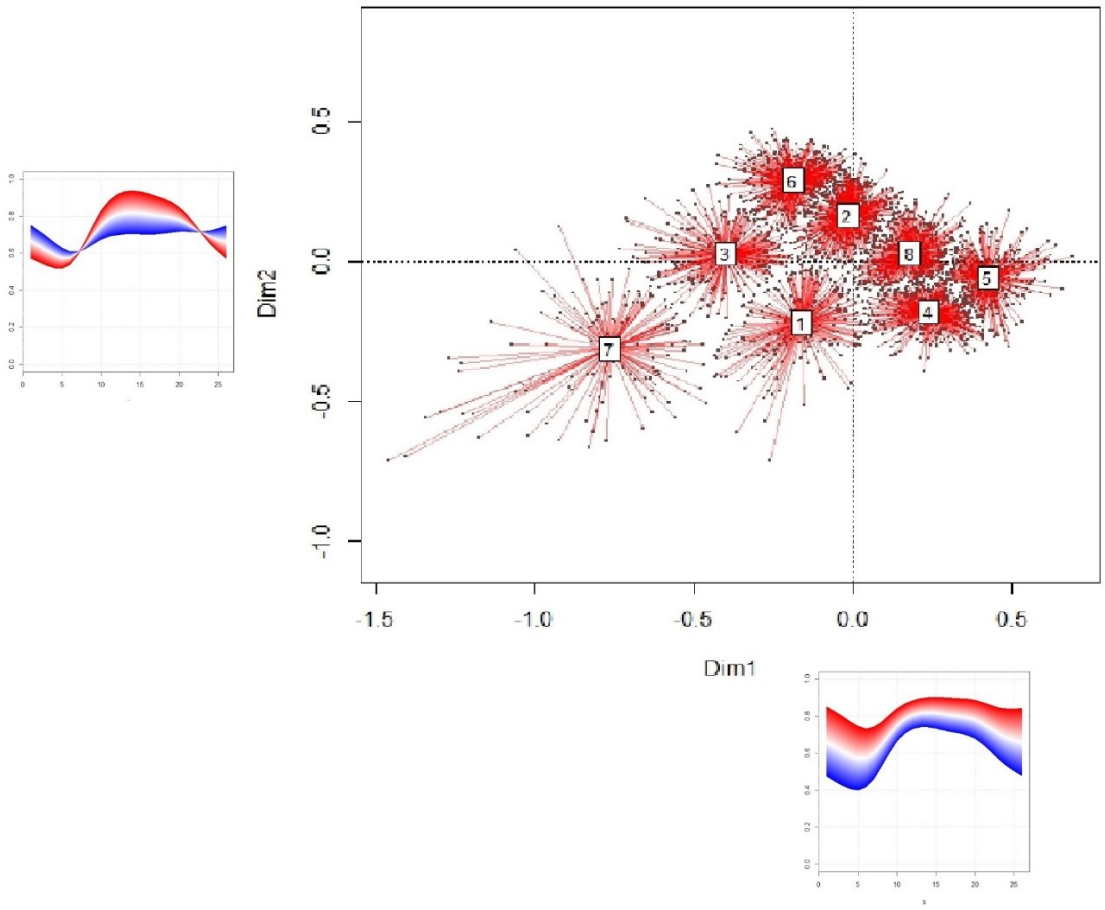


Figura 4-5: Scores ottenuti dalla FPCA con i relativi gruppi ottenuti dalla classificazione unsupervised. Da sinistra a destra (armonica FPCA 1) i gruppi NDVI sono ordinati secondo valori via via crescenti. Dal basso verso l'alto (armonica FPCA 2) i gruppi NDVI sono ordinati secondo crescenti valori dei mesi estivi e decrescenti valori dei mesi invernali.

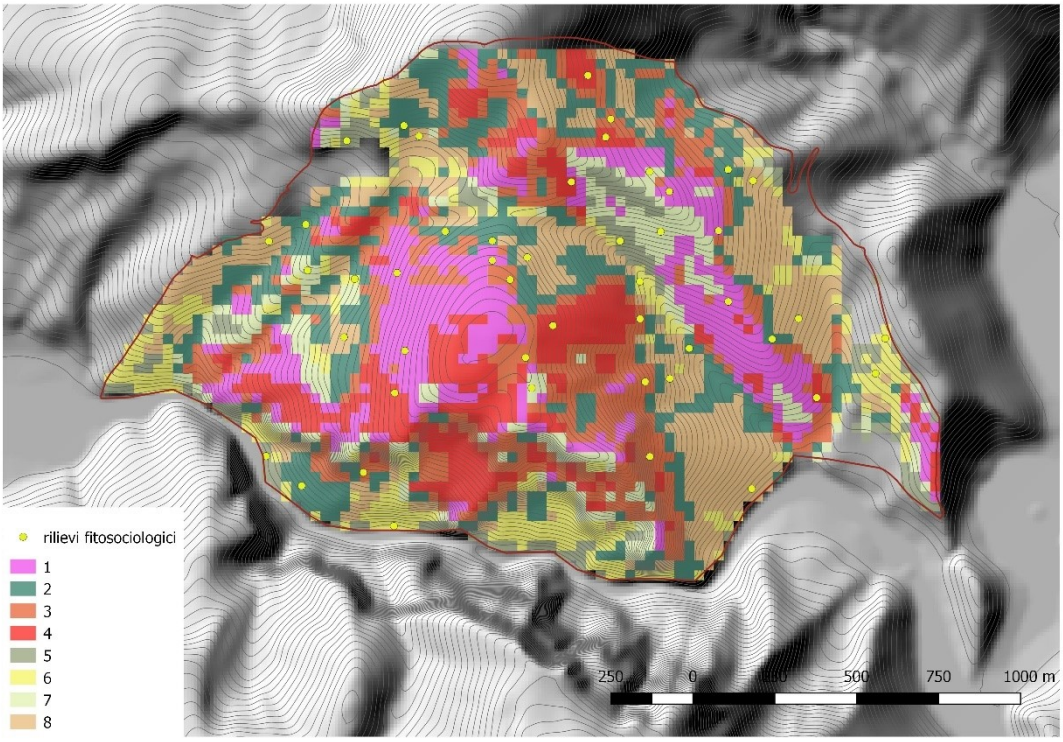


Figura 4-6 : Mappa dei pheno-clusters dell'area del Monte Frasassi utilizzata per pianificare il campionamento fitosociologico. I punti gialli rappresentano i rilievi fitosociologici effettuati.

4.1.2. Cluster analysis dei rilievi fitosociologici: le associazioni vegetali.

I rilievi fitosociologici effettuati sul Monte Frasassi unitamente a quelli del Monte Valmontagnana (Costanzi, et al., 2018) sono stati riuniti in una matrice di 69 rilievi e 171 specie che descrive la variazione delle abbondanze delle specie vegetali delle foreste e delle praterie nella ZSC del Monte Frasassi.

La prima *cluster analysis* ha individuato tre principali cluster corrispondenti ai boschi a dominanza di *Ostrya carpinifolia* (33 rilievi), *Quercus ilex* (17 rilievi) e *Quercus pubescens* (19 rilievi). Le tre tipologie sono state analizzate su base esperta e confrontate con le comunità forestali note per l'Appennino e attribuite quindi rispettivamente alle associaioni *Scutellario columnae-Ostryetum carpinifoliae* Pedrotti, Ballelli &Biondi ex Pedrotti, Ballelli, Biondi, Cortini & Orsomando 1980, *Cytiso sessilifolii-Quercetum pubescentis* Blasi, Feoli & Avena 1982 e *Cephalanthero longifoliae-Quercetum ilicis* Biondi & Venanzoni ex Biondi, Gigante, Pignattelli & Venanzoni 2002 le cui tabelle sono riportate in appendice (Tabelle A1,2,3).

La *fuzzy cluster analysis*, in accordo all'indice PEN) ha ulteriormente suddiviso le tre associazioni vegetali in due sottogruppi (subassociazioni o varianti) ciascuno, la cui interpretazione viene di seguito descritta.

I boschi di *Ostrya carpinifolia (Scutellario columnae-Ostryetum carpinifoliae)*, sono suddivisi in due differenti aspetti: uno mesofilo attribuito alla subassociaione *quercetosum cerridis* (O1) per lo più distribuita sul Monte Valmontagnana e l'altro più termofilo e rupestre (O2) per lo più distribuito sul Monte Frasassi. O1 si caratterizza per la presenza delle seguenti specie (assenti o presenti in maniera sporadica in O2): *Quercus cerris*, *Sorbus torminalis*, *Corylus avellana*, *Crataegus monogyna*, *Ilex aquifolium*, *Hepatica nobilis*, *Helleborus viridis ssp. bocconei*, *Lathyrus venetus*, *Dioscorea communis* e *Scutellaria columnae*. Al contrario, O2 è caratterizzato da una maggiore presenza di specie termofile quali *Juniperus oxycedrus*, *Viburnum tinus ssp. tinus*, *Pistacia terebinthus ssp. terebinthus*, *Cytisophyllum sessilifolium*, *Smilax aspera*, *Osyris alba*, *Arabis turrita*, e *Mycelis muralis* ssp. *muralis*. Le distinte composizioni specifiche delle due fitocenosi sopra descritte sono sintetizzate nella tabella fitosociologica in appendice (tabella A3). Gli ostrieti più mesofili sono caratterizzati da altezze dello strato arboreo comprese tra i 12 e i 16 metri, a differenza di quelle dell'ostrieto più termofilo quasi sempre comprese tra i 7 e gli 11 metri. In figura 4-7 sono mostrati i due plot identificati nelle due diverse tipologie di ostrieto.

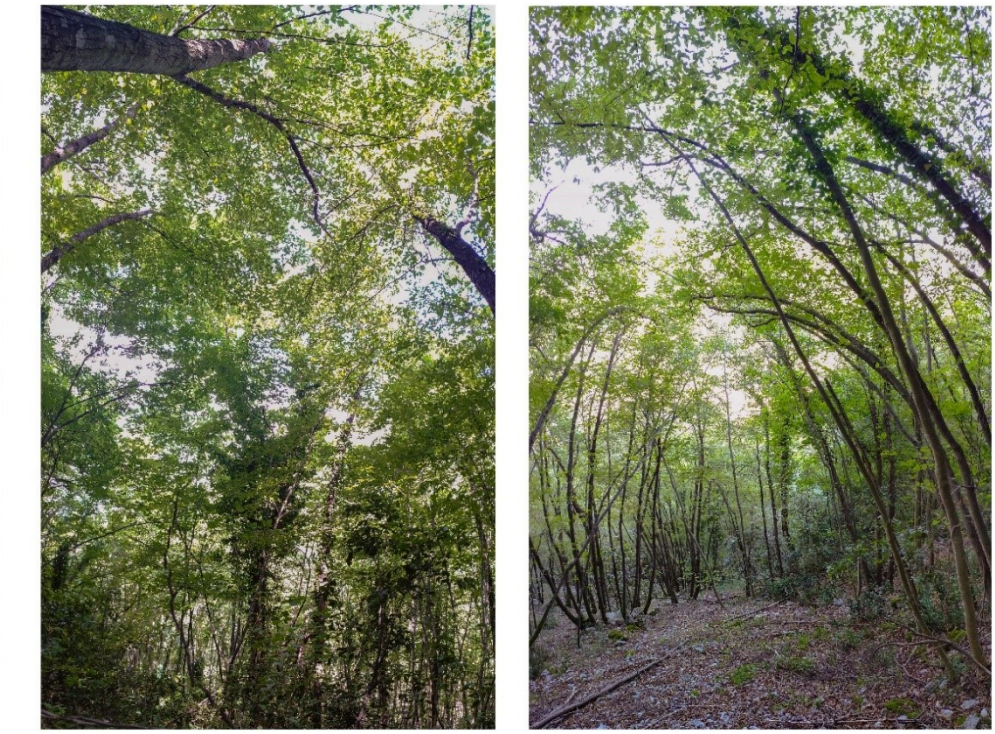


Figura 4-7: Siti rilevati fitosociologicamente e attribuiti ai boschi a dominanza di Ostrya carpinifolia. L'immagine di sinistra rappresenta il plot n° 64 eseguito sul Monte Frasassi e attribuito alla subass. quercetosum cerridis (O1). L'immagine di destra rappresenta il plot n° 87 eseguito sul Monte Frasassi ma attribuito alla formazione più termofila e rupestre (O2).

La *fuzzy cluster analysis* ha suddiviso anche i boschi a dominanza di *Quercus ilex (Cephalanthero longifoliae-Quercetum ilicis)* in due differenti aspetti: uno più mesofilo attribuito alla subassociazione *lathyretosum veneti* (L1) per lo più distribuito sul Monte Valmontagnana e uno più termofilo attribuito alla variante a *Cotinus coggygria* (L2) per lo più distribuita sul Monte Frasassi. L1 è una formazione mista di sempreverdi e caducifoglie caratterizzata dalla presenza di specie forestali e nemorali quali *Ostrya carpinifolia*, *Acer opalus ssp. obtusatum*, *Melica uniflora*, *Dioscorea communis*, *Stachys officinalis*, *Hepatica nobilis*, *Euphorbia amygdaloides* e *Mercurialis perennis*. Il carpino nero (*Ostrya carpinifolia*) in questa tipologia è piuttosto abbondante tanto da competere in alcuni casi con il leccio per il predominio dello strato arboreo. L2 è caratterizzata invece da specie arbustive tipiche delle formazioni di macchia quali *Pistacia terebinthus ssp. terebinthus*, *Phillyrea latifolia*, e

Viburnum tinus ssp. tinus, e *Cotinus coggygria* alle quali si aggiungono *Smilax aspera*, e *Osyris alba*. Le distinte composizioni specifiche delle due fitocenosi sopra descritte sono indicate nella tabella fitosociologica in appendice (tabella A1). In figura 4-8 è rappresentato un plot identificato nell'aspetto più termofilo di lecceta.

Figura 4-8: Sito rilevato fitosociologicamente e attribuito ai boschi a dominanza di Quercus ilex. L'immagine rappresenta il plot n° 84 individuato sul Monte Frasassi e attribuito alla variante a Cotinus coggygria (L2).

Nei boschi a dominanza di *Quercus pubescens* (*Cytiso sessilifolii-Quercetum pubescentis*) non si riscontrano significative differenze. Sono presenti specie quali *Juniperus oxycedrus*, *Cytisophyllum sessilifolium*, *Rosa canina*, *Teucrium chamaedrys*, *Cotinus coggygria* e *Pistacia terebinthus ssp. terebinthus*. La *fuzzy cluster analysis* ha comunque distinto un aspetto più termofilo e più ricco in arbusti (Q1), caratterizzato dalla presenza di *Phillyrea latifolia*, e *Viburnum tinus* ssp. *tinus*. Le composizioni specifiche delle fitocenosi sono sintetizzate nella tabella fitosociologica in appendice (tabella A2). In figura 4-9 è mostrato un plot identificato nell'aspetto più termofilo di querceto.

Figura 4-9: Sito rilevato fitosociologicamente ed attribuito ai boschi a dominanza di Quercus pubescens. L'immagine rappresenta il plot n° 71 eseguito sul Monte Frasassi e attribuito alla tipologia più termofila (Q1).

4.1.3. Training data

I rilievi fitosociologici sono stati integrati con 76 punti identificati tramite rilievi speditivi in campo e con ulteriori 136 punti identificati attraverso l'interpretazione visiva di immagini aeree ad alta risoluzione. Questi ultimi hanno permesso di incrementare i punti riferibili ai diversi gruppi identificati dalla *cluster analysis* e di ottenere dei punti anche per tutte le classi target da mappare che non sono state rilevate o che non sono rilevabili come le aree coltivate, i ginestreti, i ginepreti, le praterie, i rimboschimenti e le aree ripariali. In figura 4-10 sono mostrati tutti i punti del training data utilizzati per la mappatura della vegetazione fisionomica e fitosociologica di primo livello (al livello di associazione vegetale), mentre in figura 4-11 sono evidenti i punti del training data utilizzati per la mappatura della vegetazione fitosociologica di secondo livello (al livello di subassociazione e/o variante). Per i punti

fotointerpretati non è stato sempre possibile scendere al secondo livello (subassociazione o variante). Il training data è quindi costituito di 291 al primo livello e 274 per il secondo.

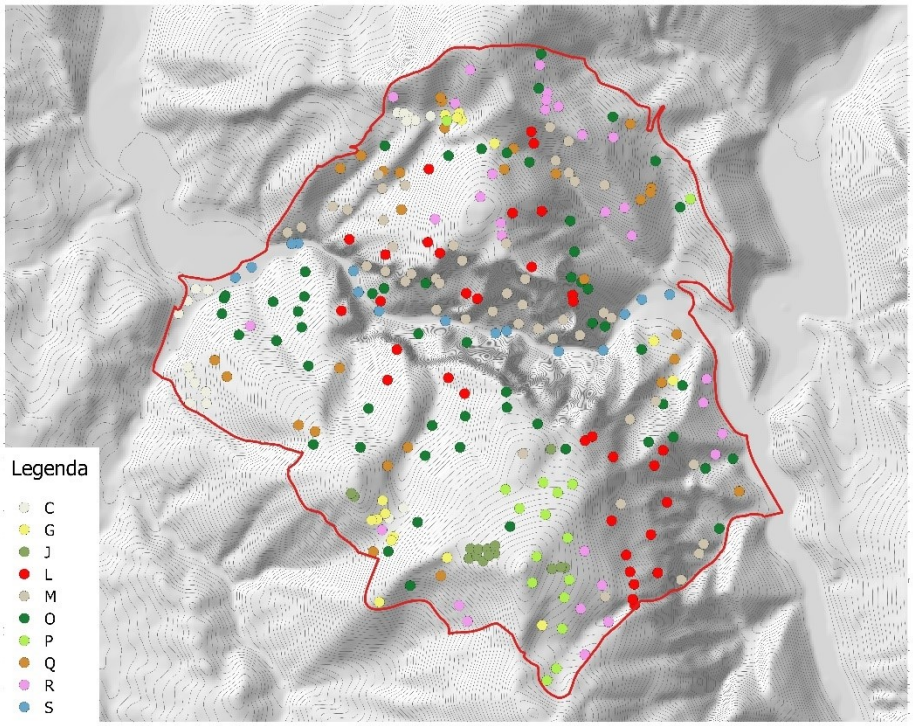


Figura 4-10: Il training data di primo livello composto da 291 punti. I diversi colori dei punti rappresentano le diverse categorie (fisionomiche e associazioni vegetali) da mappare: C-Coltivi; G-Spartio juncei-Cytisetum sessilifolii var. a Spartium junceum; J-Spartio juncei-Cytisetum sessilifolii var. a Juniperus oxycedrus e J. communis; L-Cephalanthero longifoliae-Quercetum ilicis; M- mosaico di gariga e macchia; O-Scutellario columnae-Ostryetum carpinifoliae; P-Asperulo purpureae-Brometum erecti; Q- Cytiso sessilifolii-Quercetum pubescentis; R- Rimboschimenti; S- zone ripariali (Salici-Populetum nigrae, Rubo-Salicetum albae);

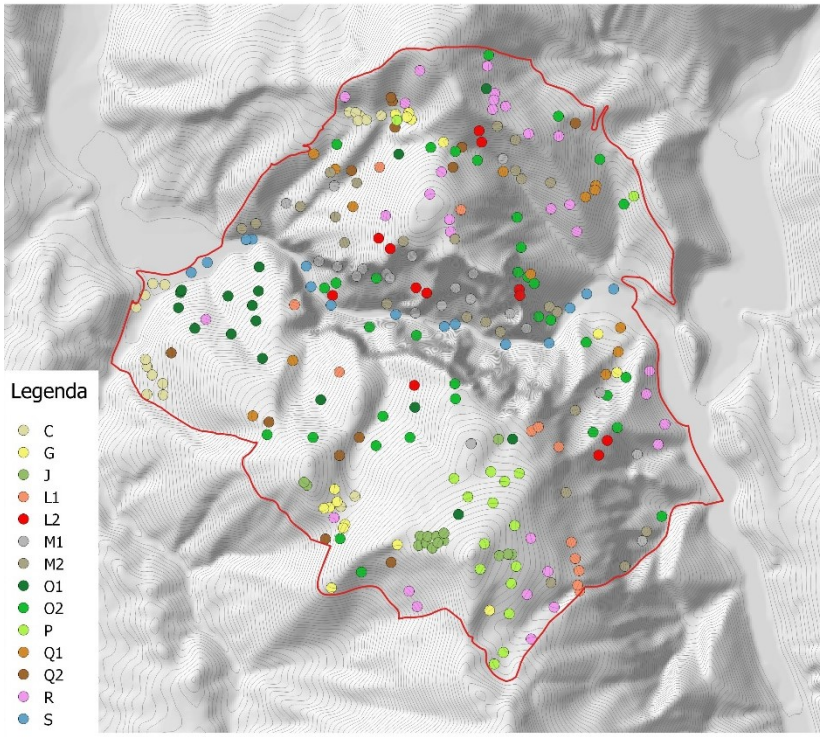


Figura 4-11: Il training data di secondo livello composto da 274 punti. I diversi colori dei punti rappresentano le diverse categorie (fisionomiche, subassociazioni e varianti) da mappare: C-Coltivi; G-Spartio juncei-Cytisetum sessilifolii var. a Spartium junceum; J-Spartio juncei-Cytisetum sessilifolii var. a Juniperus oxycedrus e J. communis; L1-Cephalanthero longifoliae-Quercetum ilicis subass. lathyretosum veneti; L2-Cephalanthero longifoliae-Quercetum ilicis variante a Cotinus coggygria; M1-vegetazione rupestre di parete; M2.- mosaico di gariga e macchia; O1- Scutellario columnae-Ostryetum carpinifoliae subass. quercetosum cerridis; O2- Scutellario columnae-Ostryetum carpinifoliae variante termofila e rupestre; P- Asperulo purpureae-Brometum erecti; Q- Cytiso sessilifolii-Quercetum pubescentis; R- Rimboschimenti; S-zone ripariali (Salici-Populetum nigrae, Rubo-Salicetum albae).

In accordo ai punti rilevati da Costanzi Valentina (Costanzi, et al., 2018) e grazie ai punti da noi rilevati in campo in maniera speditiva è stato possibile attribuire la categoria dei ginestreti all'associazione *Spartio juncei-Cytisetum sessilifolii* var. a *Spartium junceum*, la categoria dei ginepreti all'associazione *Spartio juncei-Cytisetum sessilifolii* var. a *Juniperus oxycedrus* e J. *communis*, la categoria delle praterie all'associazione *Asperulo purpurae-Brometum erecti* e infine la categoria dei boschi ripariali al *Salici albae-Populetem nigrae* e al *Rubo-Salicetum albae*. Alcuni punti presi in campo in maniera speditiva sono relativi alla

categoria dei rimboschimenti. Si tratta di popolamenti artificiali a base di conifere varie (pini, cipressi, cedri, abeti mediterranei), con locale presenza di latifoglie autoctone codominanti. In relazione alle caratteristiche topografiche e litologiche, all'interno del rimboschimento può essere presente anche *Quercus ilex* o *Ostrya carpinifolia*. Le potenzialità evolutive di tali popolamenti sono quindi assai eterogenee. Altri punti presi in maniera speditiva in campo o attribuiti per fotointerpretazione sono quelli relativi alle aree con vegetazione sporadica o discontinua (M). All'interno di tale categoria, sono state individuate due diverse tipologie. La prima tipologia (M1) è associata alla vegetazione detritica e casmofitica dei ghiaioni e delle pareti rocciose calcaree. La seconda tipologia (M2) viene invece identificata in un mosaico di gariga e macchia. Si tratta di popolamenti radi su detriti e su affioramenti rocciosi calcarei, dove le specie di gariga lasciano spazio a vegetazione terofitica e pochi arbusti termoxerofili di macchia quali *Phillyrea latifolia*, *Pistacia terebinthus* ssp. *terebinthus*, *Cotinus coggygria*, *Juniperus oxycedrus* e *Quercus ilex*.

Figura 4-12: Esempio di area classificata nel mosaico di gariga e macchia (M2). È evidente l'alternanza tra le specie erbacee di gariga e gli arbusti termofili.

4.2 Principali variazioni stagionali degli indici vegetazionali telerilevati

Di seguito sono riportati i principali risultati (eigenvalues, pattern temporali e spaziali delle principali componenti funzionali) ottenute dall'applicazione della FPCA alle serie temporali bisettimanali NDVI Landsat 8 e Sentinel-2, e a quelle settimanali MCARI, GNDVI, SAVI e ND705 Sentinel-2.

4.2.1. Variazioni stagionali derivate dalle serie temporali bisettimanali NDVI Landsat 8

La FPCA delle serie temporali bisettimanali NDVI Landsat 8 (8069 serie NDVI bisettimanali basate su pixel di 30m) della ZSC Monte Frasassi ha permesso di identificare 6 componenti funzionali principali. FPCA1 spiega il 67.4% della variazione totale, FPCA2 il 28.5%, FPCA3 l'1.7%, FPCA4 l'1.4%, FPCA5 lo 0.8% e infine FPCA6 lo 0.1%.

In figura 4-13 sono mostrati i pattern temporali e spaziali delle prime 3 componenti principali funzionali (variazioni stagionali) che spiegano circa il 97.6% della variazione totale NDVI.

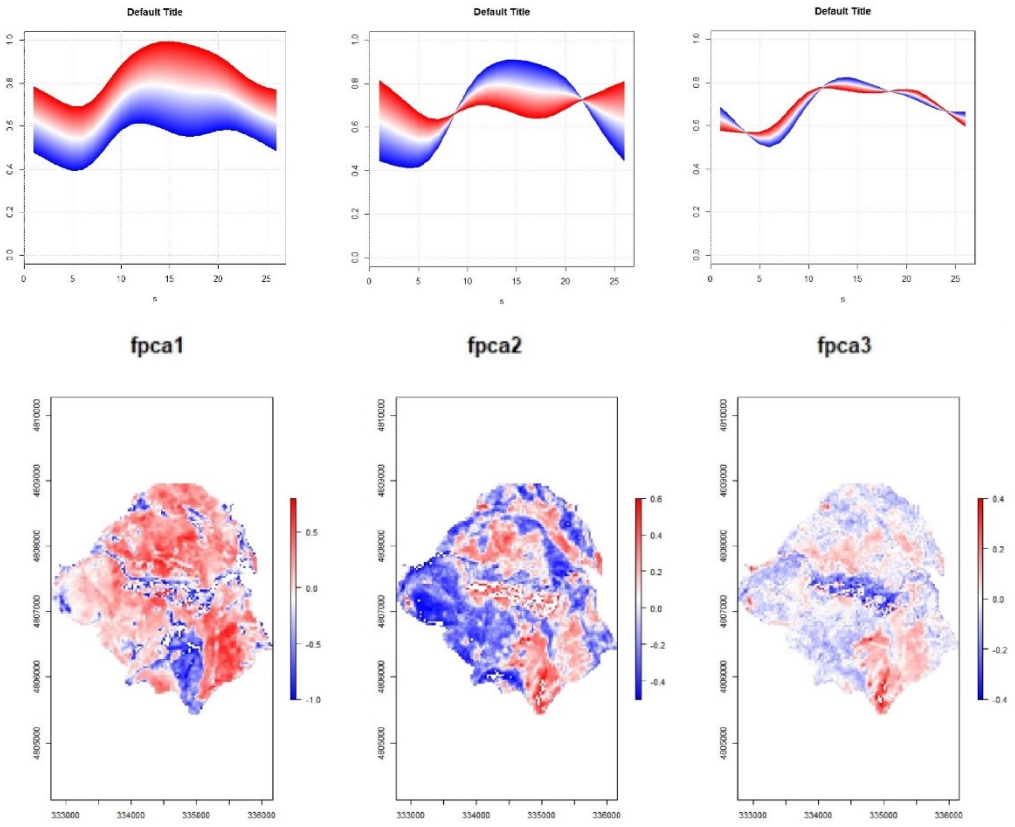


Figura 4-13: Variazioni spazio-temporali NDVI (fenologiche) derivate dalle serie temporali bisettimanali Landsat 8, identificate dalla Functional Principal Component

Analysis. Sopra sono visualizzati gli effetti delle prime tre componenti funzionali principali (variazioni stagionali NDVI) durante l'anno. La linea bianca rappresenta l'andamento NDVI medio nell'area di studio. In blu e rosso le serie temporali che si comportano in maniera opposta rispetto alla media. Sotto con le stesse colorazioni sono rappresentati i pattern spaziali delle tre Principali Componenti Funzionali.

4.2.2. Variazioni stagionali derivate dalle serie temporali bisettimanali NDVI Sentinel-2

La FPCA delle serie temporali bisettimanali NDVI Sentinel-2 (18313 serie NDVI bisettimanali basate su pixel di 20m) della ZSC del Monte Frasassi ha permesso di identificare 6 componenti funzionali principali. FPCA1 spiega il 70.7%, FPCA2 il 24.1%, FPCA3 il 3.7%, FPCA4 l'1%, FPCA5 lo 0.3% e FPCA6 lo 0.008%.

In figura 4-14 sono mostrati i pattern temporali e spaziali delle prime 3 componenti principali funzionali (variazioni stagionali) che spiegano circa il 98.5% della variazione totale NDVI.

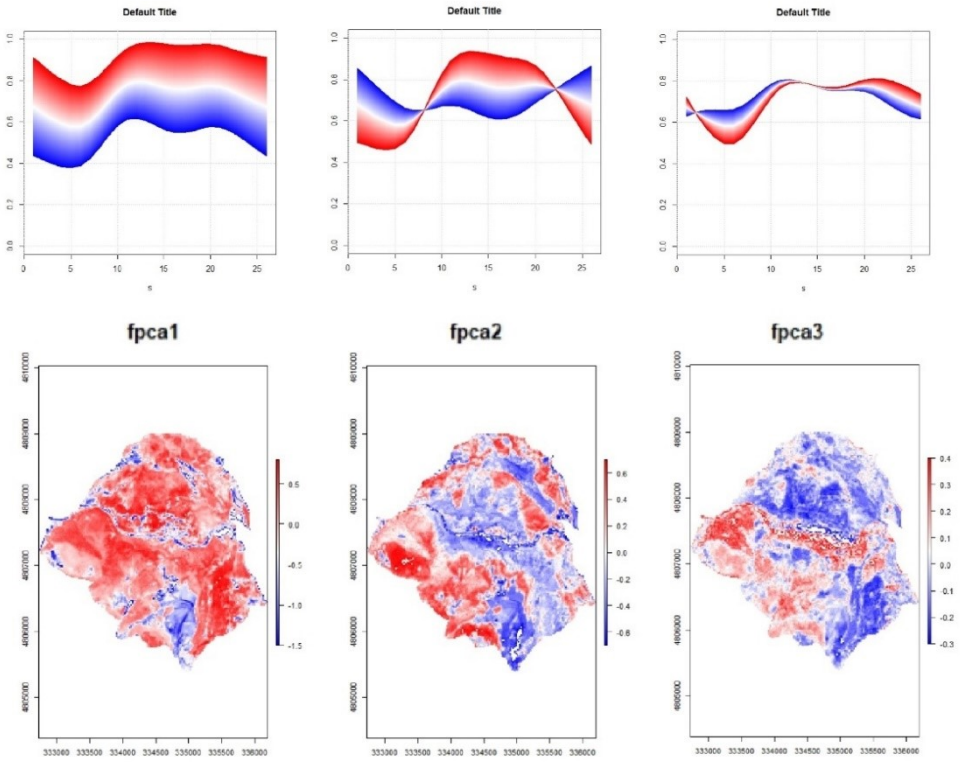


Figura 4-14: Variazioni spazio-temporali NDVI (fenologiche) derivate dalle serie temporali bisettimanali Sentinel-2, identificate dalla Functional Principal Component

Analysis. Sopra sono visualizzati gli effetti delle prime tre componenti funzionali principali (variazioni stagionali NDVI) durante l'anno. La linea bianca rappresenta l'andamento NDVI medio nell'area di studio. In blu e rosso le serie temporali che si comportano in maniera opposta rispetto alla media. Sotto con le stesse colorazioni sono rappresentati i pattern spaziali delle tre Principali Componenti Funzionali.

4.2.3. Variazioni stagionali derivate dalle serie temporali settimanali NDVI Sentinel-2

La FPCA delle serie temporali settimanali NDVI Sentinel-2 (18313 serie NDVI settimanali basate su pixel di 20m) della ZSC del Monte Frasassi ha permesso di identificare 8 componenti funzionali principali. FPCA1 spiega il 65.8%, FPCA2 il 24.3%, FPCA3 il 5.7%, FPCA4 il 2.1%, FPCA5 l'1%, FPCA6 lo 0.6%, FPCA7 lo 0.2% e FPCA8 lo 0.02%.

In figura 4-15 sono mostrati i pattern temporali e spaziali delle prime 3 componenti principali funzionali (variazioni stagionali) che spiegano circa il 95.8% della variazione totale NDVI.

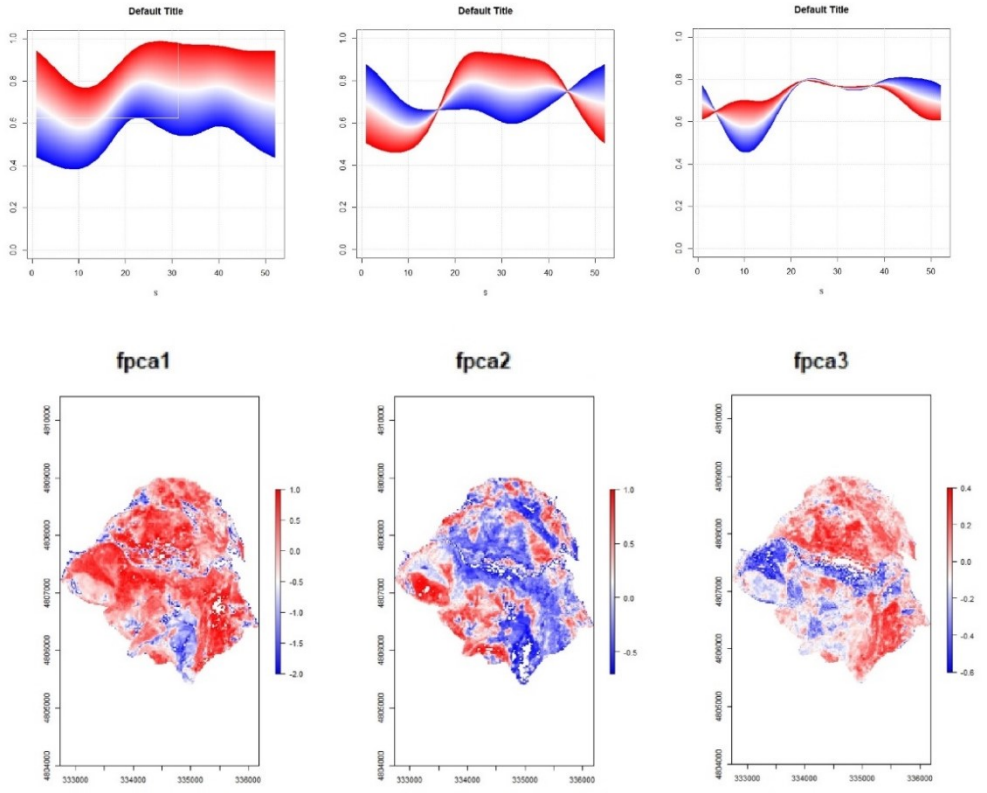


Figura 4-15: Variazioni spazio-temporali NDVI (fenologiche) derivate dalle serie temporali settimanali Sentinel-2, identificate dalla Functional Principal Component

Analysis. Sopra sono visualizzati gli effetti delle prime tre componenti funzionali principali (variazioni stagionali NDVI) durante l'anno. La linea bianca rappresenta l'andamento NDVI medio nell'area di studio. In blu e rosso le serie temporali che si comportano in maniera opposta rispetto alla media. Sotto con le stesse colorazioni sono rappresentati i pattern spaziali delle tre Principali Componenti Funzionali.

4.2.4. Variazioni stagionali derivate dalle serie temporali settimanali GNDVI Sentinel-2

La FPCA delle serie temporali settimanali GNDVI Sentinel-2 (18313 serie GNDVI settimanali basate su pixel di 20m) della ZSC del Monte Frasassi ha permesso di identificare 8 componenti funzionali principali. FPCA1 spiega il 70.8%, FPCA2 il 18.8%, FPCA3 il 6.9%, FPCA4 l'1.5%, FPCA5 l'1.1%, FPCA6 lo 0.5%, FPCA7 lo 0.2% e FPCA8 lo 0.02%.
In figura 4-16 sono mostrati i pattern temporali e spaziali delle prime 3 componenti principali funzionali (variazioni stagionali) che spiegano circa il 96.5% della variazione totale GNDVI.

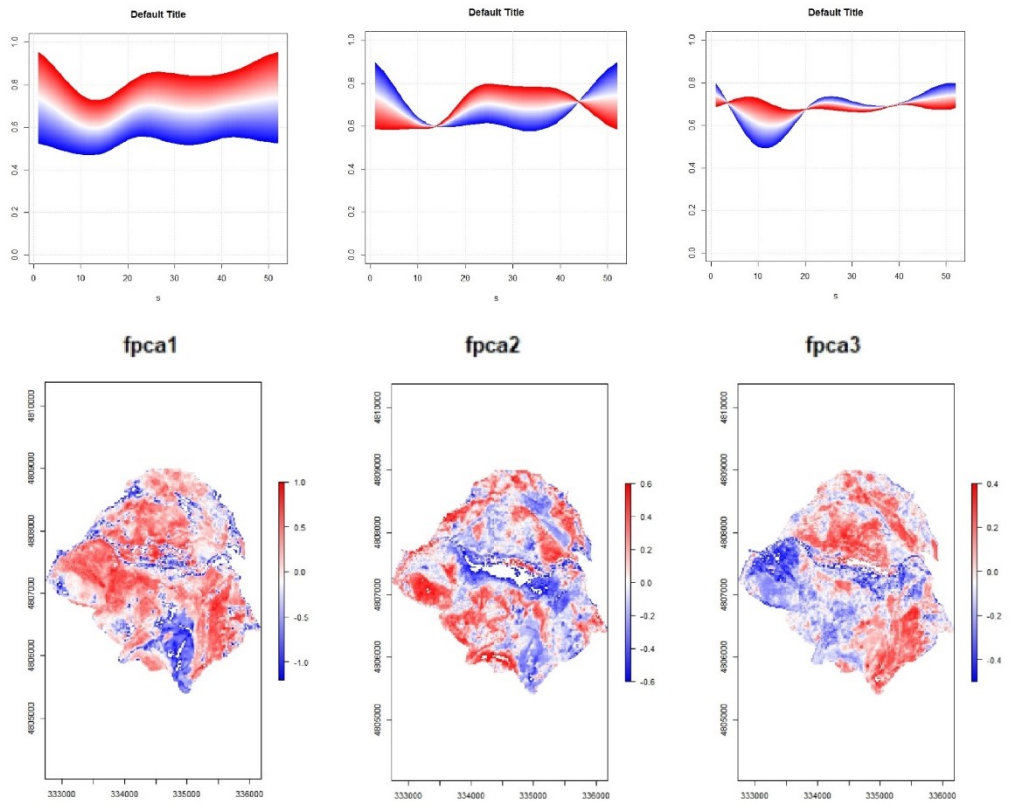


Figura 4-16: Variazioni spazio-temporali GNDVI (fenologiche) identificate dalla Functional Principal Component Analysis. Sopra sono visualizzati gli effetti delle prime

tre componenti funzionali principali (variazioni stagionali GNDVI) durante l'anno. La linea bianca rappresenta l'andamento GNDVI medio nell'area di studio. In blu e rosso le serie temporali che si comportano in maniera opposta rispetto alla media. Sotto con le stesse colorazioni sono rappresentati i pattern spaziali delle tre Principali Componenti Funzionali.

4.2.5. Variazioni stagionali derivate dalle serie temporali settimanali SAVI Sentinel-2

La FPCA delle serie temporali settimanali SAVI Sentinel-2 (18313 serie SAVI settimanali basate su pixel di 20m) della ZSC del Monte Frasassi ha permesso di identificare 8 componenti funzionali principali. FPCA1 spiega il 65.8%, FPCA2 il 24.4%, FPCA3 il 5.6%, FPCA4 il 2.1%, FPCA5 l'1.1%, FPCA6 lo 0.5%, FPCA7 lo 0.2% e FPCA8 lo 0.03%. In figura 4-17 sono mostrati i pattern temporali e spaziali delle prime 3 componenti principali funzionali (variazioni stagionali) che spiegano circa il 95.8% della variazione totale SAVI.

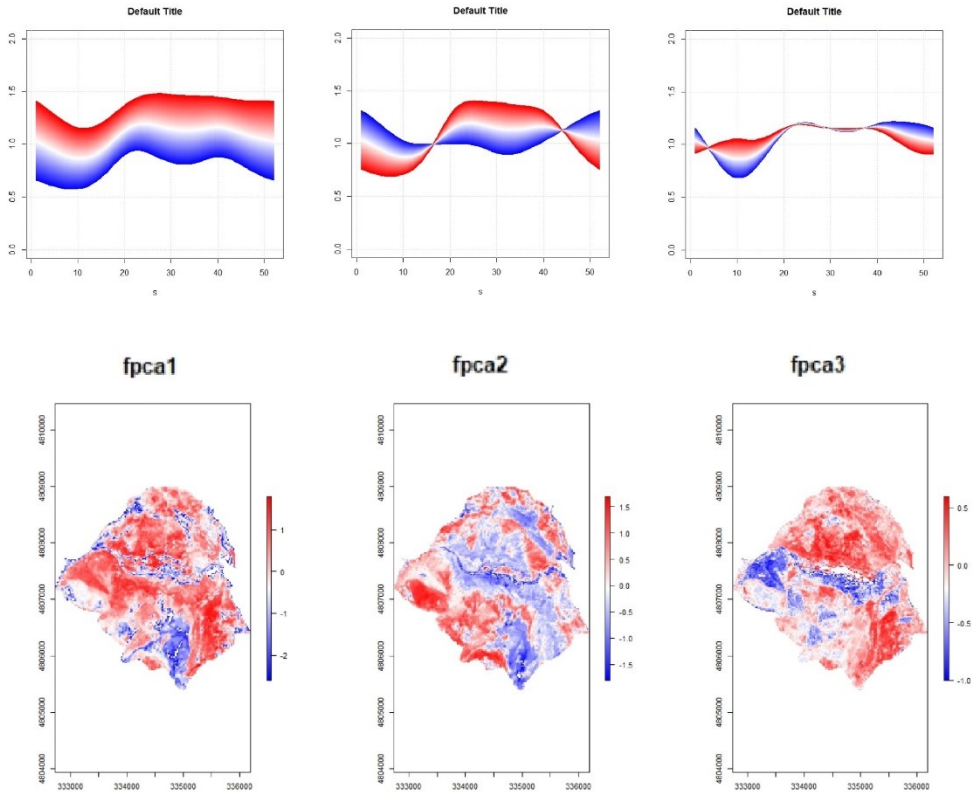


Figura 4-17: Variazioni spazio-temporali SAVI (fenologiche) identificate dalla Functional Principal Component Analysis. Sopra sono visualizzati gli effetti delle prime tre componenti funzionali principali (variazioni stagionali SAVI) durante l'anno. La linea

bianca rappresenta l'andamento SAVI medio nell'area di studio. In blu e rosso le serie temporali che si comportano in maniera opposta rispetto alla media. Sotto con le stesse colorazioni sono rappresentati i pattern spaziali delle tre Principali Componenti Funzionali.

4.2.6. Variazioni stagionali derivate dalle serie temporali settimanali ND705 Sentinel-2

La FPCA delle serie temporali settimanali ND705 Sentinel-2 (18313 serie ND705 settimanali basate su pixel di 20m) della ZSC del Monte Frasassi ha permesso di identificare 8 componenti funzionali principali. FPCA1 spiega il 60.5%, FPCA2 il 29.2%, FPCA3 il 6.1%, FPCA4 l'1.7%, FPCA5 l'1.4%, FPCA6 lo 0.6%, FPCA7 lo 0.2% e FPCA8 lo 0.02%.
In figura 4-18 sono mostrati i pattern temporali e spaziali delle prime 3 componenti principali funzionali (variazioni stagionali) che spiegano circa il 95.8% della variazione totale ND705.

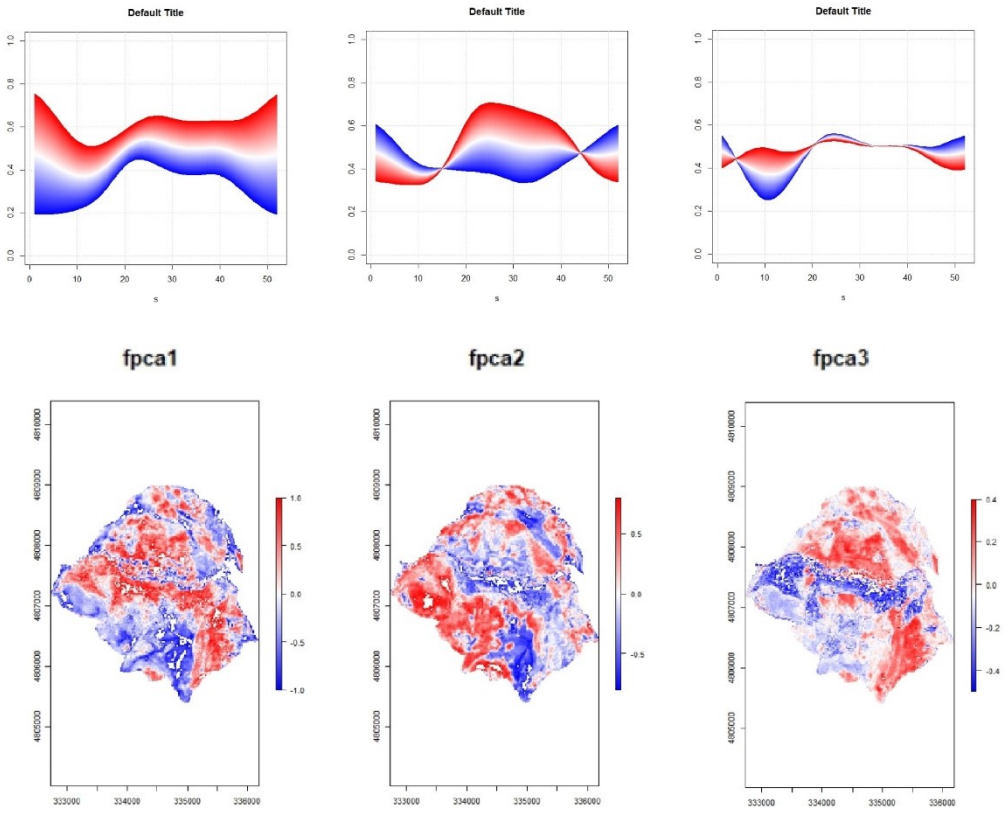


Figura 4-18: Variazioni spazio-temporali ND705 (fenologiche) identificate dalla Functional Principal Component Analysis. Sopra sono visualizzati gli effetti delle prime tre componenti funzionali principali (variazioni stagionali ND705) durante l'anno. La linea bianca rappresenta l'andamento ND705 medio nell'area di studio. In blu e rosso le

serie temporali che si comportano in maniera opposta rispetto alla media. Sotto con le stesse colorazioni sono rappresentati i pattern spaziali delle tre Principali Componenti Funzionali.

4.2.7. Variazioni stagionali derivate dalle serie temporali settimanali MCARI Sentinel-2

La FPCA delle serie temporali settimanali MCARI Sentinel-2 (18313 serie MCARI settimanali basate su pixel di 20m) della ZSC del Monte Frasassi ha permesso di identificare 8 componenti funzionali principali. FPCA1 spiega il 76.9%, FPCA2 l'11.3%, FPCA3 il 6.9%, FPCA4 il 3.6%, FPCA5 lo 0.66%, FPCA6 lo 0.3%, FPCA7 lo 0.2% e FPCA8 lo 0.007%.
In figura 4-19 sono mostrati i pattern temporali e spaziali delle prime 3 componenti principali funzionali (variazioni stagionali) che spiegano circa il 95.1% della variazione totale MCARI.

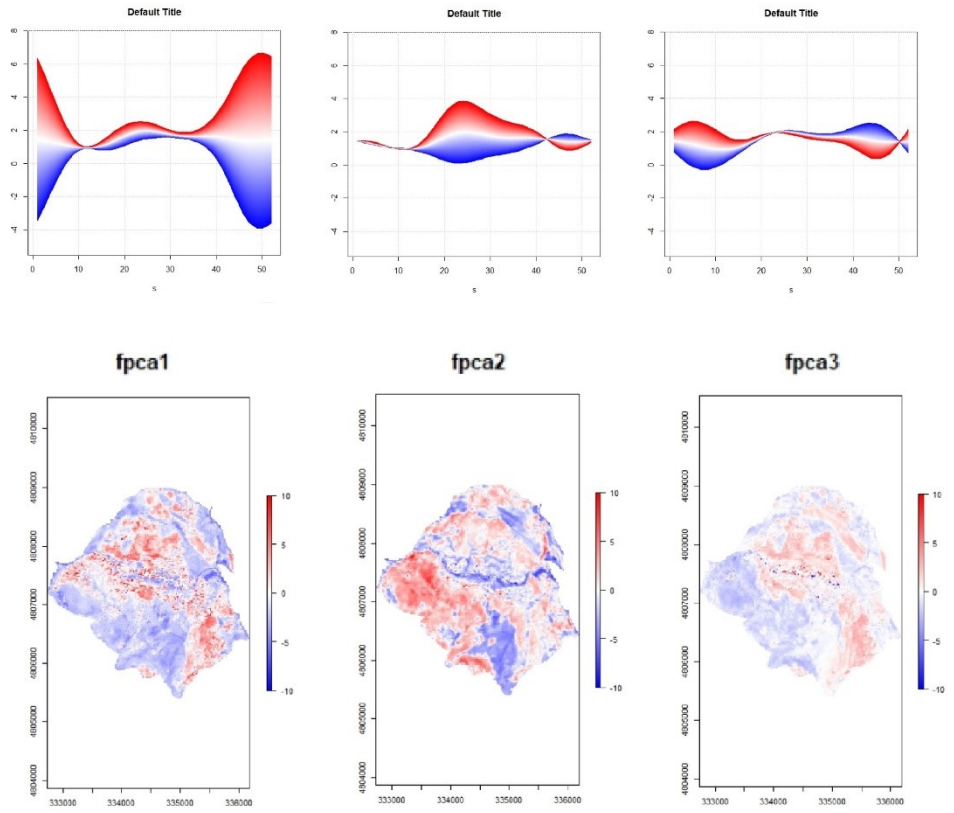


Figura 4-19: Variazioni spazio-temporali MCARI (fenologiche) identificate dalla Functional Principal Component Analysis. Sopra sono visualizzati gli effetti delle prime tre componenti funzionali principali (variazioni stagionali MCARI) durante l'anno. La linea bianca rappresenta l'andamento MCARI medio nell'area di studio. In blu e rosso le

serie temporali che si comportano in maniera opposta rispetto alla media. Sotto con le stesse colorazioni sono rappresentati i pattern spaziali delle tre Principali Componenti Funzionali.

4.3 Mappatura supervised della vegetazione di primo livello e degli habitat

Sono state prodotte mappe basate esclusivamente sulle variazioni stagionali (FPCA scores) dei diversi indici tele-rilevati. Infine, è stata prodotta la mappa basata sulla migliore combinazione delle principali variazioni fenologiche, e sulle variazioni topografiche e litologiche. Da tale mappa è stato possibile derivare quella degli habitat.

4.3.1 Mappatura basata sulle variabili topografiche e litologiche

Il solo utilizzo delle variabili topografiche e litologiche ha permesso di mappare le 10 categorie del training data con una accuratezza globale del 57.9%. Gli errori della mappatura sono espressi nella tabella 4-2 che mostra la '*producer's accuracy'* e la '*user's accuracy'* per ogni categoria target.

Tabella 4-2: Matrice degli errori tra la classificazione prodotta dal modello RF (basato sulle variabili topografiche e litologiche) e quella del training data

	C	G	J	L	M	O	P	Q	R	S	tot	producers
C	10	4	0	0	0	0	0	0	0	1	15	67%
G	1	10	0	0	0	1	1	0	2	0	15	67%
J	0	0	13	1	0	0	1	0	0	0	15	87%
L	0	2	0	20	6	3	1	2	1	0	35	57%
M	1	0	0	7	30	4	1	1	2	1	47	64%
O	1	1	3	8	7	25	0	6	5	0	56	45%
P	0	1	4	0	0	0	10	0	0	0	15	67%
Q	2	0	2	1	3	6	0	13	5	0	32	41%
R	1	4	0	2	1	2	4	5	12	0	31	39%
S	1	0	0	0	0	0	0	0	0	14	15	93%
tot	17	22	22	39	47	41	18	27	27	16	276	
user	59%	45%	59%	51%	64%	61%	56%	48%	44%	88%		

4.3.2. Mappatura basata sugli FPCA scores delle serie temporali bisettimanali NDVI Landsat 8

La classificazione '*supervised*' delle principali variazioni NDVI stagionali derivate dalle serie temporali bisettimanali Landsat 8 ha permesso di mappare le 10 categorie del training data con una accuratezza globale finale del 65.22%. Gli errori della mappatura sono espressi nella Tabella 4-3 che mostra la '*producer's accuracy'* e la '*user's accuracy'* per ogni categoria target.

Tabella 4-3: Matrice degli errori tra la classificazione prodotta dal modello RF (basato sugli FPCA scores NDVI Landsat 8) e quella del training data

	C	*G*	*J*	*L*	*M*	*O*	*P*	*Q*	*R*	*S*	*tot*	*producer*
C	10	3	0	0	1	0	2	0	0	2	**18**	***56%***
G	1	9	1	0	1	1	1	0	1	1	**16**	***56%***
J	0	0	14	0	0	0	1	0	0	0	**15**	***93%***
L	0	0	1	27	0	2	0	0	4	0	**34**	***79%***
M	3	2	2	3	26	6	1	0	1	2	**46**	***57%***
O	0	1	2	4	4	30	0	14	1	0	**56**	***54%***
P	3	1	0	0	0	0	12	0	0	0	**16**	***75%***
Q	0	1	0	0	2	7	0	19	0	0	**29**	***66%***
R	0	0	1	4	0	1	0	0	25	0	**31**	***81%***
S	0	1	0	0	3	0	0	3	0	8	**15**	***53%***
tot	**17**	**18**	**21**	**38**	**37**	**47**	**17**	**36**	**32**	**13**	**276**	
user	***59%***	***50%***	***67%***	***71%***	***70%***	***64%***	***71%***	***53%***	***78%***	***62%***		

4.3.3. Mappatura basata sugli FPCA scores delle serie temporali bisettimanali NDVI Sentinel-2

La classificazione '*supervised*' delle principali variazioni NDVI stagionali derivate dalle serie temporali bisettimanali Sentinel-2 ha permesso di mappare le 10 categorie del training data con una accuratezza globale finale del 69.6%. Gli errori della mappatura sono espressi nella Tabella 4-4 che mostra la '*producer's accuracy'* e la '*user's accuracy'* per ogni categoria target.

Tabella 4-4: Matrice degli errori tra la classificazione prodotta dal modello RF (basato sugli FPCA scores NDVI Sentinel-2 bisettimanali) e quella del training data

	C	*G*	*J*	*L*	*M*	*O*	*P*	*Q*	*R*	*S*	*tot*	*producer*
C	9	1	0	0	1	0	5	0	0	2	**18**	***50%***
G	0	12	0	0	1	0	0	2	0	1	**16**	***75%***
J	0	1	10	0	1	0	1	0	2	0	**15**	***67%***
L	0	0	0	27	0	1	0	0	6	0	**34**	***79%***
M	0	0	7	0	35	1	1	0	0	2	**46**	***76%***
O	1	1	0	4	0	35	0	10	3	2	**56**	***63%***
P	3	1	1	0	0	0	11	0	0	0	**16**	***69%***
Q	0	1	0	0	0	3	0	25	0	0	**29**	***86%***
R	0	0	3	6	0	2	0	0	20	0	**31**	***65%***
S	0	3	0	0	0	1	0	3	0	8	**15**	***53%***
tot	**13**	**20**	**21**	**37**	**38**	**43**	**18**	**40**	**31**	**15**	**276**	
user	***69%***	***60%***	***48%***	***73%***	***92%***	***81%***	***61%***	***63%***	***65%***	***53%***		

4.3.4. Mappatura basata sugli FPCA scores delle serie temporali settimanali NDVI Sentinel-2

La classificazione '*supervised*' delle principali variazioni NDVI stagionali derivate dalle serie temporali settimanali Sentinel-2 ha permesso di mappare le 10 categorie del training data con una accuratezza globale finale del 72.2%. Gli errori della mappatura sono espressi nella Tabella 4-5 che mostra la '*producer's accuracy'* e la '*user's accuracy'* per ogni categoria target.

Tabella 4-5: Matrice degli errori tra la classificazione prodotta dal modello RF (basato sugli FPCA scores NDVI Sentinel-2 settimanali) e quella del training data

	C	*G*	*J*	*L*	*M*	*O*	*P*	*Q*	*R*	*S*	*tot*	*producer*
C	11	1	0	0	1	0	3	0	0	2	**18**	**61%**
G	0	12	1	0	0	1	0	2	0	0	**16**	**75%**
J	0	1	10	0	1	0	1	0	2	0	**15**	**67%**
L	0	0	0	27	0	1	0	0	6	0	**34**	**79%**
M	0	1	2	0	38	0	1	1	0	3	**46**	**83%**
O	0	2	0	3	0	34	0	11	4	2	**56**	**61%**
P	2	1	0	0	0	0	13	0	0	0	**16**	**81%**
Q	0	1	0	0	0	2	0	25	0	1	**29**	**86%**
R	0	0	4	6	0	1	0	0	20	0	**31**	**65%**

S	0	1	0	0	0	2	0	3	0	9	15	60%
tot	**13**	**20**	**17**	**36**	**40**	**41**	**18**	**42**	**32**	**17**	276	
user	**85%**	**60%**	**59%**	**75%**	**95%**	**83%**	**72%**	**60%**	**63%**	**53%**		

4.3.5. Mappatura basata sugli FPCA scores delle serie temporali settimanali GNDVI Sentinel-2

La classificazione '*supervised*' delle principali variazioni GNDVI stagionali ha permesso di mappare le 10 categorie del training data con una accuratezza globale finale del 73.55%. Gli errori della mappatura sono espressi nella Tabella 4-6 che mostra la '*producer's accuracy'* e la '*user's accuracy'* per ogni categoria target.

Tabella 4-6: Matrice degli errori tra la classificazione prodotta dal modello RF (basato sugli FPCA scores GNDVI Sentinel-2) e quella del training data

	C	**G**	**J**	**L**	**M**	**O**	**P**	**Q**	**R**	**S**	**tot**	**producer**
C	12	1	0	0	3	0	2	0	0	0	**18**	***67%***
G	0	12	1	0	0	0	0	3	0	0	**16**	***75%***
J	0	0	11	0	1	0	1	1	1	0	**15**	***73%***
L	0	0	0	25	0	2	0	0	7	0	**34**	***74%***
M	1	2	5	0	36	0	1	0	0	1	**46**	***78%***
O	0	2	0	1	0	40	0	8	4	1	**56**	***71%***
P	2	0	1	0	0	0	13	0	0	0	**16**	***81%***
Q	0	3	1	0	0	5	0	20	0	0	**29**	***69%***
R	0	0	3	7	0	1	0	0	20	0	**31**	***65%***
S	0	0	0	0	0	1	0	0	0	14	**15**	***93%***
tot	**15**	**20**	**22**	**33**	**40**	**49**	**17**	**32**	**32**	**16**	**276**	
user	***80%***	***60%***	***50%***	***76%***	***90%***	***82%***	***76%***	***63%***	***63%***	***88%***		

4.3.6. Mappatura basata sugli FPCA scores delle serie temporali settimanali SAVI Sentinel-2

La classificazione '*supervised*' delle principali variazioni SAVI stagionali ha permesso di mappare le 10 categorie del training data con una accuratezza globale finale del 74.3%. Gli errori della mappatura sono espressi nella Tabella 4-7 che mostra la '*producer's accuracy'* e la '*user's accuracy'* per ogni categoria target.

Tabella 4-7: Matrice degli errori tra la classificazione prodotta dal modello RF (basato sugli FPCA scores SAVI Sentinel-2) e quella del training data

	C	*G*	*J*	*L*	*M*	*O*	*P*	*Q*	*R*	*S*	*tot*	*producer*
C	13	1	0	0	1	0	1	0	0	2	**18**	***72%***
G	0	12	1	0	0	1	0	2	0	0	**16**	***75%***
J	0	1	11	0	1	0	1	0	1	0	**15**	***73%***
L	0	0	0	31	0	0	0	0	3	0	**34**	***91%***
M	0	1	4	0	36	0	1	1	0	3	**46**	***78%***
O	0	2	0	3	0	34	0	11	4	2	**56**	***61%***
P	2	1	0	0	0	0	13	0	0	0	**16**	***81%***
Q	0	1	0	0	0	3	0	25	0	0	**29**	***86%***
R	0	0	4	5	0	1	0	0	21	0	**31**	***68%***
S	0	1	0	0	0	2	0	3	0	9	**15**	***60%***
tot	**15**	**20**	**20**	**39**	**38**	**41**	**16**	**42**	**29**	**16**	**276**	
user	***87%***	***60%***	***55%***	***79%***	***95%***	***83%***	***81%***	***60%***	***72%***	***56%***		

4.3.7. Mappatura basata sugli FPCA scores delle serie temporali settimanali ND705 Sentinel-2

La classificazione '*supervised*' delle principali variazioni ND705 stagionali ha permesso di mappare le 10 categorie del training data con una accuratezza globale finale del 69.6%. Gli errori della mappatura sono espressi nella Tabella 4-8 che mostra la '*producer's accuracy'* e la '*user's accuracy'* per ogni categoria target.

Tabella 4-8: Matrice degli errori tra la classificazione prodotta dal modello RF (basato sugli FPCA scores ND705 Sentinel-2) e quella del training data

	C	*G*	*J*	*L*	*M*	*O*	*P*	*Q*	*R*	*S*	*tot*	*producer*
C	11	2	0	0	1	0	3	0	0	1	**18**	***61%***
G	1	10	2	0	1	0	0	2	0	0	**16**	***63%***
J	0	1	12	0	1	0	1	0	0	0	**15**	***80%***
L	0	0	0	28	1	0	0	0	5	0	**34**	***82%***
M	2	2	3	0	35	0	1	0	0	3	**46**	***76%***
O	0	1	0	3	1	27	0	20	2	2	**56**	***48%***
P	2	1	2	0	0	0	11	0	0	0	**16**	***69%***
Q	0	1	0	0	0	6	0	22	0	0	**29**	***76%***
R	0	0	1	2	1	2	0	0	25	0	**31**	***81%***
S	0	2	0	0	0	0	0	1	1	11	**15**	***73%***
tot	**16**	**20**	**20**	**33**	**41**	**35**	**16**	**45**	**33**	**17**	**276**	
user	***69%***	***50%***	***60%***	***85%***	***85%***	***77%***	***69%***	***49%***	***76%***	***65%***		

4.3.8. Mappatura basata sugli FPCA scores delle serie temporali settimanali MCARI Sentinel-2

La classificazione '*supervised*' delle principali variazioni MCARI stagionali ha permesso di mappare le 10 categorie del training data con una accuratezza globale finale del 62.4%. Gli errori della mappatura sono espressi nella Tabella 4-9 che mostra la '*producer's accuracy'* e la '*user's accuracy'* per ogni categoria target.

Tabella 4-9: Matrice degli errori tra la classificazione prodotta dal modello RF (basato sugli FPCA scores MCARI Sentinel-2) e quella del training data

	C	*G*	*J*	*L*	*M*	*O*	*P*	*Q*	*R*	*S*	*tot*	*producer*
C	9	4	1	0	0	0	3	0	0	1	**18**	***50%***
G	1	7	1	0	0	0	0	4	0	3	**16**	***44%***
J	0	2	9	0	2	0	2	0	0	0	**15**	***60%***
L	1	0	0	28	1	0	0	0	4	0	**34**	***82%***
M	0	2	6	1	32	0	2	0	2	1	**46**	***70%***
O	0	2	0	1	1	32	0	13	7	0	**56**	***57%***
P	1	1	0	0	1	0	13	0	0	0	**16**	***81%***
Q	0	3	0	0	0	10	0	16	0	0	**29**	***55%***
R	0	0	1	3	2	1	0	0	23	1	**31**	***74%***
S	1	3	1	0	4	2	0	1	0	3	**15**	***20%***
tot	**13**	**24**	**19**	**33**	**43**	**45**	**20**	**34**	**36**	**9**	**276**	
user	***69%***	***29%***	***47%***	***85%***	***74%***	***71%***	***65%***	***47%***	***64%***	***33%***		

4.3.9. Mappatura basata sugli FPCA scores delle serie temporali settimanali SAVI e GNDVI Sentinel-2, delle serie temporali bisettimanali NDVI Landsat 8 e sulle variabili topografiche e litologiche

Confrontando le mappe prodotte e le relative matrici di errore è stato possibile individuare gli indici migliori per la mappatura delle diverse categorie target. Il GNDVI è il migliore per la categoria degli ostrieti (*Scutellario columnae-Ostryetum carpinifoliae*) (*producer's accuracy* del 72%), e per quella delle formazioni ripariali (*producer's accuracy* del 93%) (tabella 4-6). L'indice SAVI sembra è, invece, il più abile nella discriminazione dei coltivi (*producers'accuracy* del 73%), delle leccete (*Cephalanthero longifoliae-Quercetum ilicis*) (*producer's accuracy* del 92%) e dei querceti (*Cytiso sessilifolii-Quercetum pubescentis*) (*producer's accuracy* dell'87%) (tabella 4-7). L'NDVI settimanale Sentinel-2 sembra essere il migliore per la categoria delle formazioni erbose rupicole (*producer's accuracy* dell'83%) (tabella 4-4), mentre l'NDVI Landsat 8 sembra essere il migliore per la categoria dei ginepreti

(*producer's accuracy* dell'94%) e dei rimboschimenti (*producer's accuracy* dell'81%) (tabella 4-3). Nella tabella 4-10 sono riportati le migliori *producer's accuracy* ottenute per ciascuna delle categorie target da mappare e i relativi indici vegetazionali.

Tabella 4-10: Tabella sintetica delle migliori producer's accuracy di ogni categoria target ottenute con i diversi indici vegetazionali

	GNDVI	*NDVI 52*	*SAVI*	*NDVI L8*	*NDVI 26*	*MCARI*	*ND705*
C			73%				
G	75%	75%	75%		75%		
J				94%			
L			92%				
M		83%					
O	72%						
P							
Q		87%	87%		87%		
R				81%			81%
S	93%						

Con questa analisi è stato possibile combinare tra loro i migliori indici per le diverse categorie, e valutare quale tra le diverse combinazioni fosse in grado di produrre la mappa con l'accuratezza più elevata. La migliore combinazione in questo senso è risultata essere quella composta dall'indice GNDVI, dall'indie SAVI e dall'NDVI Landsat 8. La migliore producer's accuracy di questi indici nelle diverse categorie, corrisponde anche ad una migliore user's accuracy (tabella 4-11), e cioè ad una maggiore sicurezza da parte dell'utilizzatore nell'uso della mappa ottenuta.

Tabella 4-11: Tabella sintetica delle migliori user's accuracy di ogni categoria target ottenute con i diversi indici vegetazionali

	GNDVI	*NDVI 52*	*SAVI*	*NDVI L8*	*NDVI 26*	*MCARI*	*ND705*
C			87%				
G	60%	60%	60%				
J				67%			
L						85%	85%
M		95%	95%				
O		83%	83%				
P			81%				

Q	63%							63%				
R						78%						
S	88%											

La classificazione '*supervised*' delle principali variazioni stagionali GNDVI, SAVI e NDVI Landsat 8, e delle principali variazioni topografiche e litologiche ha permesso di mappare le 10 categorie del training data con una accuratezza globale finale del 85.2%. Gli errori della mappatura sono espressi nella Tabella 4-12 che mostra la '*producer's accuracy'* e la '*user's accuracy'* per ogni categoria target. Le componenti fenologiche sono risultate maggiormente importanti rispetto a quelle topografiche e litologiche nel contribuire all'accuratezza finale. I 6 predittori più importanti sono stati fpca1 SAVI, fpca1 GNDVI, fpca3 GNDVI, topografia 1, topografia 2 e fpca1 NDVI.

In figura 4-20 è rappresentata la mappa prodotta. Tale mappa ha permesso inoltre di derivare quella degli habitat rappresentata in figura 4-21.

Tabella 4-12: Matrice degli errori tra la classificazione prodotta dal modello RF (basato sugli FPCA scores GNDVI, SAVI e NDVI Landsat 8 e sulle principali variazioni topografiche e litologiche) e quella del training data.

	C	***G***	***J***	***L***	***M***	***O***	***P***	***Q***	***R***	***S***	***tot***	***producer***
C	14	3	0	0	0	0	0	0	0	1	**18**	***78%***
G	1	13	1	0	0	0	0	1	0	0	**16**	***81%***
J	0	0	14	0	0	0	1	0	0	0	**15**	***93%***
L	0	0	0	29	0	2	0	0	3	0	**34**	***85%***
M	0	1	0	0	44	0	1	0	0	0	**46**	***96%***
O	0	0	1	4	0	40	0	11	0	0	**56**	***71%***
P	1	1	0	0	0	0	14	0	0	0	**16**	***88%***
Q	0	0	0	0	0	3	0	26	0	0	**29**	***90%***
R	0	0	1	2	0	1	0	1	26	0	**31**	***84%***
S	0	0	0	0	0	0	0	0	0	15	**15**	***100%***
tot	**16**	**18**	**17**	**35**	**44**	**46**	**16**	**39**	**29**	**16**	**276**	
user	***88%***	***72%***	***82%***	***83%***	***100%***	***87%***	***88%***	***67%***	***90%***	***94%***		

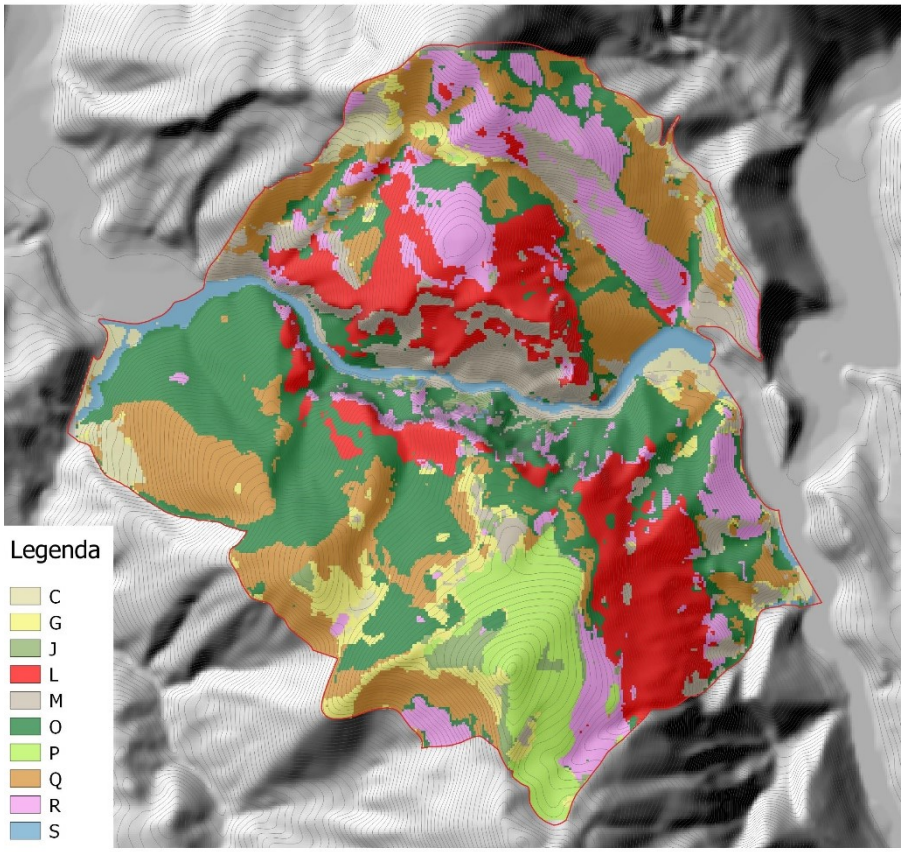


Figura 4-20: Mappa della vegetazione di primo livello (delle fisionomie e delle associazioni vegetali) della gola di Frasassi prodotta tramite la classificazione supervised delle principali variazioni fenologiche telerilevate, topografiche e litologiche. Sono mostrate le 10 categorie (fisionomiche e associazioni vegetali): C-Coltivi; G-Spartio juncei-Cytisetum sessilifolii var. a Spartium junceum; J-Spartio juncei-Cytisetum sessilifolii var. a Juniperus oxycedrus e J. communis; L- Cephalanthero longifoliae-Quercetum ilicis; M- mosaico di vegetazione rupestre e mosaico di garighe e macchia; O-Scutellario columnae-Ostryetum carpinifoliae; P-Asperulo purpureae-Brometum erecti; Q- Cytiso sessilifolii-Quercetum pubescentis; R- Rimboschimenti; S- zone ripariali (Salici-Populetum nigrae, Rubo-Salicetum albae);

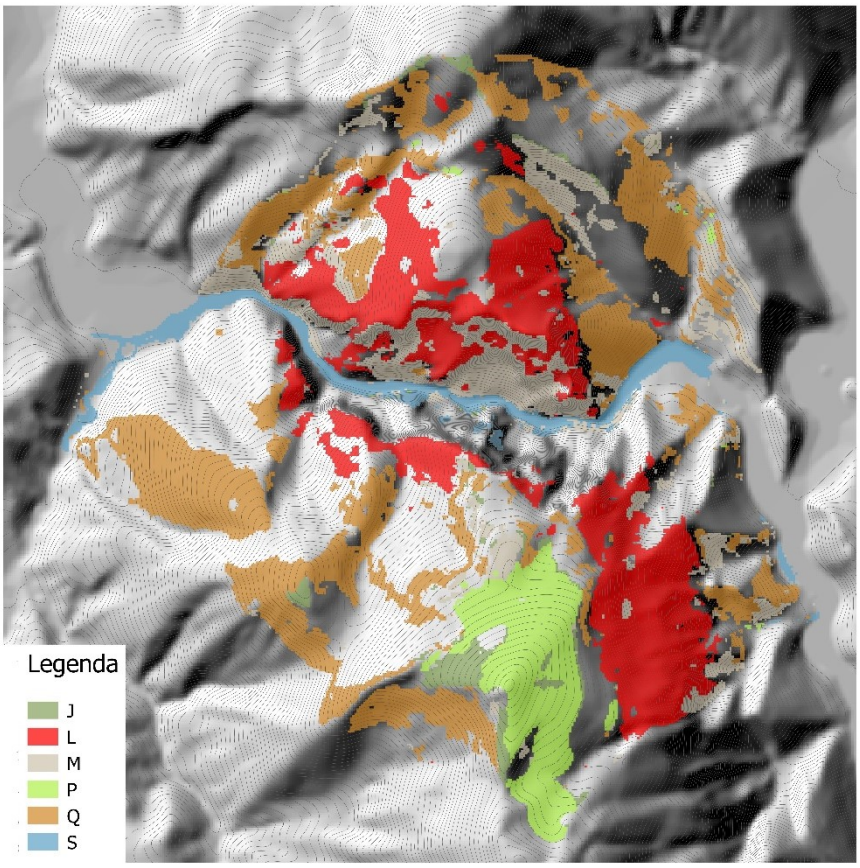


Figura 4-21: Mappa degli habitat della gola di Frasassi derivata dalla mappa della vegetazione di primo livello. J- habitat 5130 (Formazioni a Juniperus communis su lande o prati calcicoli); L- habitat 9340 (Foreste di Quercus ilex e Quercus rotundifolia); M- aree con vegetazione sporadica o discontinua (mosaico di vegetazione rupestre e mosaico di garighe e macchia). In questa categoria possono essere presenti gli habitat 8210 (Pareti rocciose calcaree con vegetazione casmofitica), 6110* (Formazioni erbose calcicole rupicole o basofile dell'Alysso-Sedion albi), 6220* (Percorsi substeppici di graminacee e piante annue dei Thero-Brachypodietea) ; P- habitat 6210* (Formazioni erbose secche seminaturali e facies coperte da cespugli su substrato calcareo); Q- habitat 91AA* (Boschi orientali di quercia bianca); S- habitat 92A0 (Foreste a galleria di Salix alba e Populus alba).

4.4 Mappatura supervised della vegetazione di secondo livello

La mappatura della vegetazione di secondo livello (fisionomie, associazioni vegetali, subassociazioni e/o varianti) è stata effettuata tramite classificazione supervised non gerarchica 'flat' (tutte le categorie sono state classificate contemporaneamente) e gerarchica (le subassociazioni vegetali e/o varianti, sono classificate all'interno del dominio spaziale dell'associazione vegetale di appartenenza).

4.4.1 Mappatura basata sulle variabili topografiche e litologiche

Il solo utilizzo delle variabili topografiche e litologiche ha permesso di mappare le 13 categorie del training data con una accuratezza globale del 53.6%. Gli errori della mappatura sono espressi nella tabella 4-13 che mostra la '*producer's accuracy'* e la '*user's accuracy'* per ogni categoria target.

Tabella 4-13: Matrice degli errori tra la classificazione prodotta dal modello RF (basato sulle variabili topografiche e litologiche) e quella del training data

	C	G	J	L1	L2	M1	M2	O1	O2	P	Q	R	S	tot	Producer %
C	11	3	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1	**17**	**65**
G	1	10	0	0	0	0	0	1	0	1	1	1	0	**15**	**67**
J	0	0	13	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	**15**	**87**
L1	0	0	0	8	0	0	1	2	0	0	1	0	0	**12**	**67**
L2	0	0	0	2	2	1	6	0	1	0	0	0	0	**12**	**17**
M1	1	0	0	1	0	14	3	0	1	0	0	0	1	**21**	**67**
M2	0	0	0	1	5	1	13	1	1	1	1	1	0	**25**	**52**
O1	0	0	2	1	0	0	0	12	1	0	2	1	0	**19**	**63**
O2	2	2	0	0	4	3	3	4	8	1	7	3	0	**37**	**22**
P	0	1	4	0	0	0	0	0	0	10	0	0	0	**15**	**67**
Q	1	1	2	0	0	0	2	3	2	0	11	3	0	**25**	**44**
R	1	3	1	3	0	0	2	3	1	4	3	10	0	**31**	**32**
S	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	14	**15**	**93**
tot	**18**	**20**	**22**	**17**	**11**	**20**	**30**	**26**	**15**	**19**	**26**	**19**	**16**		
User %	**61**	**50**	**59**	**47**	**18**	**70**	**43**	**46**	**53**	**53**	**42**	**53**	**88**		

4.4.2. Mappatura della vegetazione di secondo livello basata sulla classificazione non gerarchica ('flat') delle variabili fenologiche, topografiche e litologiche

Sono state prodotte mappe basate esclusivamente sulle variazioni stagionali (FPCA scores) dei diversi indici tele-rilevati. Infine, è stata prodotta la mappa basata sulla migliore combinazione delle principali variazioni fenologiche, e sulle variazioni topografiche e litologiche.

Il GNDVI sembra essere migliore per la categoria dei ginestreti (producer's accuracy del 75%), per quella dei ginepreti (producer's accuracy del 74%) e per quella delle formazioni ripariali (producer's accuracy del 94%). L'indice NDVI Sentinel-2 (settimanale) è invece il più abile nell'individuazione dei coltivi (producers'accuracy del 67%), delle due tipologie di lecceta (L1-producer's accuracy del 84%; L2-producer's accuracy del 60%), delle due tipologie della categoria delle formazioni erbose rupicole (M1-producer's accuracy del 86%; M2-producer's accuracy del 60%) e dei querceti (producer's accuracy dell'85%). MCARI è migliore per la tipologia di ostrieto O1(producer's accuracy dell'83%) mentre l'NDVI Landsat 8 per la tipologia di ostrieto O2 (producer's accuracy del58%). Nella tabella 4-14 sono sintetizzati i valori delle migliori producer's accuracy ottenute per ciascuna delle categorie target in relazione ai diversi indici vegetazionali.

Tabella 4-14: producer's accuracy per le categorie target e relativi indici vegetazionali

	GNDVI	*NDVI 52*	*SAVI*	*NDVI L8*	*NDVI 26*	*MCARI*	*ND705*
C		67%					
G	75%	75%	75%				
J	74%			74%			
L1		84%	84%		84%		
L2		60%					
M1		86%					
M2		60%					
O1						83%	
O2				58%			
P	94%						
Q		85%	85%				
R				81%			
S	94%						

Da questa analisi è stato possibile combinare tra loro i migliori indici per le diverse categorie, e valutare quale tra le diverse combinazioni fosse in grado di produrre la mappa con l'accuratezza più elevata. La migliore combinazione è risultata quella composta dagli FPCA scores GNDVI e NDVI (settimanale) Sentinel-2.

La classificazione 'supervised' di questa combinazione unitamente alle principali variazioni topografiche e litologiche ha permesso di ottenere una mappa della vegetazione di secondo livello con una accuratezza globale finale del 71.8%. Gli errori della mappatura sono espressi nella Tabella 4-15 che mostra la 'producer's accuracy' e la 'user's accuracy' per ogni categoria target. Le componenti fenologiche sono state maggiormente importanti di quelle topografiche e litologiche nel contribuire all'accuratezza finale. I 5 predittori più importanti sono stati fpca1 NDVI, fpca1 GNDVI, fpca2 NDVI, fpca3 GNDVI e fpca4 NDVI. In figura 4-22 è rappresentata la mappa prodotta.

Tabella 4-15: Matrice degli errori tra la classificazione prodotta dal modello RF (basato sugli FPCA scores GNDVI e NDVI Sentinel-2 e sulle principali variazioni topografiche e litologiche) e quella del training data.

	C	*G*	*J*	*L1*	*L2*	*M1*	*M2*	*O1*	*O2*	*P*	*Q*	*R*	*S*	*tot*	**Producer %**
C	13	2	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1	**18**	***72***
G	2	11	2	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	**16**	***69***
J	0	0	13	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	**15**	***87***
L1	0	0	0	9	2	0	0	0	0	0	0	1	0	**12**	***75***
L2	0	0	0	2	8	0	0	0	0	0	0	2	0	**12**	***67***
M1	1	0	0	0	0	15	4	0	0	0	0	0	1	**21**	***71***
M2	0	1	0	0	0	2	20	0	0	1	1	0	0	**25**	***80***
O1	0	0	0	0	0	0	0	11	4	0	2	0	0	**17**	***65***
O2	0	0	1	1	2	1	0	7	10	0	13	0	0	**35**	***29***
P	1	1	0	0	0	0	0	0	0	14	0	0	0	**16**	***88***
Q	0	1	0	0	0	0	0	1	2	0	22	0	0	**26**	***85***
R	0	0	0	3	1	0	0	0	1	0	1	25	0	**31**	***81***
S	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	15	**15**	***100***
tot	**17**	**16**	**16**	**15**	**13**	**19**	**24**	**19**	**17**	**17**	**40**	**29**	**17**	**259**	
User %	***76***	***69***	***81***	***60***	***62***	***79***	***83***	***58***	***59***	***82***	***55***	***86***	***88***		

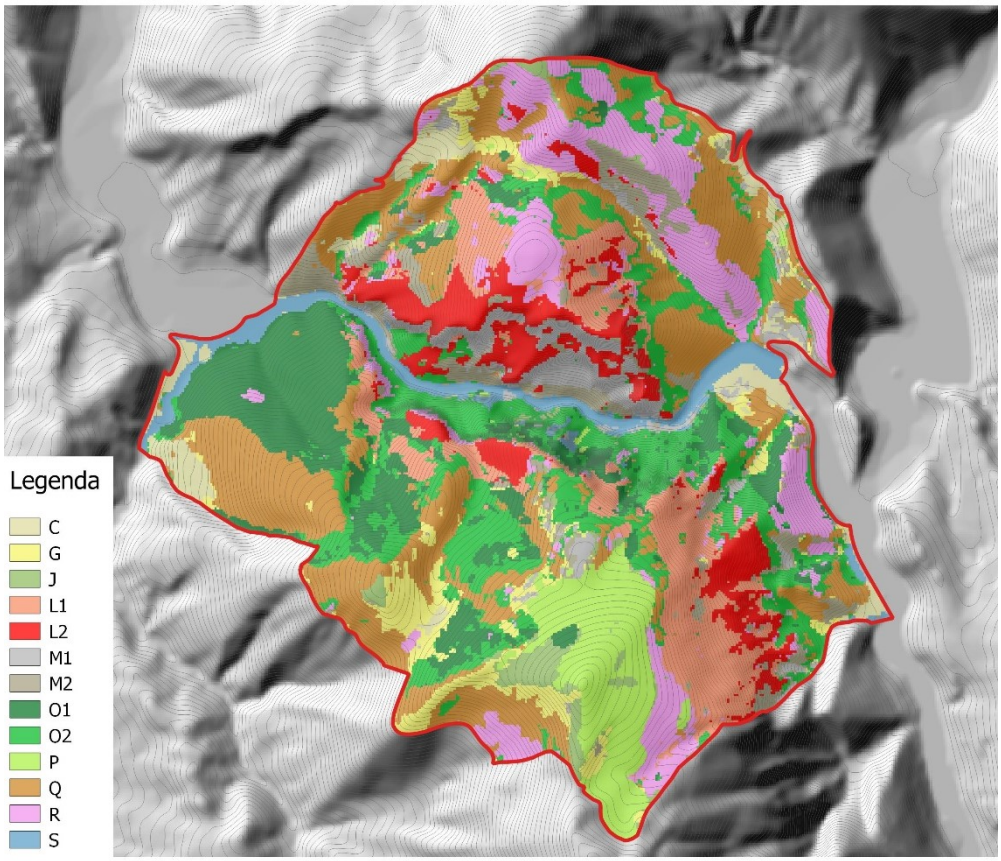


Figura 4-22: Mappa della vegetazione di secondo livello della gola di Frasassi prodotta tramite la classificazione (non gerarchica) supervised delle principali variazioni fenologiche telerilevate, topografiche e litologiche. Sono mostrate le 13 categorie (fisionomiche, subassociazioni e varianti): C-Coltivi; G-Spartio juncei-Cytisetum sessilifolii var. a Spartium junceum; J-Spartio juncei-Cytisetum sessilifolii var. a Juniperus oxycedrus e J. communis; L1- Cephalanthero longifoliae-Quercetum ilicis subass. lathyretosum veneti; L2- Cephalanthero longifoliae-Quercetum ilicis variante a Cotinus coggygria; M1- vegetazione rupestre delle pareti rocciose; M2- mosaico di gariga e macchia; O1- Scutellario columnae-Ostryetum carpinifoliae subass. quercetosum cerridis; O2- Scutellario columnae-Ostryetum carpinifoliae variante termofila e rupestre; P- Asperulo purpureae-Brometum erecti; Q- Cytiso sessilifolii-Quercetum pubescentis; R- Rimboschimenti; S- zone ripariali (Salici-Populetum nigrae, Rubo-Salicetum albae).

4.4.3. Mappatura della vegetazione di secondo livello basata sulla classificazione gerarchica delle variabili fenologiche, topografiche e litologiche

Per realizzare una mappatura tramite classificazione gerarchica, sono state selezionate le aree delle associazioni vegetali e al loro interno mappate le loro subassociazioni e/o varianti. Ad esempio, per le due categorie di ostrieto O1 *(Scutellario columnae-Ostryetum carpinifoliae* subass. *quercetosum cerridis*) e O2 (*Scutellario columnae-Ostryetum carpinifoliae* variante rupestre) è stata fatta la classificazione supervised degli FPCA scores e delle variabili topografiche e litologiche incluse nell'area dei boschi a dominanza di *Ostrya carpinifolia* (*Scutellario columnae-Ostryetum carpinifoliae*) individuata con la mappatura di primo livello. La combinazione degli indici GNDVI e NDVI Sentinel-2 (settimanale) ha permesso di discriminare le categorie O1 e O2 con un'accuratezza dell'87.5%. Gli errori della mappatura sono espressi nella Tabella 4-16 che mostra la 'producer's accuracy' e la 'user's accuracy'. In figura 4-23 è mostrata la spazializzazione delle due tipologie di ostrieto. Gli ostrieti più mesofili (Q1) sembrano occupare prevalentemente i settori impluvianti e i settori settentrionali del Monte Valmontagnana.

Tabella 4-16: Matrice degli errori tra la classificazione prodotta dal modello RF (basato sugli FPCA scores GNDVI e NDVI Sentinel-2 e sulle principali variazioni topografiche e litologiche) e quella del training data.

	O1	*O2*	*tot*	*producer*
O1	**11**	6	**17**	***65%***
O2	2	**33**	**35**	***94%***
tot	**13**	**39**	**52**	
user	***85%***	***85%***		

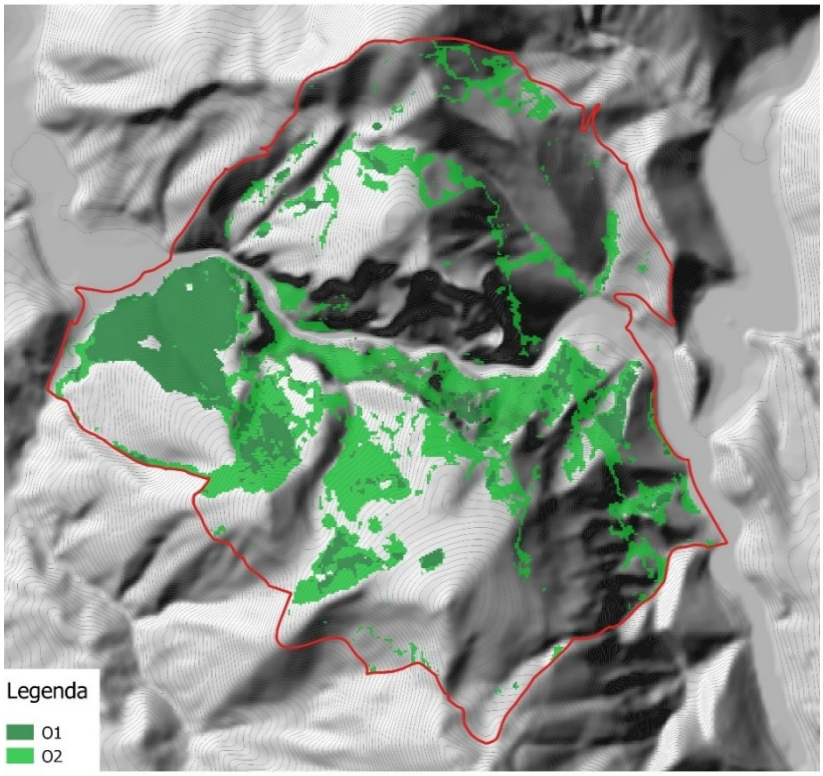


Figura 4-23: Mappatura delle due tipologie di ostrieto basata sulla classificazione gerarchica degli FPCA scores e delle variabili topografiche e litologiche. In verde scuro lo Scutellario columnae-Ostryetum carpinifoliae subass. quercetosum cerridis. In verde chiaro lo Scutellario columnae-Ostryetum carpinifoliae variante rupestre.

Così come per gli ostrieti, è stato possibile mappare le due tipologie di lecceta (L1, L2) del *Cephalanthero longifoliae-Quercetum ilicis,* e le due tipologie di querceto a *Quercus pubescens* (Q1, Q2) dell'associazione *Cytiso sessilifolii-Quercetum pubescentis*. Per i boschi a dominanza di *Quercus ilex*, la combinazione degli indici GNDVI, SAVI e NDVI Sentinel-2 (settimanali) uniti alla topografia e alla litologia hanno permesso di mappare la variante a *Cotinus coggygria* (L2) e la subass. *lathyretosum veneti* (L1) con un'accuratezza dell'84.6%. Nel caso dei boschi a dominanza di *Quercus pubescens* (*Cytiso sessilifolii-Quercetum pubescentis*), invece, la combinazione degli indici NDVI Sentinel-2 (settimanali) e MCARI uniti alla topografia e alla litologia hanno permesso di mappare le due tipologie (Q1 e Q2) con un'accuratezza del 73.1%. Gli errori della mappatura sono espressi nelle Tabelle 4-17 e 4-18 che mostrano le '*producer's accuracy'* e le '*user's accuracy'*. In figura 4-24 è mostrata la spazializzazione delle due tipologie di lecceta, mentre in figura 4-25 è mostrata la spazializzazione delle due tipologie di querceto. La mappatura delle diverse tipologie

vegetazionali sembra avere un pattern coerente con le variazioni topografiche e litologiche. Ad esempio, le leccete identificate nella tipologia più termofila (O2) occupano, nell'area indagata i settori a ridosso della gola o i settori esposti a Sud.

Tabella 4-17: Matrice degli errori tra la classificazione prodotta dal modello RF (basato sugli FPCA scores GNDVI, SAVI e NDVI Sentinel-2 e sulle principali variazioni topografiche e litologiche) e quella del training data.

	L1	*L2*	*tot*	*producer*
L1	10	2	12	*83%*
L2	1	11	12	*92%*
tot	11	13	24	
user	*91%*	*85%*		

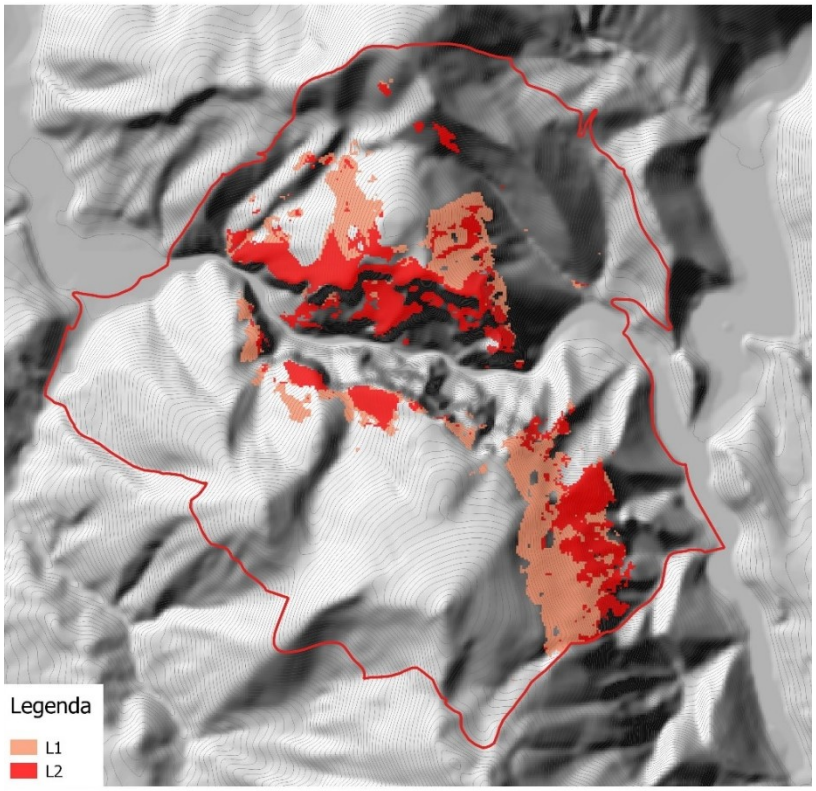


Figura 4-24: Mappatura delle due tipologie di lecceta basata sulla classificazione gerarchica degli FPCA scores e delle variabili topografiche e litologiche. In rosso chiaro Cephalanthero longifoliae-Quercetum ilicis subass. lathyretosum veneti (L1) e in rosso scuro Cephalanthero longifoliae-Quercetum ilicis variante a Cotinus coggygria (L2).

Tabella 4-18: Matrice degli errori tra la classificazione prodotta dal modello RF (basato sugli FPCA scores MCARI e NDVI Sentinel-2 e sulle principali variazioni topografiche e litologiche) e quella del training data.

	Q1	*Q2*	*tot*	*producer*
Q1	9	4	13	*69%*
Q2	3	10	13	*77%*
tot	12	14	26	
user	*75%*	*71%*		

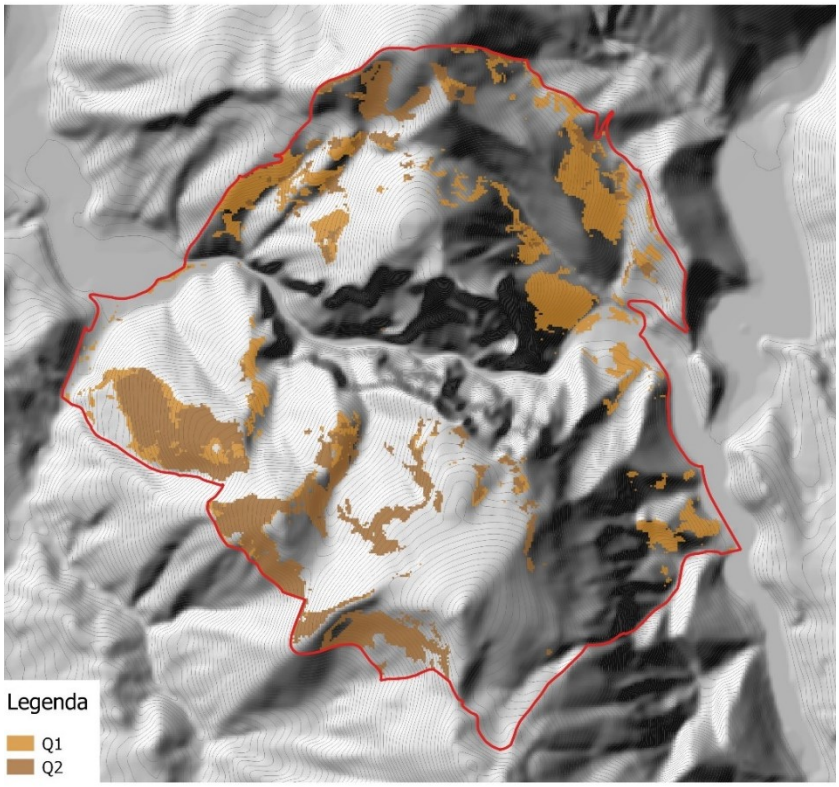


Figura 4-25: Mappatura delle due tipologie di querceto (Cytiso sessilifolii-Quercetum pubescentis) basata sulla classificazione gerarchica degli FPCA scores e delle variabili topografiche e litologiche. In marrone chiaro la tipologia di più termofila e ricca in arbusti, in marrone scuro la tipologia più matura.

5 DISCUSSIONI E CONCLUSIONI

5.1 Accuratezza della mappatura

La classificazione 'supervised' delle principali variazioni stagionali GNDVI, SAVI e NDVI (Landsat 8 e Sentinel-2), e delle principali variazioni topografiche e litologiche ha permesso di mappare le categorie target (associazioni vegetali) con una elevata accuratezza. La mappa della vegetazione di primo livello (10 categorie fisionomiche e delle associazioni vegetali) ha raggiunto una accuratezza globale dell'85.2%. La mappa della vegetazione di secondo livello (13 categorie fisionomiche, delle associazioni vegetali, delle subassociazioni e delle varianti) ha raggiunto invece una accuratezza globale del 71.8%. Il maggiore contributo all'accuratezza finale della mappa è dato dalla componente fenologica, in grado di raggiungere da sola una accuratezza del 74.3%. La componente topografica da sola non supera invece il 57.9% (tabella 4.2). Le principali variazioni stagionali tele-rilevate sono dunque in grado di interpretare la variabilità vegetazionale meglio rispetto alle variazioni topografiche e litologiche.

La mappatura della vegetazione basata sulla LSP rappresenta un promettente strumento per una produzione continua di mappe ed è utile al monitoraggio sessennale degli habitat come richiesto dalla Direttiva habitat. L'elevata risoluzione temporale delle immagini Sentinel-2 ha permesso di collezionare ben 93 immagini in un arco temporale di soli tre anni (2017-2020). Questo permetterebbe di produrre mappe della vegetazione e degli habitat anche in tempi più brevi rispetto a quelli richiesti dalla Direttiva. Anche il clustering preliminare delle serie temporali NDVI del Monte Frassasi (Pheno-clustering) si è rilevato un utile strumento che ha facilitato l'esplorazione dell'area dal punto di vista dello studio fitosociologico. La mappa dei pheno-clusters ha consentito infatti di ottimizzare il campionamento a terra che è solitamente molto costoso in termini di risorse richieste.

Le precedenti mappe della vegetazione e forestali (Biondi, et al., 2009; IPLA, 2001) realizzate per quest'area in maniera tradizionale non sono accompagnate dall'informazione riguardo il livello di accuratezza raggiunto, e questo rende impossibile il confronto numerico tra queste e quelle realizzate in questa tesi. Tuttavia, da una comparazione visiva è possibile

apprezzare il maggior dettaglio delle mappe prodotte con l'ausilio della fenologia tele-rilevate (figura 5-1 e figura 5-2).

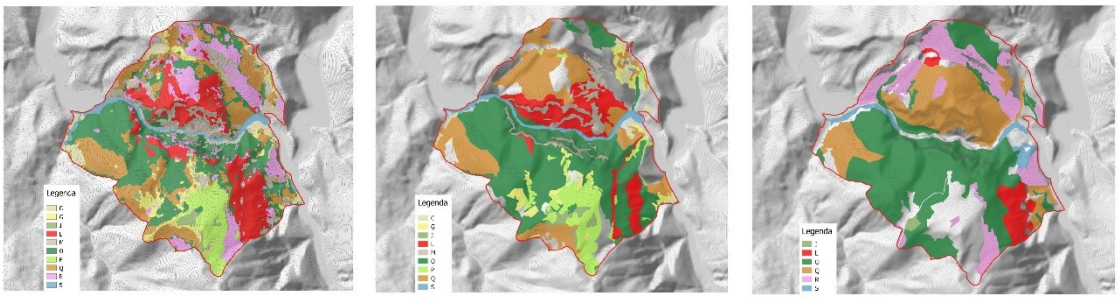


Figura 5-1: Mappe della vegetazione a confronto. A sinistra la mappa della vegetazione di primo livello ottenuta con l'ausilio della fenologia tele-rilevata. Al centro la mappa della vegetazione prodotta nel 2009 in maniera tradizionale (Biondi, et al., 2009). A destra la mappa dei tipi forestali (IPLA, 2001).

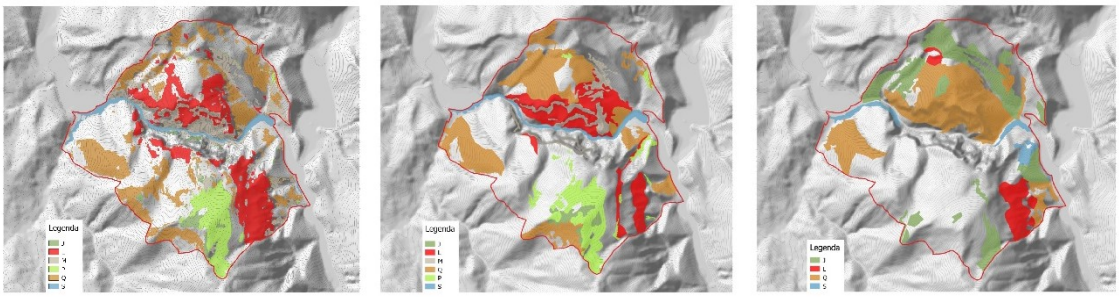


Figura 5-2: Mappe degli habitat a confronto. A sinistra la mappa degli habitat derivata dalla mappa della vegetazione di primo livello. Al centro la mappa degli habitat derivata dalla quella della vegetazione prodotta nel 2009 (Biondi, et al., 2009). A destra la mappa degli habitat derivata da quella dei tipi forestali (IPLA, 2001).

5.1.1. Confronto tra Landsat 8 e Sentinel-2

Le mappe basate sugli FPCA scores delle serie temporali NDVI Sentinel-2 (tabelle 4-3 e 4-4) hanno raggiunto un livello di accuratezza globale più alto rispetto a quello della mappa basata sugli FPCA scores delle serie temporali NDVI Landsat 8 (tabella 4-2). La più alta accuratezza globale ottenuta con l'NDVI Sentinel-2 non sempre però riflette una più alta accuratezza anche all'interno di tutte le categorie target. L'indice NDVI Landsat 8 sembra infatti discriminare meglio la categoria dei ginepreti e quella dei rimboschimenti (tabella 4-10). Questo testimonia che, nonostante le immagini Sentinel-2 siano in grado di apportare forti benefici, le immagini Landsat 8 possono comunque contribuire all'accuratezza finale della mappa. La migliore accuratezza ottenuta con le Sentinel-2 è probabilmente attribuibile alla loro maggiore risoluzione spaziale e temporale che in questo caso ha permesso di descrivere in modo più efficiente la variabilità vegetazionale. Il contributo della risoluzione spaziale delle immagini Sentinel-2 sembra essere maggiore soprattutto in quelle categorie che spesso hanno un'estensione inferiore alla risoluzione spaziale delle immagini Landsat 8 (30 metri) ma anche nelle situazioni di transizione tra le diverse categorie. Questo può avere dunque un forte impatto nell'accuratezza finale della mappa soprattutto in un'area eterogenea e molto frammentata da un punto di vista vegetazionale come quella relativa alla nostra area di studio (es. figura 5-3).

Figura 5-3: Vista di una porzione della Gola di Frasassi. Si può notare la continua alternanza tra le leccete sempreverdi e i boschi a dominanza di Ostrya carpinifolia che già

in questo periodo dell'anno presentano una marcata defogliazione (foto del 10 ottobre 2019).

5.1.2. Impatto dei diversi indici nelle categorie target

L'indice NDVI è comunemente utilizzato nello studio della fenologia tele-rilevata (Pesaresi, et al., 2020a; Costanzi, et al., 2018). Tuttavia, questa tesi ha rivelato che altri indici vegetazionali possono essere maggiormente performanti ed utili per la mappatura della vegetazione. Ad esempio, con l'NDVI abbiamo ottenuto una accuratezza globale del 72.2% (tabella 4-5), mentre con il GNDVI e il SAVI abbiamo ottenuto rispettivamente il 73.55% (tabella 4-6) ed il 74.3 % (tabella 4-7). Con gli indici MCARI e ND705, invece, abbiamo ottenuto accuratezze globali inferiori a quelle dell'NDVI rispettivamente del 62.4% e del 69.6% (tabelle 4-9 e 4-8).

I nostri risultati hanno però messo in evidenzia che ogni indice utilizzato ha mostrato diverse abilità nella discriminazione delle diverse categorie target. L'indice SAVI, che si è dimostrato essere il più performante a livello di accuratezza globale, risulta avere la migliore accuratezza in ben 4 delle 10 categorie target (tabella 4-10). L'indice GNDVI risulta avere la migliore accuratezza in 3 categorie su 10 (tabella 4-10) cosi come l'indice NDVI Sentinel-2. L'NDVI Landsat 8 ha invece la migliore accuratezza in 2 categorie su 10. In tabella 4-9 è facilmente osservabile l'azione complementare di questi indici nella discriminazione delle diverse categorie e la loro capacità di aggiungere contributi importanti nell'accuratezza globale. Questa analisi ci ha indirizzato verso la selezione della migliore combinazione di indici da utilizzare nelle mappature e che ha permesso di migliorare l'accuratezza globale e di ottenere quasi per tutte le categorie una producer's accuracy superiore all'80% (tabella 4-12). La combinazione degli indici GNDVI, SAVI, e NDVI Landsat 8 sembra dunque adatta a descrivere la fenologia di superficie e la vegetazione di quest'area.

5.2 Limiti del modello e future ricerche

La categoria dei boschi a dominanza di *Ostrya carpinifolia* (*Scutellario columnae-Ostryetum carpinifoliae*) è quella che presenta una producer's accuracy più bassa rispetto a tutte le altre (71%; tabella 4-12). La tabella di confusione mostra che questa tipologia può essere confusa prevalentemente con il bosco a dominanza di *Quercus pubescens* (*Cytiso sessilifolii-Quercetum pubescentis*) che di conseguenza tende ad essere sovrastimato dal modello. La categoria dei querceti presenta infatti una *user's accuracy* inferiore a tutte le altre

categorie target (67%, tabella 4-12). Questo informa l'utilizzatore che la categoria dei querceti potrebbe includere in alcune sue aree la categoria degli ostrieti ma non viceversa (nella mappa prodotta, gli ostrieti non includono mai i querceti). La mappatura della vegetazione di secondo livello ha evidenziato che ad essere maggiormente confusa con la categoria dei querceti è la tipologia di ostrieto termofilo e rupestre (O2) che ha una producer's accuracy del 29% (tabella 4-15). Va inoltre sottolineato che né la topografia, né la litologia sono in grado di discriminare queste categorie (tabella 4-13) e che in alcuni casi di boschi di *Quercus pubescens* (*Cytiso sessilifolii-Quercetum pubescentis*) e di *Ostrya carpinifolia* (*Scutellario columnae-Ostryetum carpinifoliae*) non si osserva la netta prevalenza di una specie rispetto all'altra (tabelle A2 e A3). Una ulteriore causa della difficile interpretazione e discriminazione dei due boschi potrebbe essere attribuita alla gestione antropica del territorio esercitata nel tempo. Osservando le foto aeree storiche del 1949-1951 della nostra area di studio (figura 5-4) ci si rende facilmente conto di come le aree maggiormente sfruttate dall'uomo (più chiare nell'immagine) coincidano con il pattern spaziale della categoria dei querceti e degli ostrieti O2. Ad esempio, la figura 5-5 mostra il cambiamento di uso del suolo avvenuto nel versante orientale del Monte Frasassi.

Migliorare l'accuratezza dei querceti (habitat 91AA* dell'allegato I 92/43/CEE) impone ulteriori ricerche. A tal fine è attualmente in corso una collaborazione con il gruppo di ricerca di Adriano Mancini del Dipartimento ingegneria dell'informazione per lo studio e l'applicazione di altri indici di vegetazione oltre a quelli utilizzati in questa tesi e di classificatori diversi dal Random Forest. Ad esempio, in via del tutto preliminare, è stato usato il classificatore 'Adaboost' che pur mostrando un'accuratezza globale (producer's accuracy del 73.8%) inferiore a quella del Random Forest, sembra essere migliore per alcune categorie. Anche l'utilizzo di foto storiche (orto-rettificate, ad es. figura 5-4) nel processo di mappatura potrebbe essere una buona soluzione per discriminare accuratamente le tipologie forestali (soprattutto quelle fortemente influenzate dalla gestione).

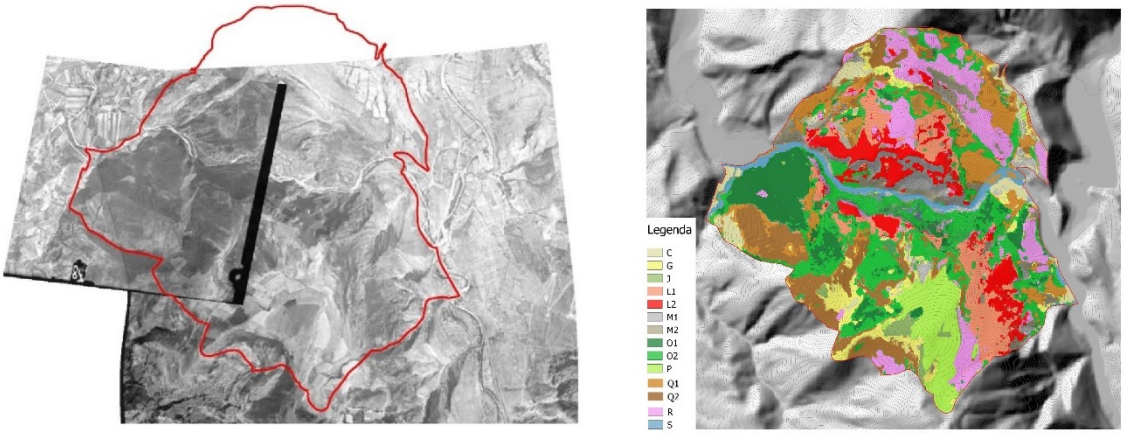


Figura 5-4: Corrispondenza visiva tra la l'uso del suolo passato e l'attuale assetto spaziale della vegetazione. A sinistra le foto aeree storiche del 1949-1951 mentre a destra la mappa della vegetazione prodotta in questa tesi.

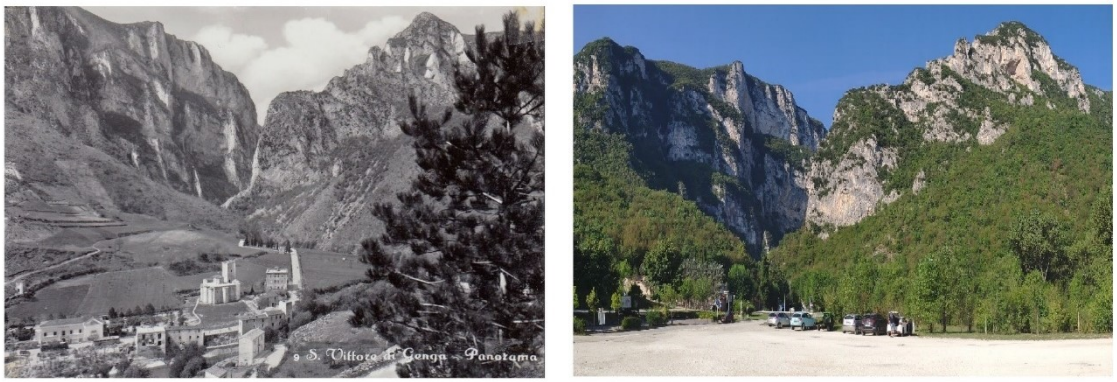


Figura 5-5: Cambiamento storico avvenuto nel versante orientale del Monte Frasassi. Le aree interessate dalla gestione dell'uomo sono oggi occupante da boschi a dominanza di Quercus pubescens e Ostrya carpinifolia laddove nel 1953 erano utilizzate come coltivi o pascoli.

Il lavoro di questa tesi ha permesso di mappare con una elevata accuratezza e in tempi brevi l'intera area della ZSC 'Gola di Frasassi'. Inoltre, il buon risultato ottenuto con l'utilizzo di diversi indici vegetazionali e dalla combinazione di questi, indica che l'analisi della fenologia può essere integrata allo studio della fitosociologia.

6 APPENDICE

6.1 Tabelle fitosociologiche

Tabella A1. Tabella fitosociologica ordinata dell'associazione vegetale Cephalanthero longifoliae-Quercetum ilicis

Ril (Plot)	**18**	**19**	**34**	**45**	**46**	**47**	**48**	**65**	**73**	**29**	**32**	**50**	**52**	**53**	**67**	**84**	**85**
cluster	L1	L1	L1	L1	L1	L1	L1	L1	L1	L2	L2	L2	L2	L2	L2	L2	L2
Data	30/07/2019	30/07/2019	04/10/2019	12/06/2020	12/06/2020	12/06/2020	12/06/2020	07/08/2020	07/08/2020	12/09/2019	12/09/2019	09/07/2020	09/07/2020	09/07/2020	07/08/2020	04/09/2020	04/09/2020
Quota (m s.l.m)			360	580				540	640	580	540	390	450	430	570	440	450
Esposizione (°)			0	335	23	112	45	300	120	135	30	225	202	270	277	114	77
Pendenza (°)		20	40	35	40	35	25	40	40	30	40	40	35	25	35	50	45
Copertura totale (%)			100	100	100	95	100	100	100	100	100	90	98	100	100	100	100
Cop. Strato arboreo (%)	100	100	95	98	100	95	100	100	100	98	90	90	97	100	100	100	100
Cop. Strato arbustivo (%)	15	10	50	20	10	5	15	2	3	10	10	70	30	30	40	7	6
Cop. strato erbaceo (%)	20	10	35	35	60	10	40	3	2	30	5	10	20	7	20	30	15
Altezza strato arboreo (m)	8	8	8	10	6	7	9	8	6	6	5	6	8	9	8	8	8
Altezza strato arbustivo (m)	1.8	1	3	4	0.5	1.5	1	0.5	1.5	1	1.5	2.5	2	1.5	3.5	1	0.8
Altezza strato erbcaeo (m)	0.3	0.2	0.6	0.3	0.4	0.3	0.3	0.3	0.3	0.6	0.3	0.3	0.6	0.3	0.6	0.8	0.6
Sp. caratt. dell'ass. Cephalanthero longifoliae-Quercetum ilicis																	
Ostrya carpinifolia	.	2	2	2	1	2	3	2	+	2	.	2	.	.	.	2	3
Melica uniflora	2	1	2	+	.	.	2	+	.	+	.	.	.	.	.	.	.
Melittis melissophyllum	+	+	+	+	1	.	1	+	.	+	.	.	+	+	+	.	+
Hepatica nobilis	.	.	.	+	+	+	+	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.
Sorbus aria	.	.	.	+	+	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	+
Specie diff. della subass. lathyretosum veneti																	
Dioscorea communis	+	+	.	+	.	+	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
Stachys officinalis	.	.	+	.	+	+	+	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.
Daphne laureola	.	.	.	+	+	+	.	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.
Acer opalus ssp. obtusatum	.	.	.	1	+	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	+
Lonicera xylosteum	+	.	.	+	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
Crataegus monogyna	.	+	.	+	.	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
Ligustrum vulgare	+	.	.	.	.	+	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
Acer campestre	+	.	.	.	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
Euphorbia amygdaloides	.	.	+	.	.	.	.	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.
Helleborus foetidus ssp. foetidus	+	.	.	.	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
Helleborus viridis ssp. bocconei	.	.	+	.	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.

Laburnum anagyroides	.	.	.	+	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
Mercurialis perennis	.	.	.	.	+	.	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
Sorbus torminalis	.	.	+	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
Lathyrus venetus	.	+	.	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
Sp. diff. della variante a Cotinus coggygria																		
Cotinus coggygria	.	.	+	+	+	.	.	.	.	+	+	4	3	2	.	1	+	
Osyris alba	.	.	.	.	.	+	.	.	+	+	1	2	1	1	.	+	1	
Viburnum tinus ssp. tinus	.	.	.	.	+	.	.	+	.	.	+	.	+	+	3	+	+	
Pistacia terebinthus ssp. terebinthus	.	.	+	.	.	.	.	.	.	+	+	2	1	.	.	.	+	
Vincetoxicum hirundinaria	.	.	.	.	.	.	.	.	.	+	.	+	.	.	.	.	.	
	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	
Specie caratt. degli ordini superiori																		
Quercus ilex	4	5	4	4	5	5	4	5	5	4	5	4	5	5	5	5	5	
Fraxinus ornus ssp. ornus	2	2	3	3	2	2	3	2	3	3	2	3	3	3	2	2	2	
Asparagus acutifolius	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	1	1	+	+	+	
Rubia peregrina	+	+	+	+	1	1	1	+	+	+	2	1	+	+	.	+	2	
Phillyrea latifolia		+	+	.	1	+	1	.	+	.	1	+	2	1	1	+	+	
Smilax aspera		.	.	+	+	.	.	.	.	+	1	2	3	4	2	2	1	
Asplenium onopteris	1	1	1	+	.	+	+	+	.	+	+	.	.	.	.	+	.	
Cyclamen hederifolium	+	+	+	+	+	+	.	+	.	+	.	.	+	.	+	.	.	
Carex halleriana		.	.	+	+	+	1	.	+	+	.	+	+	+	+	.	.	
Teucrium flavum		.	.	.	.	.	.	.	.	+	.	+	.	.	.	.	+	
Lonicera etrusca		.	.	.	.	.	.	+	.	+	.	.	.	.	.	.	.	
Specie compagne																		
Ruscus aculeatus	+	1	3	3	1	+	1	+	+	2	.	.	2	1	2	2	1	
Coronilla emerus ssp. emeroides	+	1	+	+	+	+	+	+	.	+	.	1	+	1	+	+	+	
Acer monspessulanum	2	2	3	1	+	+	3	.	.	1	.	+	2	1	1	.	.	
Quercus pubescens	2	1	1	1	+	+	.	2	1	.	.	2	.	.	+	.	1	
Ceterach officinarum	1	+	+	.	.	+	+	.	+	+	+	.	.	.	+	+	.	
Hedera helix ssp. helix	+	.	+	+	+	+	+	+	.	+	.	.	.	.	+	.	+	
Viola alba ssp. dehnhardtii	+	+	.	+	+	+	1	+	.	+	.	.	.	.	.	+	+	
Cornus mas	.	+	2	1	.	.	.	.	+	.	.	+	1	1	+	.	.	
Juniperus oxycedrus	.	.	.	.	.	+	+	+	1	1	.	3	.	+	.	.	.	
Arabis turrita	+	.	.	.	.	1	.	.	.	+	+	+	.	.	.	+	.	
Brachypodium rupestre	.	.	.	+	+	.	.	.	.	+	+	+	.	.	.	.	.	
Cyclamen repandum Sm.	.	.	.	2	1	+	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	
Polypodium vulgare	.	.	+	.	.	+	.	.	+	.	.	.	.	.	.	+	.	
Cytisophyllum sessilifolium	.	.	.	.	+	.	.	.	.	.	.	1	+	.	.	+	.	
Asplenium trichomanes	+	.	+	.	.	.	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	
Digitalis micrantha	+	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	
Buglossoides purpurocaerulea	+	.	.	.	.	.	.	.	+	.	.	.	.	.	.	.	.	
Carex flacca	.	.	+	.	.	.	.	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	
Amelanchier ovalis	.	.	.	.	.	.	.	.	.	+	.	.	.	.	.	.	.	
Arbutus unedo	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	+	.	.	
Asplenium adiantum-nigrum	.	.	.	.	.	.	.	.	.	+	.	.	.	.	.	.	.	
Asplenium ruta-muraria	.	.	.	.	.	.	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	
Brachypodium sylvaticum	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	
Carex sylvatica	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	+	.	.	
Clematis recta	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	2	.	.	.	.	.	
Cornus sanguinea	2	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	
Epipactis helleborine	.	.	.	.	.	.	.	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	

Euonymus europaeus	.	.	.	.	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
Festuca heterophylla Lam.	.	.	.	.	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
Hieracium murorum	.	.	.	.	.	.	.	.	.	+	.	.	.	.	.	.	.	.
Luzula sylvatica	.	.	.	.	1	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
Pinus pinea	.	.	.	.	.	.	.	1	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
Polypodium interjectum	.	.	.	.	.	.	.	.	.	+	.	.	.	.	.	.	.	.
Primula vulgaris	.	.	.	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
Ptilostemon strictus	.	.	.	.	.	.	.	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
Quercus cerris	.	.	.	1	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
Rosa canina	.	.	.	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
Scutellaria columnae	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
Silene alba	.	.	.	.	.	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
Sorbus domestica	.	.	.	.	.	.	.	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
Viola reichenbachiana	.	.	.	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.

Tabella A2. Tabella fitosociologica ordinata dell'associazione vegetale Cytiso sessilifolii-Quercetum pubescentis

Ril (Plot)	**10**	**38**	**39**	**41**	**55**	**57**	**59**	**78**	**82**	**2**	**4**	**7**	**25**	**28**	**58**	**61**	**62**	**63**	**71**
Cluster	Q1	Q1	Q1	Q1	Q1	Q1	Q1	Q1	Q1	Q2	Q2	Q2	Q2	Q2	Q2	Q2	Q2	Q2	Q2
Data	16/07/2019	04/10/2019	11/10/2019	11/10/2019	09/07/2020	24/07/2020	24/07/2020	04/09/2020	04/09/2020	16/07/2019	16/07/2019	16/07/2019	01/08/2019	12/09/2019	24/07/2020	24/07/2020	24/07/2020	07/08/2020	07/08/2020
Quota (m s.l.m)		200	200	240	480	482	480	344	416	800				700	465	567	577	520	570
Esposizione (°)	45	45			135	190	270	136	65	259	37	315	280	135	150	176	188	282	
Pendenza (°)	20	45	35	37	35	25	30	25	40	30	30	6	28	35	40	30	35	25	45
Copertura totale (%)	100	90	100	95	90	80	100	95	90	98	85	98		95	100	100	100	100	100
Cop. Strato arboreo (%)	70	85	95	95	75	75	100	90	85	95	80	95	80	90	100	95	100	100	90
Cop. Strato arbustivo (%)	80	40	30	20	50	60	5	30	30	40	10	40	70	45	20	25	20	10	3
Cop. strato erbaceo (%)	85	70	50	15	70	50	10	40	40	20	50	60	10	35	70	40	40	70	90
Altezza strato arboreo (m)	6	8	11	9	9	4	11	10	8	7	8	6	7	7	12	10	9	10	8
Altezza strato arbustivo (m)	1.2	2	1.5	2.5	2	2	2	2	1	0.9	1	1	3	1.5	1.8	1.5	1.5	1.5	2
Altezza strato erbcaeo (m)	0.4	0.3	0.2	0.25	0.7	0.3	0.3	0.6	0.4	0.4	0.3	0.4	0.4	0.3	0.5	0.3	0.4	0.4	0.4
Sp. caratt. e diff. dell'ass. Cytiso sessilifolii-Quercetum pubescentis																			
Juniperus oxycedrus	+	2	+	+	1	3	+	2	1	2	1	1	2	.	2	.	+	+	2
Cytisophyllum sessilifolium	1	+	.	+	.	+	.	1	+	1	+	2	.	3	1	1	1	+	+
Rosa canina	.	.	.	.	+	.	.	.	.	2	+	+	.	+	+	.	.	+	.
Teucrium chamaedrys	.	.	.	.	.	.	.	+	.	+	1	+	+	.	.	+	.	.	+
Cotinus coggygria	5	.	.	+	.	+	.	+	.	.	.	3	5	3	.	1	+	.	1
Pistacia terebinthus	+	.	.	.	.	2	.	.	1	.	.	.	+	.	.	.	1	.	.
Sp. diff. aspetto più termofilo e più ricco in arbusti																			
Phillyrea latifolia	.	3	.	2	+	2	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.

Viburnum tinus ssp. tinus	.	+	1	1	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	+	.
Specie diff. della suball. Lauro-Quercenion pubescentis																				
Quercus pubescens	3	4	4	4	4	4	5	4	3	4	4	4	4	4	5	4	4	5	5
Fraxinus ornus ssp. ornus	4	3	3	3	4	3	4	3	4	3	3	2	3	4	3	3	3	3	2
Asparagus acutifolius	1	1	1	1	1	+	+	1	+	1	1	.	1	2	1	1	1	+	+
Osyris alba	1	+	.	2	2	3	+	2	1	+	3	2	1	2	3	3	3	+	1
Quercus ilex	3	2	+	2	.	3	1	+	2	+	2	1	+	.	2	2	+	2	2
Acer monspessulanum	1	1	1	2	1	2	+	+	+	.	.	.	1	2	1	+	+	+	1
Rubia peregrina	.	3	2	1	1	+	+	+	+	.	.	.	.	.	+	+	.	1	.
Viola alba ssp. dehnhardtii	.	.	+	.	.	+	+	.	+	1	1	+	+	+	+	+	+	+	+
Ptilostemon strictus	.	.	.	.	.	.	+	.	+	1	+	+	.	+	+	+	.	1	+
Lonicera etrusca	.	.	.	.	+	.	.	+	.	1	.	+	+	.	+	1	+	+	+
Helleborus foetidus	.	.	.	.	.	.	+	.	+	+	.	.	+	.	.	+	+	.	.
Inula conyzae	.	+	.	+	.	.	.	.	.	.	+	+	+	.	+	.	.	.	.
Laurus nobilis	.	.	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
Specie degli ordini superiori																				
Ostrya carpinifolia	.	3	3	4	+	2	1	3	3	2	3	3	+	2	3	4	4	2	1
Acer opalus ssp. obtusatum	+	+	+	.	.	.	3	1	+	1	+	+	.	1	.	+	.	.	1
Cornus mas	.	.	.	.	+	.	.	+	.	+	.	.	3	2	.	+	+	+	+
Coronilla emerus	.	.	+	+	.	.	+	+	+	1	.	.	.	.	.	.	+	.	+
Acer campestre	.	.	3	+	.	.	1	+	.	.	+	.	+	.	.	.	.	1	.
Hedera helix ssp. helix	.	.	4	2	.	.	+	.	.	1	.	.	.	.	.	+	.	1	+
Sorbus domestica	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	1	+	+	.	+	+	.	1	.
Daphne laureola	.	.	.	+	.	.	.	.	.	+	+	.	.	+	.	.	.	+	+
Peucedanum oreoselinum	.	.	.	.	.	.	.	.	.	2	1	+	.	+	.	+	.	.	.
Sorbus aria	.	.	.	.	.	.	.	.	.	+	+	+	.	.	.	+	.	+	.
Helleborus viridis ssp. bocconei	.	.	+	.	.	.	.	.	.	.	.	+	+	.	+	.	.	1	.
Lonicera xylosteum	.	.	.	.	.	.	.	.	+	1	1	.	+	.	.	.	.	.	.
Cyclamen hederifolium	.	+	.	+	.	.	+	.	.	.	.	.	.	+	.	.	.	.	.
Euphorbia amygdaloides	.	.	.	.	.	.	.	.	.	+	.	.	.	.	+	.	.	1	.
Ulmus minor	+	.	.	.	1	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.

Lilium bulbiferum ssp. croceum	.	+	.	.	.	.	.	.	.	.	+	.	.	.	.	.	.	.	.
Buglossoides purpurocaerulea	.	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	1	.	.	.	.	.
Melittis melissophyllum	.	.	.	.	.	.	+	.	.	.	.	.	.	+	.	.	.	.	.
Epipactis helleborine	.	.	.	.	.	.	.	.	.	r	.	.	.	.	.	+	.	.	.
Rubus caesius	.	.	.	.	.	.	.	.	.	+	.	.	.	.	.	.	.	+	.
Dioscorea communis	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	+	.	.	.	.	.	.	+	.
Solidago virgaurea	.	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
Luzula forsteri	.	.	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
Rubus hirtus	.	.	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
Prunus avium	.	.	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
Melica uniflora	.	.	.	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
Brachypodium sylvaticum	.	.	.	.	.	.	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
Carpinus orientalis	.	.	.	.	.	.	.	1	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
Primula vulgaris	.	.	.	.	.	.	.	.	.	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.
Fagus sylvatica	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	+	.	.	.	.	.	.	.
Quercus cerris	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	1	.	.	.	.	.	.	.
Ilex aquifolium	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	+	.	.	.	.	.	.	.
Hepatica nobilis	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	+	.	.	.	.	.
Specie compagne																			
Brachypodium rupestre	2	3	+	2	4	.	1	1	3	1	3	2	1	1	3	3	3	4	4
Spartium junceum	+	2	.	.	3	2	+	+	1	+	.	+	+	.	+	+	.	.	.
Carex halleriana	.	1	.	.	.	+	+	+	.	.	.	1	.	.	+	.	.	1	.
Arabis turrita	.	.	.	+	+	.	+	+	+	.	.	.	+	.	.	.	.	+	.
Dorycnium hirsutum	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	+	+	+	.	+	+	+	+	.
Ruscus aculeatus	4	.	+	.	.	.	+	+	.	.	+	.	1	.	.	.	.	.	.
Ligustrum vulgare	.	+	1	1	.	.	.	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	+	+
Prunus spinosa ssp. spinosa	.	+	+	+	2	.	.	.	1	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.
Polypodium vulgare	.	+	+	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
Ceterach officinarum	.	+	.	+	.	.	.	.	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
Calamintha nepeta	.	+	.	.	.	.	+	.	.	.	.	.	+	.	.	.	.	.	.
Crataegus monogyna	.	.	+	+	+	.	+	.	.	.	.	.	+	.	.	.	.	+	.
Clematis vitalba	.	.	+	.	.	.	.	.	+	.	.	.	.	.	.	.	.	+	.

Dactylis glomerata	.	.	.	.	1	.	.	.	.	+	.	.	.	.	.	.	.	.	+
Pyrus communis ssp. pyraster	.	.	.	.	.	.	.	+	+	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.
Asplenium trichomanes	.	+	.	.	.	.	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
Silene alba	.	.	.	.	.	.	.	.	.	1	.	1	.	.	.	.	.	.	.
Carex flacca	.	.	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	+
Clinopodium vulgare	.	.	.	.	+	.	.	.	.	r	.	.	.	.	.	.	.	.	.
Melica ciliata	.	.	.	.	+	.	.	.	.	.	.	.	+	.	.	.	.	.	.
Smilax aspera	.	.	.	.	.	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	+	.	.
Pinus nigra	.	.	.	.	.	.	.	+	.	.	.	.	.	.	.	2	.	.	.
Colutea arborescens	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	1	.	.	.	+	.	.
Pinus pinea	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	2	1	.	.
Cruciata glabra	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	+	+
Koeleria splendens	.	2	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
Silene italica	.	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
Cornus sanguinea	.	.	2	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
Elaeagnus pungens	.	.	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
Orobanche hederae	.	.	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
Bromus erectus	.	.	.	.	1	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
Olea europaea	.	.	.	.	1	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
Eryngium amethystinum	.	.	.	.	.	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
Galium corrudifolium	.	.	.	.	.	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
Asplenium onopteris	.	.	.	.	.	.	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
Pteridium aquilinum	.	.	.	.	.	.	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
Festuca circummediterranea	.	.	.	.	.	.	.	.	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
Digitalis micrantha	.	.	.	.	.	.	.	.	.	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.
Rubus ulmifolius	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	+	.	.	.	.	.	.	.	.
Euonymus europaeus	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	+	.	.	.	.	.	.
Euphorbia cyparissias	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	+	.	.	.
Hieracium pilosella	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	+	.	.	.	.	.	.
Lathyrus latifolius	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	+	.	.	.	.	.	.
Agrimonia eupatoria	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	+	.	.	.	.	.	.
Astragalus monspessulanus	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	+	.

Tabella A3. Tabella fitosociologica ordinata dell'associazione vegetale Scutellario columnae-Ostryetum carpinifoliae

Ril (Plot)	**8**	**9**	**20**	**21**	**22**	**23**	**24**	**26**	**30**	**33**	**35**	**36**	**37**	**6**	**31**	**5**	**27**	**40**	**42**	**43**	**44**	**49**	**51**	**54**	**56**	**70**	**83**	**87**	**86**	**64**	**17**	**3**	
cluster	O1	O1	O1	O1	O1	O1	O1	O1	O1	O1	O1	O1	O1	O2	O2	O2	O2	O2	O2	O2	O2	O2	O2	O2	O2	O2	O2	O2	O2	O1	O1	O2	O1
Data	16/07/2019	16/07/2019	01/08/2019	01/08/2019	01/08/2019	01/08/2019	01/08/2019	01/08/2019	12/09/2019	04/10/2019	04/10/2019	04/10/2019	04/10/2019	16/07/2019	12/09/2019	16/07/2019	12/09/2019	11/10/2019	11/10/2019	11/10/2019	11/10/2019	09/07/2020	09/07/2020	09/07/2020	24/07/2020	07/08/2020	04/09/2020	04/09/2020	04/09/2020	07/08/2020	30/07/2019	16/07/2019	08/06/2010
Quota (m s.l.m)	510	467	260	260	250	327	390		600	360	340	330	240		670		635	278	240	170	270	190	340	310	460	590	500	370	380	550		800	840
Esposizione (°)	326	330	299	335	340	315	170	0	245	315	315	340	315	300	20	0	160					225	90	225	220	350	51	73	96	315		315	
Pendenza (°)	25	35	46	10	20	30	40	40	20	30	30	35	35	8	5	25	35	50	45	40	55	30	30	35		25	35	40	35	30	8	10	
Cop. Strato arboreo (%)	95	98	100	100	95	95	98	98	100	98	98	100	90	96	90	98	95	95	98	100	95	98	100	100	100	100	100	100	100	100	95	98	
Cop. Strato arbustivo (%)	15	10	20	20	15	10	5	5	7	25	5	15	10	40	30	10	30	40	7	40	40	60	50	60	20	30	5	5	20	5	10	40	
Cop. strato erbaceo (%)	40	60	50	60	30	60	35	10	35	50	45	30	40	40	80	30	30	35	30	70	90	10	15	25	40	80	25	30	40	50	30	35	
Altezza strato arboreo (m)	14	14	11	20	16	14	14	15	14	12	14	10	14	10	10	10	13	10	9	10	7	8	8	8	13	9	15	12	7	14	10	9	18
Altezza strato arbustivo (m)	0.7	1.2	1	1.5	2	2	0.5	1.6	0.4	2	1.5	3	2	0.7	2	1	2.5	4	3	2	1.5	3	2	2	2	1.5	1	1	1.2	0.4	1.5	0.8	
Altezza strato erbcaeo (m)	0.5	0.4	0.4	0.3	0.4	0.5	0.7	0.3	0.3	0.6	0.7	0.6	0.6	0.3	0.5	0.3	0.2	0.3	0.3	0.4	0.7	0.3	0.3	0.2	0.3	0.3	0.3	0.6	0.6	0.3	0.3	0.3	
Specie caratt. e diff. dell'associazione Scutellario columnae-Ostryetum carpinifoliae																																	
Hepatica nobilis	+	+	+	.	+	+	+	+	+	+	+	+	+	1	.	+	.	.	.	1	.	.	+	.	.	+	.	.	.	2	+	+	.
Crataegus monogyna	+	+	.	+	+	+	1	+	+	+	.	1	1	+	.	.	.	+	+	.	.	+	.	+	.	1	.	.	.	+	+	.	.
Melittis melissophyllum	+	+	1	.	.	1	+	.	+	+	+	+	1	.	.	.	+	+	.	+	+	+	+	+	+	.	.	.	.	1	.	.	.
Helleborus viridis ssp. bocconei	+	+	+	+	+	+	.	+	.	+	+	+	+	1	.	.	.	.	+	.	.	.	.	.	+	1	.	.	.	2	+	.	.
Lathyrus venetus	1	1	.	.	3	r	.	.	+	.	+	+	.	.	.	.	.	.	.	+	.	.	.	.	+	.	.	.	.	+	2	.	.
Viola reichenbachiana	.	1	1	2	.	.	+	+	+	.	.	.	+	.	.	+	.	+	.	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.

Dioscorea communis	.	+	+	+	.	.	+	+	.	.	.	.	.	.	.	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	+	.	.	+
Corylus avellana	.	+	+	3	.	.	.	+	1	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	1	.	.
Ilex aquifolium	.	1	.	.	.	.	+	.	+	.	.	.	.	.	.	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
Scutellaria columnae	.	.	.	.	.	.	.	.	1	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	+	.	.	.
subass. quercetosum cerridis																																			
Quercus cerris	5	1	1	2	4	4	3	2	1	3	3	3	4	3	2	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
Sorbus torminalis	.	.	+	+	.	+	+	+	.	1	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	1	.	.	.	.	.	.	.
Carex sylvatica	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	1	.	.	.	.
Aspetto rupestre (termofilo)																																			
Arabis turrita	.	.	.	.	.	.	.	.	+	.	.	.	.	.	+	.	.	+	+	.	.	+	.	.	+	.	.	+	+	.	.	.	.
Ceterach officinarum	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	+	.	+	+	.	+	.	.	.	+	+	.	.	.	.
Carex halleriana	.	1	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	1	.	3	.	.	.	.	.	+	+	+	+	+	.	.	.	.	.	.	.
Smilax aspera	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	+	+	1	.	3	+	.	.	.	.	1	.	.	.	.
Viburnum tinus ssp. tinus	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	2	.	+	.	.	+	+	.	.	.	+	.	.	.	.	.
Pistacia terebinthus	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	+	.	+	.	+	.	.	.	.	.	1	.	.	.	.
Quercus ilex	3	+	+	.	1	+	.	+	2	.	2	1	.	+	2	1	.	3	2	2	3	2	4	2	1	1	2	2	4	2	+	1	.
Cotinus coggygria	+	.	1	.	1	+	.	.	.	2	+	+	+	2	+	.	1	.	2	1	3	3	3	3	.	.	.	.	1	.	.	1	+
Rubia peregrina	+	.	+	.	1	+	+	+	.	.	.	.	.	+	1	.	.	1	2	+	1	1	1	1	1	+	.	2	+	.	.	.	.
Asplenium onopteris	+	.	+	.	1	.	.	.	.	.	+	.	.	.	.	.	.	.	+	1	.	+	.	+	+	.	.	1	+	+	.	.	+
Specie della suballeanza Laburno-Ostryenion																																			
Ostrya carpinifolia	4	5	4	4	3	2	5	5	5	4	4	5	4	4	4	5	4	5	4	5	5	5	4	4	4	5	5	5	4	5	5	5	5
Fraxinus ornus ssp. ornus	3	2	2	2	3	3	3	3	3	3	3	2	2	3	2	3	3	3	3	3	3	2	3	2	3	3	2	2	3	2	+	3	+
Acer opalus ssp. obtusatum	2	2	3	1	.	2	3	3	3	3	.	3	2	2	2	2	3	.	1	1	1	.	2	.	+	2	1	.	.	3	2	2	2
Cornus mas	+	+	1	2	1	2	+	1	+	+	+	1	2	+	.	.	3	1	.	2	.	1	1	+	2	.	.	.	.	.	.	+	.
Lonicera xylosteum	+	.	1	+	1	.	.	+	+	.	.	+	.	1	2	1	.	.	1	+	1	+	.	.	1	3	.	.	.	+	+	1	2
Helleborus foetidus	.	.	+	+	+	.	+	.	+	.	.	.	+	.	+	.	.	+	.	.	+	+	.	.	2	.	+	+	.	.	.	+	.
Sorbus aria	+	.	+	.	.	.	.	.	1	.	.	.	.	1	+	1	+	.	.	+	+	.	+	.	.	1	.	.	.	1	2	2	.
Euphorbia amygdaloides	+	+	+	.	1	+	.	+	.	1	.	+	+	+	.	1	+	+	.	+	.	.	.	.	.	1	+	.	.	2	+	2	.
Melica uniflora	2	1	+	1	1	+	.	+	1	.	.	+	.	.	1	.	.	.	.	+	.	1	.	+	.	+	1	2	+	3	1	.	.

Mercurialis perennis	.	+	1	.	.	.	.	.	1	.	.	.	+	+	.	+	.	.	.	1	+	.	+	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
Sanicula europaea	.	+	.	+	.	.	.	+	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	+	.	3
Lilium bulbiferum	.	.	+	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	+	.	+	.	.	.	.	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	+	1
Cruciata glabra	.	.	.	.	+	.	.	.	+	.	.	.	.	.	.	.	+	.	.	.	.	.	.	.	+	+	.	.	.	.	.	.	1
Euonymus latifolius	.	+	+	+	.	.	.	.	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	2	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
Staphylea pinnata	.	2	1	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
Stellaria holostea ssp. holostea	.	.	.	.	.	.	.	.	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	+	.	.
Solidago virgaurea	.	.	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
Laburnum anagyroides	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.

Specie caratt. dell'alleanza Carpinion orinetalis, dell'ordine Quercetalia pubescentis-petraeae e della classe Querco-Fagetea

Asparagus acutifolius	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	.	1	+	2	+	2	1	1	+	1	+	+	+	+	+	.	1	.
Hedera helix ssp. helix	.	+	3	3	1	1	+	+	2	+	1	+	2	.	+	.	+	2	.	3	4	2	2	2	2	+	+	r	.	2	1	+	2
Viola alba ssp. dehnhardtii	+	.	1	1	+	+	.	+	+	+	+	+	+	1	+	1	1	+	+	+	.	+	.	.	+	+	+	+	+	+	+	1	2
Daphne laureola	+	.	+	+	.	+	+	+	+	+	.	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	.	.	+	+	+	.	.	+	+	+	1
Quercus pubescens	.	.	1	2	+	2	.	+	1	1	1	.	.	1	3	1	3	1	2	.	1	1	3	3	2	2	3	.	1	2	3	3	.
Acer monspessulanum	.	.	.	.	2	2	.	1	+	1	2	1	+	+	2	.	+	+	1	+	1	1	1	1	+	+	.	1	1	.	+	.	.
Cyclamen hederifolium	.	+	+	.	+	+	1	+	+	.	+	+	+	.	.	.	.	+	1	2	+	1	.	+	.	.	.	+	+	.	.	.	.
Acer campestre	.	.	1	2	1	1	.	.	.	.	.	.	.	+	.	.	2	+	1	+	.	+	.	.	3	+	.	.	.	.	1	1	+
Primula vulgaris	.	+	+	+	.	.	+	.	.	.	.	.	+	.	.	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	+	+	.	.	1	+	+	1
Buglossoides purpurocaerulea	.	.	+	.	+	+	.	.	.	1	.	+	.	.	.	.	2	.	.	.	.	+	.	.	.	.	.	.	.	.	+	+
Sorbus domestica	.	.	.	.	+	+	.	1	1	.	.	1	.	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	1	1	.	.	.	.	.	.
Brachypodium sylvaticum	.	.	.	.	1	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	+	.	1	.	+	2	+	.	.	1	+	.	.	.
Rosa arvensis	1	.	.	.	+	.	.	.	+	+	.	.	.	.	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	1	.	+
Lonicera etrusca	.	.	.	.	.	.	.	.	+	.	+	.	.	+	.	.	+	.	.	.	.	+	+	.	.	.	.	.	.	.	.	+	.
Mycelis muralis ssp. muralis	.	.	.	.	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	+	.	+	.	.	.	.	.	+	.	+	.	.	.	.	1
Stachys officinalis	.	.	.	.	+	+	.	.	.	+	.	.	.	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	+	.	.	.
Rubus caesius	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	+	.	.	.	.	.	.	.	.	1	+	+	.	.	+	.	.	.
Rubus hirtus	.	.	.	.	.	.	.	.	.	+	.	.	+	.	.	.	.	+	+	.	.	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
Epipactis helleborine	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	+	.	.	.	+	+	.	.
Ajuga reptans	.	.	.	.	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	1

Fagus sylvatica	.	.	.	.	.	.	2	.	.	.	.	.	.	.	.	2	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	2
Campanula trachelium	.	.	+	.	.	.	.	.	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
Geum urbanum	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	1
Luzula forsteri	.	.	.	.	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	2
Acer platanoides	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	+	.	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
Vincetoxicum hirundinaria	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	+	.	.	.	.	.	.	.	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
Clematis recta	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	1	.	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
Polygonatum multiflorum	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
Prunus mahaleb	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
Inula conyzae	.	.	.	.	.	.	.	.	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
Hieracium murorum	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	2
Scilla bifolia L.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	+
Festuca heterophylla Lam.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	+
Cephalanthera damasonium	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	1
Cyclamen repandum	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	2
Euphorbia dulcis	.	.	.	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
Tilia cordata	.	.	.	3	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
Galium odoratum	.	.	.	.	.	.	.	.	1	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
Saxifraga rotundifolia	.	.	.	.	.	.	.	.	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
Cephalanthera longifolia	.	.	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
Bromus ramosus	.	.	.	.	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
Crataegus laevigata	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
Doronicum columnae	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	+	.
Prunus avium	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	1	.	.	.	.	.
Ulmus minor	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	2	.	.	.	.	.	.	.	.
Specie compagne																																			
Ruscus aculeatus	2	3	3	.	2	4	3	1	+	3	3	3	3	+	+	+	.	+	+	4	3	1	.	+	+	+	+	2	2	+	+	.	1
Coronilla emerus	+	.	+	+	+	+	.	+	+	.	.	.	+	+	+	+	+	+	.	+	+	2	2	1	+	+	+	+	+	+	.	.	.
Juniperus oxycedrus	.	.	+	.	.	.	.	.	.	1	+	.	.	2	3	+	2	+	+	+	.	+	+	+	+	1	+	+	1	+	.	2	+
Brachypodium rupestre	+	.	+	.	.	+	.	.	+	.	+	2	.	3	3	1	2	3	2	.	+	.	.	.	+	4	1	.	.	1	.	2	.
Prunus spinosa ssp. spinosa	.	.	+	+	+	.	.	.	.	.	.	.	.	+	+	.	.	1	+	.	.	.	.	.	.	1	+	.	.	.	1	.	1

Carex cf. digitata	.	.	2	+	.	.	+	+	.	.	1	.	1	.	.	.	.	2	+	+	2	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
Osyris alba	.	.	.	.	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	+	.	+	+	1	1	.	.	.	+	1	.	.	1	.				
Cytisophyllum sessilifolium	.	.	.	.	.	.	.	.	.	+	.	.	.	2	.	+	+	.	+	.	.	1	+	+	.	.	.	.	.	.	.	+	.				
Calamintha nepeta	.	.	.	.	.	+	.	.	+	.	.	.	+	.	.	.	.	.	+	.	.	+	.	.	+	.	.	+	+	.	.	.	.				
Juniperus communis	.	.	.	+	+	+	.	+	.	.	.	.	.	.	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	+	.	2				
Clematis vitalba	.	.	.	+	+	.	.	.	+	.	.	.	+	.	.	.	.	1	.	.	.	.	.	.	+	.	.	.	.	.	.	+	.				
Ptilostemon strictus	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	+	.	+	.	.	+	.	.	.	.	.	+	+	.	.	.	+	.	+	.				
Polypodium vulgare	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	+	+	.	.	.	.	+	+	+	.	.	.	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.				
Digitalis micrantha	.	.	.	.	+	.	.	.	.	.	.	+	+	.	.	.	.	+	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	+	.				
Phillyrea latifolia	.	.	.	.	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	+	1	+	+	.	.	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.				
Lonicera caprifolium	.	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	+	.	.	.	+	.	.	.	.	.	.	.	+	.	.	.	.	.	.	+	.	.				
Asplenium trichomanes	.	.	.	.	.	.	.	.	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	+	.	+	.	.	+	.	.	+	.	.	.	.	.				
Peucedanum oreoselinum	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	+	+	.	+	.	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	+	.				
Carex flacca	.	.	.	.	+	2	.	.	.	1	.	+	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.				
Euonymus europaeus	.	.	.	+	.	.	.	.	1	.	.	.	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	+	.	.	.	.	.	.	.	.				
Alliaria petiolata	.	.	.	+	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	+				
Rosa canina	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	+	+				
Dactylis glomerata	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	+	.	.	.	.	+	.	.	.				
Glechoma hederacea	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	+	.	.	.	.	.	.	.	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.				
Sambucus nigra	.	.	2	.	.	.	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.				
Clinopodium vulgare	.	.	.	.	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	+	.				
Colutea arborescens	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	+	.				
Cornus sanguinea	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	2	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	+	.				
Ligustrum vulgare	.	.	.	.	.	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	+	.	.	.	.	.	.	.	.				
Polypodium interjectum	.	.	.	.	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.				
Pteridium aquilinum	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	+	.	.				
Pyrus communis ssp. pyraster	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	+	.	.	+	.	.	.	.	.	.	.	.				
Rubus ulmifolius	.	.	.	.	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.				
Silene alba	.	.	.	.	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	+	.				
Teucrium flavum	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	+	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.				
Glechoma hirsuta	.	.	.	.	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.				
Dorycnium hirsutum	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	+	.				

Acinos alpinus	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	+	.
Amelanchier ovalis	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
Arabis collina	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
Arum italicum ssp. italicum	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
Cymbalaria muralis	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
Digitalis ferruginea	.	.	.	.	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
Geranium purpureum Vill.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	+
Geranium robertianum	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
Laurus nobilis	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	2	.	.	.	.	.	.	.	.
Melica ciliata	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
Oenanthe pimpinelloides	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
Orobanche hederae	.	.	.	.	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
Ranunculus ficaria L.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	1
Rhamnus cathartica	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
Rhamnus fallax	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
Sedum rupestre L.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	+
Silene italica	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	+
Teucrium chamaedrys	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	+	.

6.2 Landsat 8

Il programma Landsat avviato nel 1972 consiste in una serie di satelliti per l'osservazione della Terra co-gestiti da USGS e NASA e offre la più lunga registrazione continua spaziale della Terra esistente. Il programma fornisce l'acquisizione ripetitiva di dati multispettrali ad alta risoluzione della superficie terrestre. Fornisce una risorsa unica per le persone che lavorano in agricoltura, geologia, silvicoltura, pianificazione regionale, istruzione, mappatura e ricerca sul cambiamento globale (NASA Landsat Science, 2020).

I satelliti di tipo Landsat operano su orbite circolari, poste a quote di circa 920 km nel caso di quelli di prima generazione e 705 km nel caso di quelli di seconda. Tale distinzione viene fatta per identificare i Landsat 1, 2 e 3 dai Landsat 4, 5 e 7, in quanto i due gruppi presentano caratteristiche tecniche differenti. I satelliti di prima generazione sono equipaggiati con MSS (Multispectral Scanner) dove la risoluzione spaziale consentita su ciascuna banda è di 79 metri, mentre i satelliti di seconda generazione dispongono di un sensore TM (Thematic Mapper) che consente una risoluzione spaziale di 30 metri (Young, et al., 2017).

Dal 2013 è operativo il Landsat 8 che orbita attorno alla Terra in un'orbita sincrona al sole, quasi polare, ad un'altitudine di 705 km. Il Landsat 8 ha un tempo di rivisitazione di 16 giorni, e acquisisce regolarmente 725 scene al giorno (mentre il Landsat 7 ne acquisisce 438), aumentando così la probabilità di acquisire scene senza nuvole (NASA Landsat Science, 2020).

Gli strumenti Landsat 8 rappresentano un progresso evolutivo nella tecnologia. Il sensore OLI montato a bordo del satellite acquisisce infatti i dati con una migliore precisione radiometrica su una gamma dinamica di 12 bit. Ciò si traduce in 4096 potenziali livelli di grigio, rispetto ai soli 256 livelli di grigio negli strumenti Landsat 1-7 a 8 bit. Il miglioramento delle prestazioni consente una migliore caratterizzazione delle condizioni della copertura del suolo. Il sensore OLI è in grado di raccogliere i dati per le bande spettrali del visibile, del vicino infrarosso e dell'infrarosso a onde corte, nonché per una banda pancromatica. L'OLI raccoglie inoltre i dati per due nuove bande, una banda costiera / aerosol (banda 1) e una banda cirri (banda 9). Pochi strumenti spaziali sono in grado di raccogliere questa parte dello spettro, perché l'atmosfera lo assorbe quasi completamente. TIRS raccoglie invece dati per due bande spettrali più strette nella regione termica precedentemente coperta da un'ampia banda spettrale sui Landsats 4-7 (NASA Landsat Science, 2020). Nell'immagine 6-1 si confrontano le bande

spettrali OLI e TIRS con le bande ETM + del Landsat 7 mentre nella tabella 6-1 vengono messe a confronto le risoluzioni spaziali delle diverse bande.

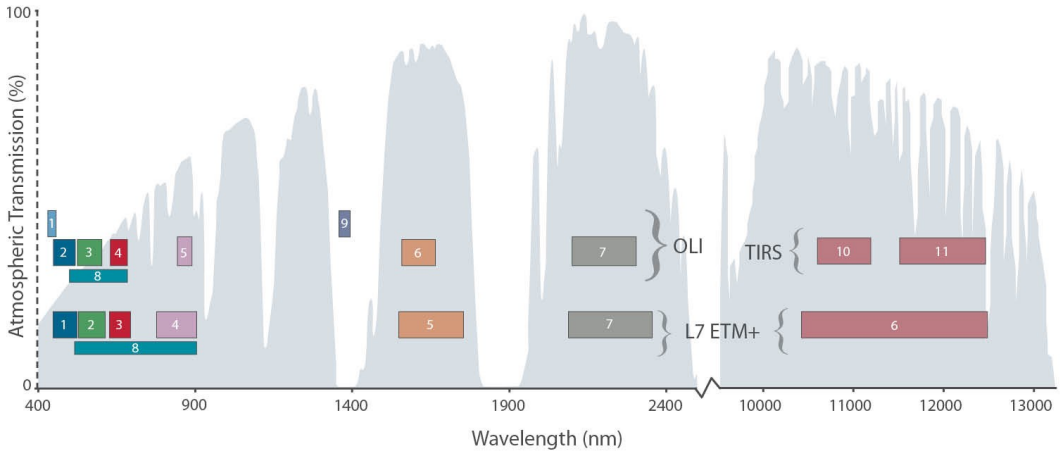


Figura 6-1: confronto delle bande spettrali investigate da Landsat 7 (ETM+) e Landsat 8 (OLI; TIRS). Il sensore OLI raccoglie dati anche nella banda 1, usata per la discriminazione di acque poco profonde e per il tracciamento di particelle fini, e nella banda 9, che copre una fetta molto sottile di lunghezze d'onda (solo 1370 ± 10 nanometri), e viene usata per la discriminazione dei cirri. Il sensore TIRS trasporta due bande termiche infrarosse aggiuntive (NASA Landsat Science, 2020).

Tabella 6-2: Risoluzioni spaziali Landsat 7 ETM+ e Landsat 8 OLI e TIRS

Landsat 7 ETM+				**Landsat 8 OLI**			
bande	*Regione spettrale*	*Lunghezza d'onda*	*Risoluzione (m)*	*bande*	*Regione spettrale*	*Lunghezza d'onda*	*Risoluzione (m)*
				1	Coastal aerosol	0.433-0.453	30
1	Blue	0.441-0.514	30	2	Blue	0.450-0.515	30
2	Green	0.519-0.601	30	3	Green	0.525-0.600	30
3	Red	0.631-0.692	30	4	Red	0.630-0.680	30
4	NIR	0.772-0.898	30	5	NIR	0.845-0.885	30
5	SWIR	1.547-1.749	30	6	SWIR	1.560-1.660	30
6	TIR	10.31-12.36	60	7	SWIR	2.100-2.300	30
7	SWIR	2.064-2.345	30	8	PAN	0.500-0.680	15
8	PAN	0.515-0.896	15	9	Cirrus	1.360-1.390	30
				10	TIR	10.60-11.20	100
				11	TIR	11.50-12.50	100

6.3 Sentinel-2

Sentinel-2, lanciato nell'ambito del programma Copernicus della Commissione europea il 23 giugno 2015, è stato progettato specificamente per fornire una vasta gamma di dati e immagini. Per garantire una disponibilità continuativa di immagini, è costituito da due satelliti identici, Sentinel-2A e Sentinel-2B, lanciati in orbita rispettivamente il 23 giugno 2015 e il 7 marzo 2017. I due satelliti operano sulla medesima orbita inclinata di 98.62° (rispetto all'equatore), eliosincrona, in modo da minimizzare l'impatto delle ombre sul terreno, ad una elevazione media di 786 km e sfasati di 180°. Questo permette un dimezzamento dei tempi di rivisitazione che sono di 5 giorni all'equatore e di 2-3 giorni alle medie latitudini (European Space Agency, 2015). Il sensore multispettrale (MSI) montato sui satelliti Sentinel-2, grazie alla sua capacità di acquisire le immagini su ben 13 bande, è in grado di determinare molti parametri relativi non solo allo stato della vegetazione, ma anche a quello delle acque costiere, dei laghi, dei corsi d'acqua e dell'atmosfera. La Banda 5 (705 nm), la Banda 6 (740 nm), la Banda 7 (783 nm), la Banda 8A (865 nm), la Banda 11 (1610 nm) e la Banda 12 (2190 nm) possono essere utilizzate ad esempio per rilevare indici relativi al contenuto d'acqua della vegetazione o altri indici particolarmente utili per la gestione delle risorse agricole e forestali. La Banda 1 (443 nm), la Banda 9 (940 nm) e la Banda 10 (1375 nm) si concentrano invece sullo screening delle nuvole e sulla correzione atmosferica (~ 443nm per gli aerosol e ~ 945nm per il vapore acqueo) e sul rilevamento dei cirri (~ 1374nm). Grazie ai dati acquisibili, il programma Sentinel-2 risulta essere quindi di supporto in una vasta gamma di aree tematiche (European Space Agency, 2015).

6.3.1. Aree tematiche Sentinel-2

Sentinel-2 si inserisce all'interno dell'iniziativa Copernicus, un programma di osservazione della Terra guidato dalla Commissione europea (CE) in collaborazione con l'Agenzia spaziale europea (ESA). Copernicus fornisce un sistema unificato attraverso il quale grandi quantità di dati vengono immesse in una serie di servizi di informazione tematica progettati per favorire l'ambiente. Questi servizi rientrano in sei categorie principali: gestione del territorio, ambiente marino, atmosfera, risposta alle emergenze, sicurezza e cambiamenti climatici. (Guerrucci & Huck, s.d.)

Le immagini satellitari rappresentano l'input per la creazione di molti prodotti a supporto di servizi di informazione e di monitoraggio del territorio, come mappe di copertura del suolo o mappe del cambiamento di uso del suolo. Tali immagini possono rappresentare poi la base

per la valutazione di importanti parametri biofisici quali l'Indice di Area Fogliare (LAI), il Contenuto di Clorofilla Fogliare (LCC) e la Copertura Fogliare (LC).

Le bande di risoluzione spaziale di 10 m di Sentinel-2 e l'alto tempo di visita della missione permettono inoltre la rapida acquisizione e consegna di immagini a supporto delle attività di soccorso in caso di calamità. Ciò include la mappatura delle aree urbane, compresi edifici a rischio e strutture, che sono stati precedentemente identificati come a rischio di pericoli naturali come terremoti, incendi e inondazioni (European Space Agency, 2015).

6.3.2. Prodotti disponibili

Sentinel-2 fornisce agli utenti un'ampia gamma di prodotti che si differenziano per il livello di pre-processamento subìto. Le immagini di Livello-1B sono i prodotti di livello più basso disponibili per gli utenti. Hanno subìto solo una correzione radiometrica e forniscono unicamente i valori di radianza Top Of Atmosphere (TOA). L'utilizzo di questi prodotti richiede dunque una conoscenza avanzata delle tecniche di ortorettifica.

I prodotti di Livello-1C, oltre ad una correzione radiometrica, sono sottoposti anche a una correzione geometrica che include i processi di georeferenziazione (allineamento delle immagini alla corretta posizione geografica) e i processi di ortorettifica (correzione degli effetti dovuti alla direzione visuale), necessari per garantire l'esatto posizionamento delle immagini. Queste forniscono valori di riflettanza Top Of Atmosphere (TOA).

Le immagini di Livello-2A derivano invece dalla correzione atmosferica e topografica dei relativi prodotti di Livello-1C ortorettificati, e forniscono valori di riflettanza Bottom of Atmosfhere (BOA). (Huck, s.d.)

7 BIBLIOGRAFIA

Biondi, E. et al., 2009. *Carte fitosociologiche.* [Online] Available at: http://www.ambiente.marche.it/Portals/0/Ambiente/Natura/ReteNatura2000/CARTE_FITO_HABITAT/Ancona/SIC_GOLA%20DI%20FRASASSI/FITO_IT5320003.pdf [Consultato il giorno 26 Settembre 2020].

Bivand, R., Keitt, T. & Rowlingson, B., 2019. *rgdal: Bindings for the 'Geospatial' Data Abstraction Library, R package version 1.4-8.* [Online] Available at: https://CRAN.R-project.org/package=rgdal [Consultato il giorno 26 Settembre 2020].

Braun-Blanquet, J., Conrad, H. S. & Fuller, G. D., 1932. *Plant sociology; the study of plant communities.* 1st ed. a cura di s.l.:New York and London,McGraw-Hill book company, inc.,1932..

Casavecchia, S. et al., 2020. Vegetation Maps. *Conservation and Managementof Biodiversity and Landscapes:A Challenge in the Era of Global Change,* pp. 489-490.

Congalton, R., 2001. Accuracy assessment and validation of remotely sensed and other spatial information. *International journal of wildland fire,* Volume 10, pp. 321-328.

Corbane, C. et al., 2015. Remote sensing for mapping natural habitats and their conservation status - New opportunities and challenges. *Intenational Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation,* Volume 37, pp. 7-16.

Costanzi, V., Pesaresi, S. & Casavecchia, S., 2018. *Mappatura della vegetazione e degli habitat della ZSC "IT5320003-Gola di frasassi basata sulla fenologia telerilevata,* s.l.: s.n.

Daughtry, C. et al., 2000. Estimating Corn Leaf Chlorophyll Concentration from Leaf and Canopy Reflectance. *Remote Sensing of Environment,* Volume 74, pp. 229-239.

European Space Agency, 2015. *Sentinel-2 User Handbook.* [Online] Available at: https://sentinel.esa.int/web/sentinel/user-guides [Consultato il giorno 26 Settembre 2020].

European Space Agency, 2020. *STEP-Scientific Toolbox Exploitation Platform.* [Online] Available at: http://step.esa.int/main/third-party-plugins-2/sen2cor/ [Consultato il giorno 26 Settembre 2020].

ForWarn II, 2017. *Detecting Change.* [Online] Available at: https://forwarn.forestthreats.org/overview/detecting-change [Consultato il giorno 26 Settembre 2020].

Gitelson, A. A. & Merzlyak, M. N., 1998. Remote sensing of chlorophyll concentration in higher plant leaves.. *Advances in Space Research,* Volume 22, p. 689–692..

Grolemund, G. & Wickham, H., 2011. *Dates and Times Made Easy.* [Online] Available at: http://www.jstatsoft.org/v40/i03/ [Consultato il giorno 26 Settembre 2020].

Guerrucci, D. & Huck, A., s.d. *European Space Agency.* [Online] Available at: http://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/Copernicus/Overview3 [Consultato il giorno 26 Settembre 2020].

Harris Geospatial, 2020. *Broadband Greenness.* [Online] Available at: https://www.harrisgeospatial.com/docs/BroadbandGreenness.html#Green3 [Consultato il giorno 26 Settembre 2020].

Hijmans, R. J., 2020. *raster: Geographic Data Analysis and Modeling, R package version 3.0-12.*. [Online] Available at: https://CRAN.R-project.org/package=raster [Consultato il giorno 26 Settembre 2020].

Hiphen, 2019. *Vegetation Indices for Chlorophyll | CI – MTCI – NDRE – ND705 – ND550 – mNDblue.* [Online] Available at: https://www.hiphen-plant.com/blog/vegetation-indices-2/ [Consultato il giorno 26 Settembre 2020].

Huck, A., s.d. *European Space Agency Sentinel-2 Data products.* [Online] Available at: http://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/Copernicus/Sentinel-2/Data_products [Consultato il giorno 26 Settembre 2020].

Hurley, M. A. et al., 2014. Functional analysis of Normalized Difference Vegetation Index curves reveals overwinter mule deer survival is driven by both spring and autumn phenology. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences,* 369(1643).

Ichter, J. et al., 2014. *Terrestrial habitat mapping in Europe: an overview.* s.l.:s.n.

IPLA, 2001. *I tipi forestali delle Marche.* Ancona: Regione Marche.

Leutner, B., Horning, N. & Schwalb-Willmann, j., 2019. *RStoolbox: Tools for Remote Sensing Data Analysis.* [Online] Available at: https://rdrr.io/cran/RStoolbox/man/cloudMask.html [Consultato il giorno 26 Settembre 2020].

Leutner, B., Horning, N. & Schwalb-Willmann, J., 2019. *RStoolbox: Tools for Remote Sensing Data Analysis. R package version.* [Online] Available at: https://CRAN.R-project.org/package=RStoolbox [Consultato il giorno 26 Settembre 2020].

NASA Landsat Science, 2020. *Landsat 8 bande.* [Online] Available at: https://landsat.gsfc.nasa.gov/landsat-8/landsat-8-bands/ [Consultato il giorno 26 Settembre 2020].

NASA Landsat Science, 2020. *Panoramica di Landsat 8.* [Online] Available at: https://landsat.gsfc.nasa.gov/landsat-8/mission-details/ [Consultato il giorno 26 Settembre 2020].

Pedrotti, F., 2014. Chapter 2: History of vegetation mapping in Europe. In: *Terrestrial habitat mapping in Europe: an overview. EEA Technical report.* Luxembourg: European Environment Agency, pp. 15-21.

Pesaresi, S., Biondi, E. & Casavecchia, S., 2017. Bioclimates of Italy. *Journal of Maps,* 13(2), pp. 955-960.

Pesaresi, S., Mancini, A. & Casavecchia, S., 2020b. Recognition and Characterization of Forest Plant Communities through Remote-Sensing NDVI Time Series.. *Diversity,* Volume 12, p. 313.

Pesaresi, S., Mancini, A., Quattrini, G. & Casavecchia, S., 2020a. Mapping Mediterranean Forest Plant Associations and Habitats with Functional Principal Component Analysis Using Landsat 8 NDVI Time Series. *Remote sensing,* 12(7), p. 1132.

Podani, J., 2007. *Analisi ed esplorazione multivariata dei dati in ecologia e biologia.* s.l.:Liguori Editore Srl.

Poncet, L., Evans, D. & Richard, D., 2014. *Terrestrial habitat mapping in Europe - an overview.* s.l.:European Environment Agency.

Qi, J. et al., 1994. A Modified Soil Adjusted Vegetation Index. *Remote Sensing of Environment,* Volume 48, pp. 119-126.

Quattrini, G., Pesaresi, S. & Casavecchia, S., 2017. *Classificazione e mappatura delle serie temporali NDVI di alcune comunità forestali del Monte Conero,* Ancona: s.n.

R Development Core Team, 2013. *R: A language and environment for statistical,* Vienna: R Foundation for Statistical Computing.

Ranghetti, L. & Busetto, L., 2020. *Sen2r: Find, Download and Process Sentinel-2 Data. R package version 1.3.2..* [Online] Available at: http://sen2r.ranghetti.info [Consultato il giorno 26 Settembre 2020].

Rodwell, J. et al., 2014. Chapter 3: Classification systems as tools for vegetation and habitat mapping. *Terrestrial habitat mapping in Europe: an overview (Joint MNHN-EEA report),* pp. 22-36.

Sims, D. & Gamon, J., 2002. Relationships Between Leaf Pigment Content and Spectral Reflectance Across a Wide Range of Species, Leaf Structures and Developmental Stages. *Remote Sensing of Environment,* Volume 81, pp. 337-354.

Sundaresan, A., Varshney, P. & Arora, M., 2007. Robustness of Change Detection Algorithms in the Presence of Registration Errors. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing,* Volume 73, pp. 375-383.

Wickham, H., 2007. *Reshaping Data with the {reshape} Package, Journal of Statistical Software.* [Online] Available at: http://www.jstatsoft.org/v21/i12/ [Consultato il giorno 26 Settembre 2020].

Wickham, H., 2016. *ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis.* [Online] Available at: https://ggplot2.tidyverse.org [Consultato il giorno 26 Settembre 2020].

Wood, S., 2016. Smoothing parameter and model selection for general smooth models. *Journal of the American Statistical Association,* Issue 111, pp. 1548-1575.

Xue, J. & Su, B., 2017. Significant Remote Sensing Vegetation Indices: A Review of Developments and Applications. *Journal of Sensors.*

Young, N. E. et al., 2017. A survival guide to Landsat preprocessing. *Ecology, ecological society of America,* 98(4), pp. 920-932.